

液氦暗物质实验的低本底测量

王宏伟

中科院上海应用物理研究所

SINAP

wanghw@sinap.ac.cn

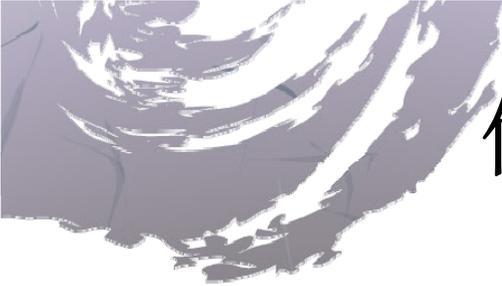
2010-3-19

973暗物质的理论研究及实验预研



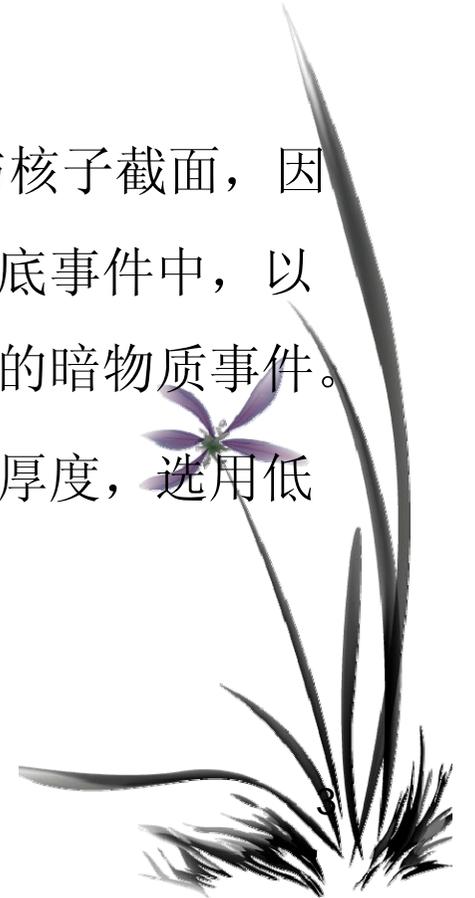
内容

- (1) 低本底Gamma测量
- (2) 低本底中子探测器研制
- (3) 低本底宇宙射线探测器研制



低本底条件对暗物质测量的重要性

- 直接探测暗物质的最好办法是观察由大质量弱相互作用粒子WIMPs 和原子核之间弱相互作用而引起的核反冲。因为我们知道暗物质的平均速度和大致质量，核反冲的动能估计在几个到几十个千电子伏特（keV）之间，这样的能量是应该可以观察到的。
- 未来的暗物质实验测量计划达到 $10^{-9} \sim 10^{-10}$ pb 的WIMP与核子截面，因此需要非常低的环境本底和探测灵敏度，以便于从各种本底事件中，以及至少吨级靶物质所能达到的足够计数率中，鉴别出真实的暗物质事件。
- 实验测量地下实验室的中子，宇宙射线强度，确定屏蔽体厚度，选用低本底的实验材料是成功测量的关键之一。

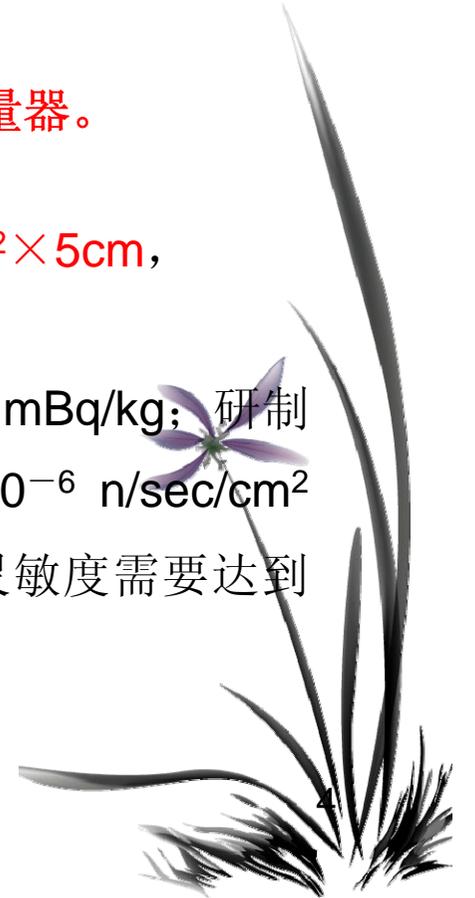




测量的目标

- 测量地下实验室的所有本底辐射，研究这些本底辐射对测量的影响。因此我们需要分别研制用来测量穿透能力比较强的gamma，中子和宇宙射线的探测器系统各一套，以检测地下实验室中的本底辐射的大小。
- (1) Gamma射线探测器。选用宽能低本底的**HpGe**探测器，改造屏蔽系统。
- (2) 中子探测器：采用基于**He³**+高密度聚乙烯材料的中子测量器。
- (3) 宇宙射线探测器：大面积塑料闪烁体探测器，尺寸为 $2\text{m}^2 \times 5\text{cm}$ ，

我们探测器研制的目标是gamma探测器的测量精度达到 $< 0.01 \text{ mBq/kg}$ ；研制的中子探测器能达到对地下实验室中从岩石等材料出来的大约 $10^{-6} \text{ n/sec/cm}^2$ 的中子进行测量和长期监测；而研制的宇宙射线检测装置的灵敏度需要达到 $10^{-10} \mu\text{/sec/cm}^2$ （2500米深的地下宇宙线在这个数量级）。

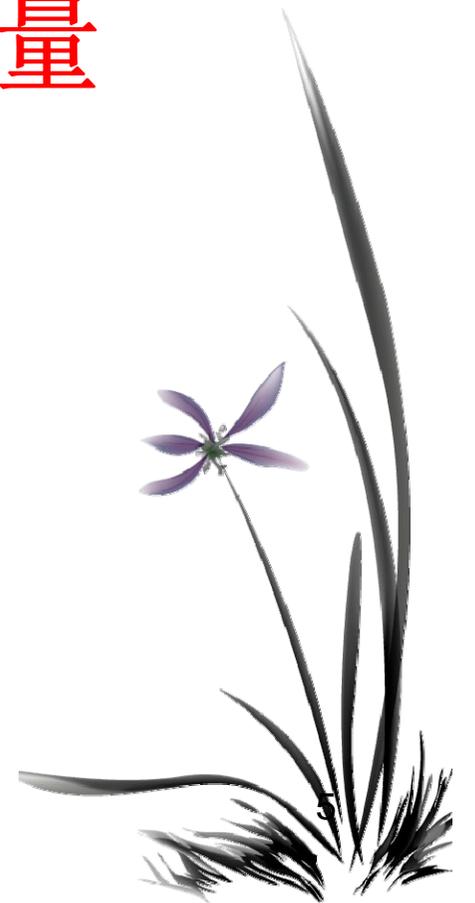




(1) 低本底Gamma测量

2010-3-19

973暗物质的理论研究及实验预研





Gran Sasso

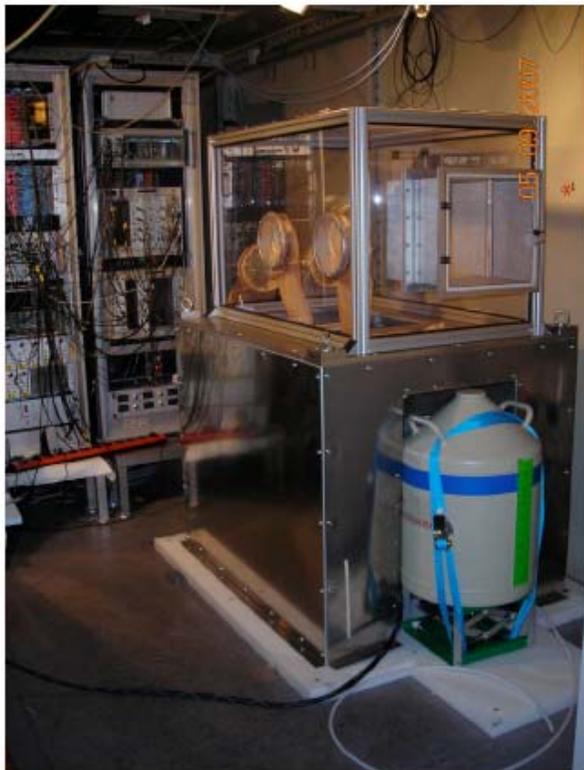
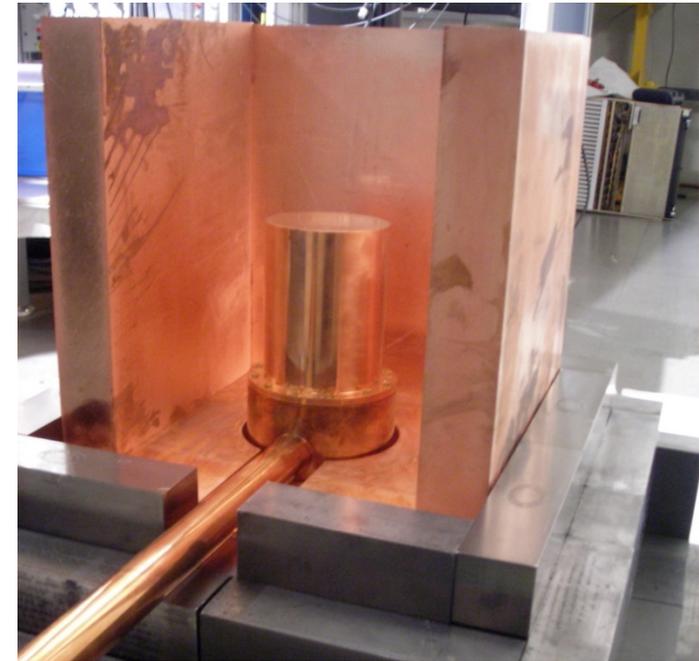


Fig. 3. Picture of the new passive shield structure of Gator, installed at Gran S. Laboratories

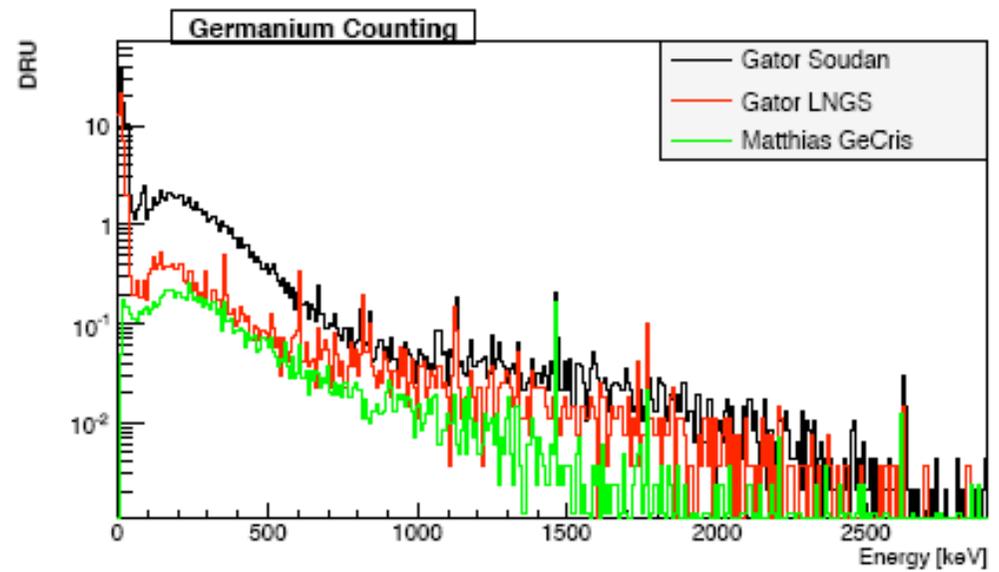


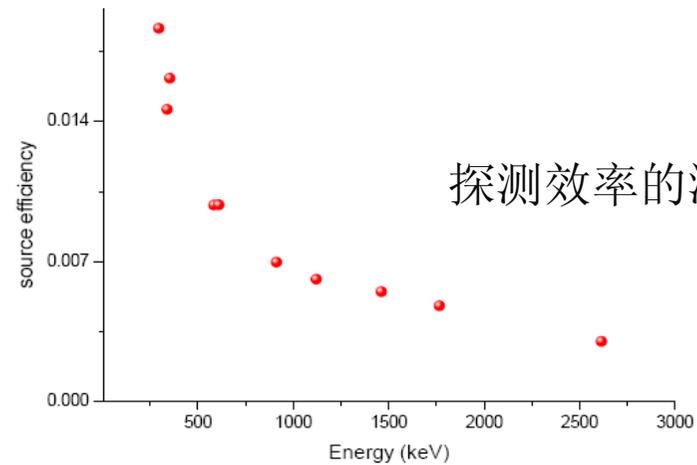
Fig. 1. Background spectra of Gator at Soudan (black), of Gator at Gran Sasso (red) and of a high purity germanium detector at Gran Sasso screening facility.

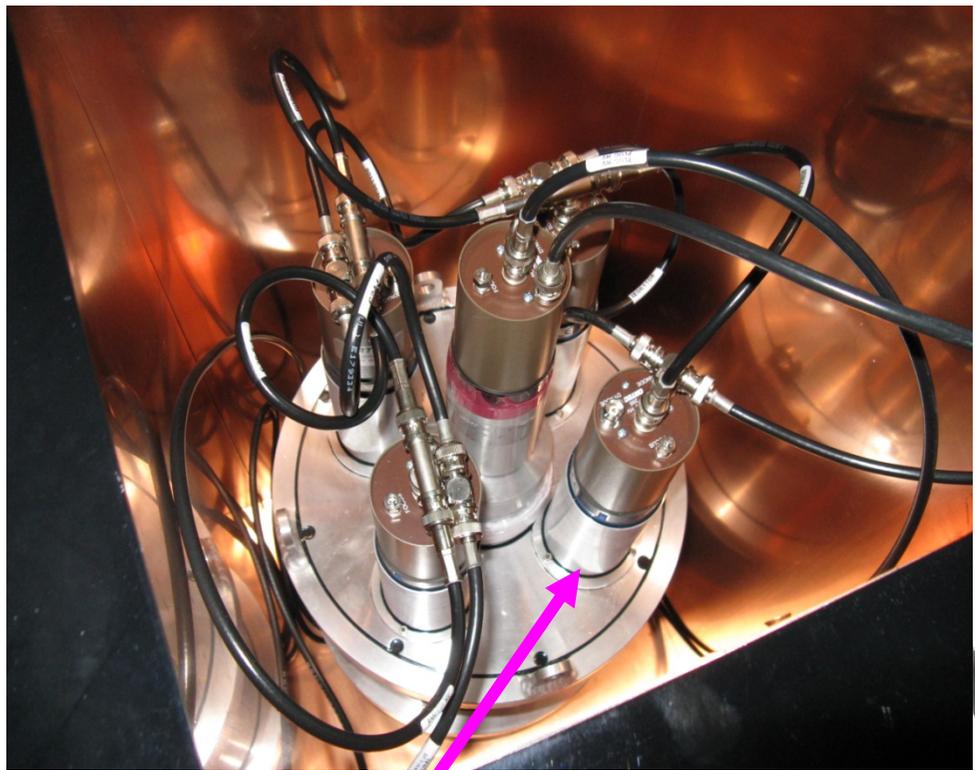
锦屏山岩石放射性测量结果-2009



CANBERRA 低本底Gamma测量装置，本底水平在1cps。

Nuclid	Energy/keV	Specific Activity (Bq/kg)
²³⁵ U	143.3	0.098
²³⁵ U	185.7	1.295
²¹⁴ Pb	295.2	15.103
²²⁸ Ac	338.5	0.615
²¹⁴ Pb	352.1	15.043
²⁰⁸ Tl	583.1	0.042
²¹⁴ Bi	609.4	14.427
²³⁸ Ac	911.1	
²¹⁴ Bi	1120.4	15.922
⁴⁰ K	1460.8	
²¹⁴ Bi	1764.7	14.805
²⁰⁸ Tl	2614.7	0.938



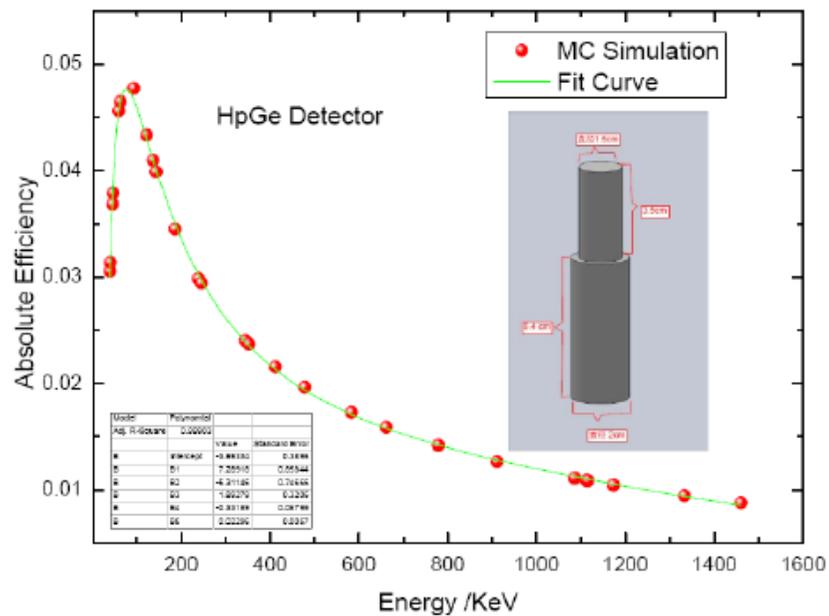


SINAP 辐射防护室新购置的低本底Gamma测量装置（ORTEC GMX60），带NaI反康装置，本底水平在0.35cps.

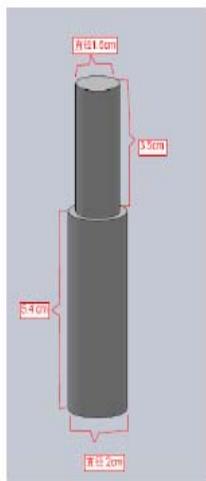
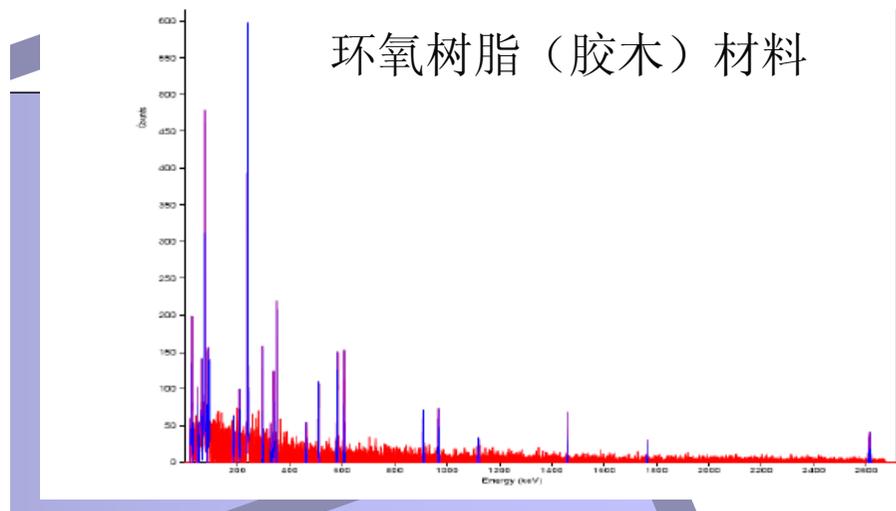
2010-3-19

973暗物质的理论研究及实验预研





下图给出的是扣除本底以后样品的 Gamma 谱:



能量 /keV	元素符号 Element	净计数 Counts	放射性活度 Bq	放射性比活度 Bq/Kg
185.62	²³⁵ U	104±30	0.03	0.826
209.04	²²⁸ Ac	222±30	0.93	24.793
238.64	²¹² Pb	2403±71	1.16	31.956
295.03	²¹⁴ Pb	873±36	1.06	29.201
338.30	²²⁸ Ac	326±27	0.69	19.008
351.90	²¹⁴ Pb	889±32	0.63	17.355
462.72	²²⁸ Ac	205±20	1.36	37.466
510.17	²⁰⁸ Tl	404±27	0.59	16.253
583.15	²⁰⁸ Tl	561±44	0.23	6.336
609.00	²¹⁴ Bi	493±32	0.39	10.744
910.71	²²⁸ Ac	437±25	0.74	20.386
967.95	²²⁸ Ac	175±30	0.51	13.774
1120.20	²¹⁴ Bi	149±21	0.57	15.703
1459.88	⁴⁰ K	191±23	1.26	34.711
1763.99	²¹⁴ Bi	45±24	0.24	6.612
2612.96	²⁰⁸ Tl	260±25	0.55	15.152



我们现有的地面低本底**Gamma**测量装置只能达到**100mB/Kg**的测量精度，为了能够达到**0.01mBq/Kg**的测量要求：

- 宽能低本底的**HpGe**探测器
- 超低本底铅室，屏蔽材料
- 合适的地下实验室深度

最终在地下实验室里达到**mBq/kg**的低本底要求

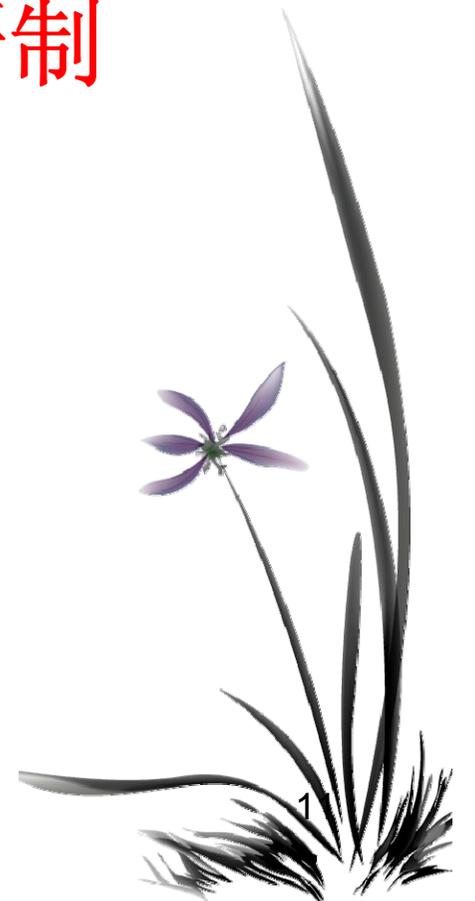




(2) 低本底中子探测器研制

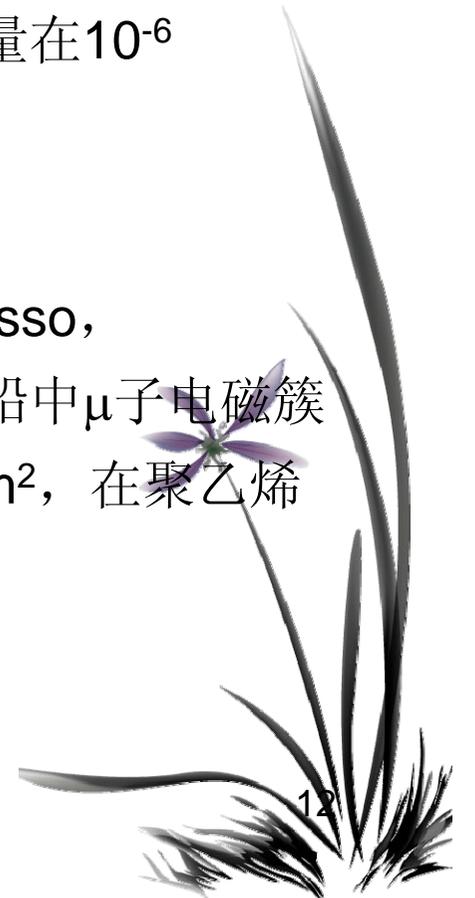
2010-3-19

973暗物质的理论研究及实验预研





- 地下实验室的主要中子来源和能谱:
-
- (1) U, Th衰变链 (α , n) 反应产生的, 能量在10MeV以下。地下实验室的U/Th含量在60/130ppb的水平, 中子产生率在 10^{-8} n/cm³/s, 平均能量在1-2MeV, 因此岩石实验室环境下的中子通量在 10^{-6} n/cm²/s(>10keV)
- (2) 宇宙射线 (主要是 μ 子) 产生的中子, 在Gran Sasso, 3700mwe的地下, μ 子的通量为 12 μ /m²/day, 因此在铅中 μ 子电磁簇射, 强子簇射和直接裂变产生的中子在 4×10^{-3} n/ μ /g/cm², 在聚乙烯中为 0.23×10^{-3} n/ μ /g/cm²。



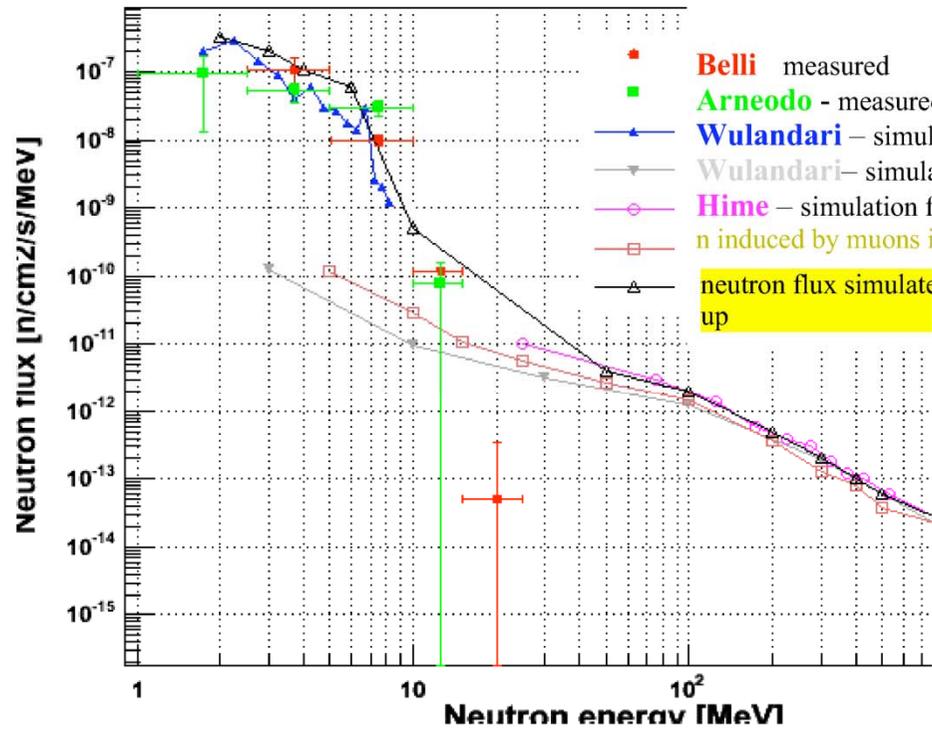


Figure 5: Existing Measurements and Simulation of External Neutron Flux.

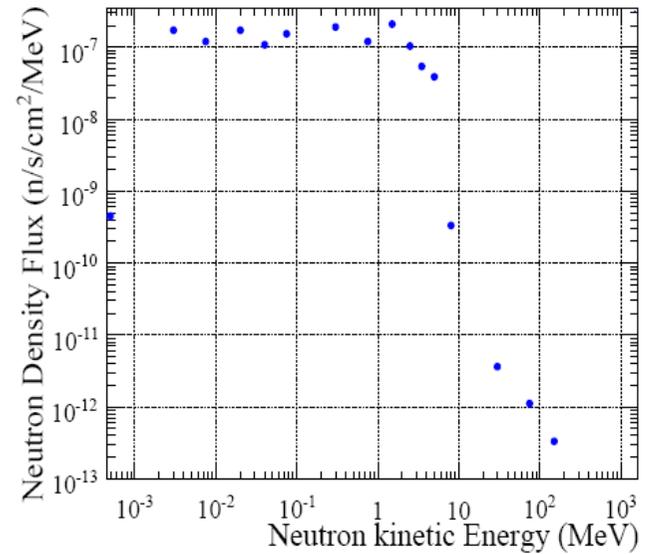


Figure 6: External Neutron Source simulated within FLUKA.

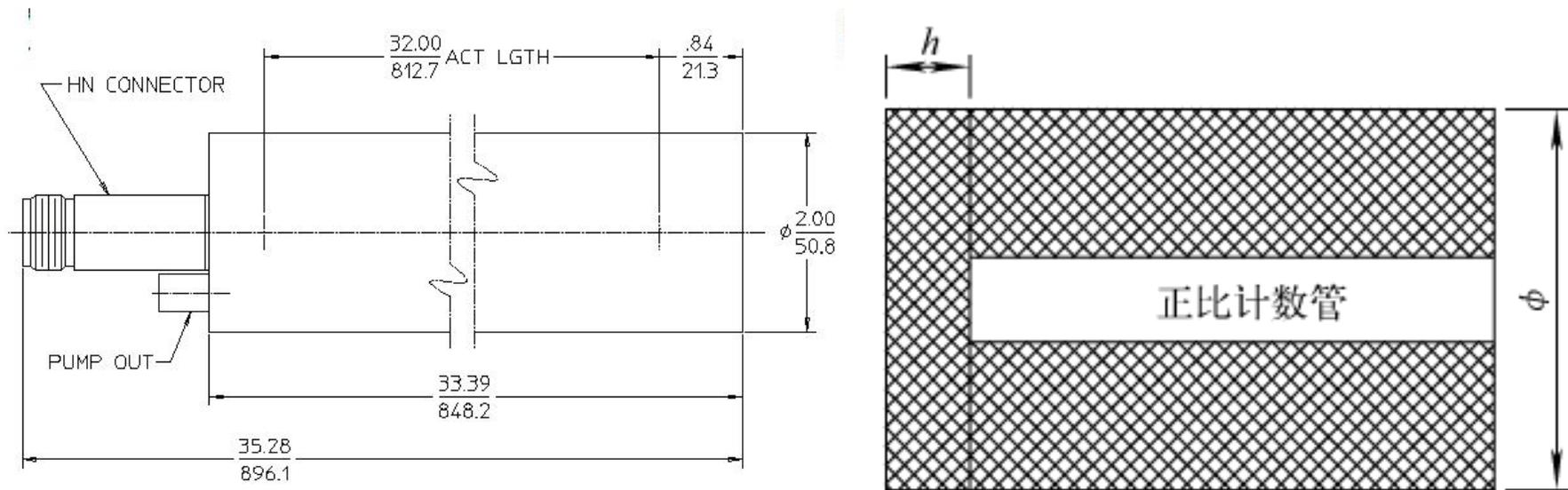
因此总的中子通量在 $(3.7 \pm 0.2) \times 10^{-6} \text{ n/cm}^2/\text{s}$
 能量主要在0-10MeV之间。



中子测量: $n + {}^3\text{He} \rightarrow p + T + 0.764\text{MeV}$ (热中子截面5333b)

为了减小器壁效应:

- (1) ${}^3\text{He}$ 正比计数管的直径尽可能大, 使中子俘获反应产生地点远离管壁 ($\phi 50\text{mm}$)
- (2) 同时增大 ${}^3\text{He}$ 气的充气压, 以便减小产物的几何射程。 (3-4atm)
- (3) 选用不锈钢外壳, 因为铝制外壳多少具有一些 α 活性。 (不锈钢外壳)



为了测量快中子, 需要外加聚乙烯慢化体

- (1) 采用大型中子正比计数管：~ ϕ 50mm×100cm
- (2) 外包聚乙烯慢化体，无吸收体（即含硼材料），称为非雷姆结构。
- (3) 聚乙烯慢化体厚度在4.5cm-7.5cm之内，才能达到注量率灵敏度与中子能量无关的特性。以实现中子注量率灵敏度在0.025ev~16MeV之间的平坦响应。具体的厚度通过MCNP的模拟计算后确定。

基于以上考虑以及资金限制，我们选择的³He正比计数管中子探测器参数：

LND-25384，灵敏度：563cps/nv

估计：

在地下实验室 10^{-7} neutron/cm²/s通量下³He正比管的计数率约为 4~5 counts/day

Founded 1964



Rm.711-712 yuquan Plaza Yuquan Rd.Shijingshan Dst.Beijing 100049

E-mail:sales@wahenyida.com Web site:www.wahenyida.com
Tel:86-010-88258670 Fax:86-010-88258190

Designers & Manufacturers of Nuclear Radiation Detectors

25384 Cylindrical He3 Neutron Detector

GENERAL SPECIFICATIONS

Gas pressure (torr)	2280
Cathode material	Stainless Steel
Maximum length (inch/mm)	35.28/896.1
Effective length (inch/mm)	32.00/812.7
Maximum diameter (inch/mm)	2.0/50.8
Effective diameter (inch/mm)	1.96/49.78
Connector	HN
Effective volume (cm ³)	1581
Operating temperature range °C	-50 to +100

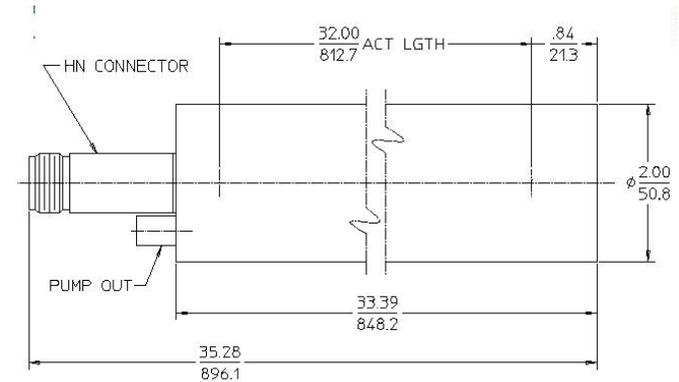
0.30397MPa=3atm

ELECTRICAL SPECIFICATIONS

Recommended operating voltage (volts)	1000
Operating voltage range (volts)	900 - 1150
Maximum plateau slope (% / 100 volts)	3
Maximum resolution (% fwhm)	6
Tube capacitance (pf)	8.5
Weight (grams)	665

THERMAL NEUTRON SENSITIVITY

Sensitivity (cps / nv)	563
------------------------	-----



Neutron Detector MC Simulation(MCNP)

探测效率定义为： $\eta = \text{正比管测量到的中子数} / \text{入射到正比管表面的中子数}$

^3He 管的参数取自 **LND 25384**

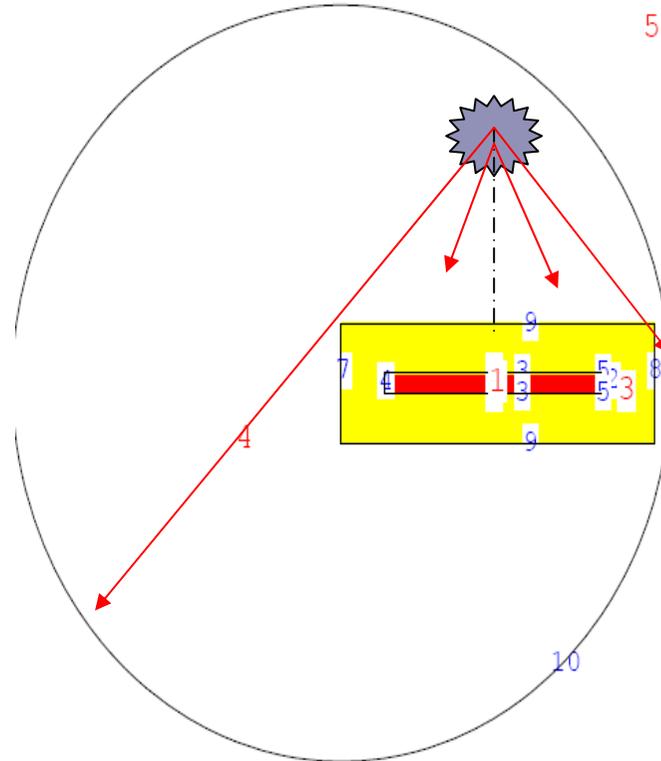
```

c Created on: He3 for LND Tube: Moderator Sim
c Cell card
1 1 -0.0003745 1 -2 -3 $ He3 gas at 2280Torr by LISE Cal
2 2 -7.86 (4 -5 -6)#1 $ shell of He3 tube
3 3 -0.92 (7 -8 -9)#2#1 $ Polyethylene CH2
4 4 -0.001204 -10#3#2#1 $ outside of CH2 with Air
5 0 10 $ outside of World

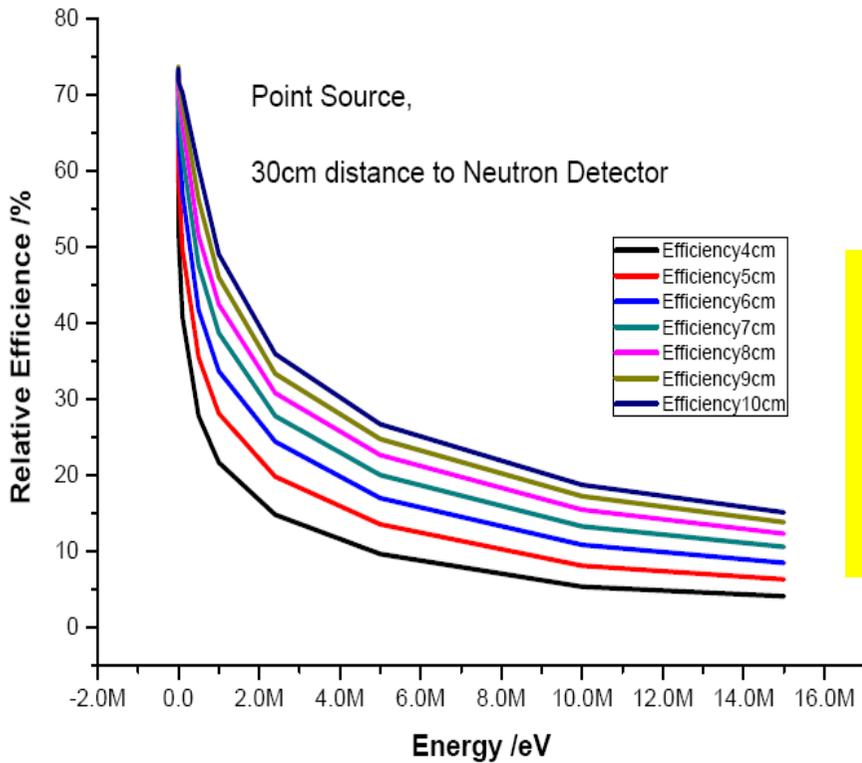
1 pp 5.05 $ Length#1.07
2 pp 86.32 $ Length#1.07
3 cy 2.489 $ He3 4.978 cm diameter
4 pp 5.00 $
5 pp 86.37 $
6 cy 2.539 $ 0.5mm tube thickness
7 pp 0.0 $
8 pp 91.37 $
9 cy 7.539 $ 5,6,7....15cm moderator
10 so 100.0 $

modc n
m1 2003. 1 $ He3
m2 26000 0.680268 $ Fe Stainless steel 304
 24000 0.002087 $ Cr rhom7.92 g/cc
 28000 0.089514 $ Ni
 35055.86e 0.020133 $ Mn
m3 1001.50e 0.6667 6000.60e 0.3333 $ CH2 Polyethylene
m4 7014.50e -0.7571
 8016.50e -0.2305
 18000 -0.0124 $ Air

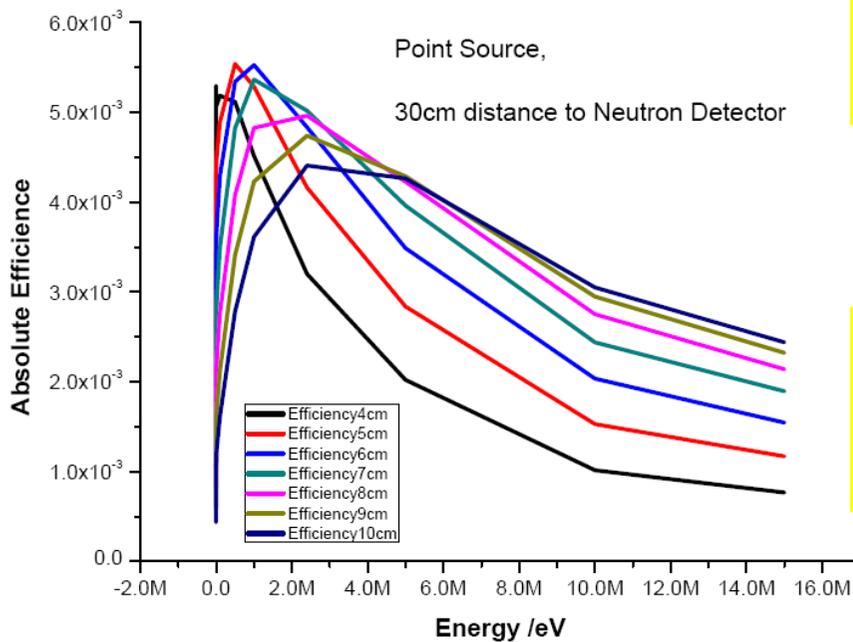
imp:n 1 1 1 0
sdef ergs=10.0 45.685 0 vecl=0 0 dir=20 $ 30.0cm
sil 1 2.400 2.425 $ d-d neutron source energy MeV
spl D 0.999 0.001 $ weighting
si2 -1 0.5246 1 $ histogram for count bin limits,30.37
Degree
sp0 0 0.7623 0.2377 $ frac. solid angle for each bin
sb2 0.0 0.0 1.0 $ source bias for each bin
C dxms $ discrete reaction neutron cross
section card
fill:3
fa11 -1 -2 $
c11 0 1
f01:n 1
fa21 -3
c01 0 1
f01:n 2
fa31 -3
c01 0 1
f4:n 1 $ cell card 1 [counts/cm^2]
sd4 1 $ Unit: Atoms/cm^3 * Volume (cm^3) atoms
sm4 (-1 1 103) $ m1 103(n,p), Integral
nps 1e6
ctmc 20
    
```



圆柱形聚乙烯慢化体



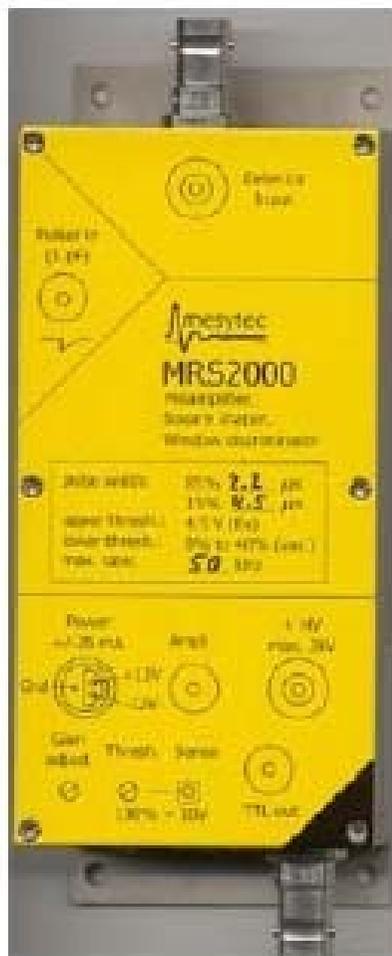
从计算可以得到：在0.025- 10KeV 能量区间，中子探测装置的探测效率为72%-50%，此后随着能量的增加逐渐降低到10MeV的20%左右，并且随着慢化层厚度的增加相对探测效率也在增加。



从图中可以看到：最大的绝对探测效率在1MeV左右出现，在聚乙烯厚度为6-7cm时的绝对效率为 5.5×10^{-3} 。

因此，根据我们的计算以及参考文献数据：我们使用**6.5cm**的聚乙烯作为最终的 ^3He 正比计数管的慢化层厚度。

The mesytec MRS2000 is a preamplifier, shaper, window discriminator with amplitude- and TTL output. It is designed for neutron detector tubes and monitor counters. Due to the square shaper, the amplitude resolution is significantly enhanced compared to standard amplifiers.



Types available:

Type 1: (very fast counting)

for detectors with fast signal risetime ($t < 0.8\mu\text{s}$), max countrate: 150kHz
typical detectors: fast counting devices, monitors.

Type 2: (standard)

for detectors with signal risetime ($t < 2.5\mu\text{s}$), max countrate: 50kHz
typical detectors: standard 1 inch diameter tubes.

Type 5: (highest gamma suppression)

for detectors with slow signal risetime ($t < 7\mu\text{s}$), max countrate: 20kHz
typical detectors: 2 inch diameter tubes.
typical applications: very high amplitude resolution and gamma suppression.

Type 3: was developed for special tubes with very slow signal risetime, max Countrate: 10kHz

In this case, it depends on the expected count rates: below 10 kHz, the type 3 seems to be an optimum, above one should chose the type 2.

慢化体材料的考虑



上海厚德橡塑材料有限公司

SHANGHAI HOUDE RUBBER&PLASTIC MATERIALS CO., LTD.

首页 | 关于厚德 | 产品与服务 | 公司新闻 | 合作与投资 | 人力资源 | 联系我们

产品与服务

产品与服务

超高分子量聚乙烯管材
超高分子量聚乙烯板材
超高分子量聚乙烯棒材
超高分子量聚乙烯扁条、板条
超高分子量聚乙烯托辊
超高分子量聚乙烯异型材
高耐磨工程塑料合金原料
关于厚德
公司新闻
合作与投资



UHMWPE RODS(Ultra High Molecular Weight Polyethylene Rods and Line Type Products)
超高分子量聚乙烯UHMW-PE棒材、线材

超高分子量聚乙烯(UHMWPE)棒材、线材

高耐磨、耐腐蚀、耐冲击、自润滑 超高分子量聚乙烯(UHMWPE)棒材，具有优良的耐磨性、自润滑性及不粘性，广泛应用于制作工程零件，可制作各种齿轮、凸轮、自润滑的轴承、轴套、托轮、喷嘴、搅拌叶等。

线材可用于各种活动插销、流水线连接杆等。
产品规格：按用户要求定制。



销售电话: 021-50808566



上海厚德橡塑材料有限公司
Shanghai Houde Rubber&Plastic
电话: 021-50808566
传真: 021-50800060



超高分子量聚乙烯价格在 25-30元/公斤，100公斤起订，密度 0.94-1.04 g/cm³。

有现成的模具：φ159mm，壁厚75mm，尺寸基本满足需要。

上海浦东张江高科技园区科苑路299号

信号放大及数据获取

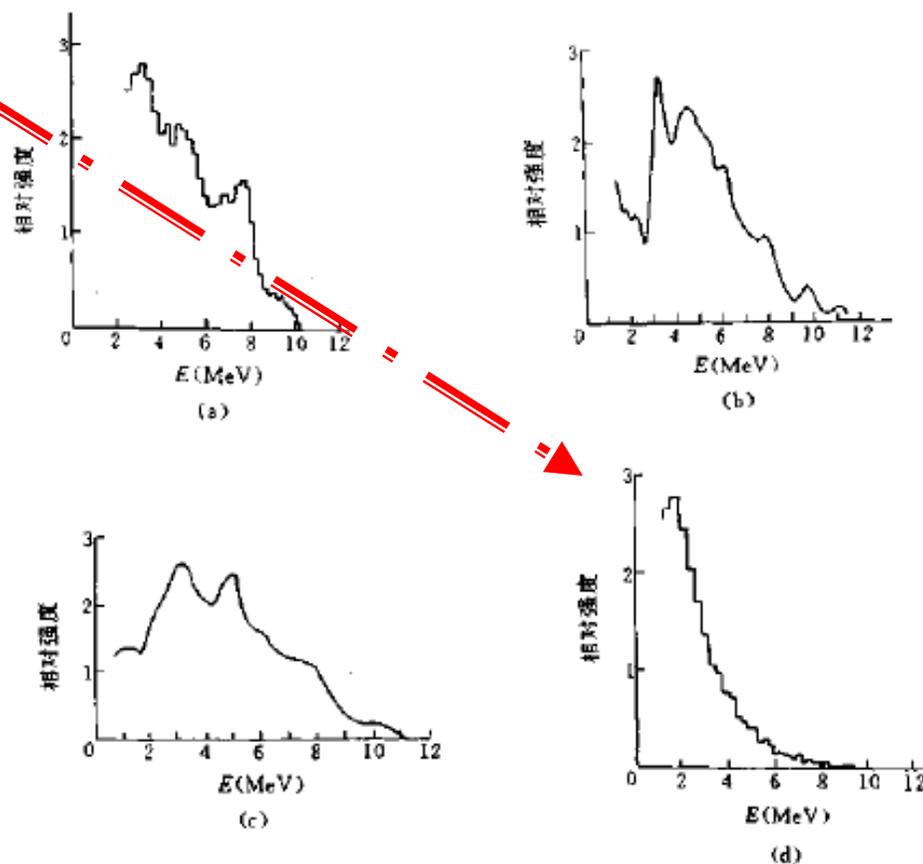
- 实验室测试采用ORTEC 572 AMP + Phillip 7164 ADC + Winner CC32 DAQ, 基于CAMAC的多参数获取系统
- 锦屏山地下实验室中将采用ORTEC 572 AMP (NIM) + 多道的专用获取模式

SINP USB多道：~ 1.5万

探测器效率刻度

- ^{252}Cf 裂变源：现有
- $^{241}\text{Am-Be}$ 源：？
- D-D, D-T中子源：？
- 需要准确活度的标准源

附录 12 同位素中子源能谱



同位素中子源能谱

- (a) $^{241}\text{Am-Be}$ (b) $^{226}\text{Ra-Be}$
(c) $^{210}\text{Po-Be}$ (d) ^{252}Cf

MCNP & GEANT4 Monte Carlo 计算, 2010年6月之前

- (1) 探测效率计算及最佳的慢化体厚度确定
- (2) ^3He 管订货, 前放, 主放, 高压, 多道获取订购。

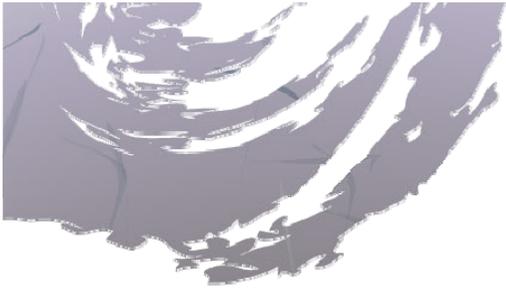
中子探测器慢化体加工和组装, 2010年10月之前

- (1) 聚乙烯慢化体机械加工
- (2) 前放, 主放, 获取等安装调试

标准源刻度: 拟采用 ^{252}Cf , $^{241}\text{Am-Be}$ 中子源刻度, 2010年12月之前

- (1) 中子发生器装置, 2.5MeV和14MeV 单能中子
- (2) ^{252}Cf , $^{241}\text{Am-Be}$ 中子源

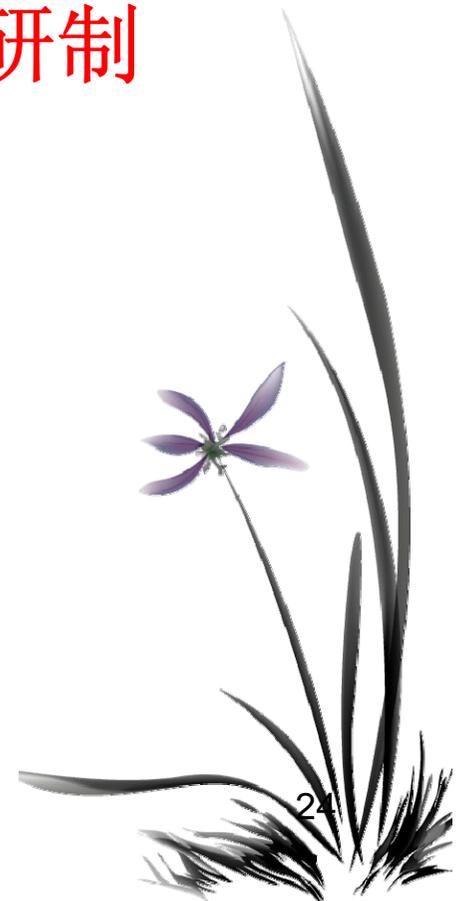
争取在2011年初能正式工作, 获取数据!



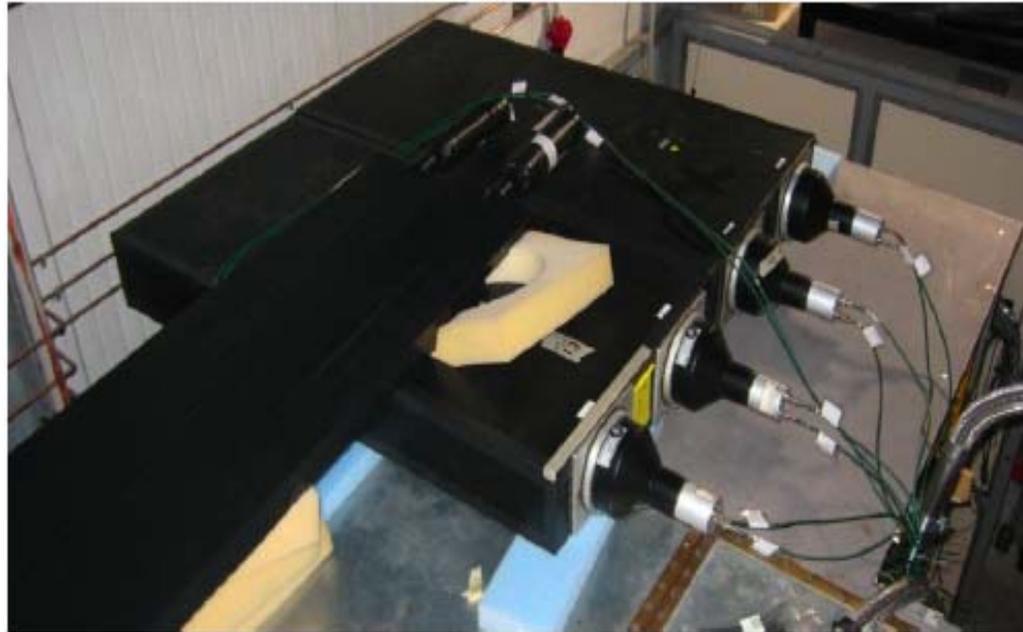
(3) 低本底宇宙射线探测器研制

2010-3-19

973暗物质的理论研究及实验预研



Muon-induced backgrounds in the CUORICINO experiment



Scintillator Label	Length (cm)	Width (cm)	Thickness (cm)	Number of PMTs
A1	100	50	5	1
A2	100	50	5	1
B1	120	60	15	2
B2	120	60	15	2
C1	96	42.5	3.2	1
C2	55	64	3.2	1
D1	200	20	3	1
D2	200	20	3	1
D3	200	20	3	1
D4	200	20	3	1

Table 1: Dimensions of the plastic scintillators used

估算宇宙射线垂直穿过探测器的能量公式为:

$$dE/dx = \sim 1.953\text{MeV}\cdot\text{cm}^2/\text{g}$$

其中闪烁体的密度为 $\rho = 1.023\text{g}/\text{cm}^3$, 尺寸为10cm (长) \times 5cm (宽) \times 100cm (高), 距离为55cm, 射线穿过探测器的尺寸为5cm, 根据上式计算, 横穿过塑料闪烁体的质量厚度dx为 $5.115\text{g}/\text{cm}^2$, 因此能量损失为dE为9.9896MeV, 远高于环境放射线的伽玛能量 (^{40}K 1.460MeV, ^{208}Tl : 2.640MeV)。

因此卡阈值能比较容易的去处本底Gama的干扰。

μ 子是一种带负电, 质量为电子207倍的基本粒子, 寿命2.20微秒, 只有高能的 μ 子才能到达地面, 角分布为 $I_{\nu}=I_0\text{Cos}^2(\theta)$, 地面附近数量大约为 $1\text{ cm}^{-2}\text{ min}^{-1} \sim 60\text{ cm}^{-2}\text{ h}^{-1} \sim 167\text{m}^{-2}\text{ sec}^{-1}$ 。

地下实验室（2500m）深处宇宙射线在 $10^{-10} \mu/\text{sec}/\text{cm}^2$ 水平，因此需要大面积、灵敏的塑料闪烁体探测器。

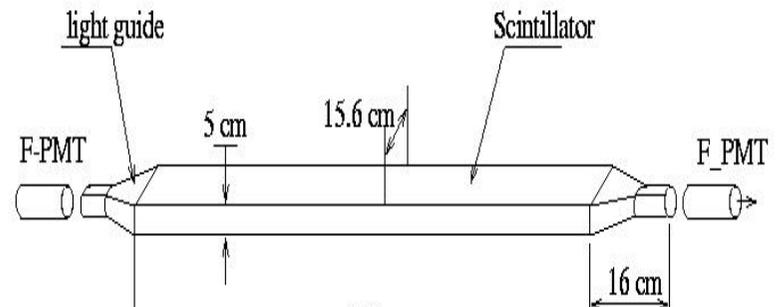
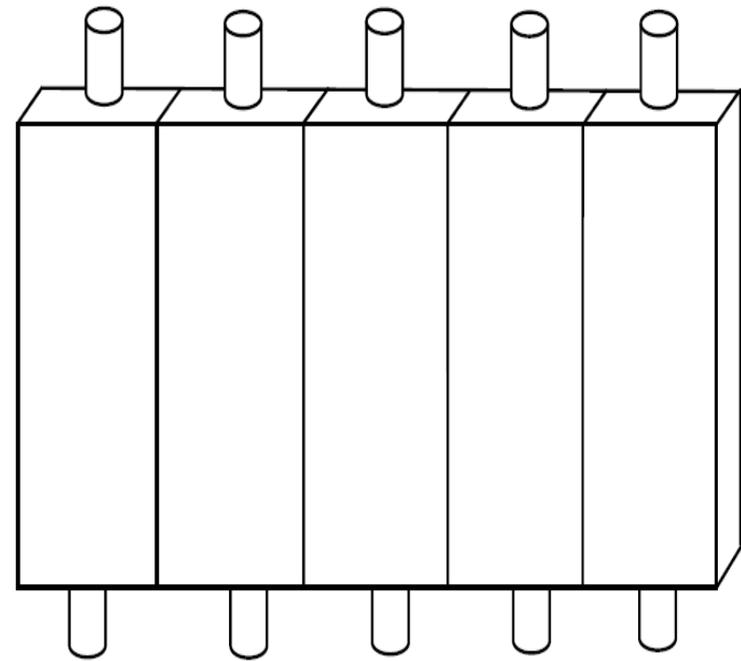
塑料闪烁体阵列测量

地下实验室宇宙射线：

- (1) 单条尺寸：40cm×5cm×100cm
(需要MC模拟后确定最终尺寸)
- (2) 阵列单元：5单元
- (3) 光电管数：10(双端读出)
- (4) 总的面积：2 m² (1.0m×2.0m)

拟采用 Bicron的 BC412 快塑料闪烁体
+ HAMAMATSU PMT+CAEN HV

由于经费限制，我们可能只允许安装部分探测器单元。



Bicron - 塑料闪烁体

Radiation Detected	Scintillator
< 100 keV X-rays	BC-404
100 keV to 5 MeV gamma rays	BC-408
>5 MeV gamma rays	BC-400 BC-416
Fast neutrons	BC-408 <u>BC-412</u>
Alphas, betas	BC-400 BC-404
Charged particles, cosmic rays, muons, protons, etc.	BC-408 <u>BC-412</u> BC-416

General Technical Data

Base Polyvinyltoluene

Density 1.032 g/cc

Refractive Index 1.58

Coefficient of Linear

Expansion 7.8×10^{-5} , below 67°C

Atomic Ratio, H/C ~1.1

Light Output Temperature

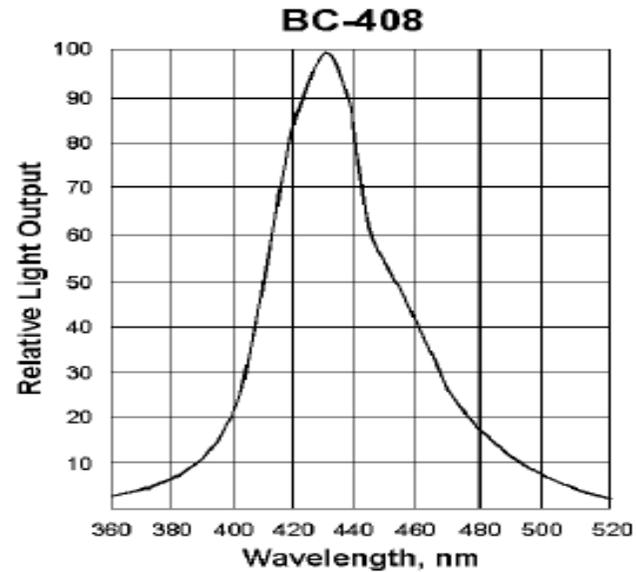
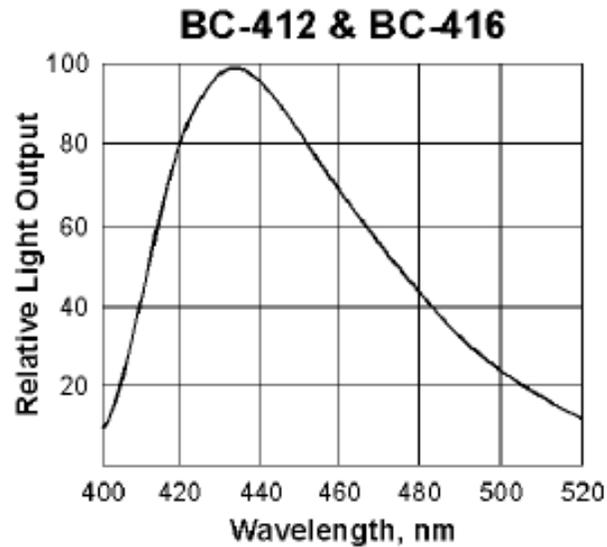
Dependence At +60°C = 95% of that at +20°C; independent of temperature from -60°C to +20°C

Vapor Pressure May be used in a vacuum

Properties

	BC-400	BC-404	BC-408	BC-412	BC-416
Light Output, % Anthracene	65	68	64	60	38
Rise Time, ns	0.9	0.7	0.9	1.0	—
Decay Time, ns	2.4	1.8	2.1	3.3	4.0
Pulse Width, FWHM, ns	2.7	2.2	~2.5	4.2	5.3
Light Attenuation Length, cm*	160	140	210	210	210
Wavelength of Max. Emission, nm	423	408	425	434	434
No. of H Atoms per cm ³ , (x10 ²²)	5.23	5.21	5.23	5.23	5.25
No. of C Atoms per cm ³ , (x10 ²²)	4.74	4.74	4.74	4.74	4.73
Ratio H:C Atoms	1.103	1.100	1.104	1.104	1.110
No. of Electrons per cm ³ , (x10 ²³)	3.37	3.37	3.37	3.37	3.37
Principal uses/applications	general purpose	fast counting	TOF counters, large area	large area	large area economy

Emission Spectra



Plastic Scintillators

Eljen Technology	Commercial Equivalent		Description
	NE	St. Gobain	
EJ-200 	Pilot F	BC-408	Best overall general properties Gamma coefficient .pdf
EJ-204	NE-104	BC-404	Good gen' l. properties, use with green WLS
EJ-208 	NE-110	BC-412	Good gen' l. properties, high attenuation length
EJ-208B	N/A	BC-416	Good overall general properties

另一个可供选择的是**EJ208**，性能和**BC412**，**NE110**一样



ELJEN TECHNOLOGY
 PO Box 870, 300 Crane Street
 Sweetwater TX 79556 USA

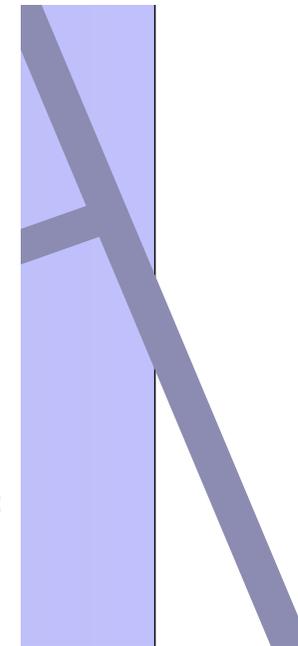
Tel: (915) 235-4276 or (888) 800-8771
 Fax: (915) 235-0701
 Website: www.eljentechnology.com

Physical and Scintillation Constants:

Light Output, % Anthracene	60
Scintillation Efficiency, photons/1 MeV e ⁻	9,200
Wavelength of Max. Emission, nm	435
Rise Time, ns	1.0
Decay Time, ns	3.3
Pulse Width, FWHM, ns	4.2
No. of H Atoms per cm ³ , x 10 ²²	5.17
No. of C Atoms per cm ³ , x 10 ²²	4.69
No. of Electrons per cm ³ , x 10 ²³	3.33
Density, g/cc:	1.023

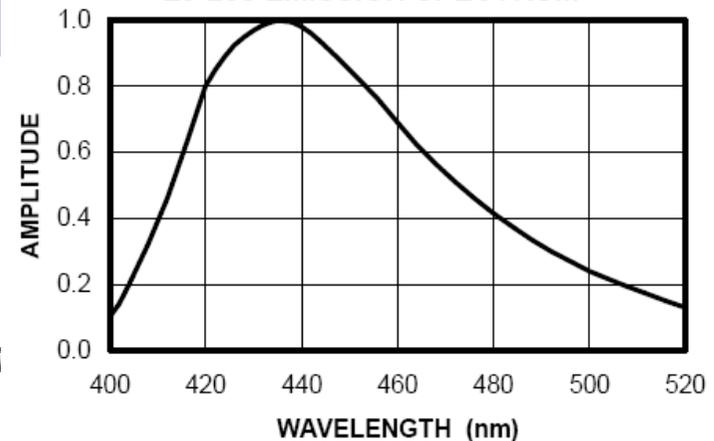
Polymer Base: Polyvinyltoluene
Refractive Index: 1.58
Vapor Pressure: Is vacuum-compatible
Coefficient of Linear Expansion: 7.8 x 10⁻⁵ below +67°C

Light Output vs. Temperature:
 At +60°C, L.O. = 95% of that at +20°C
 No change from +20°C to -60°C



This plastic scintillator embodies the formula dating from the early 1970s for achieving long optical attenuation length. It is intended specifically for use in large sizes where timing is of secondary importance and uniformity of light collection is paramount. Typical measurements of 4 meter optical attenuation length are achieved in strips of cast sheet in which a representative size is 2 cm x 20 cm x 300 cm.

EJ-208 EMISSION SPECTRUM



3/19/2010

973暗物质的理论研究及实

Head-On Type Photomultiplier Tubes

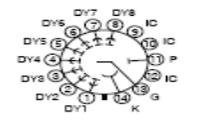
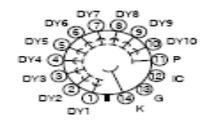
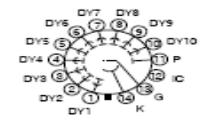
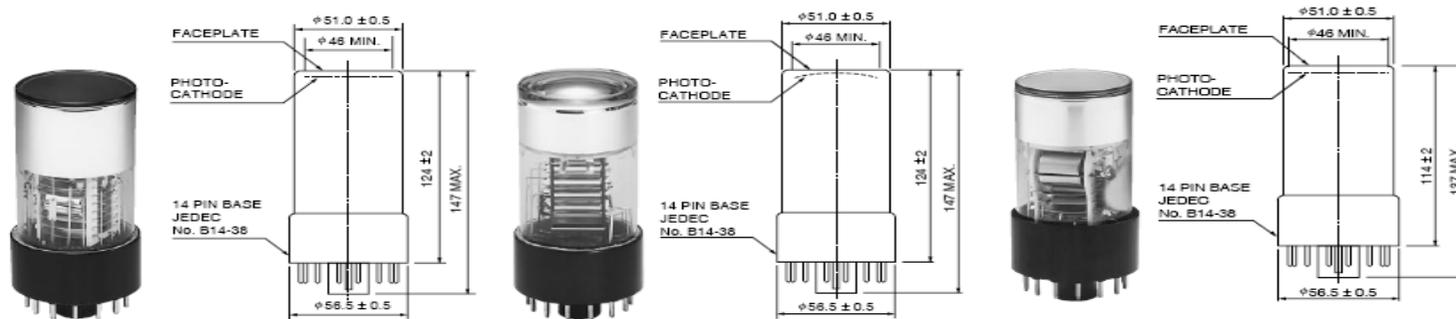


Type No.	Remarks	Spectral Response			Photo-cathode Material	Window Material	Outline No.	Dynode Structure No. of Stages	Socket Socket Assembly	Maximum Ratings		Cathode Sensitivity	
		Curve Code	Range (nm)	Peak Wave-length (nm)						Anode to Cathode Voltage (Vdc)	Average Anode Current (mA)	Min. (μ A/lm)	Typ. (μ A/lm)

51mm (2") Dia. Types with Plastic Base

R6231	For visible range and scintillation counting, low profile type	400K	300 to 650	420	BA	K	④	B + L/8	E678-14A [■]	1500	0.1	80	110
R1306	For visible range and scintillation counting				BA	K	③	B/8	E678-14A [■] /30	1500	0.1	80	110
R2154-02	For visible range and scintillation counting				BA	K	②	L/10	E678-14A [■] /31	1750	0.1	60	90
R1828-01	For visible range, fast time response				BA	K	⑤	L/12	E678-20A*/36	3000	0.2	60	90
R3234-01	For photon counting, fast time response				BA	K	⑥	L/12	E678-20A*	2500	0.1	60	80
R550	For visible to near IR range	500K (S-20)	300 to 850		MA	K	①	B/10	E678-14A [■] /29/32	1500	0.3	100	150

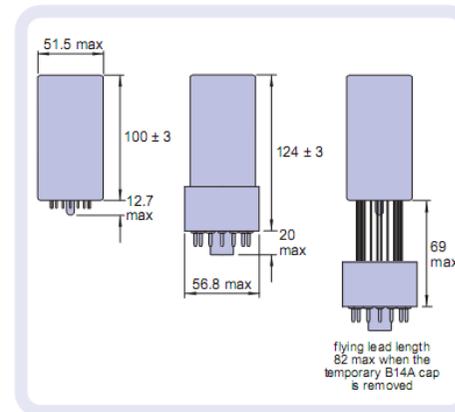
- ① R550
- ② R2154-02
- ③ R1306



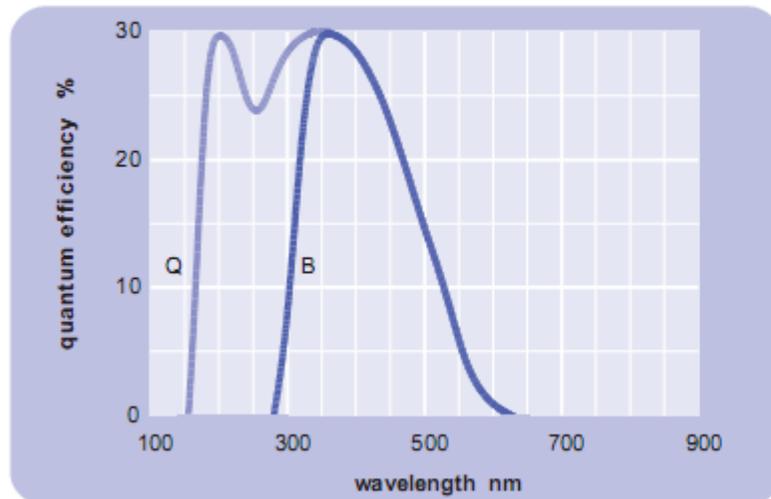
51 mm (2") photomultiplier 9266B series data sheet

4 window characteristics

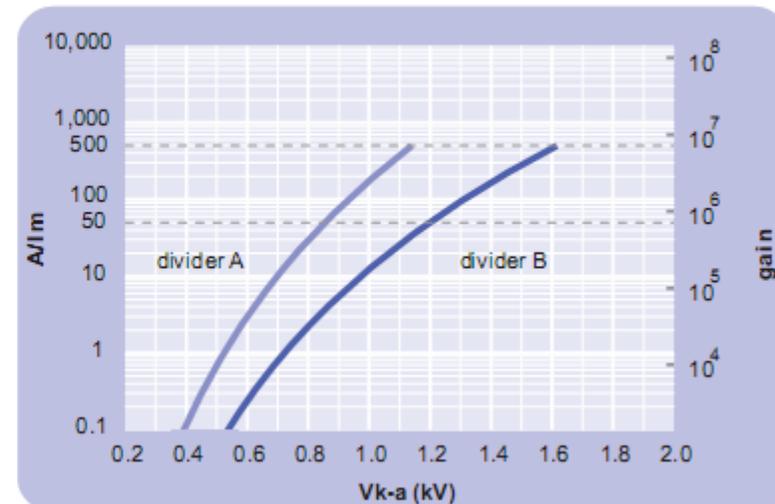
	9266B borosilicate	9266QB ⁺ fused silica
spectral range**(nm)	290 - 630	160 - 630
refractive index (n_d)	1.49	1.46
K (ppm)	300	<10
Th (ppb)	250	<10
U (ppb)	100	<10



5 typical spectral response curves



7 typical voltage gain characteristics





- 我们将会 在模拟计算的基础上确定宇宙射线探测器的尺寸，光电管型号，光导性形状等。





参加人员：王宏伟，田文栋，陈金根，郭威

SINAP 核物理室

谢 谢

