

# 利用两相液氦系统探测 中微子-核子相干散射

韩然

北京卫星环境工程研究所

广西大学第七届全国先进气体探测器会议

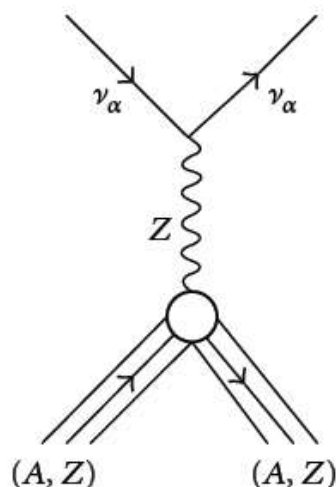
2017年11月11日

# 提 纲

- 中微子-核子相干散射介绍
- 中微子-核子相干散射研究现状
- 利用大亚湾探测中微子-核子相干散射可行性分析
- 两相液氩系统的工作进展

# 中微子-核子相干散射反应

- 中性流过程，1974年Freedman提出；
- 味道不敏感



PHYSICAL REVIEW D

VOLUME 9, NUMBER 5

1 MARCH 1974

## Coherent effects of a weak neutral current

Daniel Z. Freedman†

National Accelerator Laboratory, Batavia, Illinois 60510

and Institute for Theoretical Physics, State University of New York, Stony Brook, New York 11790

(Received 15 October 1973; revised manuscript received 19 November 1973)

If there is a weak neutral current, then the elastic scattering process  $\nu + A \rightarrow \nu + A$  should have a sharp coherent forward peak just as  $e + A \rightarrow e + A$  does. Experiments to observe this peak can give important information on the isospin structure of the neutral current. The experiments are very difficult, although the estimated cross sections (about  $10^{-38}$  cm<sup>2</sup> on carbon) are favorable. The coherent cross sections (in contrast to incoherent) are almost energy-independent. Therefore, energies as low as 100 MeV may be suitable. Quasi-coherent nuclear excitation processes  $\nu + A \rightarrow \nu + A^*$  provide possible tests of the conservation of the weak neutral current. Because of strong coherent effects at very low energies, the nuclear elastic scattering process may be important in inhibiting cooling by neutrino emission in stellar collapse and neutron stars.

- “Coherence”:

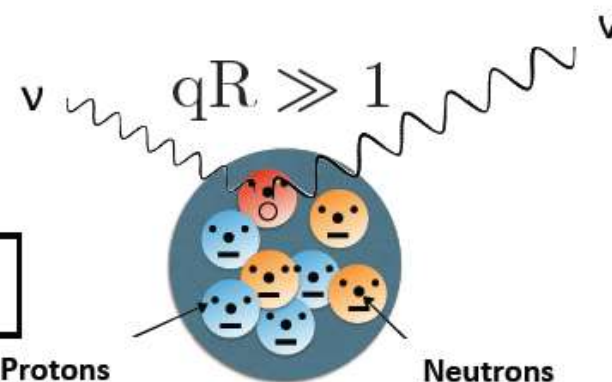
- 入射能量 < 50 MeV

$$qR \lesssim 1$$

$q$ : momentum transfer  
 $R$ : nucleus size

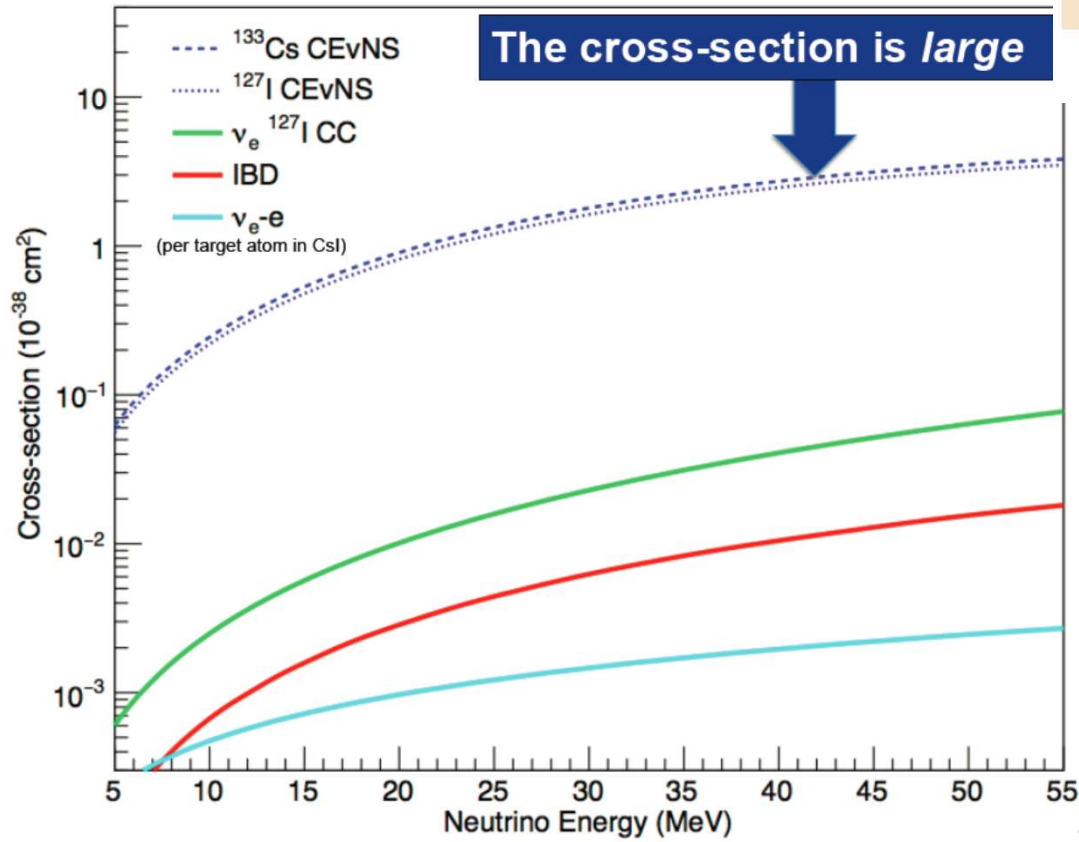


Aluminium:  $1/R \approx 60$  MeV  
Lead:  $1/R \approx 30$  MeV



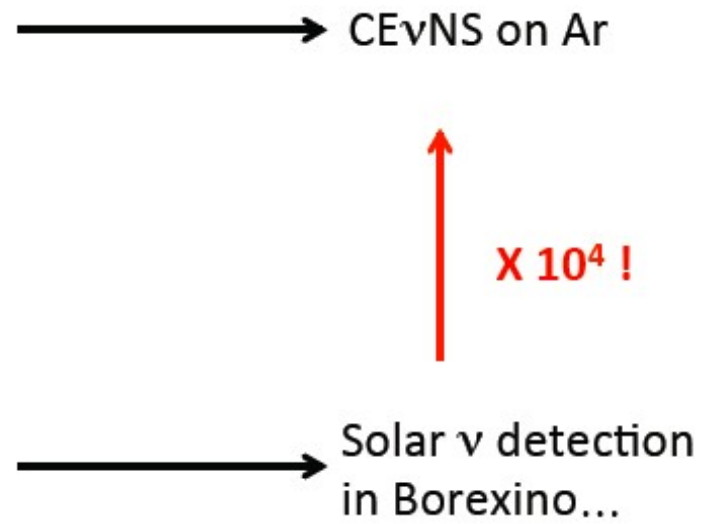
Matthew Vielzeuf, CDR Neutrino 2017

# 非常大的反应截面



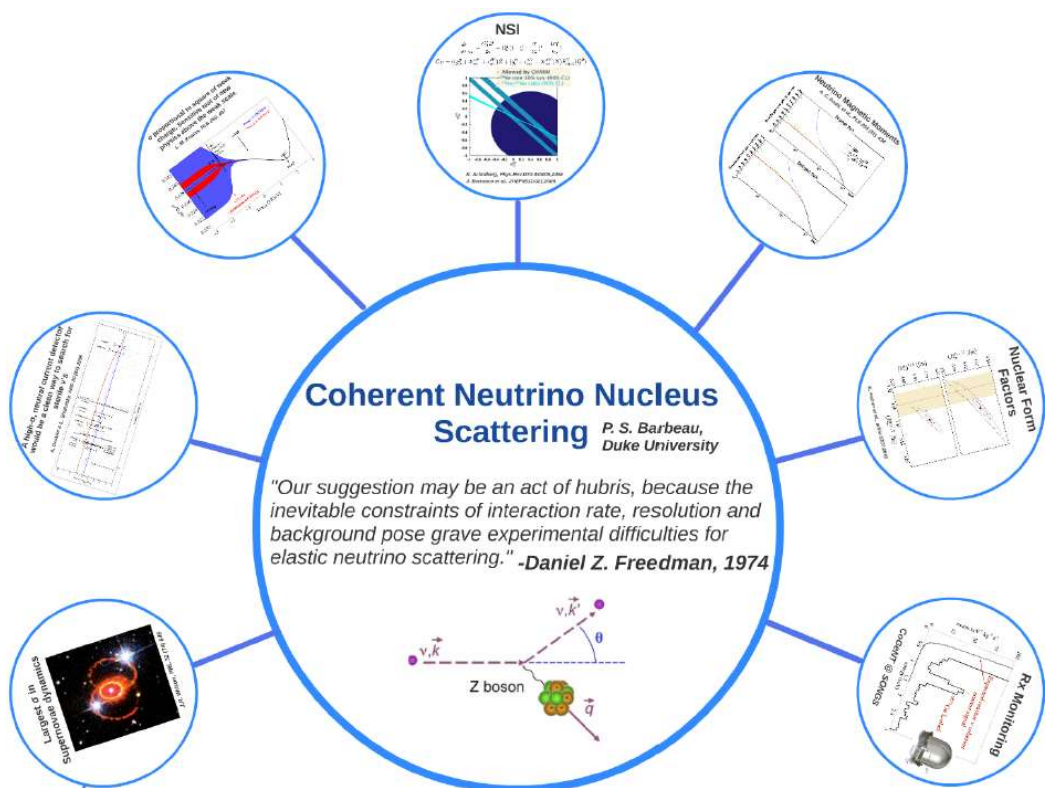
$$\frac{d\sigma(E_\nu, T)}{dT} = \frac{G_f^2}{4\pi} Q_w^2 M \left(1 - \frac{MT}{2E_\nu^2}\right) F(Q^2)^2 \sim N^2$$

$N \simeq 40 \rightarrow N^2 = 1600 \rightarrow$  detector mass 10t  $\rightarrow$  few kg



# 相干散射的研究意义

1974年首次提出中微子相干散射的测量，文章中提到，这个要求是有点傲慢无理，它受到事例率、分辨和本底等造成严重的实验困难，但是意义重大



## 核物理

检验粒子物理的标准模型的正确性和完备性；  
精确测量中子的密度函数以及原子核的形状因子；

## 天体物理

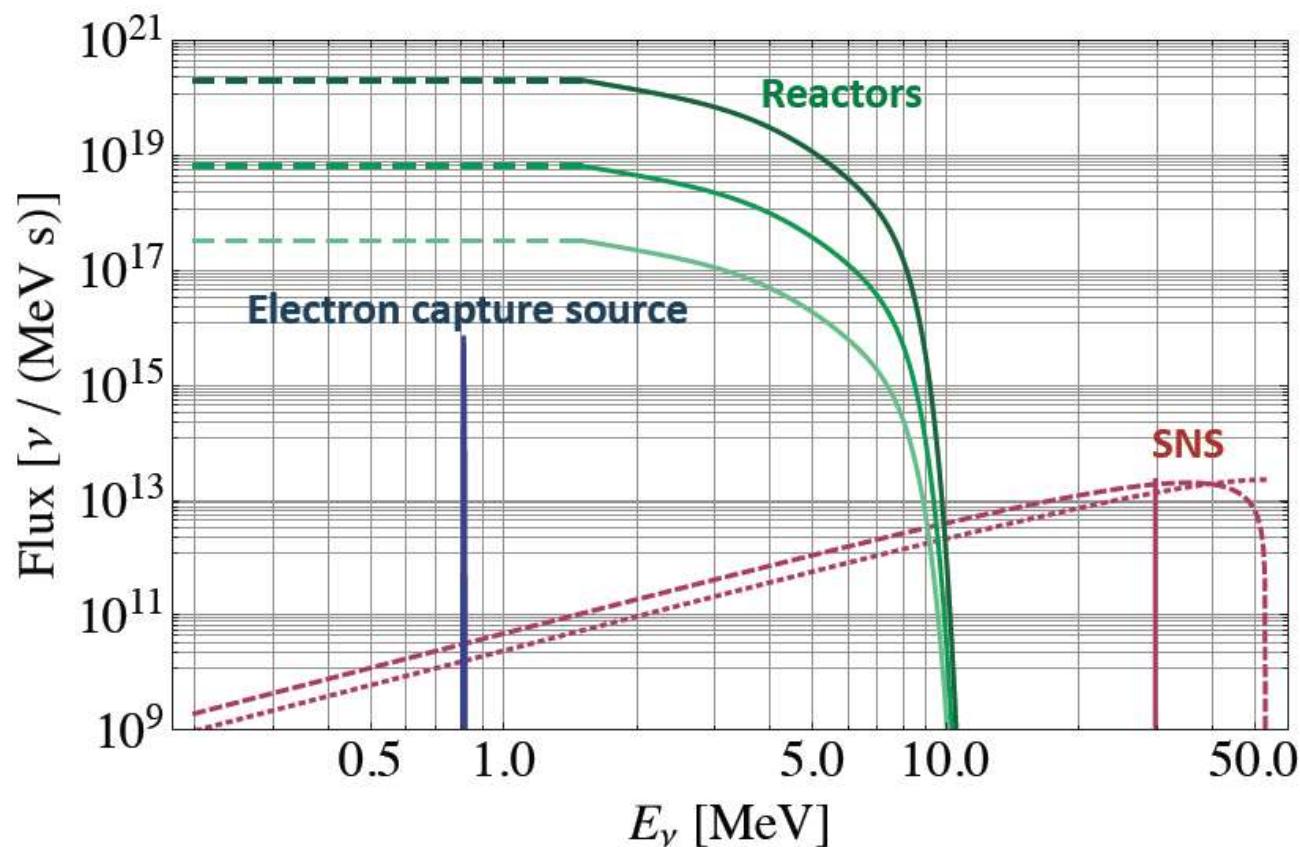
大的反应截面可以研究超新星爆发的动力学，检验不同的模型；

对此过程的截面及其性质的研究对未来暗物质直接探测实验至关重要；

## 粒子物理

温伯格角、寻找惰性中微子、测量中微子磁矩等。

# 探测中微子相干散射过程的两种方法



## Low energy $\nu$ 's from accelerators:

$\pi$ -decay-at-rest (DAR)  $\nu$  source  
Different flavors produced  
relatively high recoil energies  
→ close to de-coherence

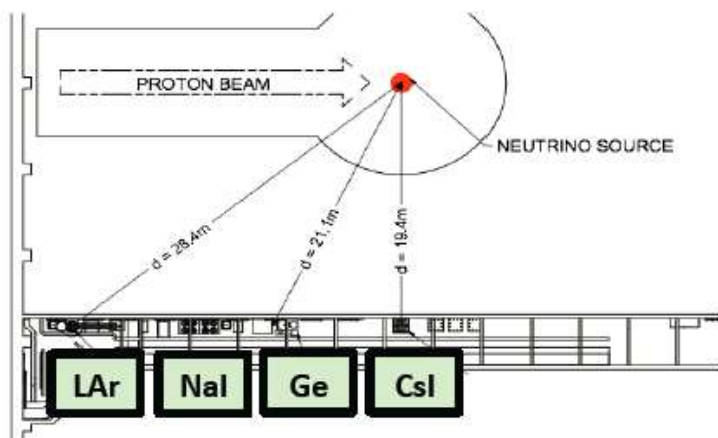
## Reactors:

Lower  $\nu$  energies than accelerators  
Lower cross section  
Different flavor content  
implications for probes of new physics



# 散裂中子源探测相干散射过程

- Using accelerators neutrinos: larger  $E_\nu \rightarrow$  larger recoils  $\rightarrow$  “easier” detection



- Multiple detectors placed 20-30 m away from neutrino source ( $10^7 \text{ cm}^{-2} \text{ s}^{-1}$  @ 20 m)
- Up to  $\approx 100$  events/yr expected
- Neutrons most dangerous source of backgrounds: from SNS itself & neutrinos induced neutrons on PB and Fe
- $10^{-4}$  neutron discrimination factor thanks to pulsed structure of beam

Target	Technology	Mass [kg]	Distance [m]	Recoil threshold [keVnr]	Data-taking start date/ CEnNS detection goal
CsI[Na]	Scintillator	14	20	6.5	Sept. 2015; $3\sigma$ in 2 yr
Ge	HPGe PPC	10	22	5	Early 2017
LAr	Single phase	35	29	20	Dec. 2016
NaI[Tl]	Scintillator	185	28	13	Summer 2016

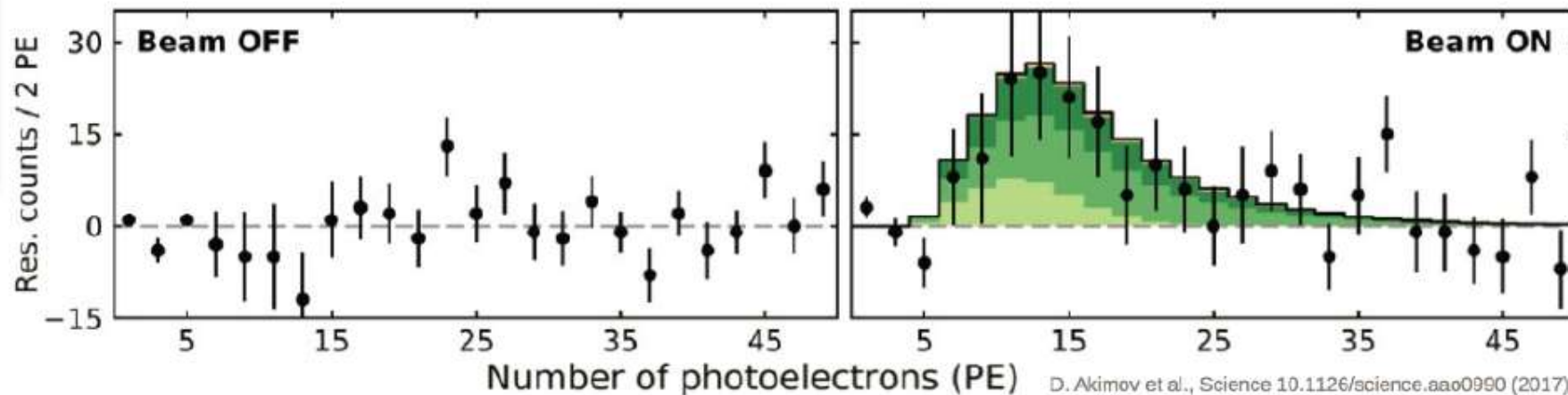
# 散裂中子源探测结果

## COHERENT experiment (stopped $\pi$ beam 30-50 MeV neutrinos)

- 4 different detector technologies
  - 14 kg of **CsI** scintillating crystals
  - 35 kg single phase LAr detector
  - 185 kg NaI scintillating crystal
  - 10 kg HPGe PPC detectors
- SNS source with  $\bar{\nu}$  flux of  $4.3 \cdot 10^7$   $\nu/\text{cm}^2/\text{s}$  @ 20m

### First COHERENT result July 2017

- 15 month of live-time accumulated with CsI[Na]
- $6.7 \sigma$  significance for excess in events, with  $1 \sigma$  consistency with the SM prediction



D. Akimov et al., Science 10.1126/science.aaa0990 (2017)



# 反应堆探测相干散射过程



## Combine:

- highest neutrino flux → close to power reactor
- lowest detection threshold → R&D
- best background suppression → “virtual depth”



## The Brokdorf (Germany) power plant:

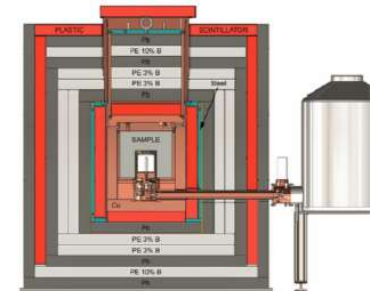
thermal power  $3.9\text{GW}_{\text{th}}$   
 detector @  $d=17\text{m}$   
 →  $\nu$  flux:  $10^{14}/\text{cm}^2/\text{s}$   
 ca.  $50\text{ kW}/\text{m}^2$  in  $\nu$ 's  
 very high duty cycle

→ most intense integral neutrino flux  
 $E_{\nu}$  up to  $\sim 8\text{ MeV}$  → fully coherent

coaxial HPGe detector ( $m_{\text{act}} = 1.8\text{ kg}$ )  
 radio-pure passive shielding:

- Pb and Cu against external radioactivity
  - borated PE to capture and moderate neutrons
- active veto:
- plastic scintillators with PMTs
  - 99% muon veto efficiency (dead time  $\sim 2\%$ )

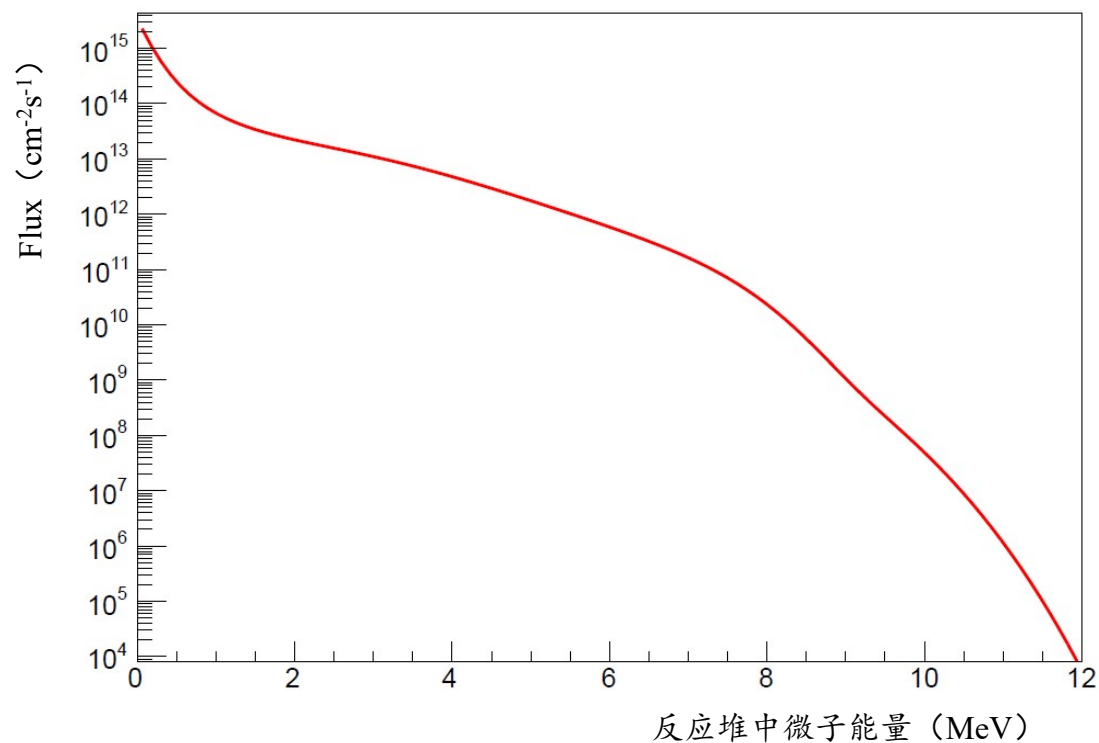
main purpose: material screening



detector	depth [m w.e.]	$\mu$ flux reduction	Bkg rate [45,50] keV [ $\text{kg}^{-1}\text{d}^{-1}\text{keV}^{-1}$ ]
Gemma-I[5]	70	$\sim 10$	$2.1 \pm 0.7$
Texono[6]	25	$\sim 4$	$1.3 \pm 0.5$
GIOVE[7]	15	$\sim 2-3$	$0.4 \pm 0.1$

# 利用大亚湾核电站探测相干散射过程

- 利用大亚湾核电站产生的中微子探测相干散射过程
- 大亚湾一个堆的功率2.9GW，探测器离反应堆的距离20m
- 总流强 $6.63 \times 10^{13} \text{cm}^{-2}\text{s}^{-1}$



# 事例数估算

- 中微子-核子弹性相干散射反应产生的事例数

$$R = \Phi \times \sigma \times N$$

$\Phi$  : 中微子通量 ( 大亚湾2.9GW , 20m的距离 ) ,

$\sigma$  : 反应截面 ,  $N$  : 靶数目

$$N = MF_N N_A B / m_N$$

$M$ :探测器质量, 以下按1kg算,  $F_N$  : 靶物质核子数的百分比, 按照100%计算

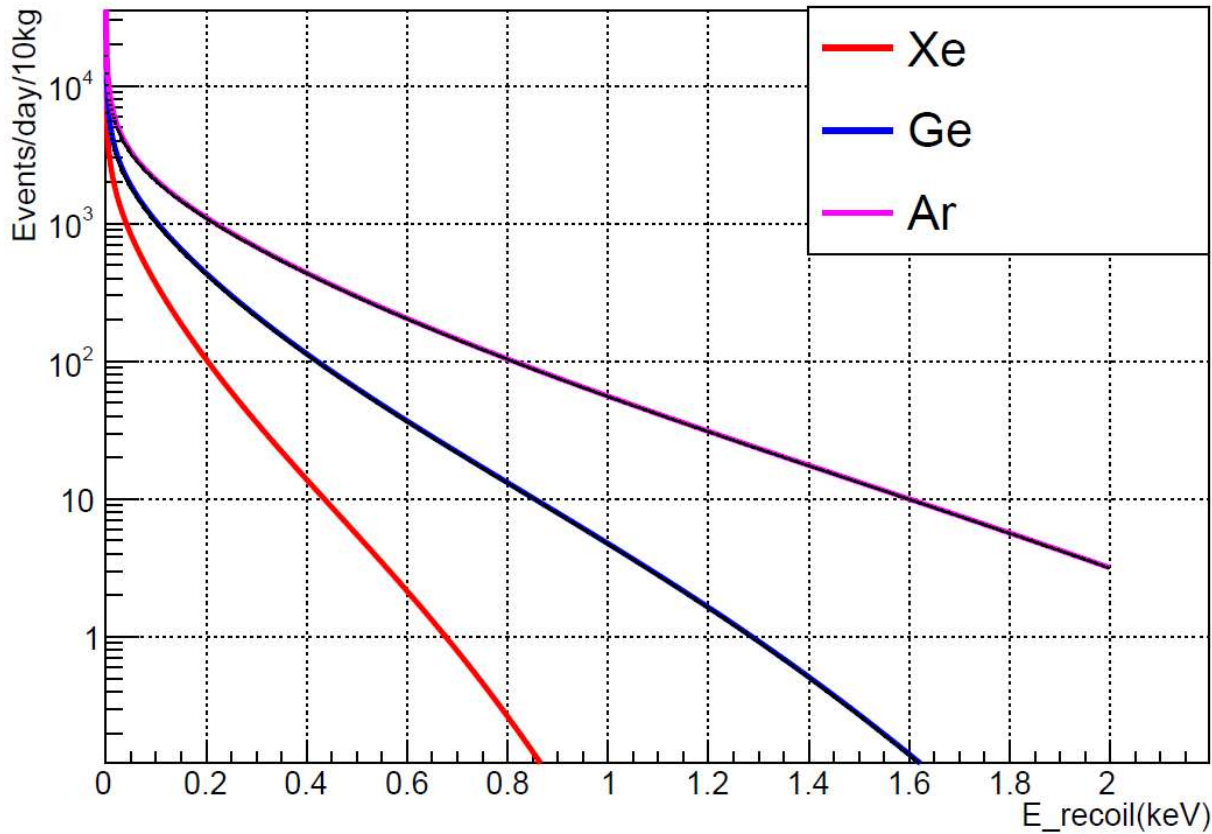
$N_A$ : 阿伏伽德罗常数 $6.02214e23$  ,  $B$  : 丰度, 都按照1算,  $m_N$ : 核子的摩尔质量

探测靶物质	锗Ge	液氩Ar	液氙Xe	液闪
反应机制	CNNS	CNNS	CNNS	IBD
0-12MeV 平均 反应截面 (cm <sup>2</sup> )	$3.68 \times 10^{-39}$	$1.10 \times 10^{-39}$	$1.36 \times 10^{-38}$	$1.99 \times 10^{-43}$
10kg 靶物质所 含的核子数	$8.36 \times 10^{25}$	$1.5 \times 10^{26}$	$4.6 \times 10^{25}$	$7.0 \times 10^{26}$
10kg 每天产生 的事例	3351	1728	6974	74
10kg 靶物质的 体积 (m <sup>3</sup> )	1.88	12.5	3.33	14.8

# 反冲核能量

反冲核子平均动能分布图

$$\frac{d\sigma}{dT_A} = \frac{G_F^2}{4\pi} m_A [Z(1 - 4\sin^2\theta_w) - N]^2 \left[ 1 - \frac{m_A T_A}{2E_\nu^2} \right]$$



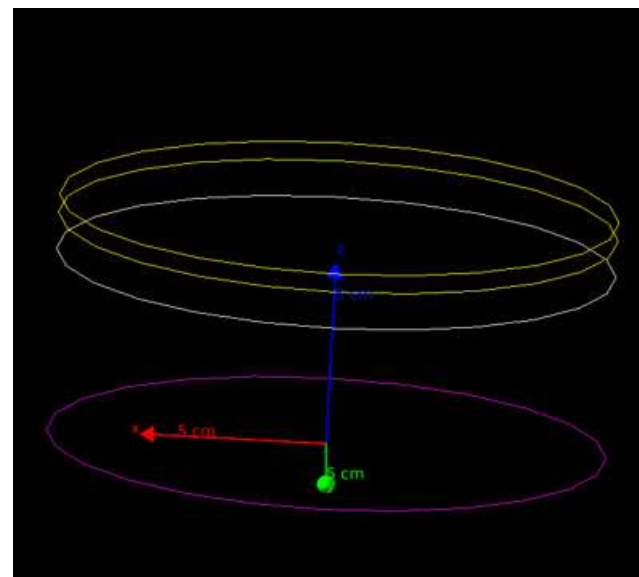
探测难点：

- 反冲核能量非常低，需要低阈值探测器
- 无法像探测IBD反应，有快慢信号符合去除一定的本底

# Geant4+NEST两相探测器模拟

USE SPREADSHEET FOR MEAN						
NEST v1.CNUCLEAR RECOIL						
rho [g/ccdft [V/cm]	T-I param	keVnr	epsilon	'k' factor		
2.9	500	3.77E-02	1.00	0.001043	0.139244	
2.9	500	3.77E-02	2.00	0.002087	0.139244	
2.9	660	3.71E-02	0.15	0.000157	0.139244	

"g1" or "alpha1"		"g2" or "alpha2" (extraction efficiency x SE				
S1 gain	S1 [PE]	S2 gain	S2 [PE]	keVee True	A(tomic)	Number
0.1	0.19088	20	153.64	0.1311107		131
0.1	0.662218	20	288.5785	0.2879658		131
0.1	0.004138	20	21.41433	0.0151991		131



- 确定液体区和气体区的长度
  - 模拟电场强度
  - 电子的复合几率以及电子漂移时间
  - 光电倍增管的光电效率等因子
- 最后看可探测到的S1光和S2光。

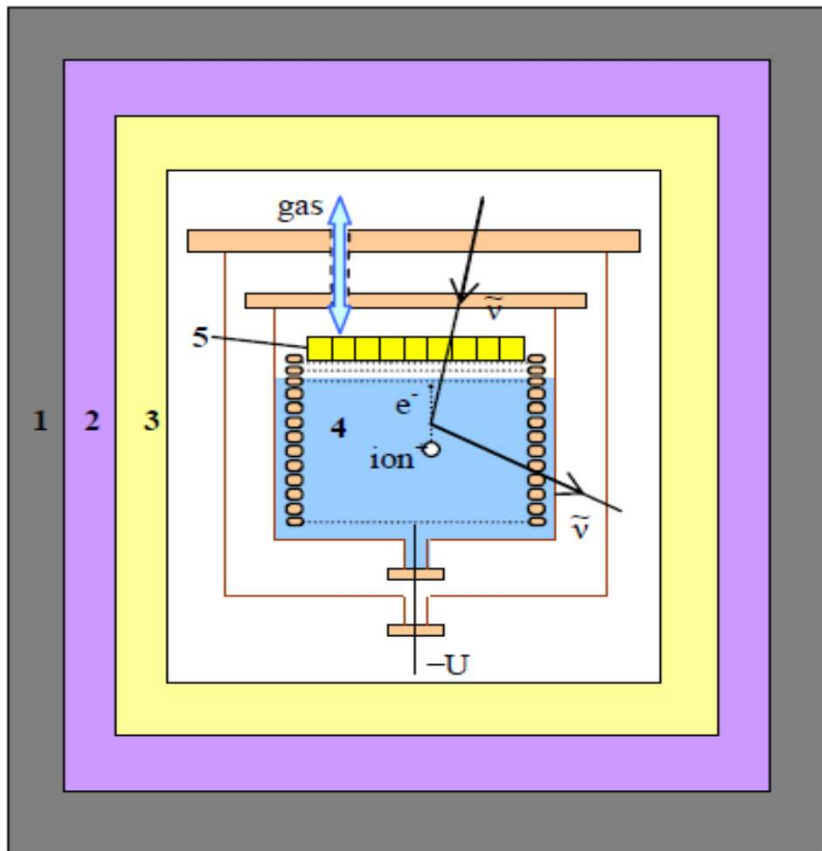


# 可探测到的事件数

	Ar里反冲核的数目 (/10kg/d)	Xe里反冲核的数目 (/10kg/d)	Ge里反冲核的数目 (/10kg/d)
初始产生	1728	6974	3351
电离一对电子空穴对	反冲核 >0.023keV 入射中微子>1.17MeV 1353	反冲核 >0.012keV 入射中微子>1.5MeV 4226	反冲核 >0.0078keV 入射中微子>0.9MeV 2587
考虑核子猝灭因子，并且最后观测到20.pe	反冲核~>0.4keV <b>235</b>	反冲核>0.15keV <b>520</b>	无放大探测最低阈值是200eV； 入射中微子> 4.5MeV <b>511</b>

拟采用两相液氙或液氙探测技术

# 屏蔽的初步设计



1是铅屏蔽层，屏蔽掉 $\gamma$ 本底，设计厚度是10cm，

2是塑料闪烁体，作为反符合探测器来符合掉外界的放射性本底，

3是掺硼聚乙烯，用来慢化次级中子并吸收，

4是液氩和外层的气氩，

5是光电倍增管/SiPM。

整个探测系统包在25cm的水里。

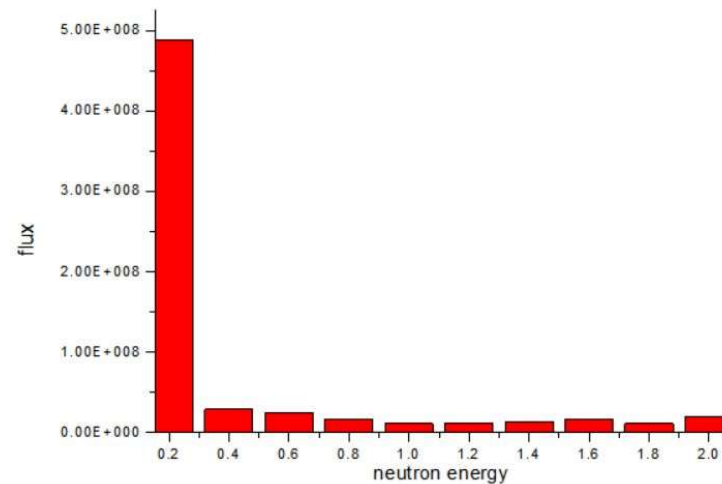
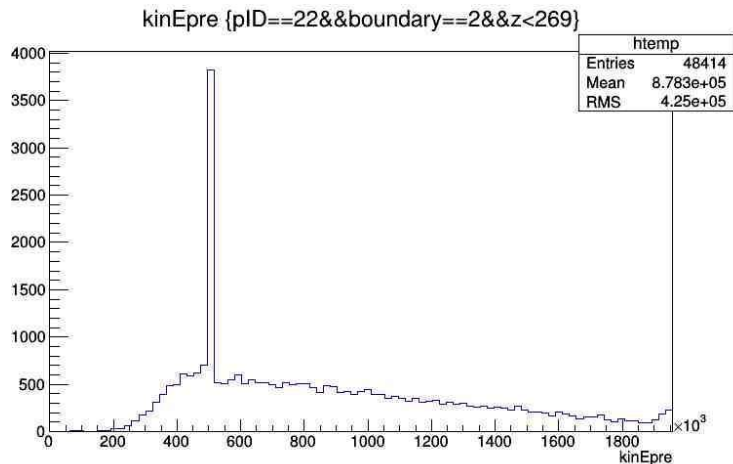
液氩装在无氧铜的真空罐里。

# 屏蔽核电站光子和中子

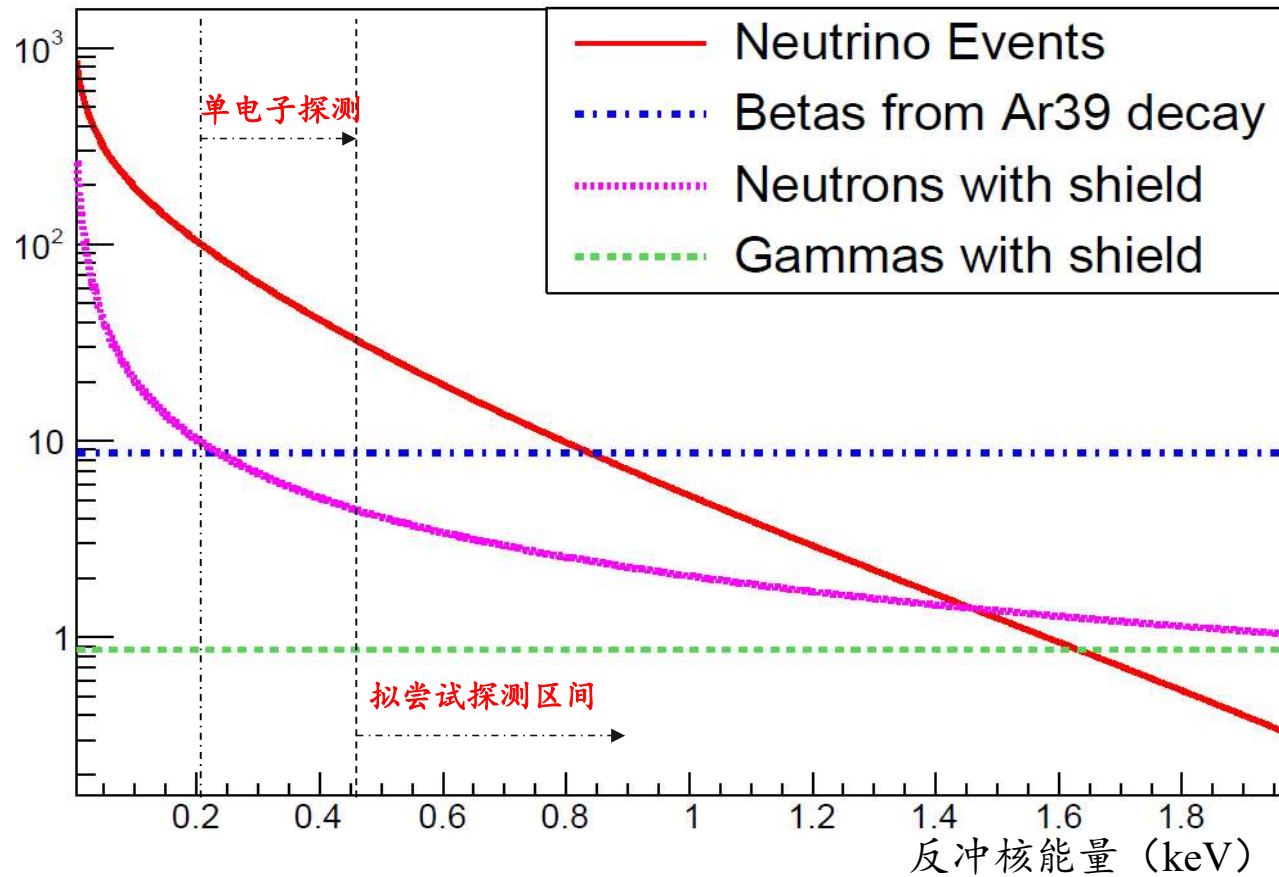
2MeV的 $\gamma$ 基本可以被10cm的Pb吸收63%，而出射的基本均是511keV的湮灭光子

Pb厚度	入射数	出射数	吸收率
10cm	100000	37330	63%，
15cm	100000	32024	68%，
20cm	100000	31358	69%

反应堆中子，以大亚湾核电站一个反应堆2.9GW的功率计算，产生中子的通量大约是 $8.4 \times 10^9 / \text{cm}^2 / \text{s}$ ，经过25cm的水做了屏蔽之后 $1.85 \times 10^{-4}$ 个/s。

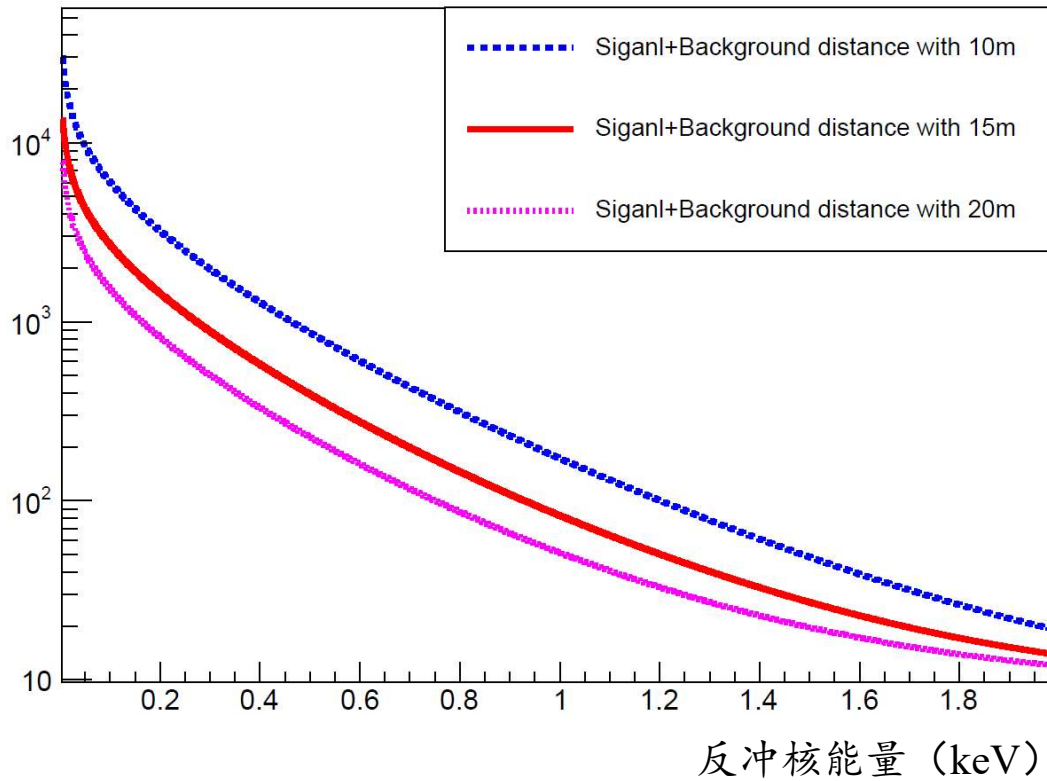


# 本底+信号

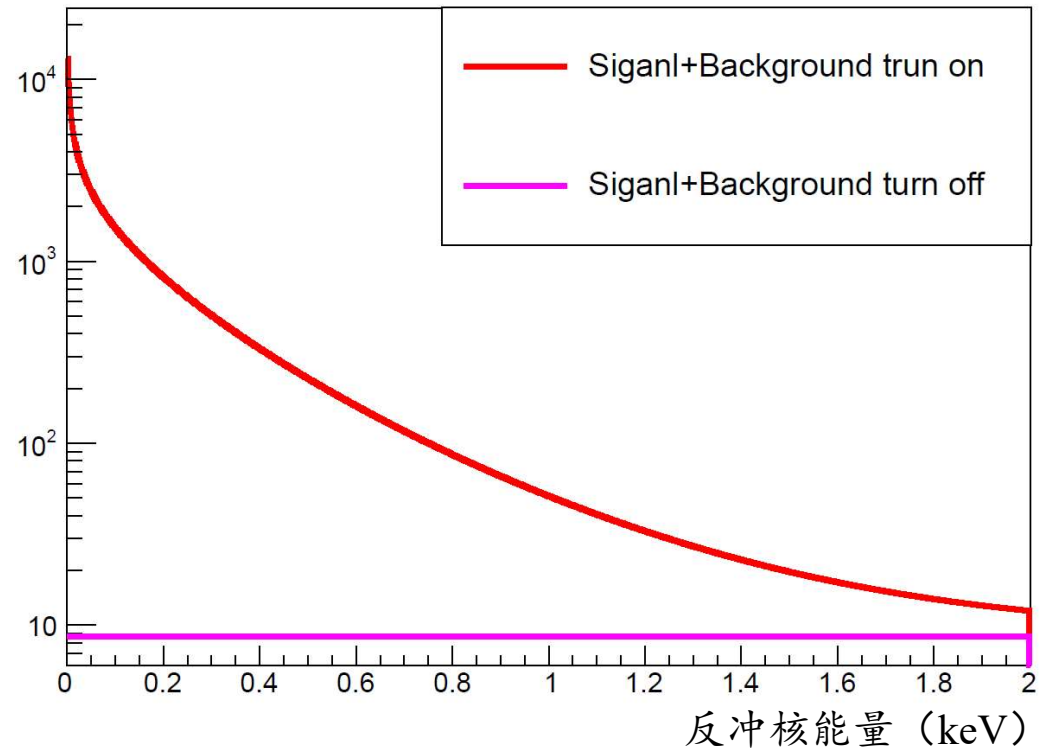


$^{39}\text{Ar}$ 的的含量1Bq/kg,  $\beta$ 衰变事例数0.005个/s/keV/kg

# 大亚湾验证方法



离反应堆不同的距离，中微子随着距离的平方减少，而Ar39不变，中子能谱进行刻度。注：此方案是近距离，具有大的中子本底

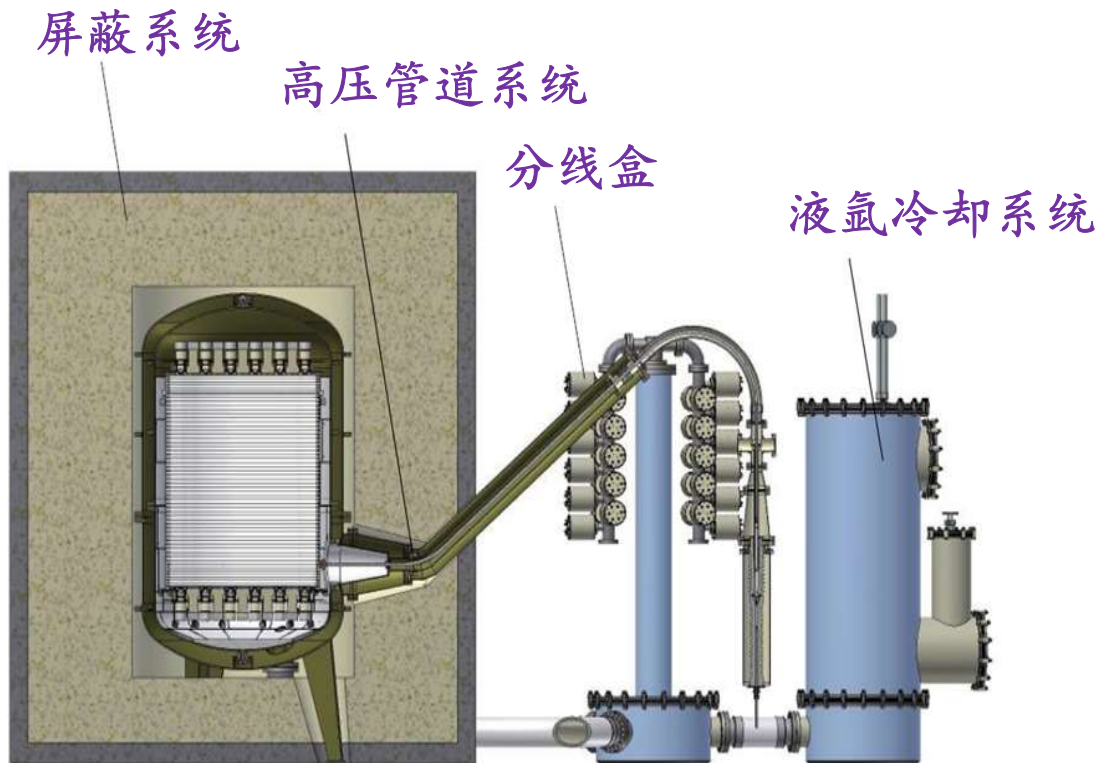


开关堆: 开堆<sup>39</sup>Ar, 中子和中微子, 关堆只有<sup>39</sup>Ar, 中子的谱将做刻度  
减去中子和<sup>39</sup>Ar 剩余的将是中微子, 可以看出其变化



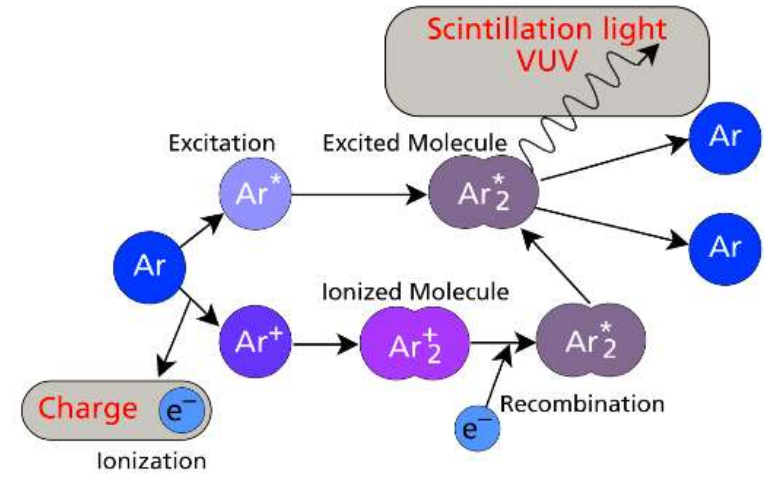
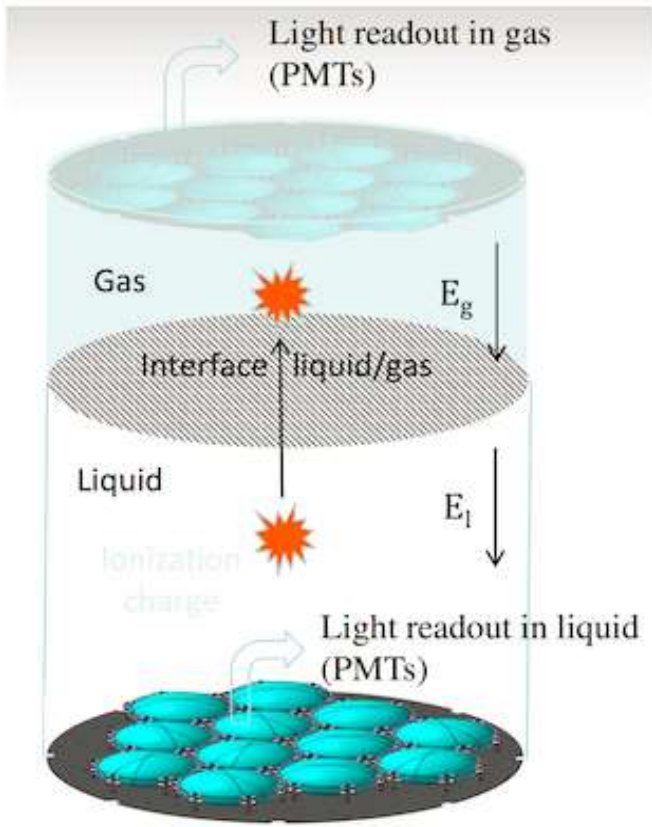
# 探测器的研制

两相液氦倍增探测系统，高能所测量无中微子beta衰变的原理样机



# 工作原理

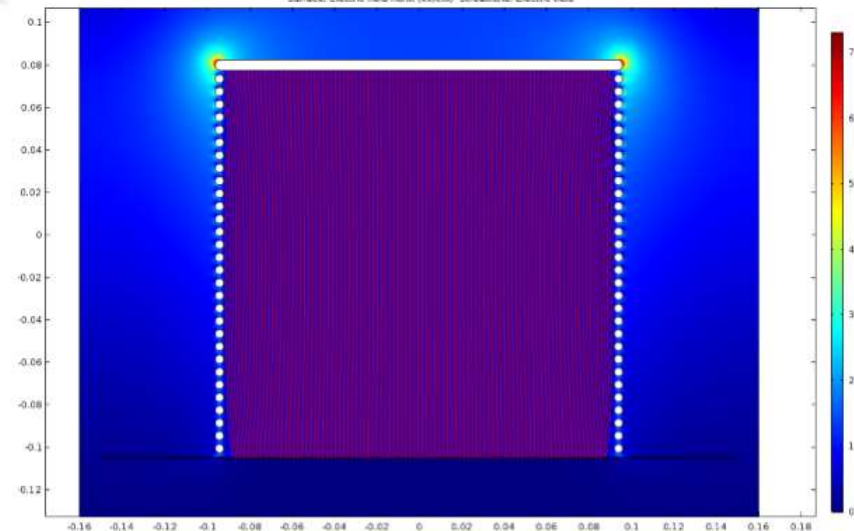
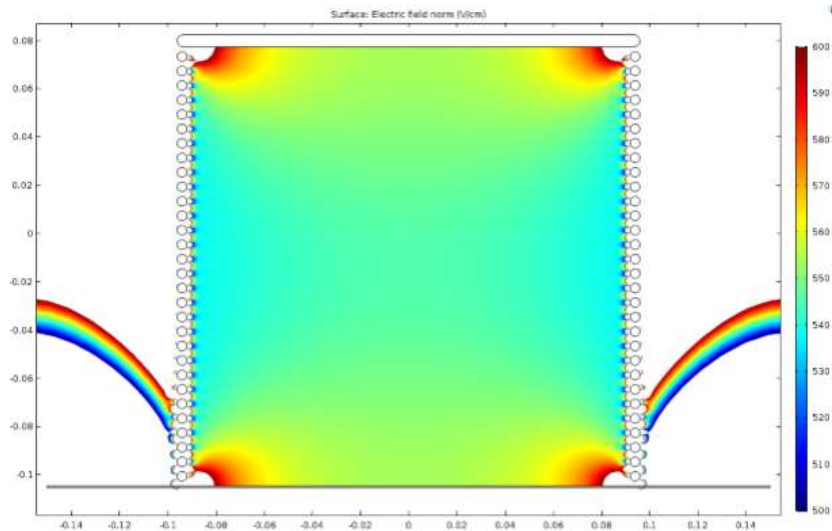
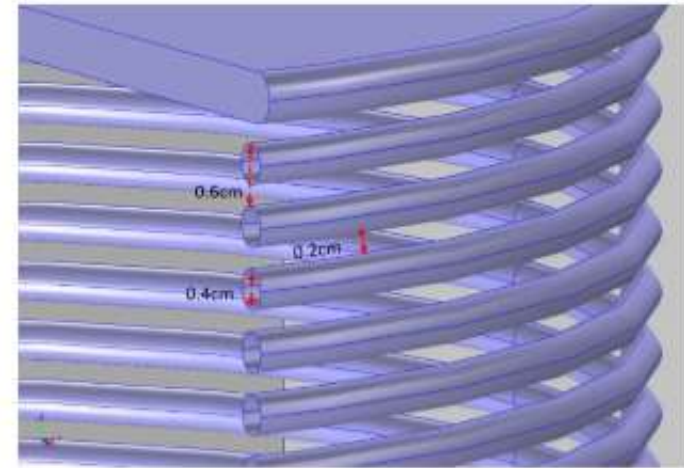
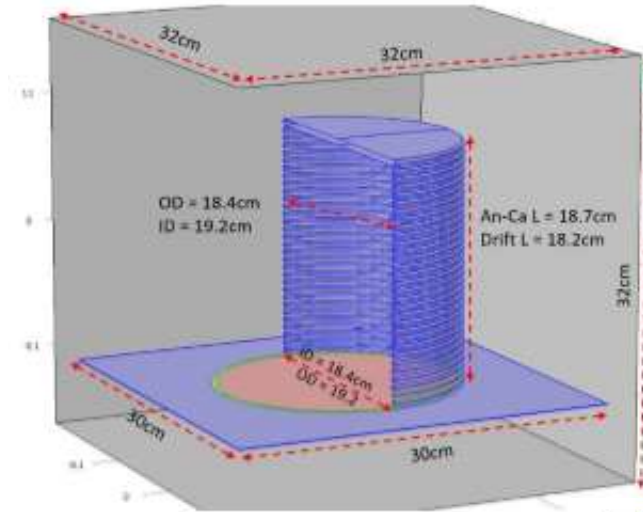
## 工作原理



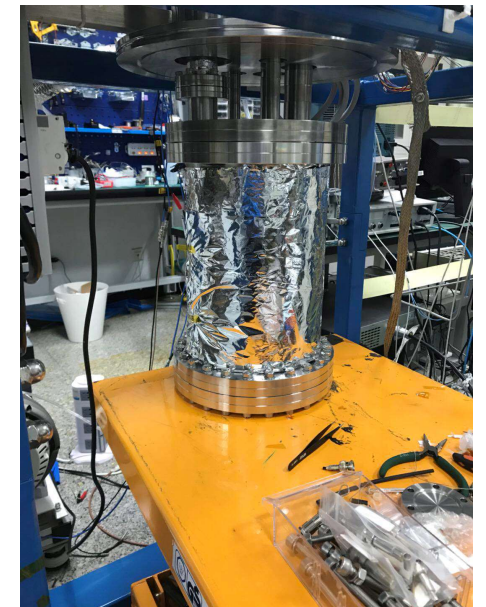
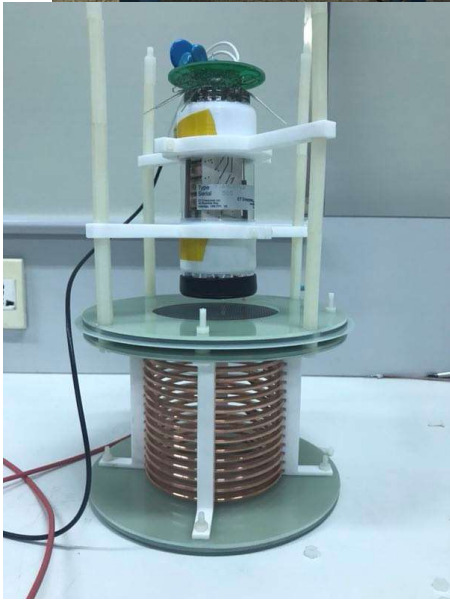
不测量S1光，仅仅测量S2光，数能量。

# 成型环的设计及电场模拟

成型环数：16  
气体间距：8mm  
液体间距：106mm  
整体外径：180mm  
整体内径：90mm







# 下步工作计划

## 明年6月份之前

- 测量宇宙线信号 ( GeV )
- 500 $\mu$ Ci  $^{241}\text{Am}$  60keV gamma
- X射线源测试 ( 5.9keV $^{55}\text{Fe}$ 源 )

## 2018年6月份之后

- SiPM 和PMT的比较
- 光信号和电信号的比较 ( triple-GEM , TGEM , Micromegas... )
- 建一个10kg左右的prototype

谢谢大家！