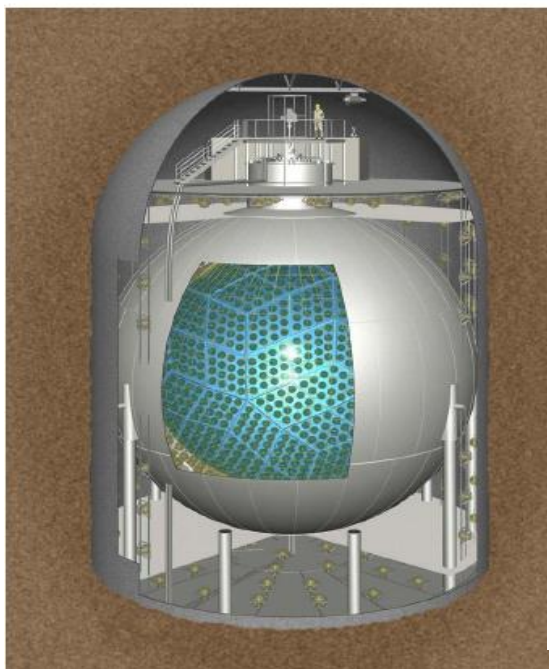
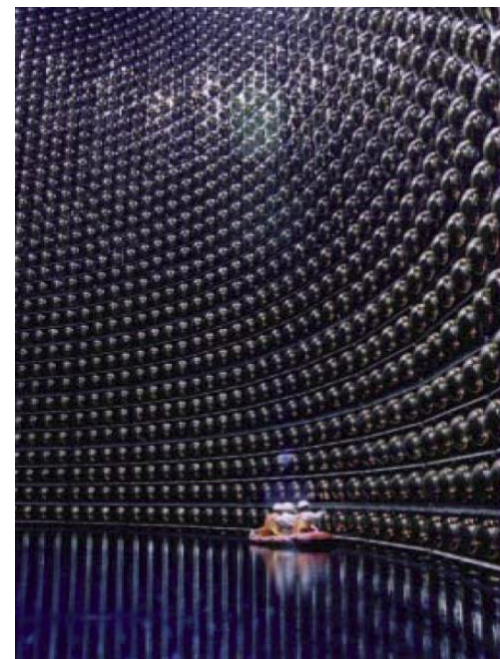
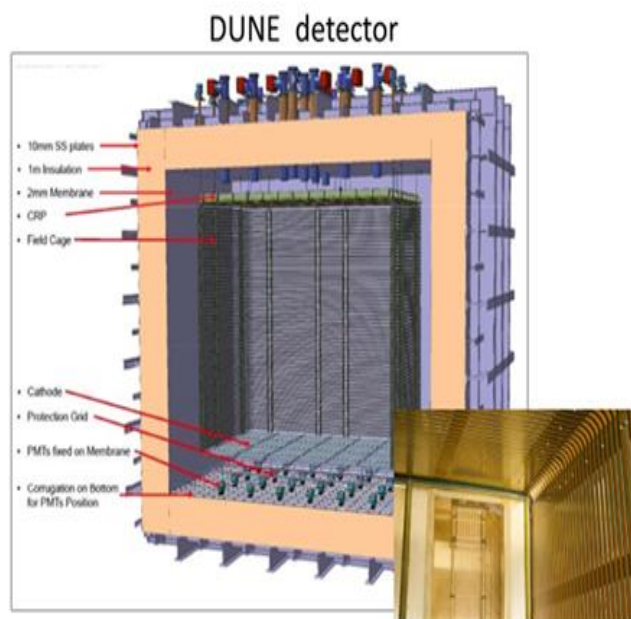


中微子实验的物理基础与技术

李 金, IHEP



KamLAND, (1kt)



SK, (50kt)

内容

- 一，中微子实验的基础物理
- 二，中微子探测的基本技术

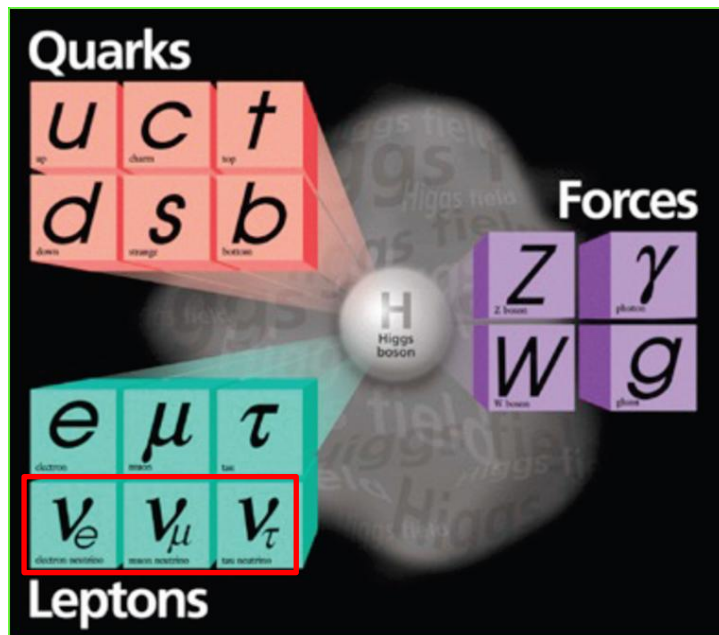
中微子研究是重大前沿课题

- 中微子充满宇宙,很有可能是暗物质的一种. 中微子是**宇宙中举足轻重**的重要成份;
 - 中微子是微观世界**最基本的单元之一**. 虽然质量最小,作用最弱,但对粒子物理发展的**影响则巨大**. 目前还是一个超出标准模型的**迷**;
 - 中微子又是极为**特殊的物理探针**. 它可以将几万光年以外星体的信息带到地球,也可以将太阳内部的信息传递给人类……;
- 中微子物理是当前基本粒子物理,宇宙学和天体物理的重要前沿课题.
 - 既关系到微观粒子结构和相互作用,又关系到宏观宇宙的起源演化,
 - 既是研究的微观对象,又是研究宏观世界的独特工具,

中微子在两个截然不同的世界里却扮演着了非同小可的角色,
是**联系着两个世界的重要纽带**.

高效准确探测中微子, 发展探测技术至关重要

幽灵粒子-三代中微子



性质

物质最基本单元
中性不带电
弱作用
三代中微子（味道，质量）
长寿命，大量存在
中微子振荡

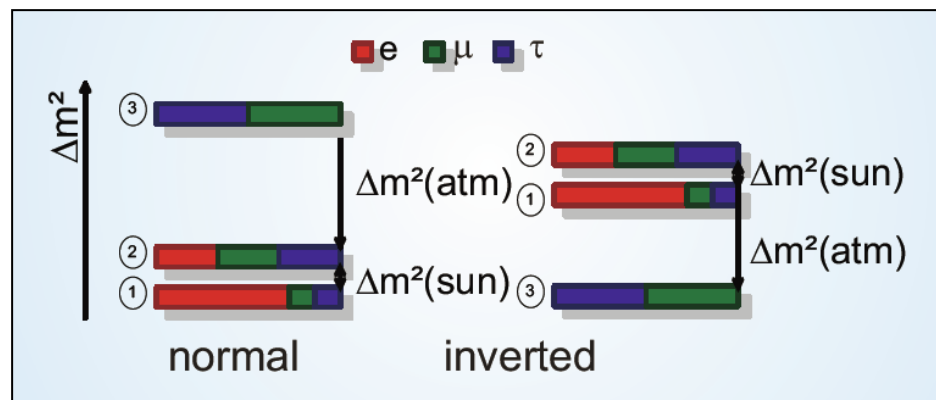
问题

左旋/右旋？
质量？ 质量排序？
Dirac /Majorana 粒子？

$$\begin{pmatrix} \nu_e \\ \nu_\mu \\ \nu_\tau \end{pmatrix} = U_{PMNS} \begin{pmatrix} \nu_1 \\ \nu_2 \\ \nu_3 \end{pmatrix}$$

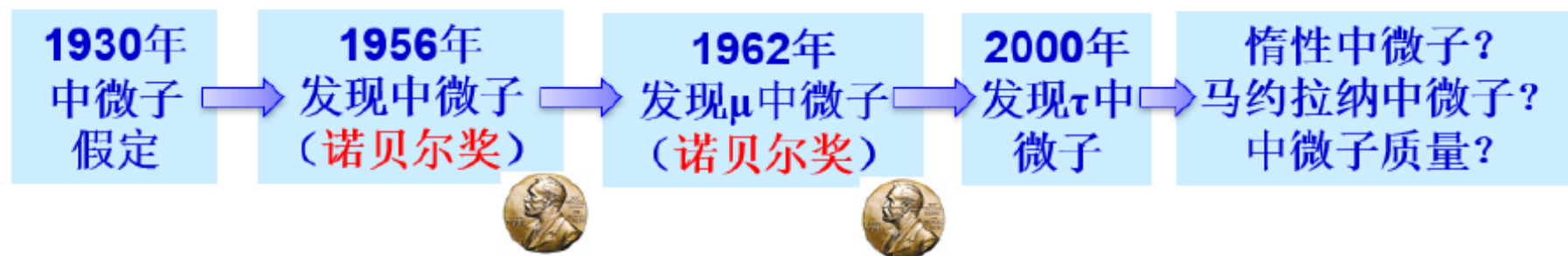
flavor states

mass states

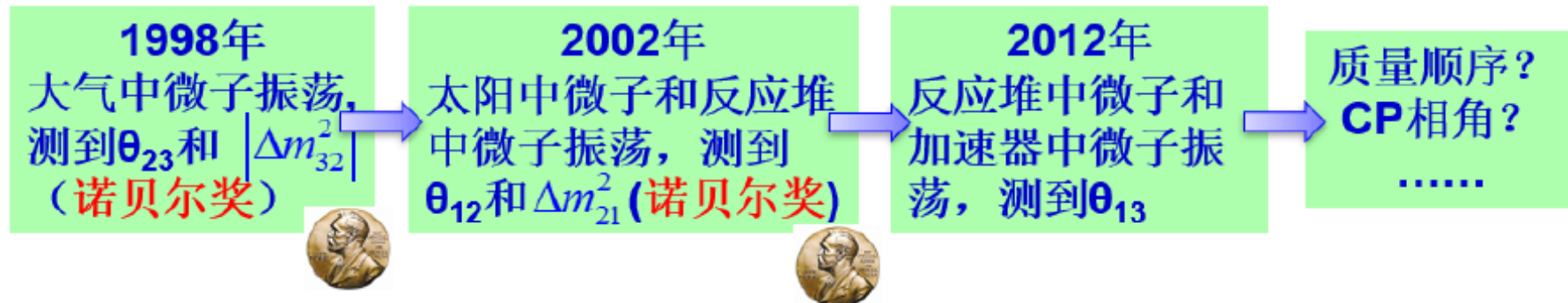


中微子研究历史悠久

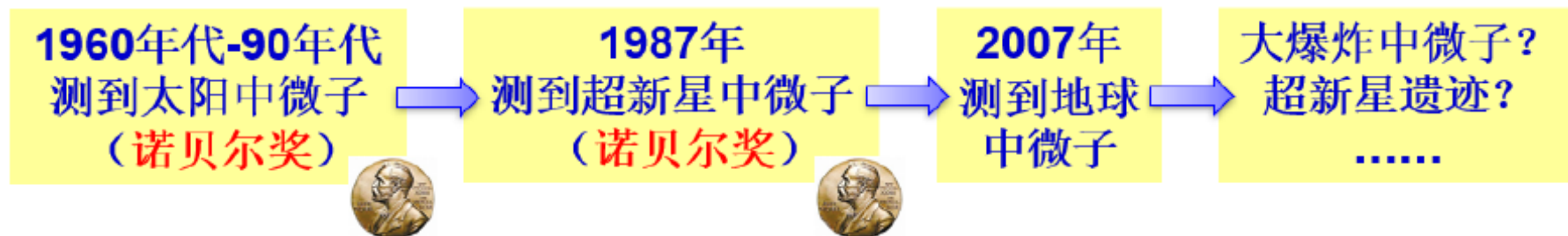
◆ 中微子的发现及其性质



◆ 中微子振荡



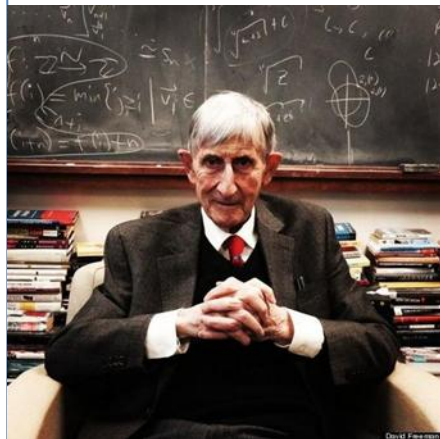
◆ 中微子：探索自然界的工具



“新的科学方向更多的是由新的探测技术来推动而不是理论，新的理论可以解释已被发现的自然现象，而新的观测技术可以发现新的未知的物理现象。

(New directions in science are launched by new tools much more often than by new concepts. The effect of a concept-driven revolution is to explain old things in new ways. The effect of a tool-driven revolution is to discover new things that have to be explained.) ”

—弗里曼·戴森 (Freeman Dyson)

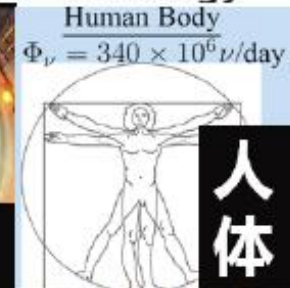
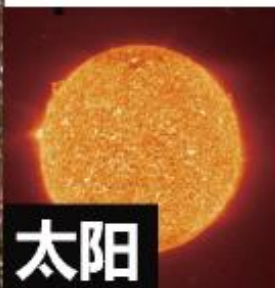
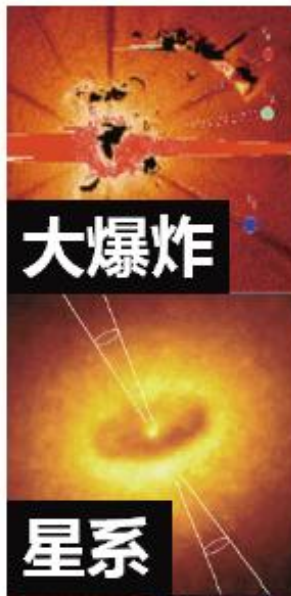
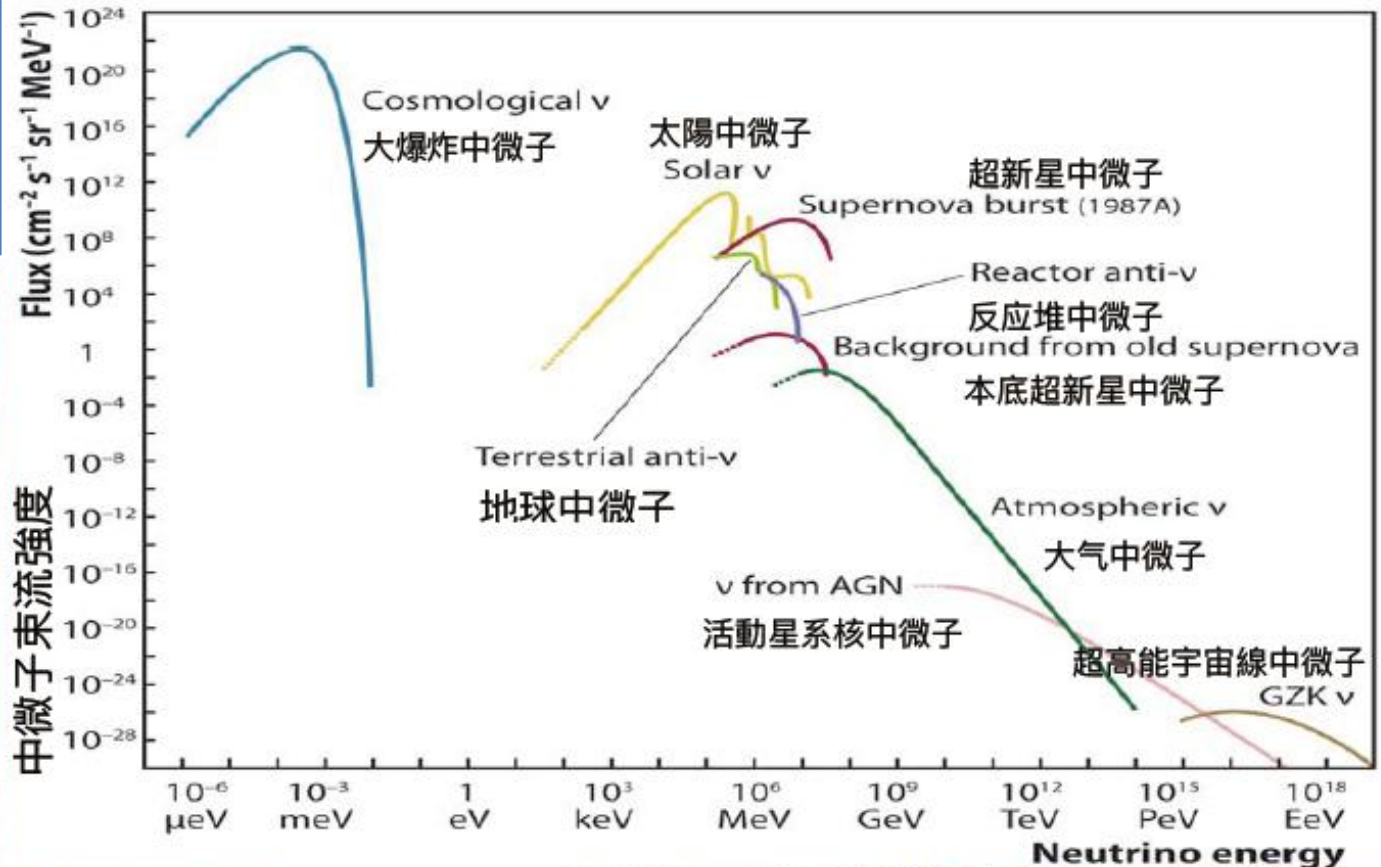


(这个时代最伟大的头脑之一)

一，中微子实验的基础物理

中微子的来源 (天然, 人工)

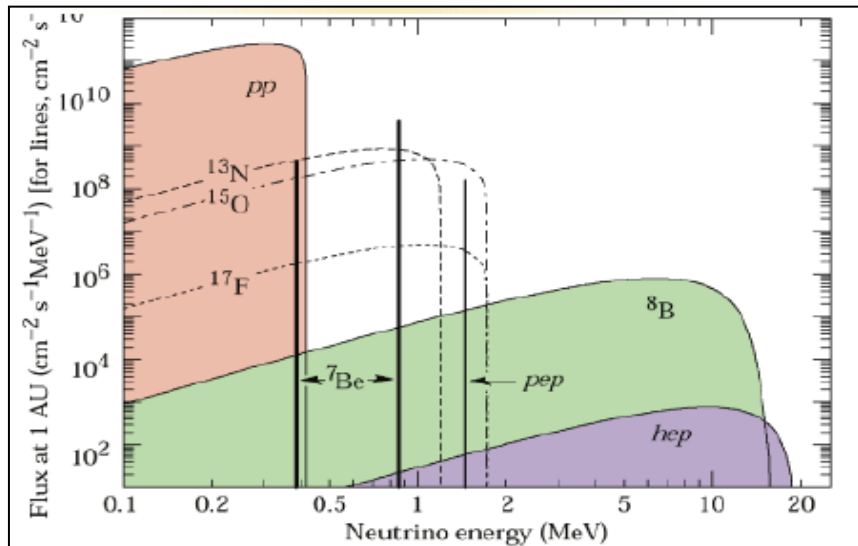
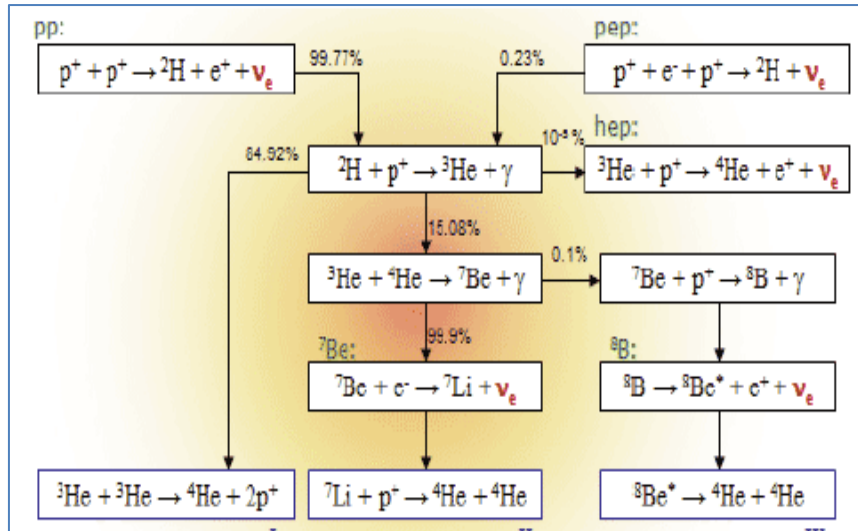
- 和光子一样多的中微子:
 $\approx 300/\text{cc}$
- 能量范围极广
20个量级
- 极少有单能中微子



太阳/大气中微子

(单能谱, 连续能谱, 高低能)

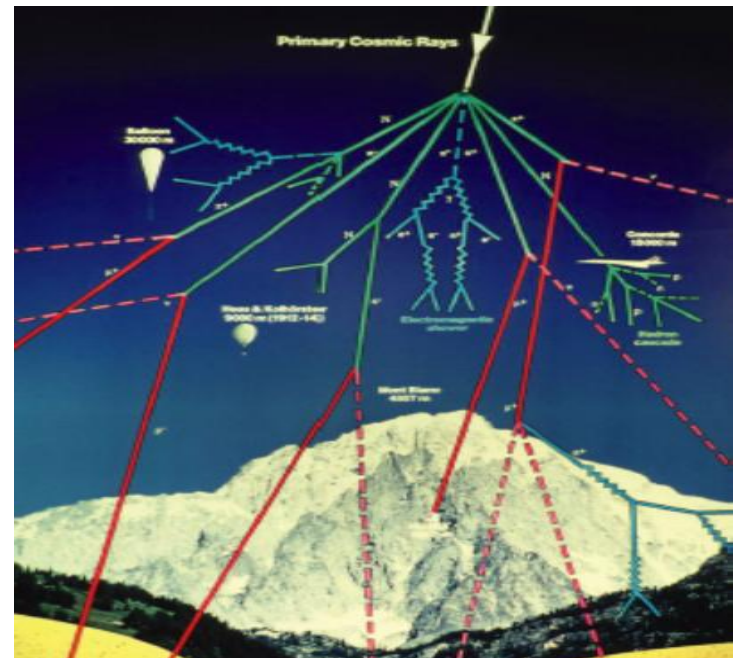
太阳标准理论模型



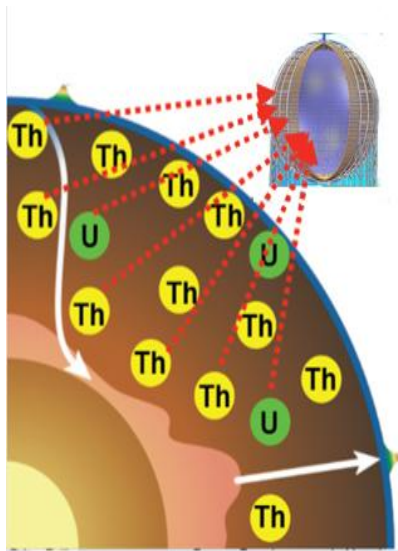
$$p + p \rightarrow d + e^+ + \nu_e \quad (1)$$

$${}^7\text{Be} + e^- \rightarrow {}^7\text{Li} + \nu_e \quad (2)$$

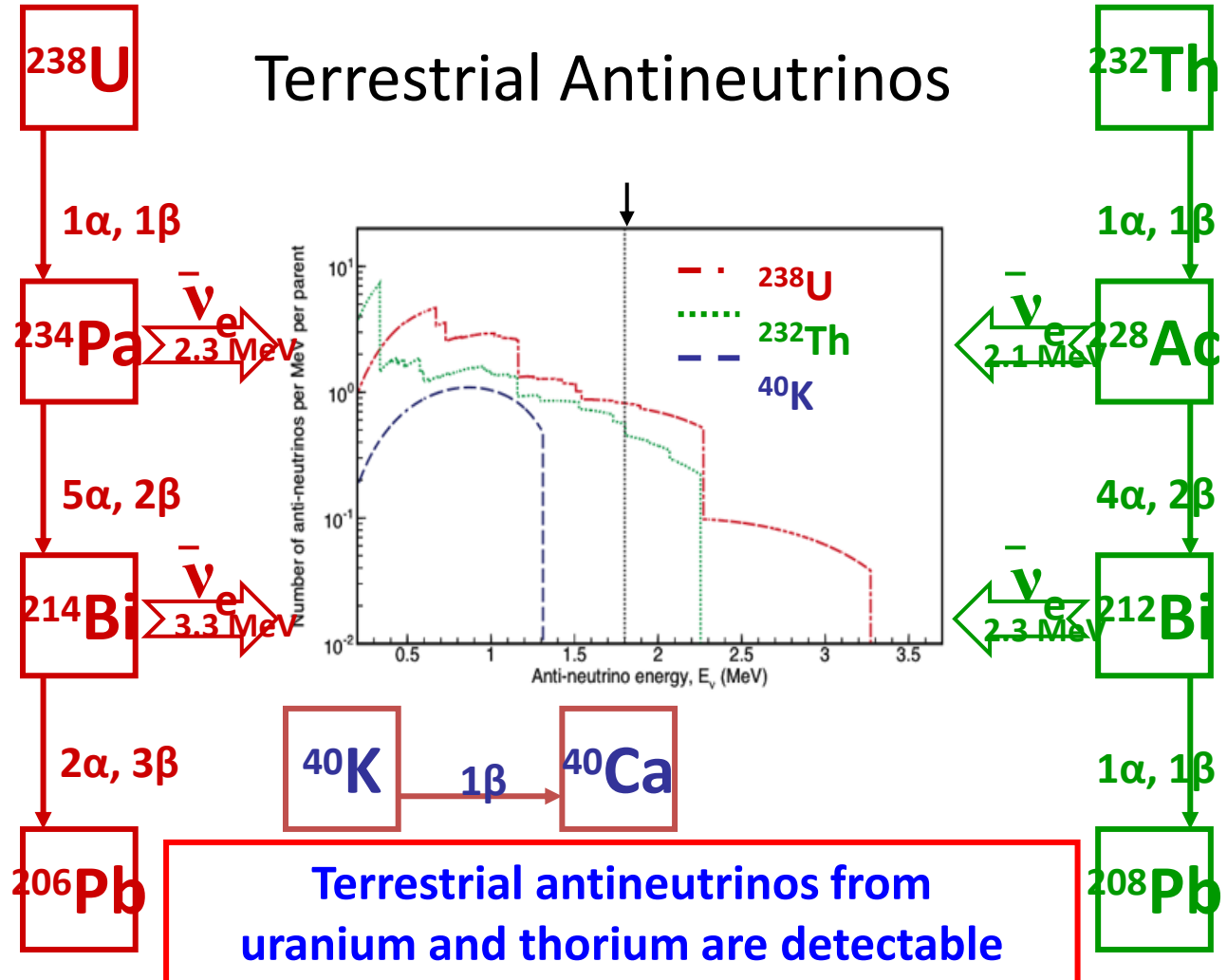
$${}^8\text{B} \rightarrow {}^8\text{Be} + e^+ + \nu_e \quad (3)$$



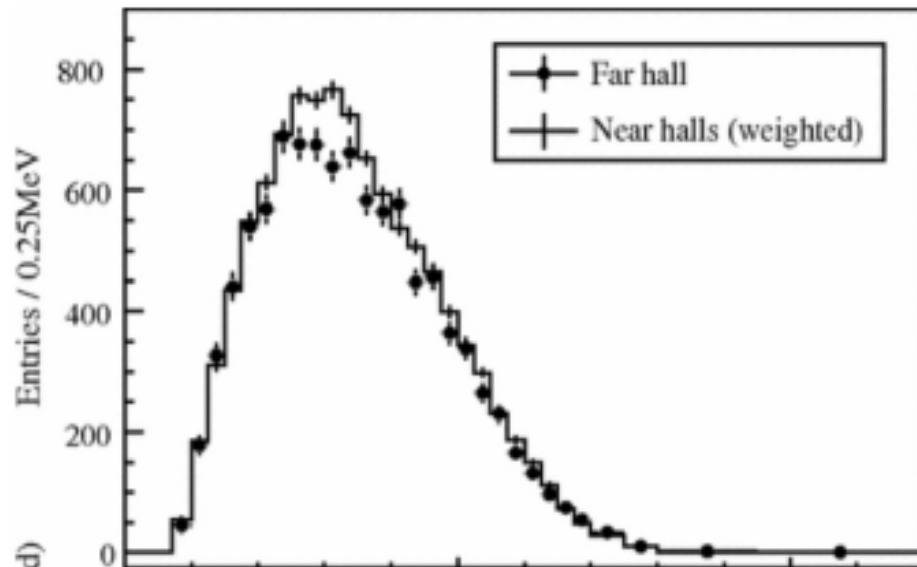
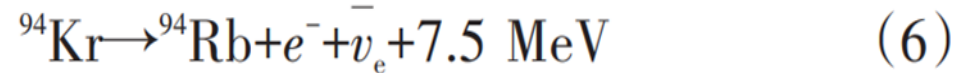
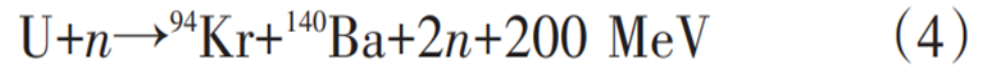
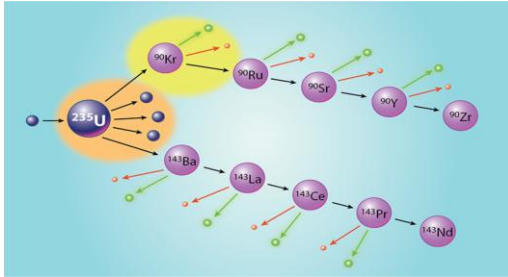
地球中微子 $\sim 10^6/\text{s}/\text{cm}^2$



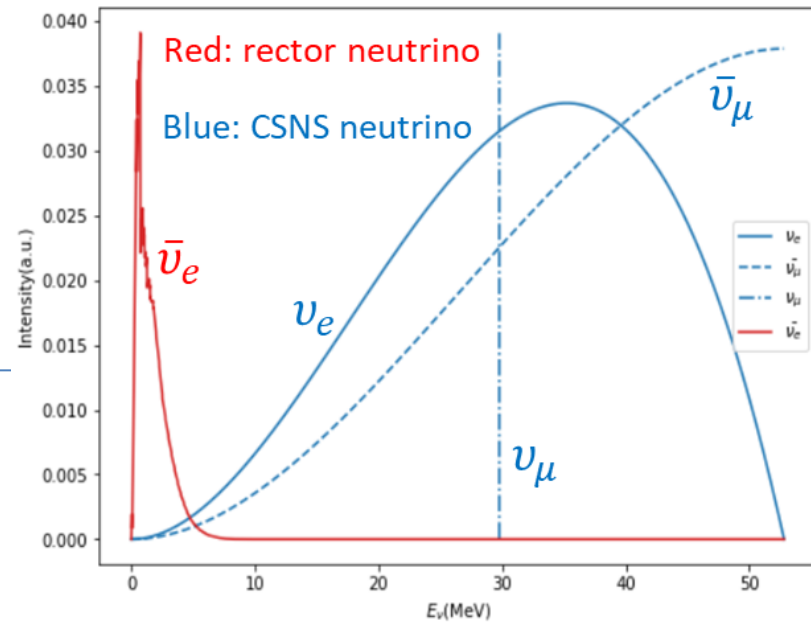
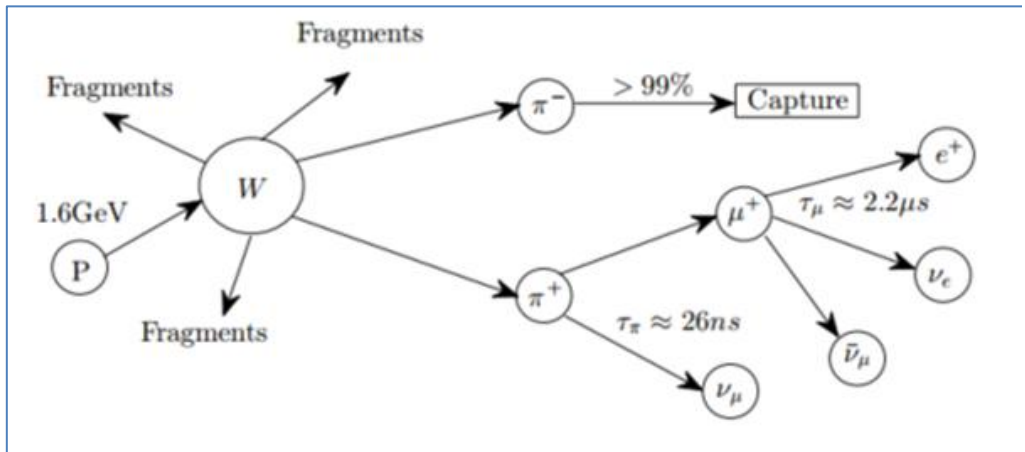
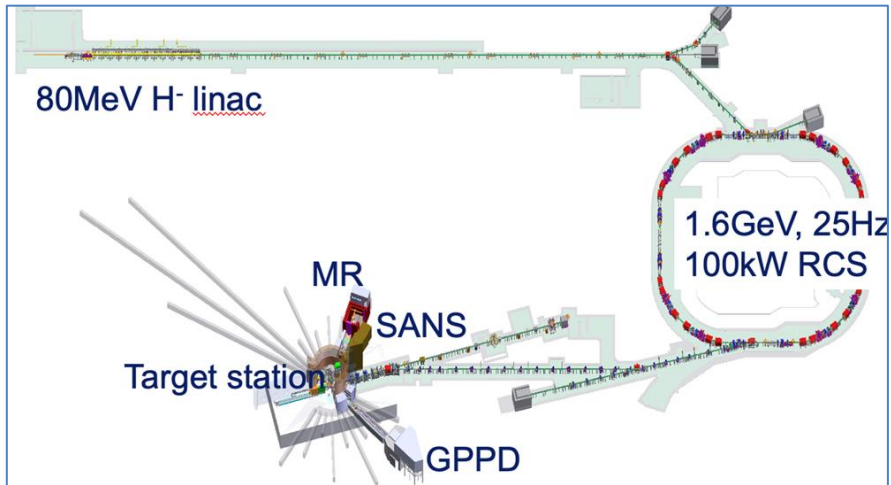
Terrestrial Antineutrinos



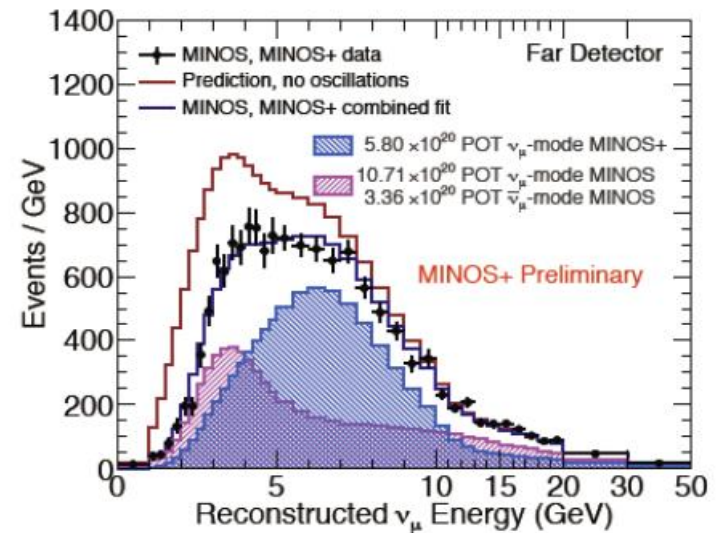
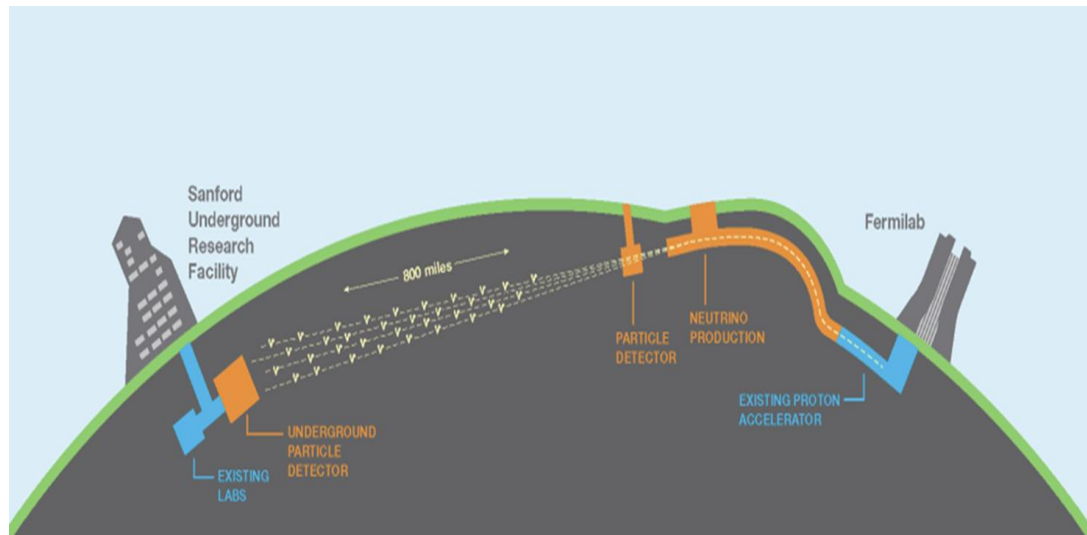
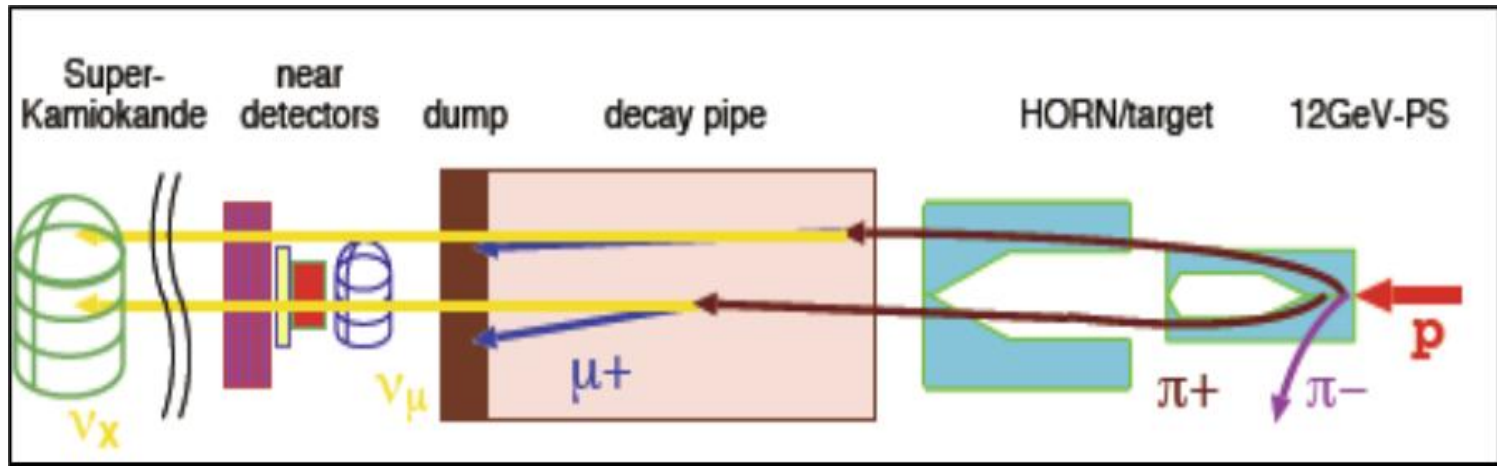
反应堆中微子



散裂中微子

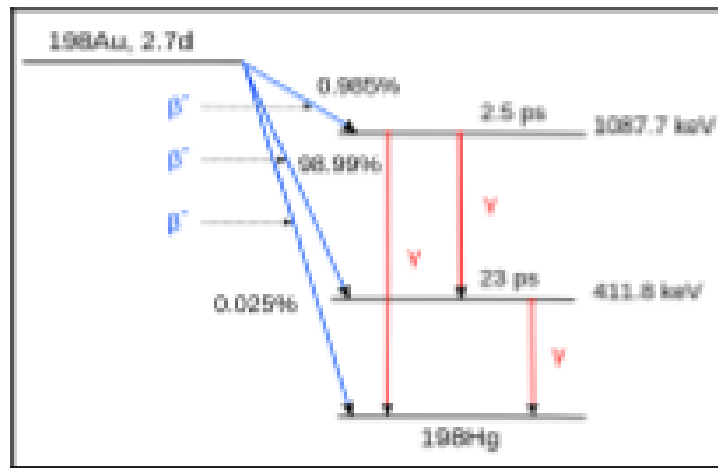


高能加速器中微子



中微子的基本来源

— $n/\pi/\mu/\tau$ 粒子的弱衰变

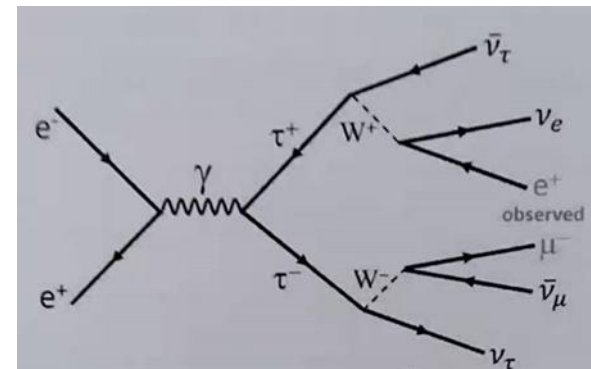
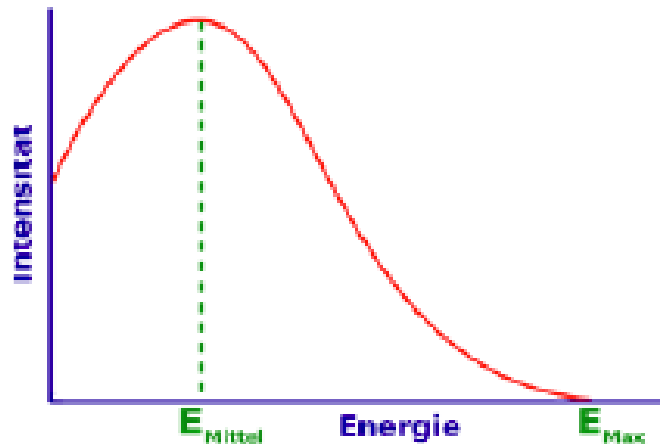


$$(A, Z) \rightarrow (A, Z + 1) + e + \nu$$

$$n \rightarrow p + e + \nu$$

$$\pi \rightarrow \mu + \nu$$

$$\mu \rightarrow e + \nu + \nu$$



三类中微子实验

(性质, 弱作用, 应用)

- 中微子振荡和参数测量
 - 加速器长基线
 - 反应堆短基线
- 质量测量& 质量顺序实验 0ν DBD
- 反常磁矩的测量
- 中微子与原子核的散射: 中微子相干散射
- 中微子电子散射: (高能与低能)
- 中微子深度非弹: 高能
- 大气中微子测量: 大气中微子反常和大气中微子振荡
- 太阳中微子测量: 能谱和强度
- 中微子丢失和中微子振荡
- 地球中微子测量: 能谱和强度

粒子物理实验

一，粒子物理实验能测量的粒子与物理量：

质量，寿命，共振宽度，截面，衰减常数
衰变分支比，强度（能谱， 时间， 位置），
都有客观的规律（某一种分布）。

实验测量就是获得这一分布或表征分布的物理量；

二，可以直接实验测量的量：

能直接测量的量只有：能量， 动量， 时间， 位置， 粒子辨别
可直接测量的粒子：Gamma, e , π , μ , K , p , ($n\cdots$); (α, β, γ)

三，粒子物理实验方案的设计：

物理方案的选择和优化；

实验探测技术的确定与优化；

本底的抑制；主动和被动

实验参数的选取和影响实验测量因素的控制；

测量精度或偏差的预测；

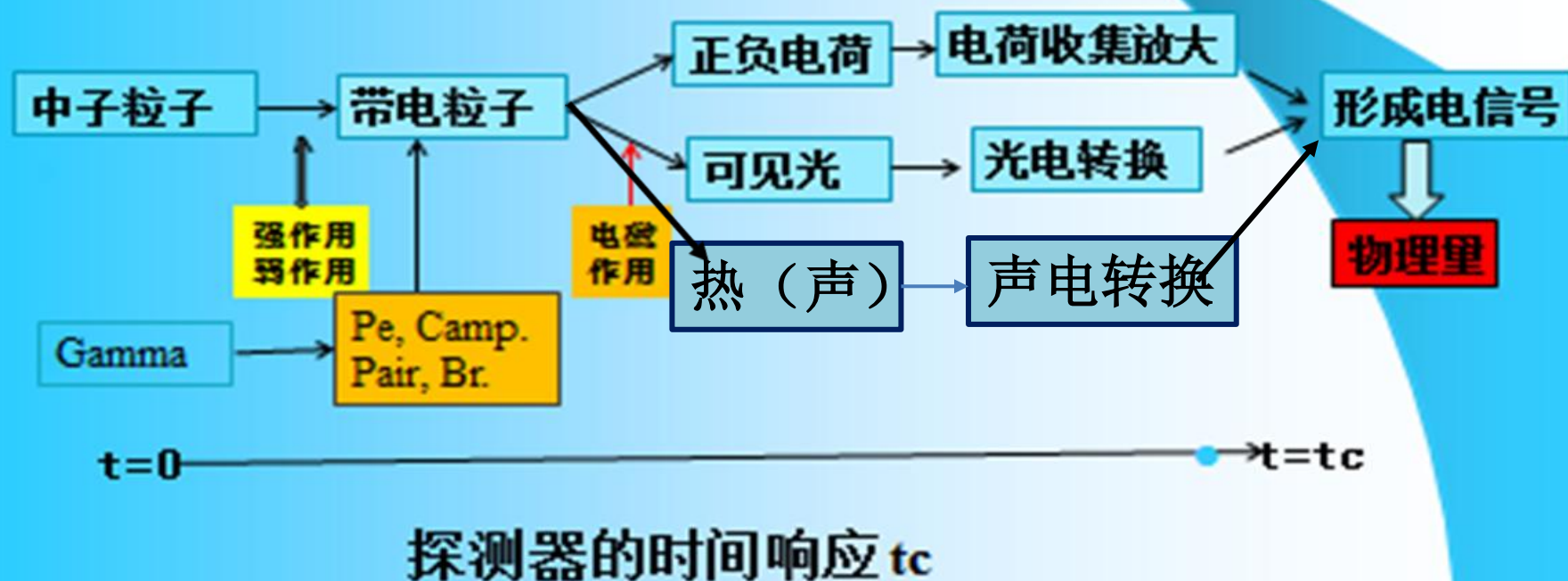
实验堆探测器主要性能的要求

- 1, 探测效率（入射粒子数目与输出粒子的电信号的比）
- 2, 响应函数（测量的物理量与输出电信号的关系）
- 3, 分辨率（物理量的测量精度）
- 4, 动态范围（可测的物理量的范围，特别是阈值）
- 5, 辨别本底事例的能力
- 6, 稳定性和可靠性，
- 7, 其它： 成本，复杂程度

要求： 物理原理要科学，
实验技术要可行，
工程建造易实现

实现对辐射与粒子的探测

- 1, 微观粒子的探测借助于**粒子与宏观物质的相互作用**实现探测。
- 2, 带电粒子与物质之间**电磁相互作用**的表现以及相关的性质成为人类探测微观带电粒子的**物理基础**。



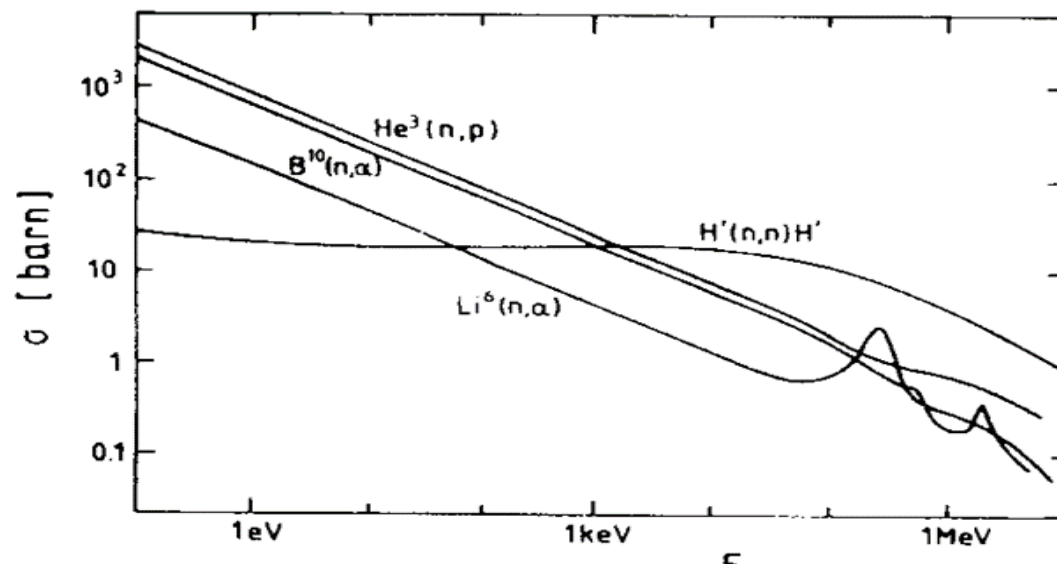
中性粒子一般要经过**转换**才能被探测

中性强子探测中的转换

从热中子到几个MeV能量的中子, 用如下的触瞬发核反应常被用来探测中子:



上述三个反应的Q值分别为4.76MeV、2.78MeV 和0.77 MeV



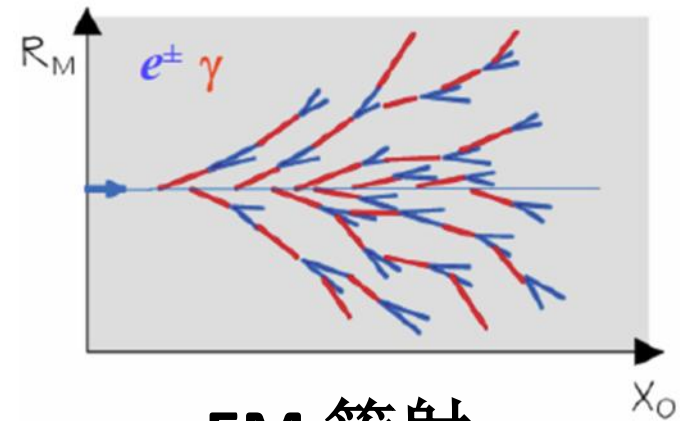
Gamma探测中的转换过程

光电效应；康普顿散射；电子对产生；

$$\sigma_{pe} = Z^5 \alpha^4 \left[\frac{m_e c^2}{E} \right]^N \quad N=7/2, 1$$

$$E_{\gamma'} = \frac{E_{\gamma} m_e c^2}{m_e c^2 + E_{\gamma} (1 - \cos \theta)}$$

$$\sigma_{pair} \approx \frac{7}{9} \frac{A}{N_A} \frac{1}{X}$$



EM 簇射

EM簇射的探测确定 Gamma的能量， 位置和方向；

中微子探测中的转换（弱作用）

1, CC带电流反应: $\nu + p \rightarrow l + n$

$$\nu_e + p \rightarrow e^+ + n$$

$$\nu_\mu + p \rightarrow \mu^- + n ;$$

$$\nu_\mu + N \rightarrow \mu^- + X(\text{shower})$$

2. NC中性流反应

$$\nu_\mu + N \rightarrow \nu_\mu + X(\text{shower})$$

3. 与核子的非弹性散射

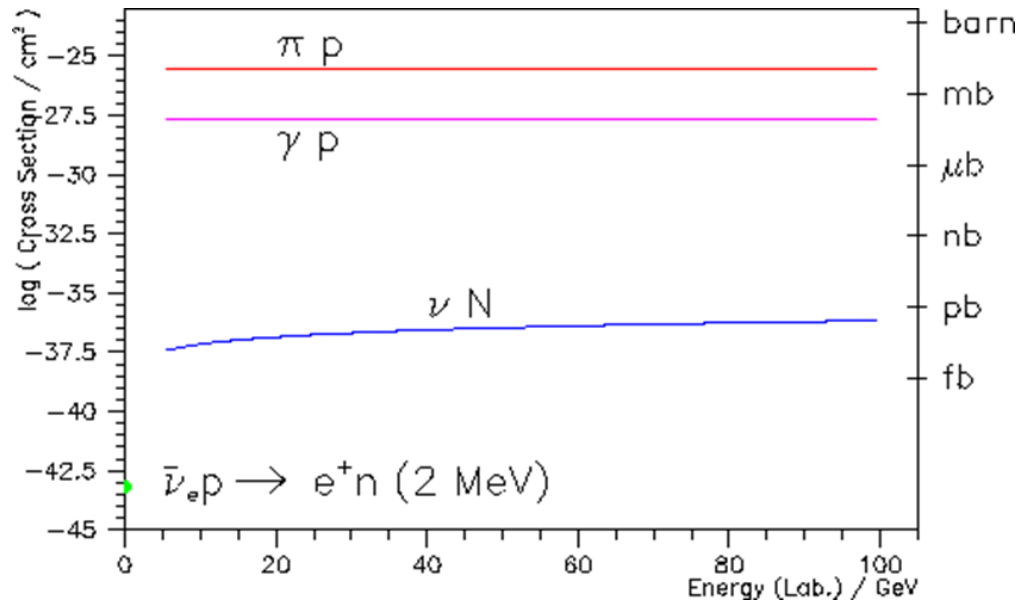
$$\nu_e + (A, Z) \rightarrow e^+ + (A, Z-1)$$

4. 中微子电子散射反应

$$\nu_e + e \rightarrow \nu_e + e$$

5, 中微子原子核散射 $\nu_e + (A, Z) \rightarrow \nu_e + (A, Z)$

中微子反应截面



$\Rightarrow \lambda(\text{H}_2\text{O}) \approx 250 \text{ 光年!}$

对中微子实验的挑战：

“如何应对如此小的截面？”

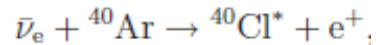
需要建立大规模的探测器，

低事例率的实验

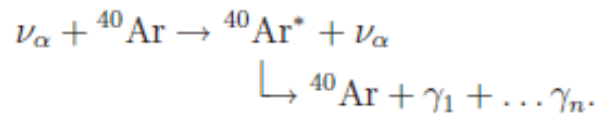
↳ 需要低本底，低成本！

中微子反应截面与能量有关

➤ Charged current (CC) interactions on Argon



➤ Neutral current (NC) interactions on Argon



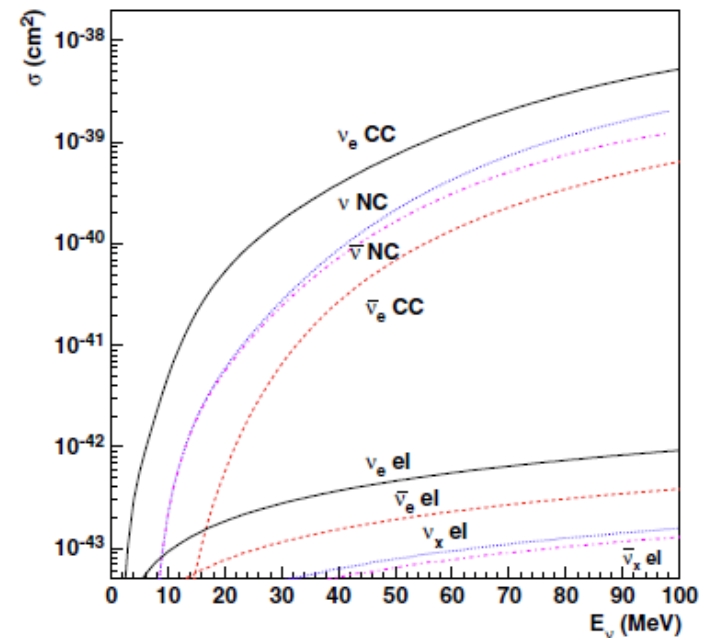
➤ Elastic scattering interactions

$$\sigma(\nu_e e^- \rightarrow \nu_e e^-) = 9.20 \times 10^{-45} (E_\nu / \text{MeV}) \text{ cm}^2,$$

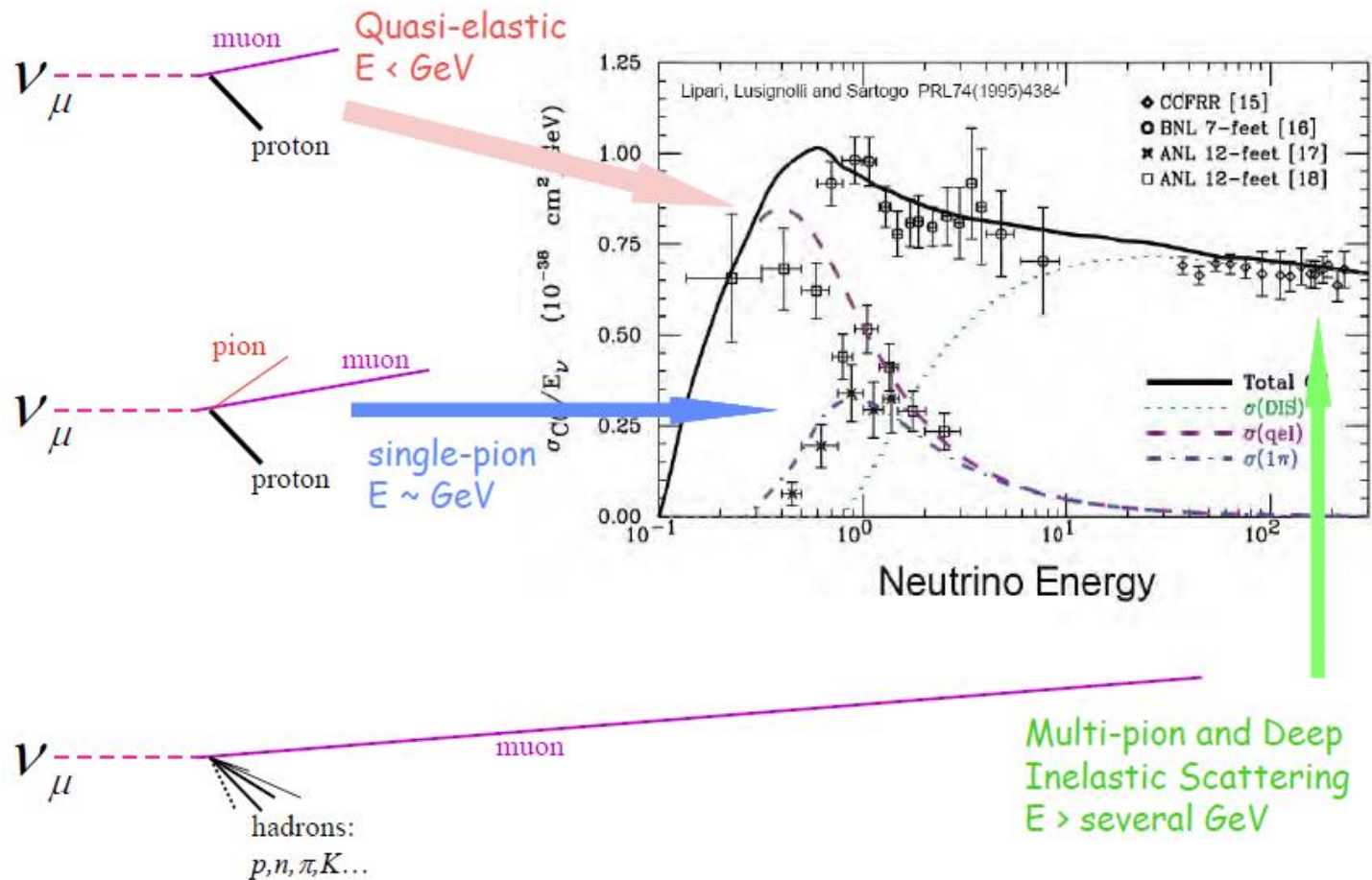
$$\sigma(\bar{\nu}_e e^- \rightarrow \bar{\nu}_e e^-) = 3.83 \times 10^{-45} (E_\nu / \text{MeV}) \text{ cm}^2,$$

$$\sigma(\nu_{\mu,\tau} e^- \rightarrow \nu_{\mu,\tau} e^-) = 1.57 \times 10^{-45} (E_\nu / \text{MeV}) \text{ cm}^2,$$

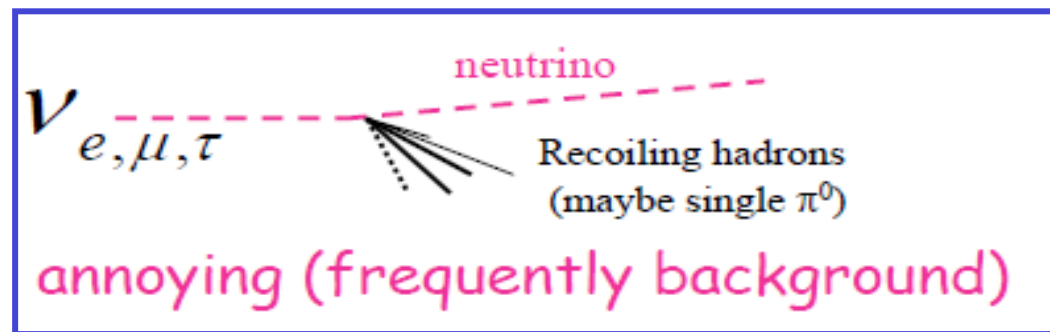
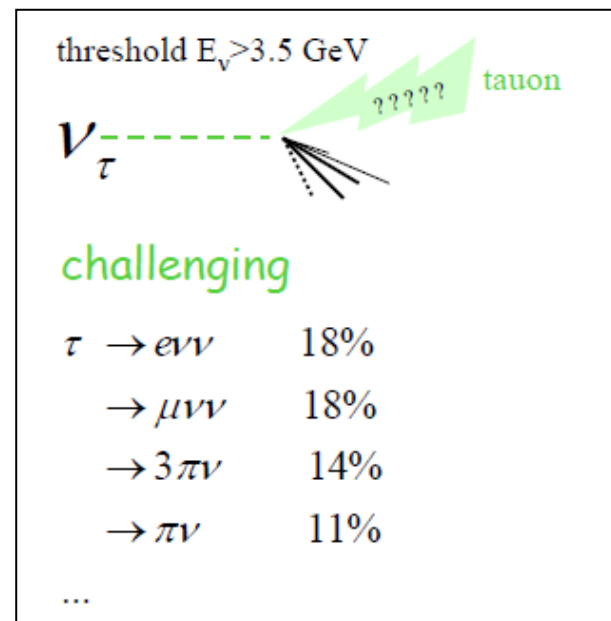
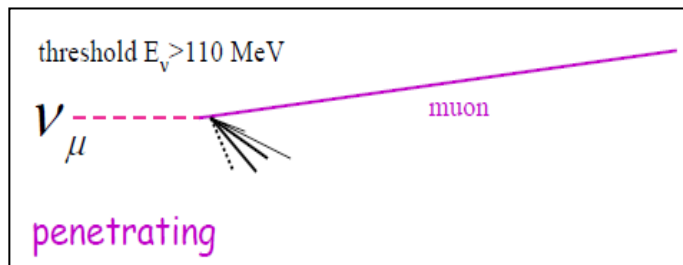
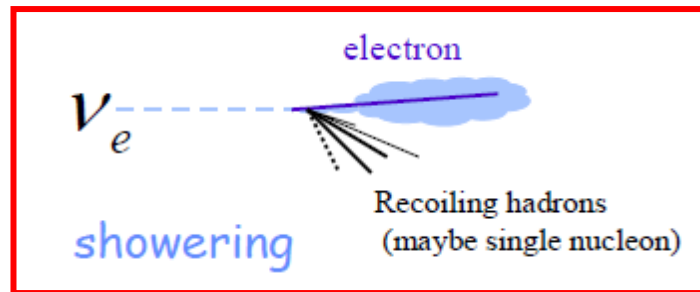
$$\sigma(\bar{\nu}_{\mu,\tau} e^- \rightarrow \bar{\nu}_{\mu,\tau} e^-) = 1.29 \times 10^{-45} (E_\nu / \text{MeV}) \text{ cm}^2.$$



中微子非弹反应截面与能量有关

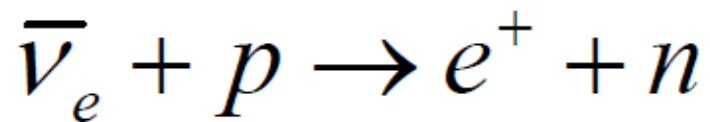


三类中微子反应中的产物



正负电子对撞中的 $e\mu$ 事例，确定 τ 中微子

黄金反应-反贝塔衰变反应



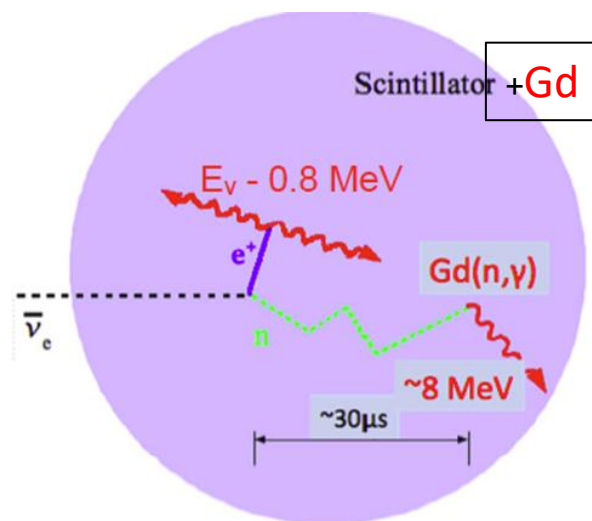
Excellent detection opportunities

$$E_{\text{thresh}} = 1.8 \text{ MeV}$$

$$E_{\text{prompt}} = E_\nu - 0.8 \text{ MeV}$$

$$E_{\text{capture}} = 2.2 \text{ MeV (on proton, 10-several } 100 \mu\text{s later)}$$

$$\sigma = 0.0952 \left(\frac{E_e p_e}{1 \text{ MeV}^2} \right) \times 10^{-42} \text{ cm}^2 \sim 5 \times 10^{-43} \text{ cm}^2$$



目的？

中微子探测的特殊性

$$Rate = \Phi \times \sigma \times N_{targets}$$

$$\Phi(^8\text{B solar } \nu) = 6 \times 10^6 \text{ cm}^{-2} \text{ s}^{-1}$$

$$\Phi(\text{atm. } \nu) \approx 1 \text{ cm}^{-2} \text{ s}^{-1}$$

$$\sigma(\nu e) \sim 10^{-43} \text{ cm}^2 \text{ (10 MeV)}$$

$$\sigma(\nu N) \sim 10^{-38} \text{ cm}^2 \text{ (1 GeV)}$$

$$3 \times 10^{32} \text{ electrons/kton}$$

$$6 \times 10^{32} \text{ nucleons/kton}$$

$\Rightarrow$ 10's events per day in 22.5 kton Super-K detector

规模大，技术简要，工作可靠，成本低廉

二，中微子探测的基本技术

不同能量中微子采用不同的探测技术

※ 0.1-1 keV

➤ R&D: 超低温量热探测技术

※ keV-MeV

➤ 以前采用: 辐射化学技术 (太阳中微子Cl, Ga) $\nu_e + {}^n\text{X} \rightarrow {}^n\text{Y}^*$

➤ 现在使用: 实时+能量测量的方法:

固体闪烁体或半导体探测器 $\nu_e + e \rightarrow e + \nu_e$

※ MeV-GeV

➤ 水Cherenkov探测器, 液体闪烁计数器

※ GeV-TeV

➤ 高能物理实验探测系统

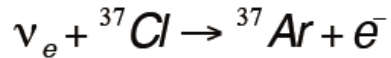
※ (UHE):天体物理超高能

➤ 特殊方案: 水/冰 Cherenov, 电磁波/声波, 宇宙线大气簇射..

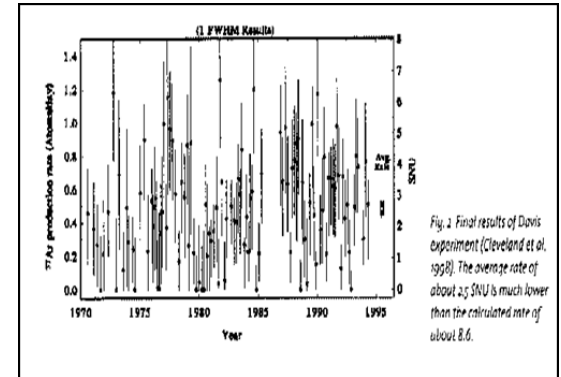
太阳中微子辐射化学实验

Ray. Davis Jr. (U. Penn) :

1968经典的“氯”的实验

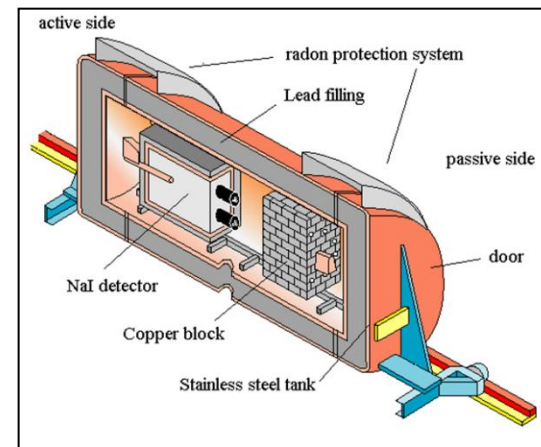
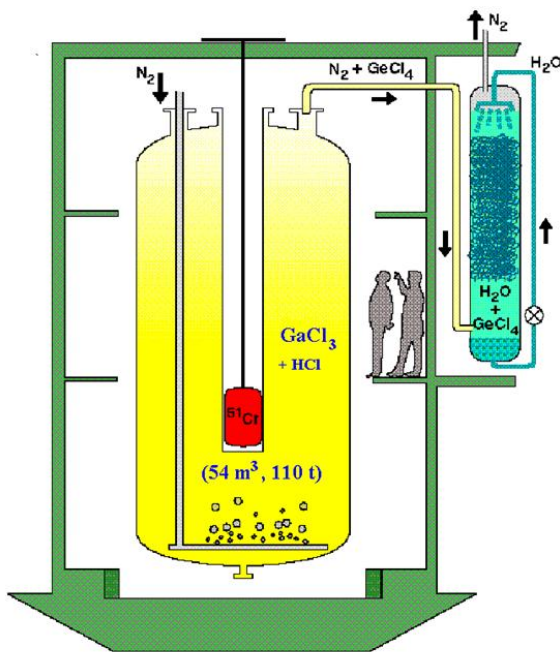


100,000加仑（615）吨液态四氯乙烯（Cl₃₇）作为探测器，约每4天1个中微子被捕获，氯原子变成放射性的氩原子（Ar₃₇）。持续25年，通过探测氩原子的放射性，戴维斯探测到了太阳中微子（只有巴考尔预言的1/3）。2002获诺贝尔奖。



从30.3 吨Ga (12吨 ⁷¹Ga) 靶(10²⁹原子)中的抽取30个原子

GALLEX: $\nu_e + {}^{71}\text{Ga} \rightarrow {}^{71}\text{Ge}$, 探测 ⁷¹Ge 的X-rays



1999, After 5.5 years of data taking, GALLEX ended its experimental phase. The solar neutrino production rate, 76.4 ± 8 SNU, represents about 55% of the predicted rate.

第二节，中微子探测的基本技术 (转换与探测)

- 2. 1, 闪烁探测器
- 2. 2 Cherenkov探测器
- 2, 3 半导体测量电离的探测
- 2. 4 气体和液体TPC技术
- 2. 5 超低温的量热器探测

中微子振荡实验与探测技术

(液闪, 水CK, 液氩)

Expt.	Detector (mass)	Source	L (Km)	$\langle E_\nu \rangle$ (GeV)	Location
MINOS [6, 7]	Iron Calorimeter (5.4 Kt)	Atmospheric Conventional Beam	15-13000 735	1-100 3, ~8, ~11	Soudan, US
ICARUS [6, 8]	Liquid Argon TPC (2.35 Kt)	Conventional Beam	732	17	LNGS, Europe
OPERA [6, 9]	Emulsion Cloud Chamber (1.65 Kt)	Conventional Beam	732	17	LNGS, Europe
T2K [10]	Water Cerenkov (50 Kt)	Superbeam (Off-axis)	295	0.76	Kamioka, Japan
NOνA [11]	Liquid Scintillator (50 Kt)	Superbeam (Off-axis)	812	2.22	US
D-CHOOZ [12]	Liquid Scintillator (11.3 t)	Reactor	1.05	0.004	France
SK-III [13]	Water Cerenkov (50 Kt)	Atmospheric Superbeam	15-13000 295	1-100 0.76	Japan
UNO [14]	Water Cerenkov (1 Mt)	Atmospheric Superbeam	15-13000 ~2500	1-100 ~0.5-7	US
Hyper-K [15]	Water Cerenkov (1 Mt)	Atmospheric Superbeam	15-13000 295	1-100 4.0	Japan
INO [16, 17]	Iron Calorimeter (50 - 100 Kt)	Atmospheric Superbeam/NF	15-13000 TBD	1-100 TBD	India

我国的大亚湾中微子, **JUNO** 等

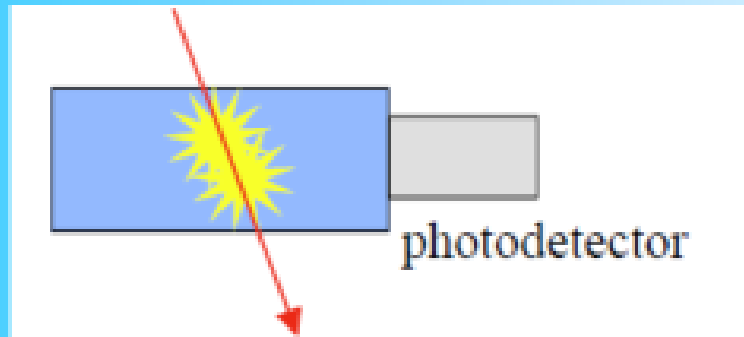
无中微子双贝塔衰变实验中的探测技术

HPGe, 液闪, TPC, 低温探测

核素	半衰期 $T_{1/2}^{0\nu}$ (年)	有效中微子质量 $\langle m_{\beta\beta} \rangle$ (meV)	实验	探测器技术
^{48}Ca	$>5.8 \times 10^{22}$ [25]	3500-22000	ELEGANT-IV	CaF ₂ (Eu) 闪烁体
^{76}Ge	$>8.0 \times 10^{25}$ [26]	120-260	GERDA	高纯锗探测器
	$>1.9 \times 10^{25}$ [27]	240-520	Majorana-Demonstrator	高纯锗探测器
^{82}Se	$>3.6 \times 10^{23}$ [28]	890-2430	NEMO-3	径迹探测器
^{96}Zr	$>9.2 \times 10^{21}$ [29]	7200-19500	NEMO-3	径迹探测器
^{100}Mo	$>1.1 \times 10^{24}$ [30]	330-620	NEMO-3	径迹探测器
^{116}Cd	$>1.0 \times 10^{23}$ [31]	1400-2500	NEMO-3	径迹探测器
^{130}Te	$>1.5 \times 10^{25}$ [32]	110-520	CUORE	晶体微量热器
^{136}Xe	$>1.1 \times 10^{26}$ [33]	61-165	KamLAND-Zen	液体闪烁体
	$>1.8 \times 10^{25}$ [34]	150-400	EXO-200	时间投影室
^{150}Nd	$>2.0 \times 10^{22}$ [35]	1600-5300	NEMO-3	径迹探测器

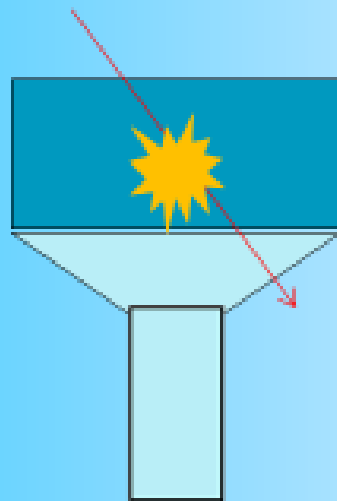
2. 1, 闪烁探测器

闪烁探测器基本结构



组成

- 闪烁体 (+反射避光)
- 光导
- 光电转换器件
- WLS



闪烁体种类:

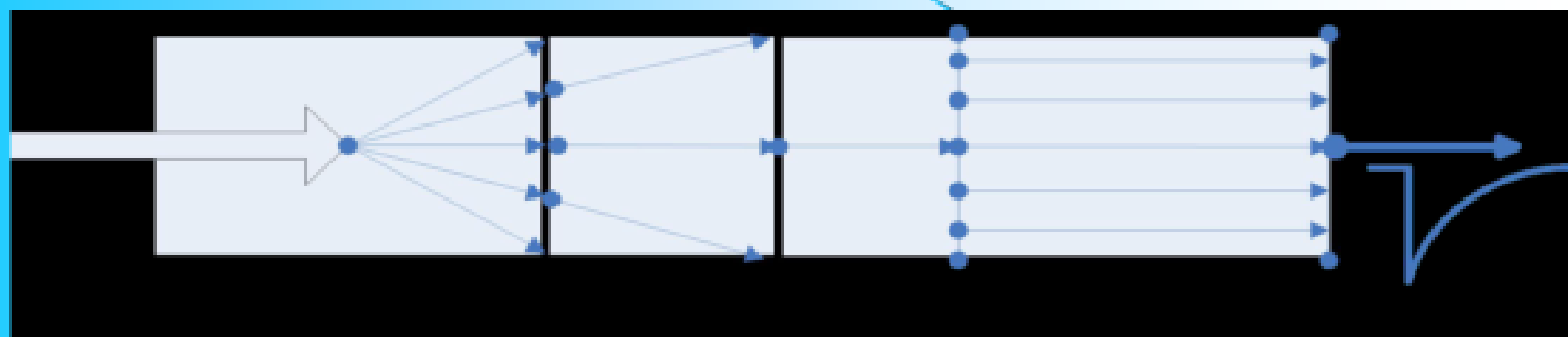
- 有机闪烁体
- 无机闪烁晶体
- 气体闪烁
- 液体闪烁

基本结构中的主要物理过程

闪烁体

光导

光电转换器件



带电粒子

可见光

可见光

光电子

电放大

电信号

闪烁体的作用：

带电粒子电离与激发
原子退激发发出荧光
荧光的传输

光导作用

荧光的收集与传导
闪烁体与光电器件匹配与的光耦合

光电器件作用：

光收集与光电转换
光电子的放大
电信号的形成，

不同闪烁探测器的特点

无机闪烁晶体：密度大，对Gamma的探测效率高，
发光效率高，光产额高
能量/能谱测量；
体积小，成本比较高

有机闪烁固体/液体：密度低，时间响应快
发光效率低，光产额低
带电粒子的时间测量
体积大，成本低

惰性液体闪烁体：纯度高，辐射本底低
温度度很低
量能器，TPC

闪烁光探测

密度 (g/cm^3) ;
折射率 n ,
荧光光产额 (p/MeV ;
发光光谱 (nm) ;
自吸收;
荧光衰减时间 (ns) ;
辐射长度 (X_0) ;
耐辐射能力;
潮解;
工作温度;
成本;
...

中微子实验中的闪烁探测器

探测器	国家	重量/体积	反应堆功率	探测能力	IBD反应基体	探测单元	特点
SONGS1	美国	3 t	3 GW	距离反应堆 24 m处400/d	掺钆液体闪烁体	4	包含反符合屏蔽系统
NEOS	韩国	1008 L	3 GW	距离反应堆 24 m处1976/d	掺钆液体闪烁体	1	包含反符合屏蔽系统
PANDA	日本	360 kg	3 GW	距离反应堆 30 m处400/d	塑料闪烁体, 钆薄片	36	二维读出
NuLat	美国	1 t	—	—	Raghavan Optical Lattice, ^6LiF 闪烁体	320	延迟信号排除 本底, 三维读出
DANSS	俄罗斯	1 t	3 GW	距离反应堆 12 m处5000/d	聚乙烯固体塑料闪烁体, 掺钆中子俘获体	2500	多层二维读出, 信号编码读出
SoLid	英国	1.6 t	60 MW	—	聚乙烯甲苯, ^6LiF : ZnS 闪烁体	12800	二维读出
MiniCHANDLER	美国	80 kg	3 GW	距离反应堆 25 m处4/h	Raghavan Optical Lattice, ^6LiF 闪烁体	320	延迟信号排除 本底, 三维读出
SuperFGD	瑞士	—	—	—	聚苯乙烯, 对三联苯, 二苯基吡唑苯	无数个 1cm^3 独立单元	3D 打印, 三维 读出

中微子振荡实验与探测技术

(液闪, 水CK, 液氩)

Expt.	Detector (mass)	Source	L (Km)	$\langle E_\nu \rangle$ (GeV)	Location
MINOS [6, 7]	Iron Calorimeter (5.4 Kt)	Atmospheric Conventional Beam	15-13000 735	1-100 3, ~8, ~11	Soudan, US
ICARUS [6, 8]	Liquid Argon TPC (2.35 Kt)	Conventional Beam	732	17	LNGS, Europe
OPERA [6, 9]	Emulsion Cloud Chamber (1.65 Kt)	Conventional Beam	732	17	LNGS, Europe
T2K [10]	Water Cerenkov (50 Kt)	Superbeam (Off-axis)	295	0.76	Kamioka, Japan
NOνA [11]	Liquid Scintillator (50 Kt)	Superbeam (Off-axis)	812	2.22	US
D-CHOOZ [12]	Liquid Scintillator (11.3 t)	Reactor	1.05	0.004	France
SK-III [13]	Water Cerenkov (50 Kt)	Atmospheric Superbeam	15-13000 295	1-100 0.76	Japan
UNO [14]	Water Cerenkov (1 Mt)	Atmospheric Superbeam	15-13000 ~2500	1-100 ~0.5-7	US
Hyper-K [15]	Water Cerenkov (1 Mt)	Atmospheric Superbeam	15-13000 295	1-100 4.0	Japan
INO [16, 17]	Iron Calorimeter (50 - 100 Kt)	Atmospheric Superbeam/NF	15-13000 TBD	1-100 TBD	India

我国的大亚湾中微子, **JUNO** 等

新型高性能无机闪烁晶体

名称	光产额 ph/keV	衰减时间 ns	中心波长 (nm)	密度 g/cm ³	能量分辨 %@662keV	是否 潮解	自身 放射性
NaI:Tl	38	230	415	3.67	6-7	是	—
LaBr ₃ :Ce	70	16	360	5.07	2.6	是	La, Ac
LaBr ₃ :Ce, Sr	77	18, 82-2500	385	5.08	2.0	是	La, Ac
CeBr ₃	60	17	380	5.18	3.8	是	Ac/-
SrI ₂ :Eu	115	600-1600	435	4.55	2.8	是	—
CLYC	20	1, 50, 1000	370	3.31	4.3	是	—
GAGG	56	92,174	520	6.63	5-6	否	—

常用的无机和液体闪烁

Table A6.2 Properties of some inorganic scintillators

scintillator composition	density (g/cm ³)	index of refraction	wavelength of maximum emission (nm)	decay time constant (μs)	scintillation pulse height ¹⁾	notes	Photons/MeV
NaI	3.67	1.78	303	0.06	190	2)	4 × 10 ⁴
NaI(Tl)	3.67	1.85	410	0.25	100	3)	
CsI	4.51	1.80	310	0.01	6	3)	
CsI(Tl)	4.51	1.80	565	1.0	45	3)	1.1 × 10 ⁴
CaI(Na)	4.51	1.84	420	0.63	85	3)	
KI(Tl)	3.13	1.71	410	0.24/2.5	24	3)	
⁴ LiI(Eu)	4.06	1.96	470-485	1.4	35	3)	1.4 × 10 ⁴
CaF ₂ (Eu)	3.19	1.44	435	0.9	50		
BaF ₂	4.88	1.49	190/220 310	0.0006 0.63	5 15		
Bi ₄ Ge ₃ O ₁₂	7.13	2.15	480	0.30	10		6.5 × 10 ³ 2 × 10 ³ 2.8 × 10 ³
CaWO ₄	6.12	1.92	430	0.5/20	50		
ZnWO ₄	7.87	2.2	480	5.0	26		
CdWO ₄	7.90	2.3	540	5.0	40		
CsF	4.65	1.48	390	0.005	5	3)	
CeF ₃	6.16	1.68	300 340	0.005 0.020	5		
ZnS(Ag)	4.09	2.35	450	0.2	150	4)	
GSO	6.71	1.9	440	0.060	20		
ZnO(Ga)	5.61	2.02	385	0.0004	40	4)	
YSO	4.45	1.8	420	0.035	50		
YAP	5.50	1.9	370	0.030	40		

¹⁾ relative to NaI(Tl) ²⁾ at 80 K ³⁾ hygroscopic ⁴⁾ polycrystalline

PbWO ₄	8.28	1.82	440, 530	0.01			100
-------------------	------	------	----------	------	--	--	-----

LAr	1.4	1.29 ⁵⁾	120-170	0.005 / 0.860			
LKr	2.41	1.40 ⁵⁾	120-170	0.002 / 0.085			
LXe	3.06	1.60 ⁵⁾	120-170	0.003 / 0.022			4 × 10 ⁴

⁵⁾ at 170 nm

液体闪烁体工作原理

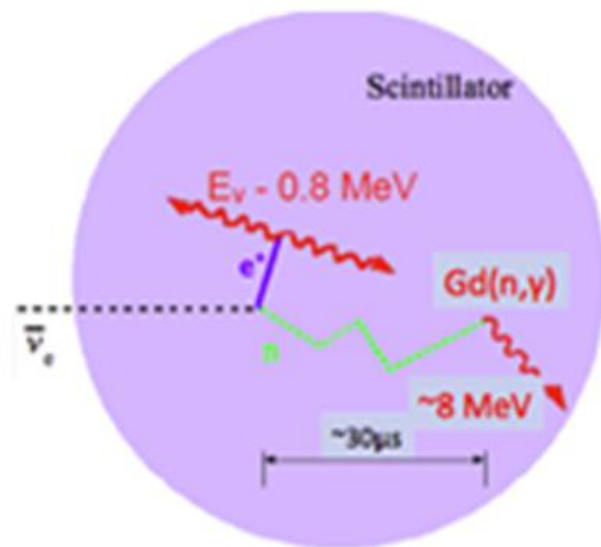
组份: 溶剂 + 溶质1 + 溶质2

原理: 溶剂电离激发 → 第一溶质荧光产生 → 第二溶质荧光产生 → 荧光被PMT接受和转换

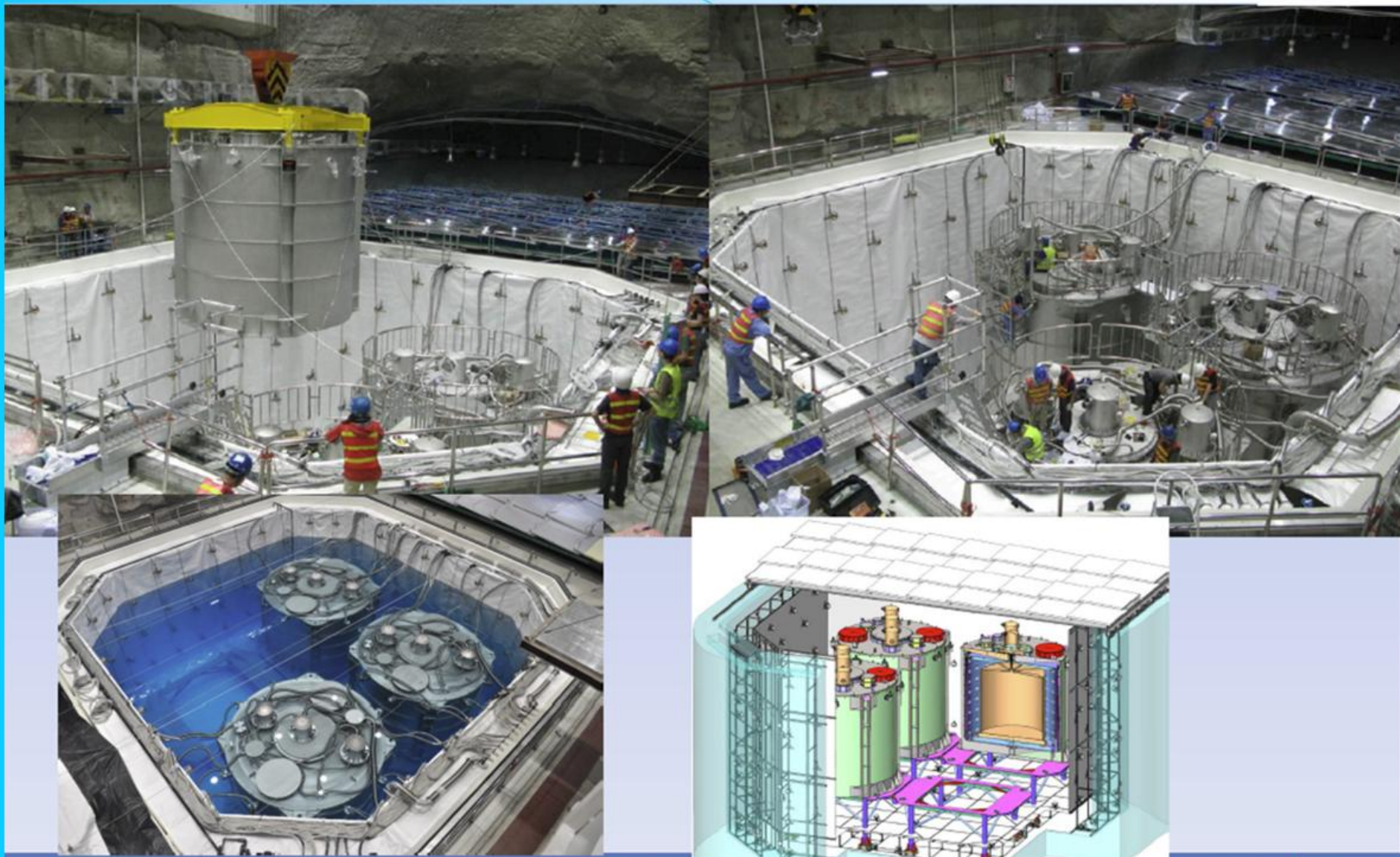
功能: 位置和能量的测量

性能: 探测效率; 分辨率(能量、位置);
事例鉴别 PID (n/r)

掺Gd液闪: 中微子转换; 中子慢化;
Gd将中子转换为gamma



大亚湾中微子液体闪烁探测器



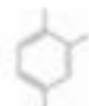
有机闪烁体的成分（液闪/塑闪）

有机溶剂 1g/cm³: 荧光量子效率低; 发光时间长; 波长短; 自吸收严重
 第一发光溶质1-5g/L: 提高溶剂发光效率; 溶质的S1低于溶剂的S1
 第二发光溶质10-20mg/L: 波长位移, 减少吸收, 匹配PMT

有机溶剂	发光时间 τ (ns)	荧光量子效率 η
	29	0.07
Benzene	33.6	0.1
Toluene	35.2	0.24
p-Xylene	33.3	0.22
Mesitylene	38.3	0.14
Pseudocumene	27.2	0.28



Toluene



Pseudocumene



PXE (phenyl xylethane)

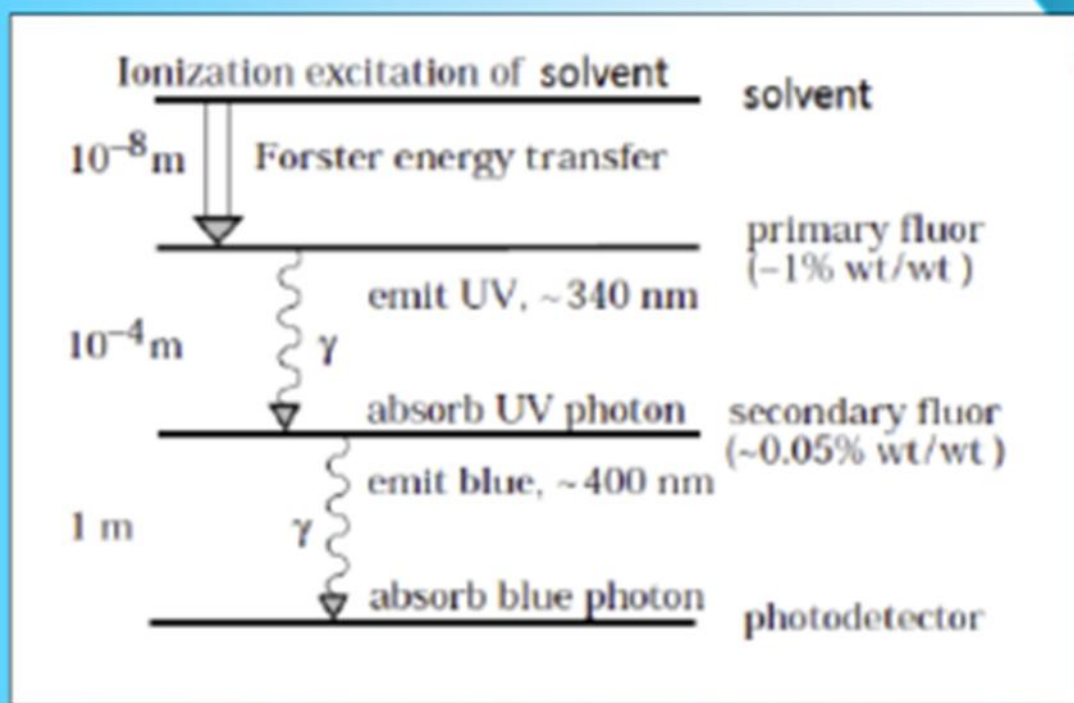
荧光衰减很快

Primary Scintillators		
Scintillator	Structure	Emission Wavelength
Styl-PSO 2-(4-phenyl-1,3-dioxol-5-yl)-1,3-dioxolane Order No. SPG-29		363nm
Naphthalene Order No. SPG-40		322nm
PSO 2,2-diphenyl-1,3-dioxolane Order No. SPG-28		367nm
p-Terphenyl Order No. SPG-30		340nm
Secondary Scintillators		
BBQ 2,2-bis(4-methyl-5-phenyl-2-pyridyl)-5,5'-bibenzimidazole Order No. SPG-45		477nm
Bi-MSE (1,4-bis(2-methyl-5-phenyl-2-pyridyl)-5,5'-bibenzimidazole) Order No. SPG-46		425nm
POPOP (2,6-bis(4-phenyl-2-pyridyl)-5,5'-bibenzimidazole) Order No. SPG-48		415nm
TPE (2,2,6,6-tetraphenyl-3,7-dioxetane) Order No. SPG-50		455nm

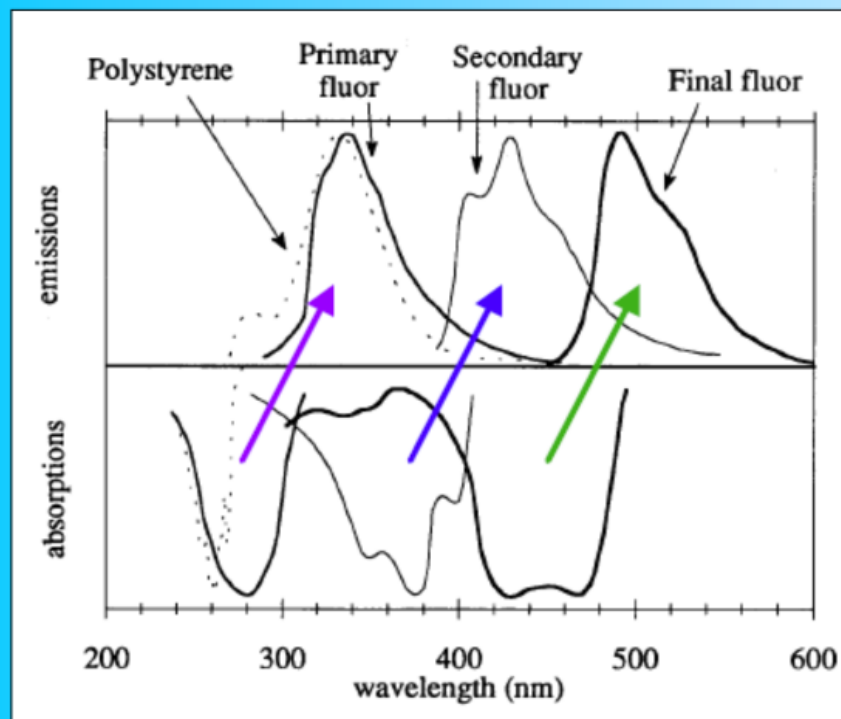
带电粒子在液闪中的能量损失与转移

- 1, π 电子的电离, 形成电子离子对 组合分子T1, S1
- 2, π 电子的激发到单态S1
- 3, 其他电子 (σ) 的电离或激发

溶剂, 发光物质和波移剂之间的能量传递



波长转换材料 (WLS)



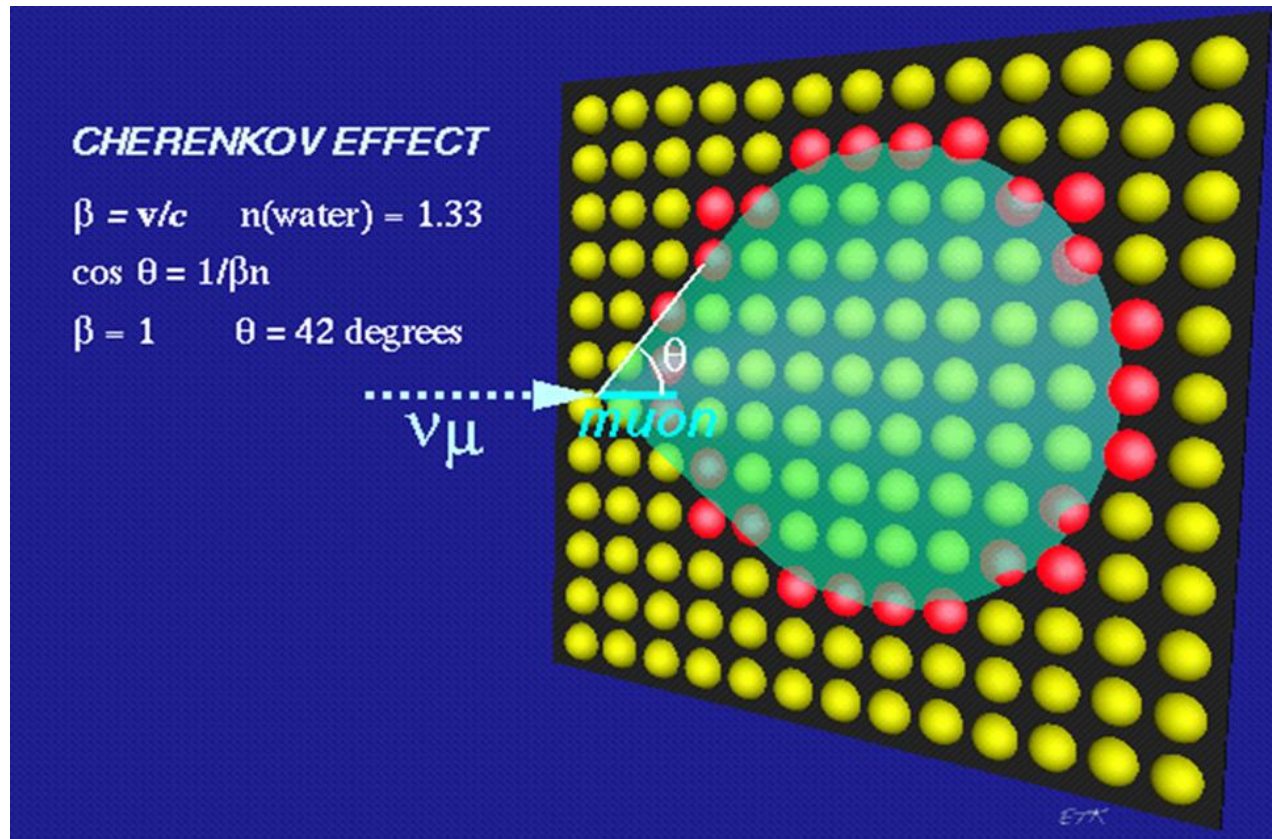
常用的溶质和WLS

	solvent	secondary fluor	tertiary fluor
Liquid scintillators	Benzene Toluene Xylene	p-terphenyl DPO PBD	POPOP BBO BPO
Plastic scintillators	Polyvinylbenzene Polyvinyltoluene Polystyrene	p-terphenyl DPO PBD	POPOP TBP BBO DPS

2.2 Cherenkov探测器

Cherenkov 辐射

- 光强与方向性
- 对短波可见光的吸收
- 对短波可见光的接受
- 闪烁光本底



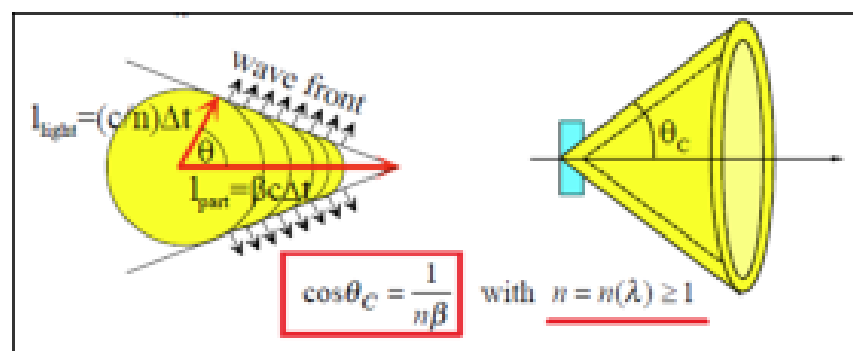
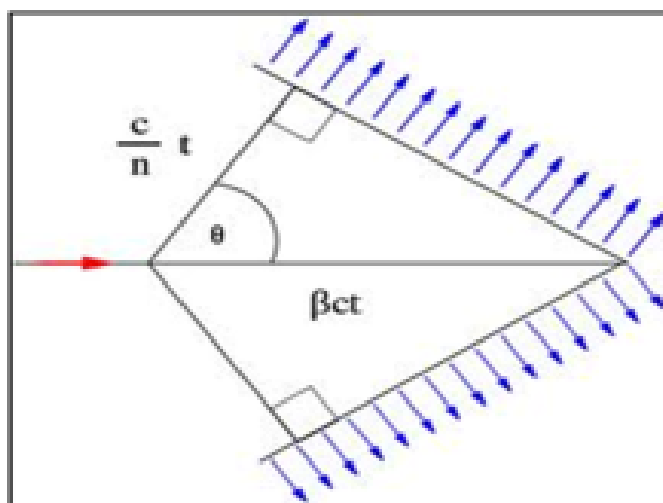
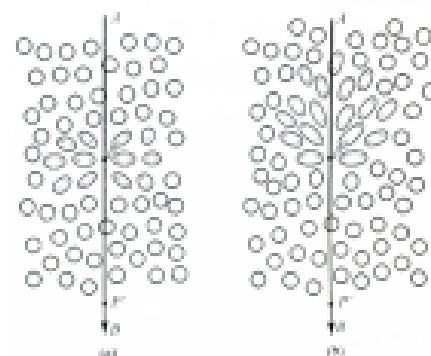
Cherenkov 辐射

如果带电粒子的速度 $v = \beta c$ 超过了光在的折射率为 n 的透明介质中光的速度，粒子就会有电磁辐射。切伦克夫辐射的**传播方向**：

$$\cos \theta_c = \frac{ct/n}{\beta ct} = \frac{1}{\beta n}$$

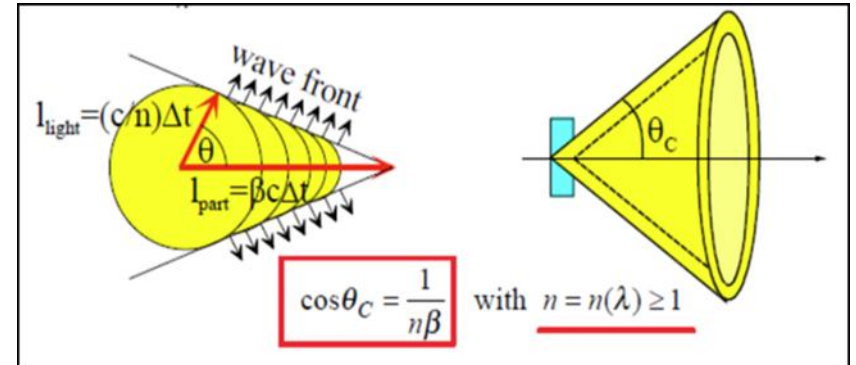
只有 $\beta > 1/n$ 才会有辐射，最小的速度是 $v_s = c/n$,

$$\gamma_s = \frac{1}{\sqrt{1 - 1/n^2}}$$



Cherenkov 辐射特性

介 质	$n-1$	阈 γ_s	阈 β_s
金刚石	1.42	1.10	0.41
ZnS(Ag)	1.37	1.10	0.42
Lead Fluoride	0.80	1.20	0.56
玻璃	0.46-0.75	1.22-1.37	0.57-0.68
闪 烁 体 toluene	0.58	1.29	0.63
Plexiglas	0.48	1.36	0.68
水	0.33	1.52	0.75
气凝硅胶	0.025-0.075	4.5-2.7	0.93-0.976
Pentane(STP)	1.7×10^{-3}	17.2	0.9983
CO ₂ (STP)	4.3×10^{-4}	34.1	0.9996
He(STP)	3.3×10^{-5}	123	0.99997



特性

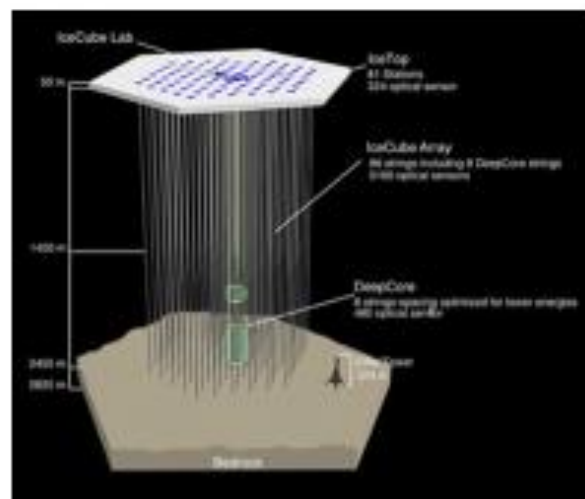
- 阈效应;
- 方向性;
- 可见光连续性;
- 时间短;
- 光产额低;

中微子的Cherenkov辐射探测 靶/探测

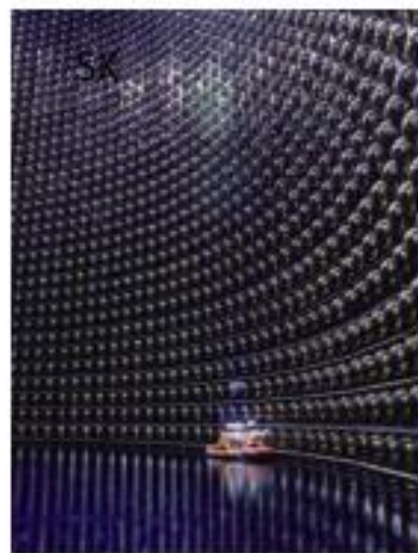
探测器构成:

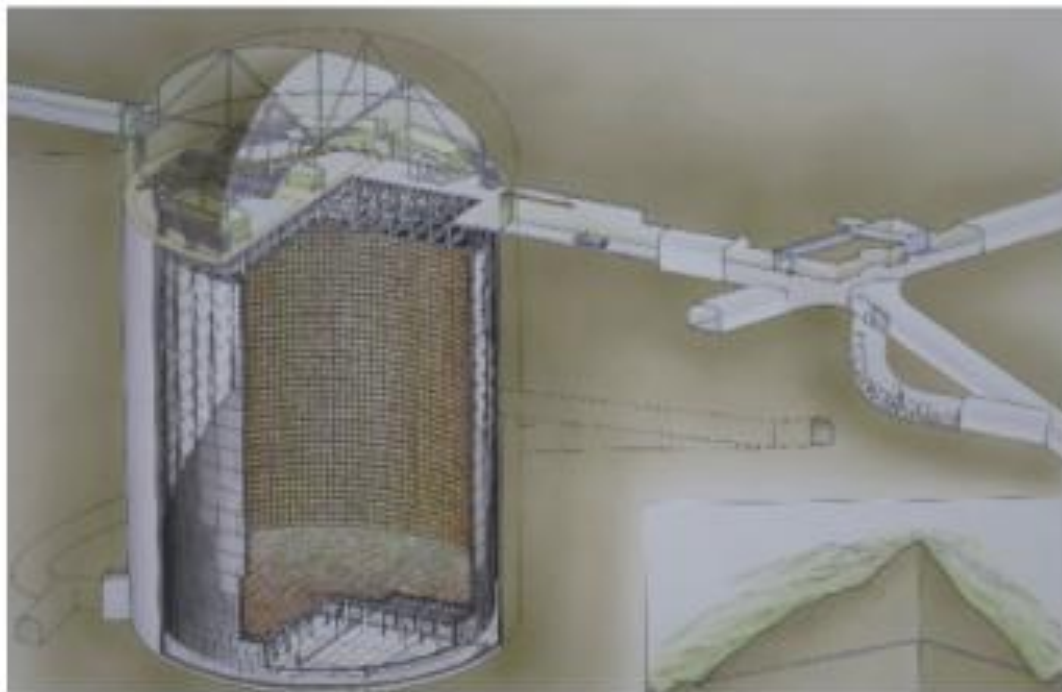
光密封容器;
辐射介质
光反射与收集
光电器件 PMT

介质: 水 SKII, Super
重水 SNO
冰 ICE cube
海水



Ice CUBE





Super-Kamiokande

Since Apr.'96,
 22,500 ton fiducial Vol.
 1,200 m² muon area
 4 MeV – 200 GeV evts
 ~20,000 **Solar ν 's**
 >11,000 FC **atm ν 's**
 >2000 **upcoming μ 's**
 Strong evidence for
 oscillations
 "also from **K2K**, Soudan
 & MACRO $\nu\mu \leftrightarrow \nu\tau$

超级神冈

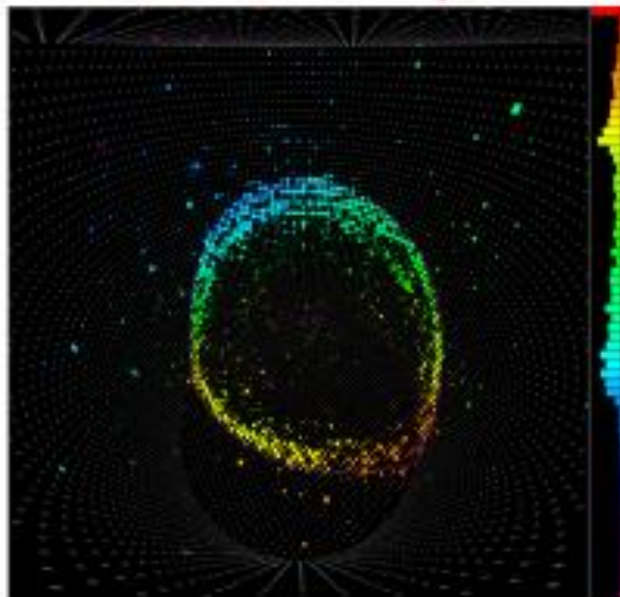




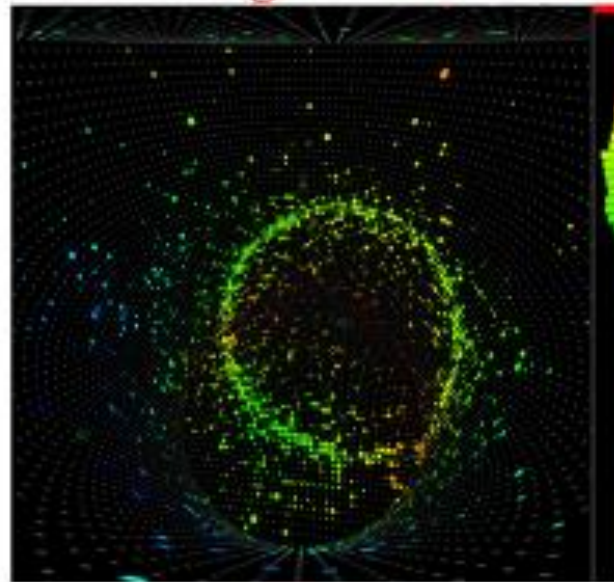
SK



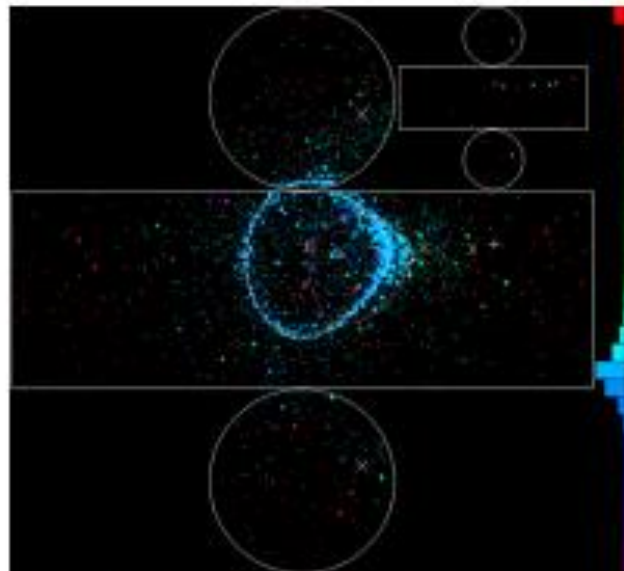
μ -ring from $\nu_\mu N$



e-ring from $\nu_e N$



SK



NC events with $\pi^0 \rightarrow 2\gamma$

Zenith angle distributions
(FC+PC+up- μ)

May-2002 Neutrino2002 @ Munich

$\nu_\mu \leftrightarrow \nu_e$

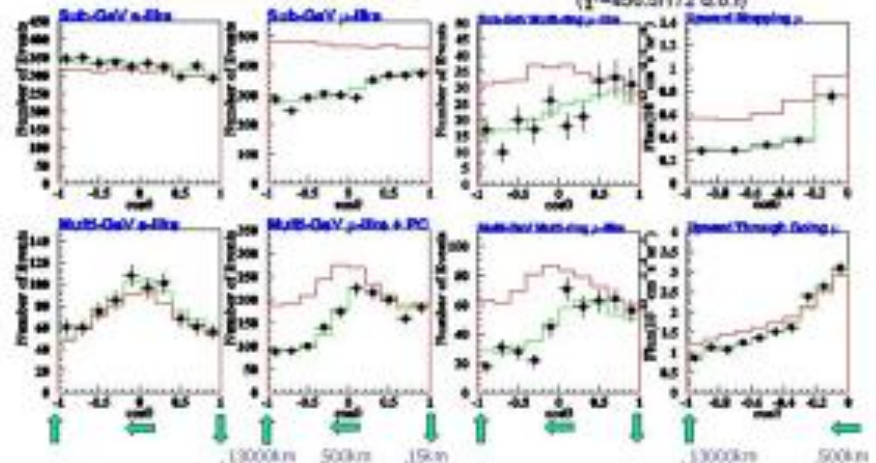
2-flavor oscillations

Best fit ($\Delta m^2 = 2.5 \times 10^{-3} \text{ eV}^2$, $\sin^2 2\theta = 1.0$)

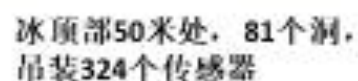
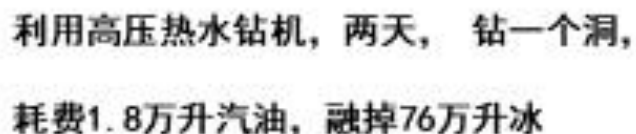
$\chi^2_{\text{min}} = 163.2/170 \text{ d.o.f.}$

Null oscillation

($\chi^2 = 456.5/172 \text{ d.o.f.}$)



South Pole 2km Deep Ice cube detector



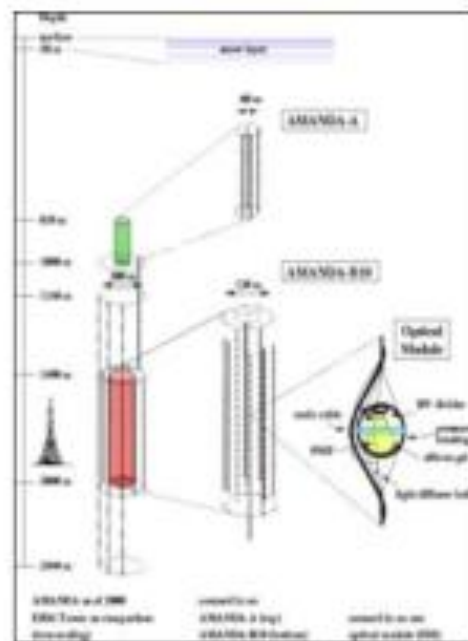
下部阵列 86 根缆绳
5160 光学传感器

核心深处添加8根缆绳
480个光学传感器

总深度 2450 米
底部深度 2820 米

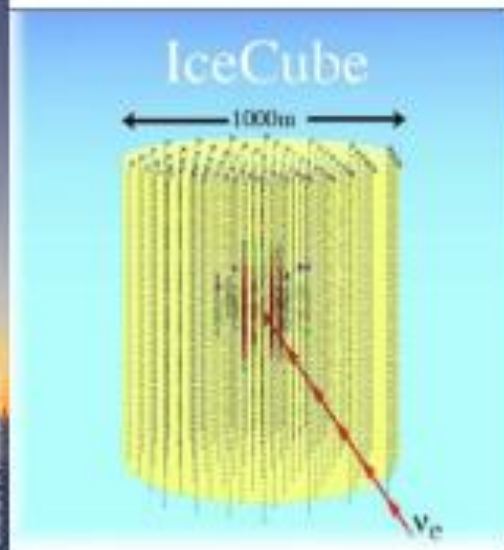
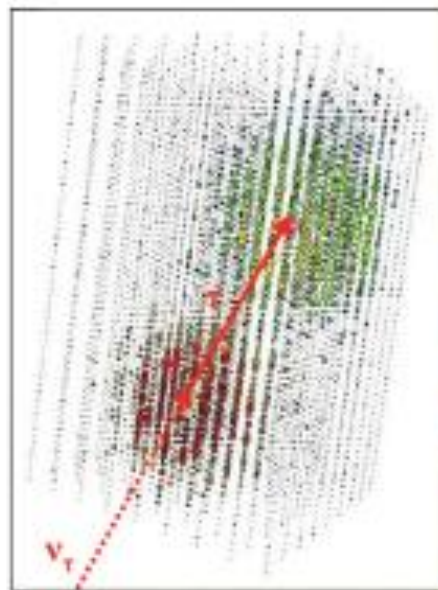
历时6个南极夏季（11月-2月），
2010年12月建成

耗资2.71亿美元，10年时间



中微子事例

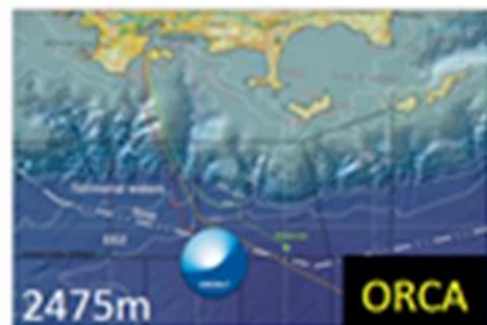
2012年 公布 千万亿eV的2个“PeV 事例”
可能的巨型黑洞喷射或gamma射线暴（GRB）的爆炸





KM3NeT

Multi-site deep-sea neutrino research infrastructure

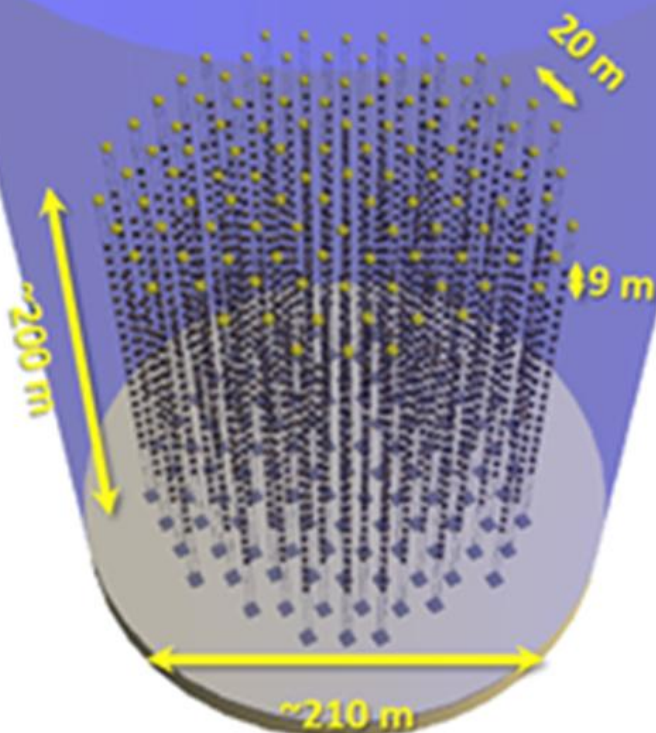


Single Collaboration, Single Technology



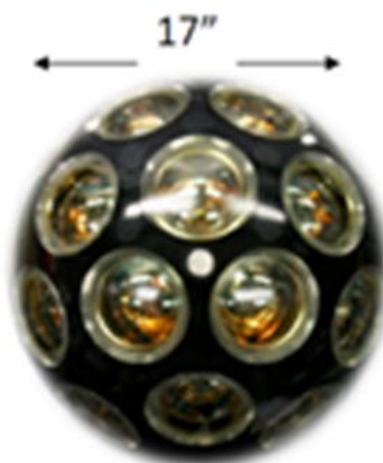
The ORCA Detector

- **~5.7 Mt** instrumented
- **115 strings**
- **18 DOMs / string** (**~50 kt ~ 2 x SK**)
- **31 PMTs / DOM** (**~3 kt ~ MINOS**)
- **Total: 64k*3" PMTs**



Depth=2475m

Digital Optical Module

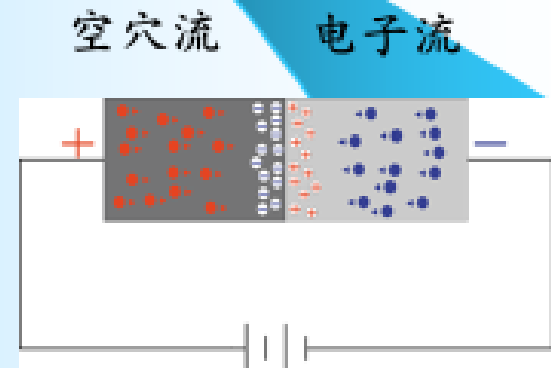
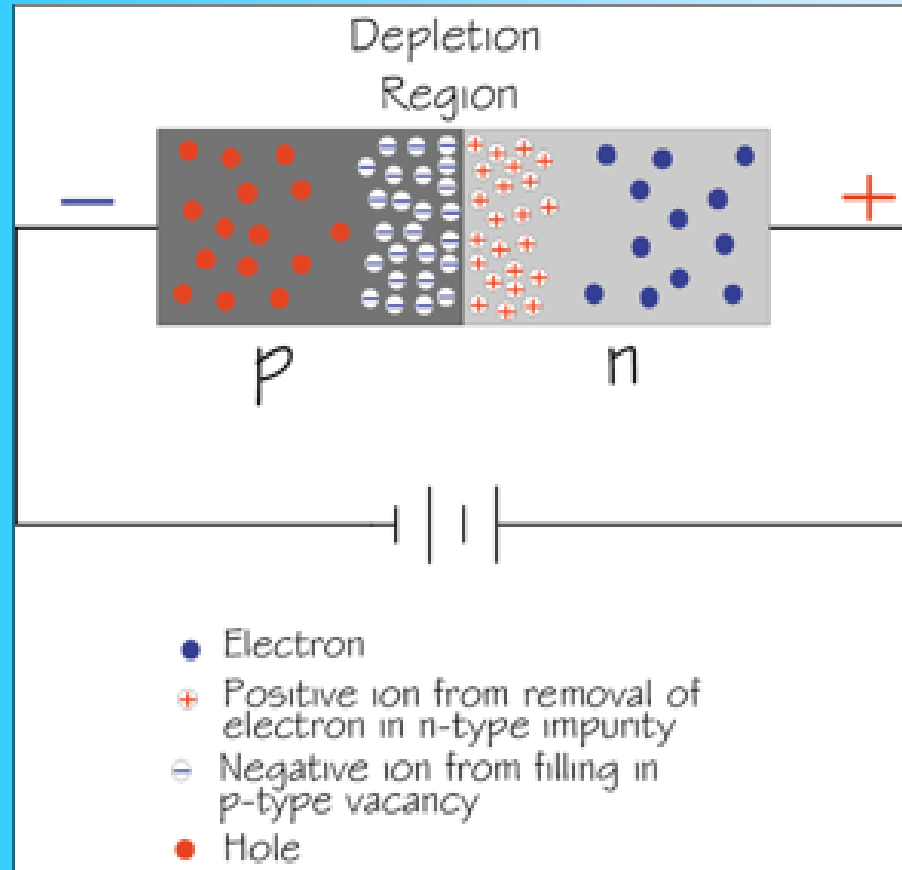


- 31 x 3" PMTs
- Uniform angular coverage
- Directional information
- Digital photon counting
- Background rejection
- All data to shore

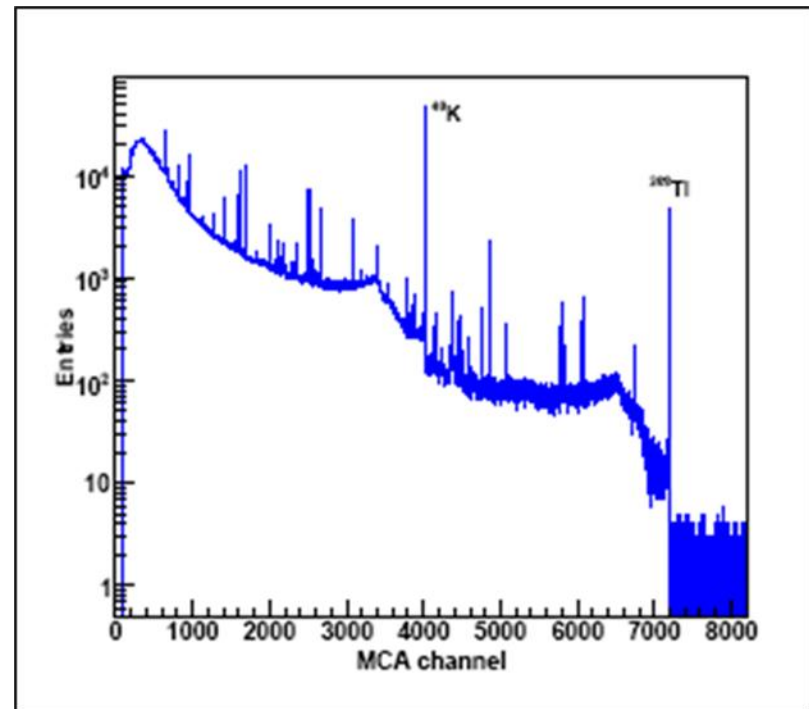
See P1.095: R. Bruijn,
The KM3NeT DOM

2, 3 半导体测量电离的探测

半导体中的电离



HPGe探测器



HP Ge detector / PC Ge detector

Detect charge only

High efficiency

High resolution

High density ,

Large mass

Pure material(internal radiation)

Low noise/ Low threshold

PSD

Low temperature(77K)

Background suppress

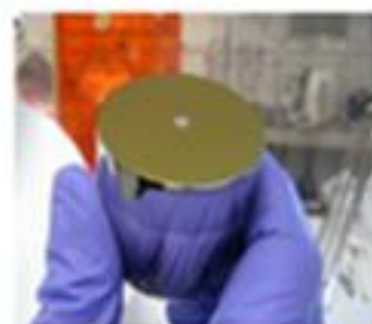
(no way to identify e, N)

三种HPGe探测器

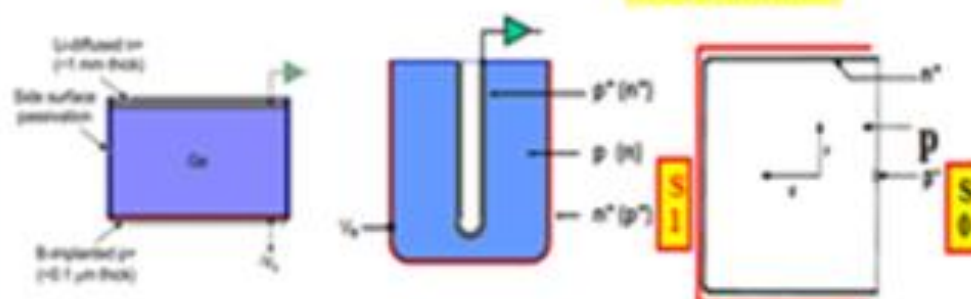


planar

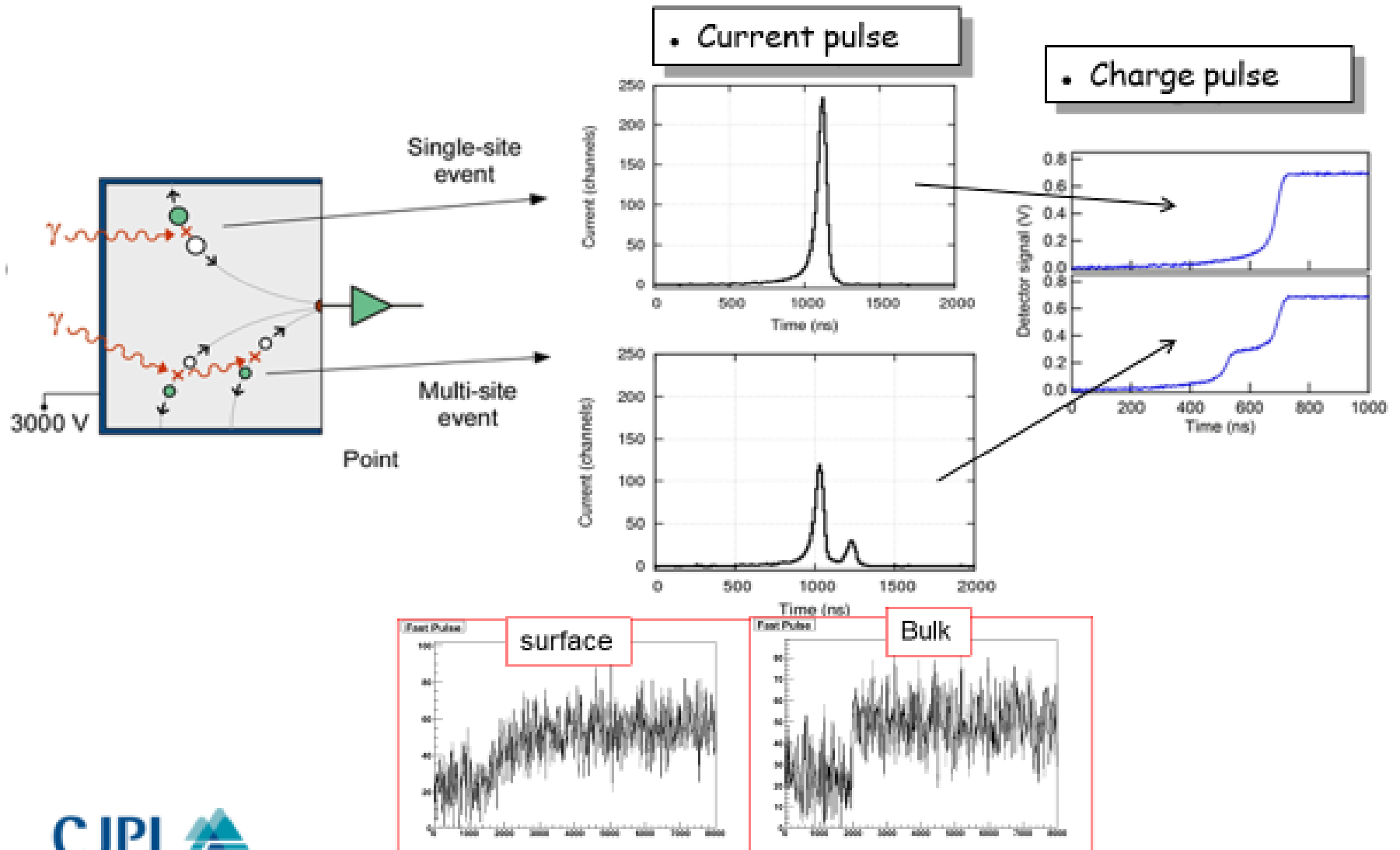
Coaxial detector

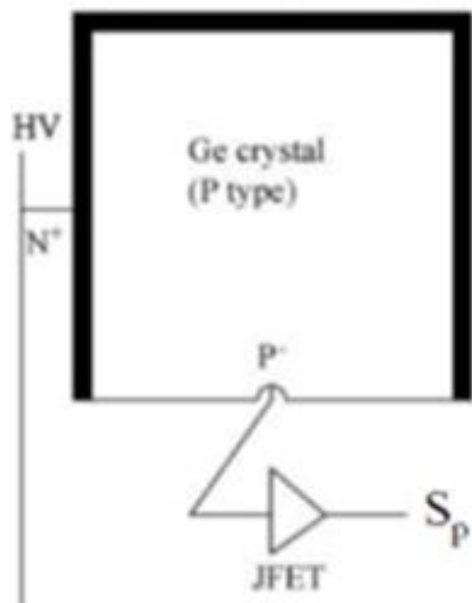


PCGe detector

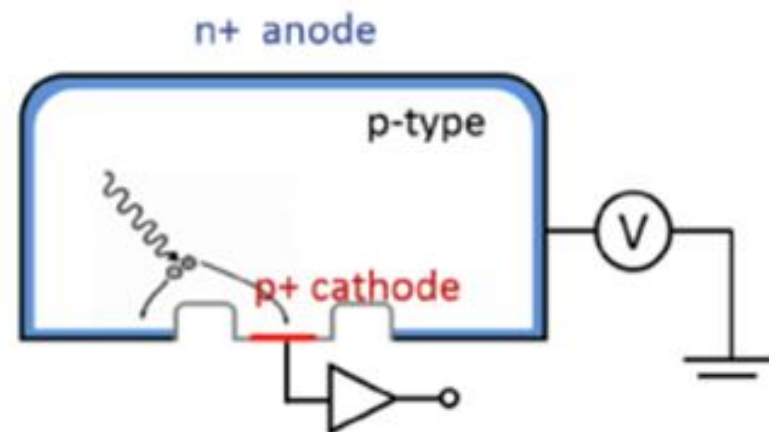


Pulse Shape of PCGe

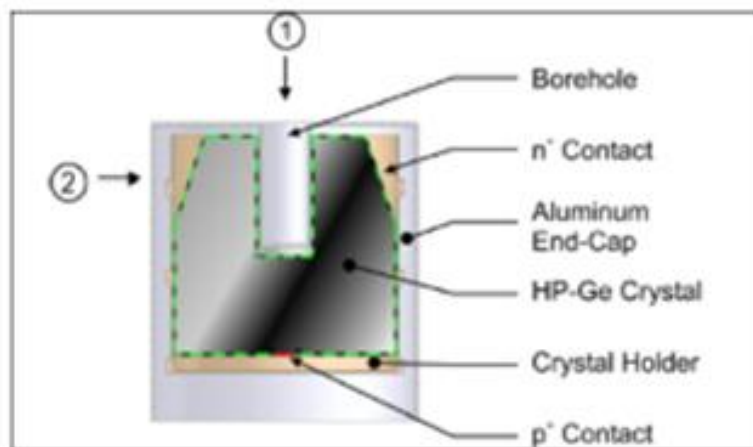




P型点电极高纯锗探测器

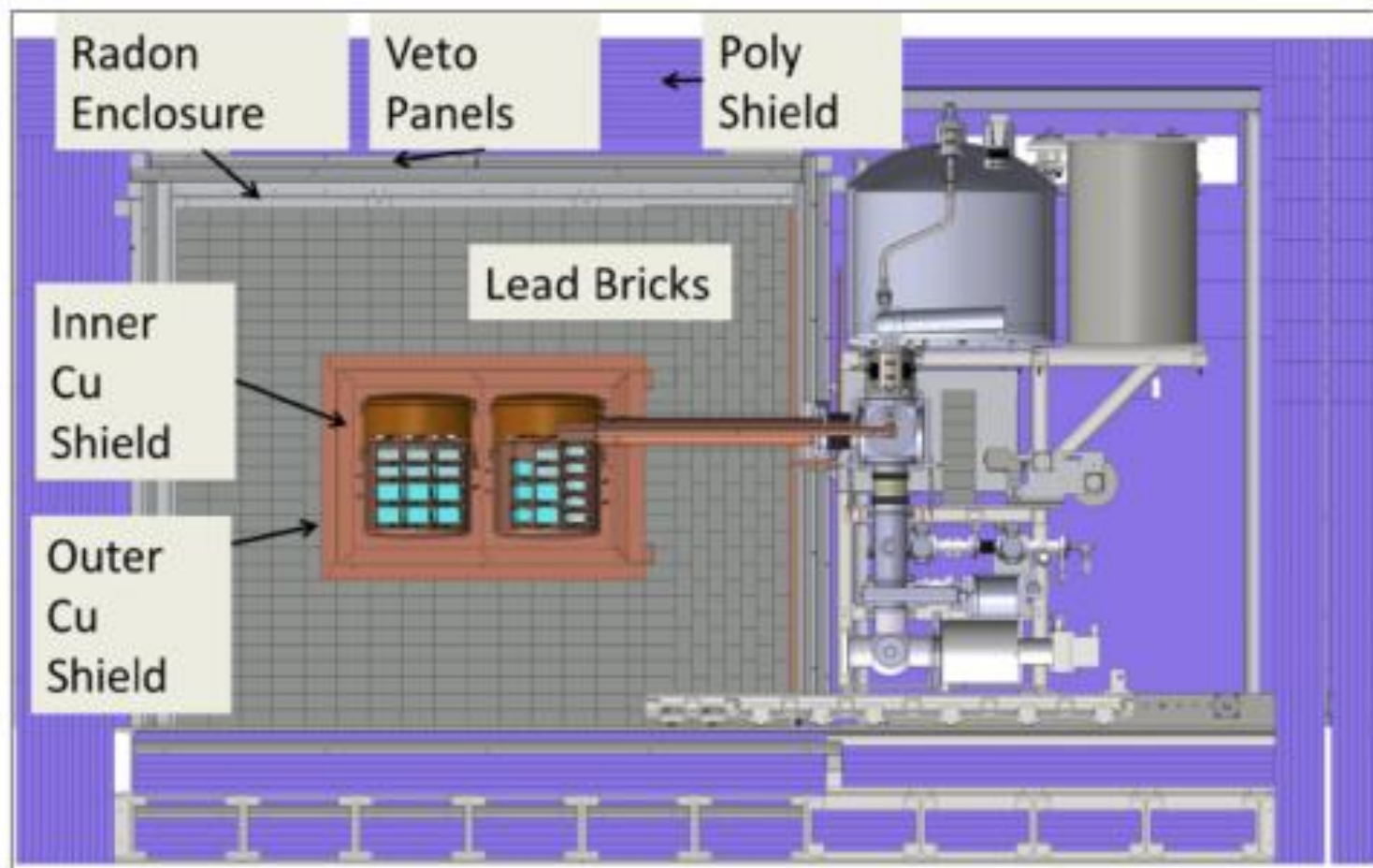


典型p型BEGe探测器



P型反向同轴高
纯锗探测器

DBD with Ge76 : Majorana



The GERDA experiment

bare HPGe detectors in cryogenic liquid

enriched to about 86% in ^{76}Ge without encapsulation in a liquid argon cryogenic bath





Background Problems

Radiation isotopes produced by cosmic ray

Cu

产物 (Cu)	半衰期	Gamma
Sc46	83.788d	2
Co60	5.27y	2
Co58	70.83d	1
Co57	271.8d	3
Mn54	312.13d	1
Co56	77.236d	12
Fe59	44.495d	3
V48	无	
Zn65	244.01d	1

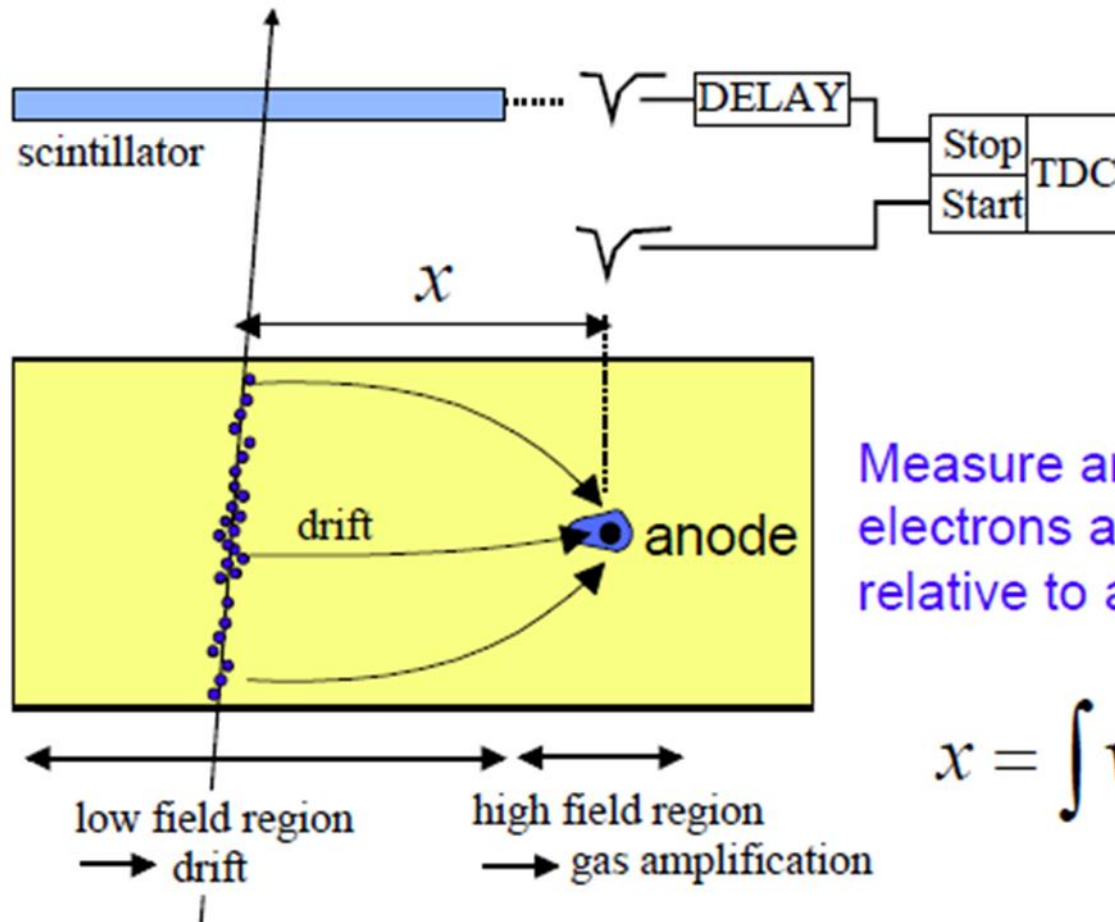
Ge

产物 (Ge)	半衰期	gamma
Ge68	<u>288 d</u>	0
Co60	5.27 y	2
Mn54	312.2 d	1
Co57	276.3 d	3
Zn65	<u>244.3 d</u>	1
Fe55	2.73 y	0
Co58	70.83 d	1
Ni63	100.1 y	0
V49	330 d	0
Ga68	1.128 h	2

2.4 气体和液体TPC技术

转换与径迹测量

电离位置的精确确定



Measure arrival time of electrons at sense wire relative to a time t_0 .

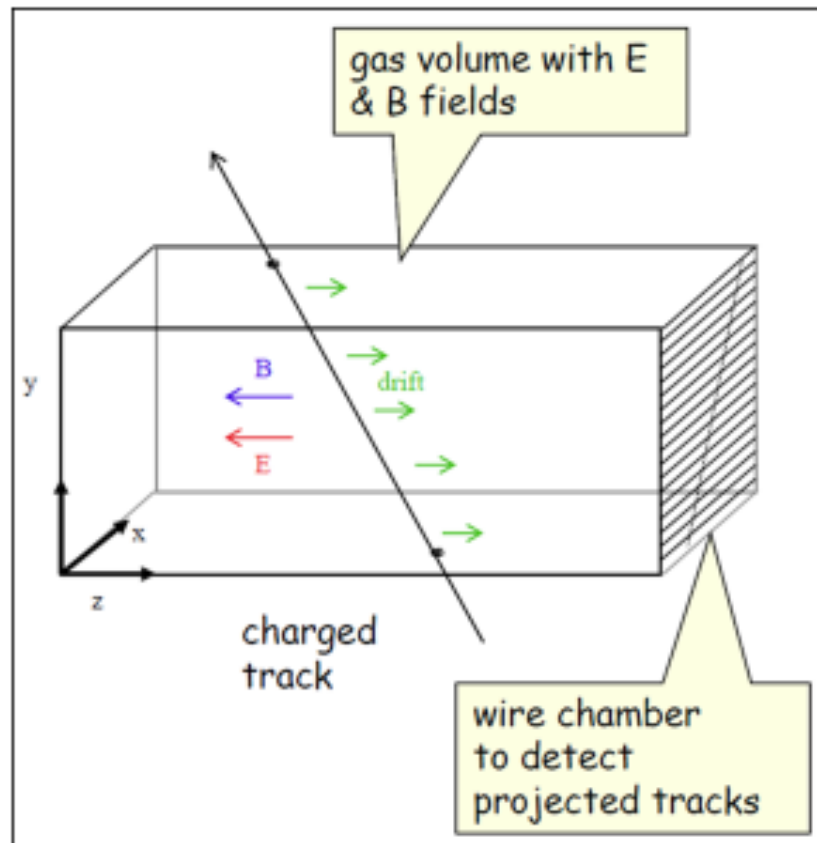
$$x = \int v_D(t) dt$$

3D Gas Detector

Tracking & particle ID

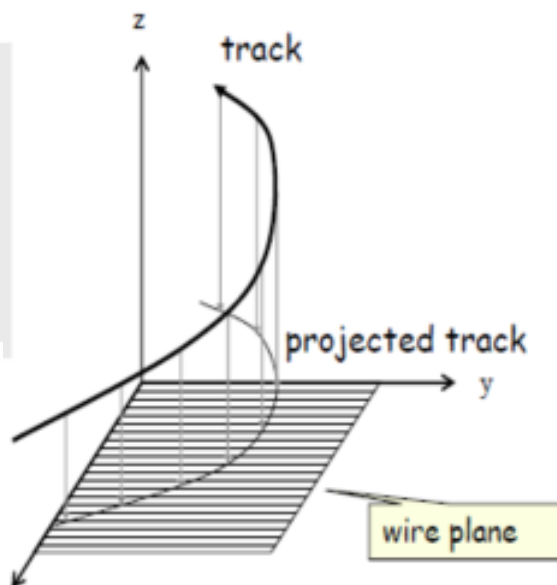
The TPC is basically a long DC with **parallel electric and magnetic fields** and **2D points read-out at the end(s)**.

- 3-D particle Tracking recorded
(x, y, z)
- dE/dx Particle Identification
- Large track densities possible
- Low material



3-D coordinates

- Z coordinate from drift time
- X coordinate from wire number
- Y coordinate?
 - » along wire direction
 - » need **cathode pads**

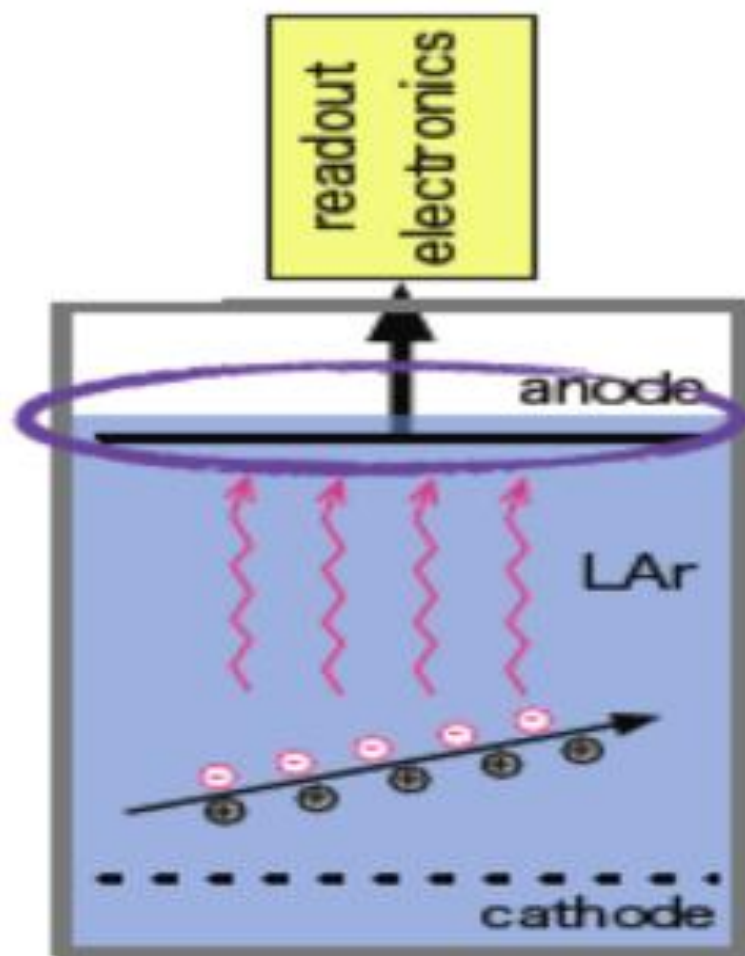


时间投影室TPC主要构成

- 1, 气/光密封容器
- 2, 工作介质: 气体/液体
- 3, 场笼
- 4, 2维探测器
- 5, 激光刻度系统

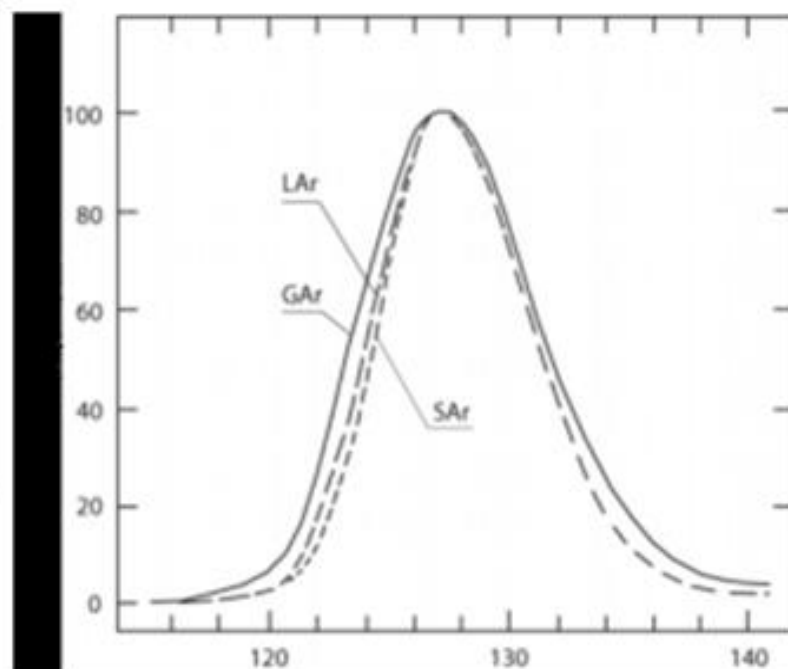
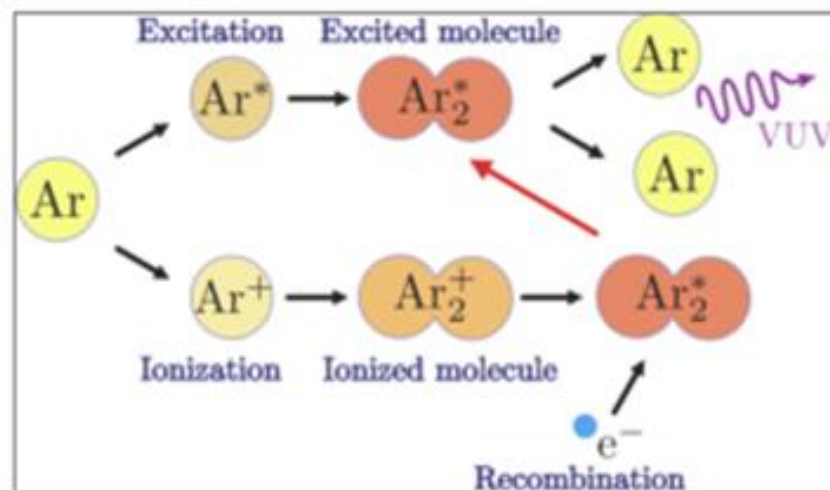
液体时间投影室TPC

3 维位置或径迹探测



同时接受电离
和闪烁光

LAr 的电离与发光



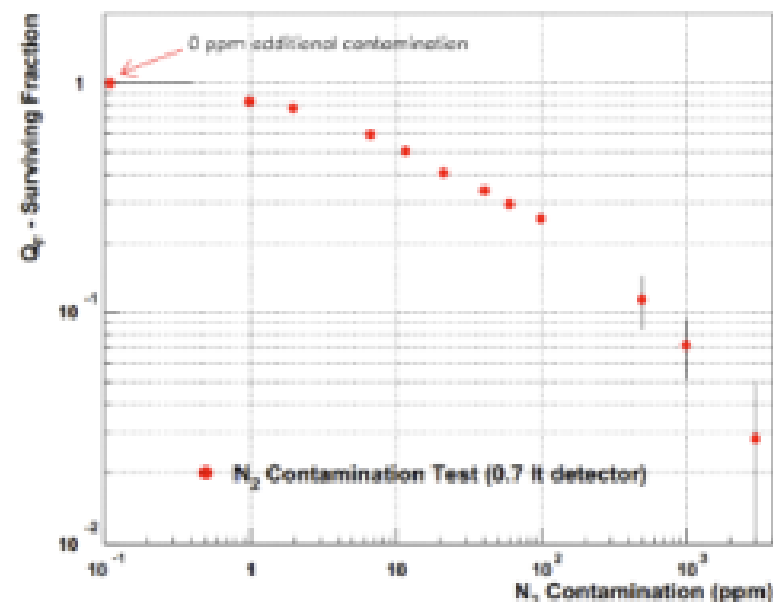
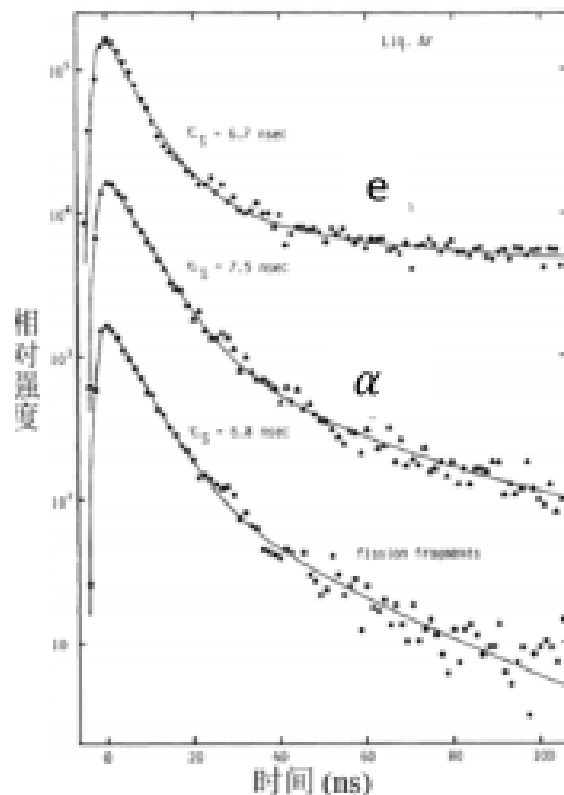
波长分布在128 nm 附近，半高宽FWHM 约为10nm

产生一个光子的平均电离能 W_{ph}

入射粒子种类	W_{ph} 值 (eV)
重离子 (Ne~La)	19.5 ± 2.0
α 粒子	27.5 ± 2.8
电子	25.1 ± 2.5

液氩闪烁光的快成分

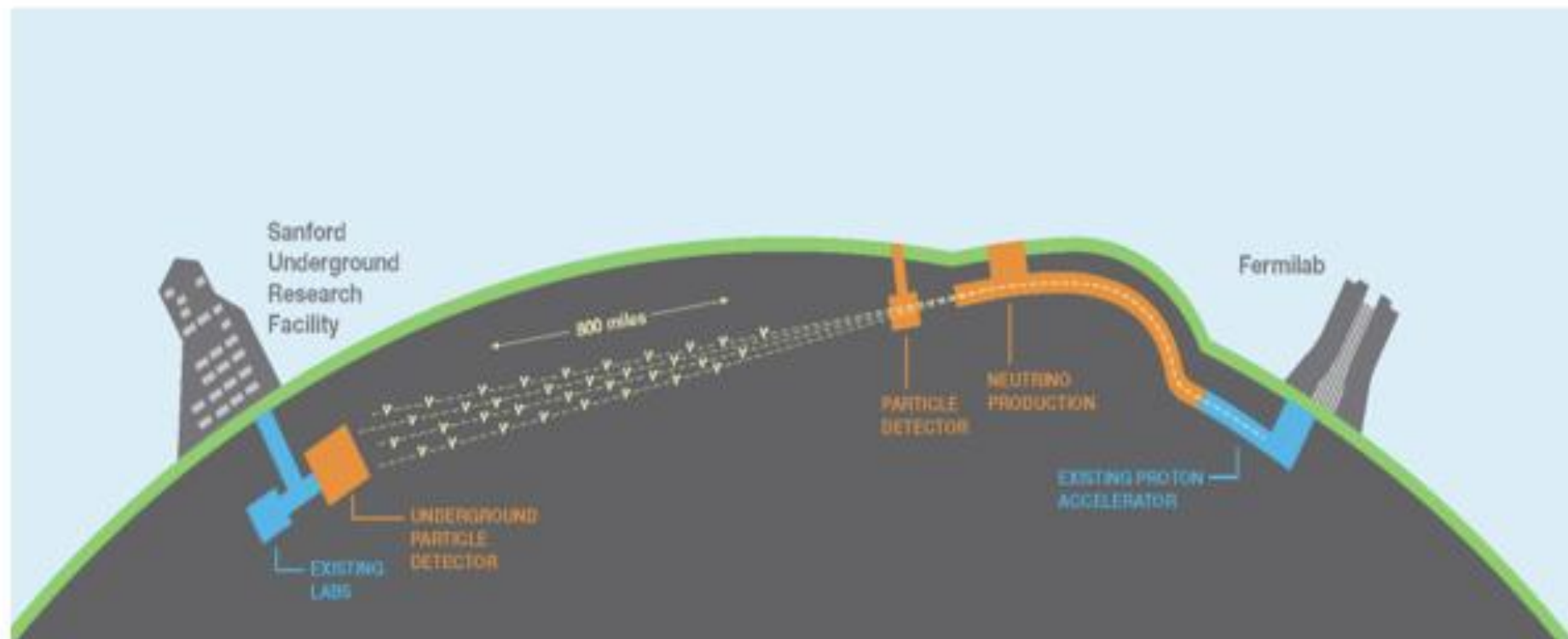
电子、 α 粒子和裂变碎片的闪烁光的衰减曲线, 分别为
4.7, 7.5, 6.8 ns



激发态氩原子存活率受N影响极大

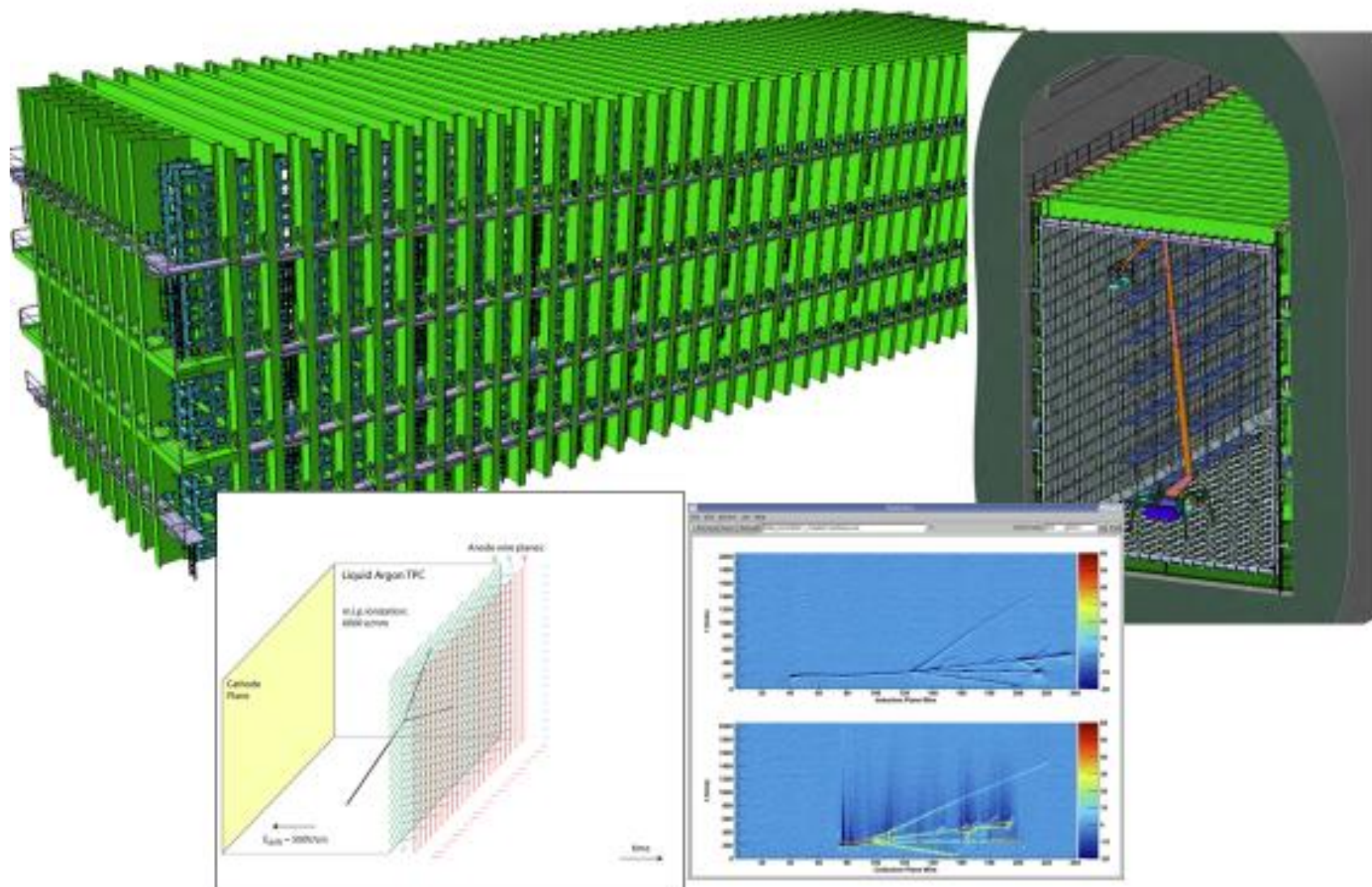
入射粒子种类	τ_e (ns)	τ_t (ns)	I_e/I_t
裂变碎片	6.8 ± 1.0	1550 ± 100	3.0
α 粒子	7.1 ± 1.0	1660 ± 100	1.3
电子	6.0 ± 2.0	1590 ± 100	0.3

Deep Underground Neutrino Experiment

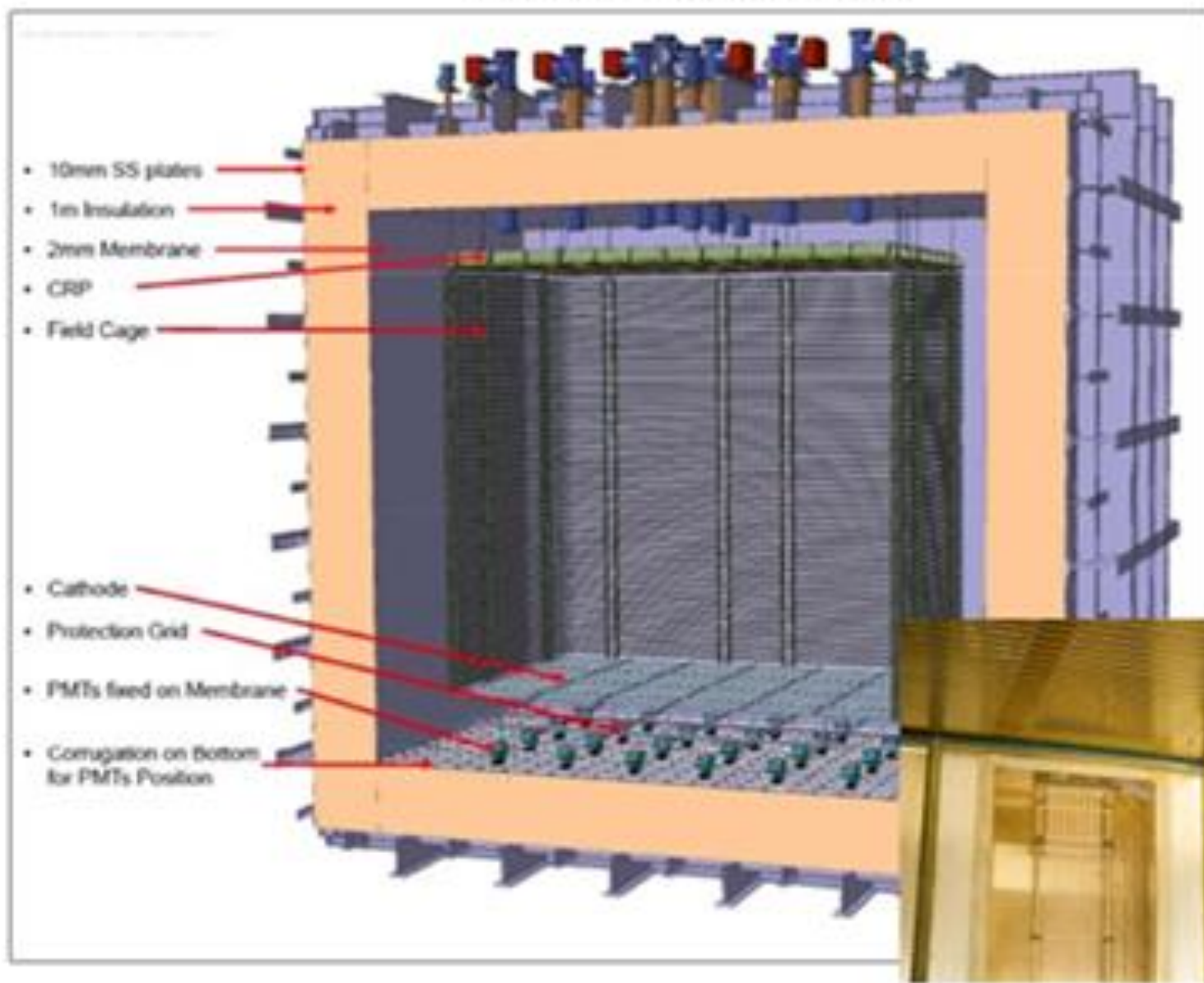


中微子束流的产生和实验安排

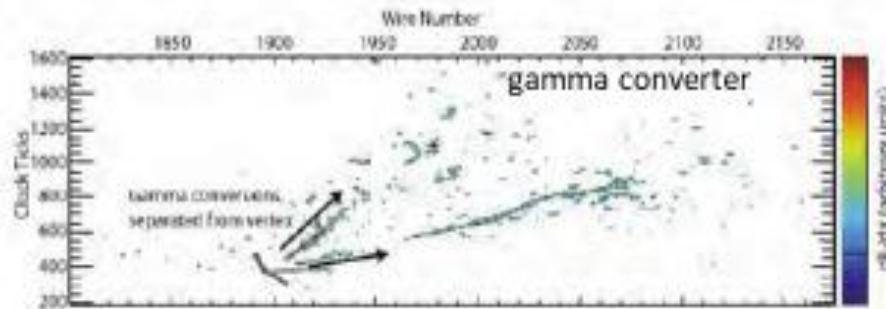
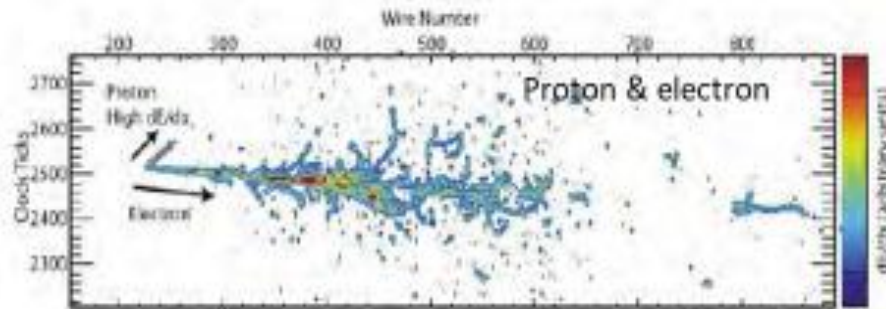
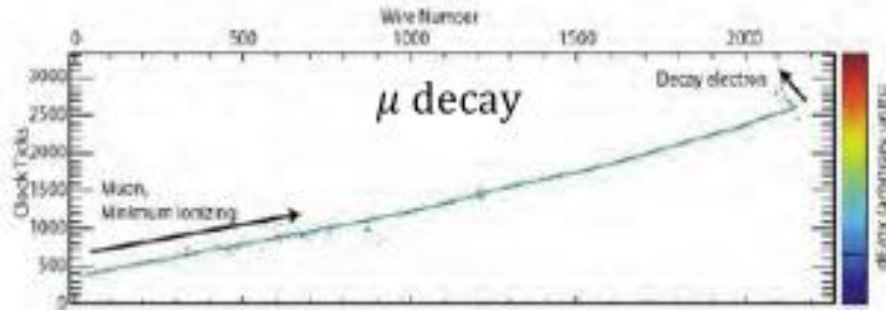
Liquid Argon Time Project Chamber with both charge and optical readout



DUNE detector



中微子事例



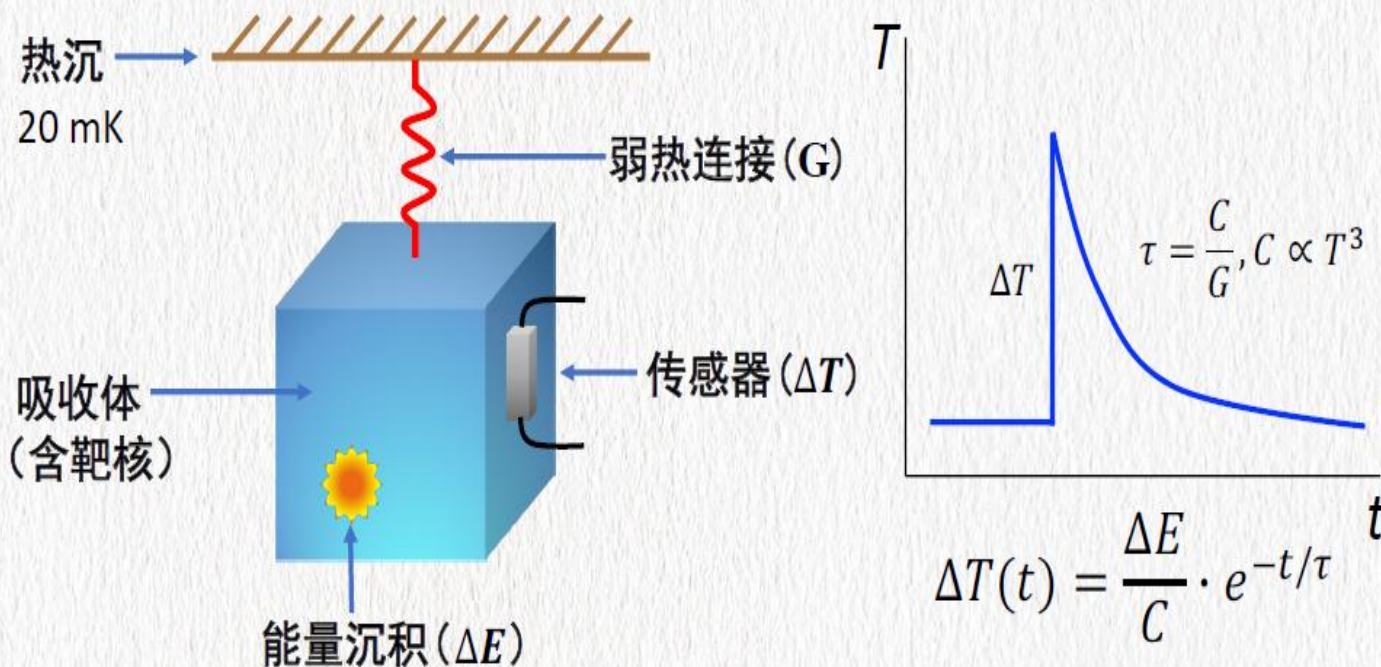
LAr Capabilities

- Bubble chamber like imaging capabilities.
- Excellent e- γ separation.
- PID through energy loss.

2.5 超低温的量热器探测

超低温量热探测技术

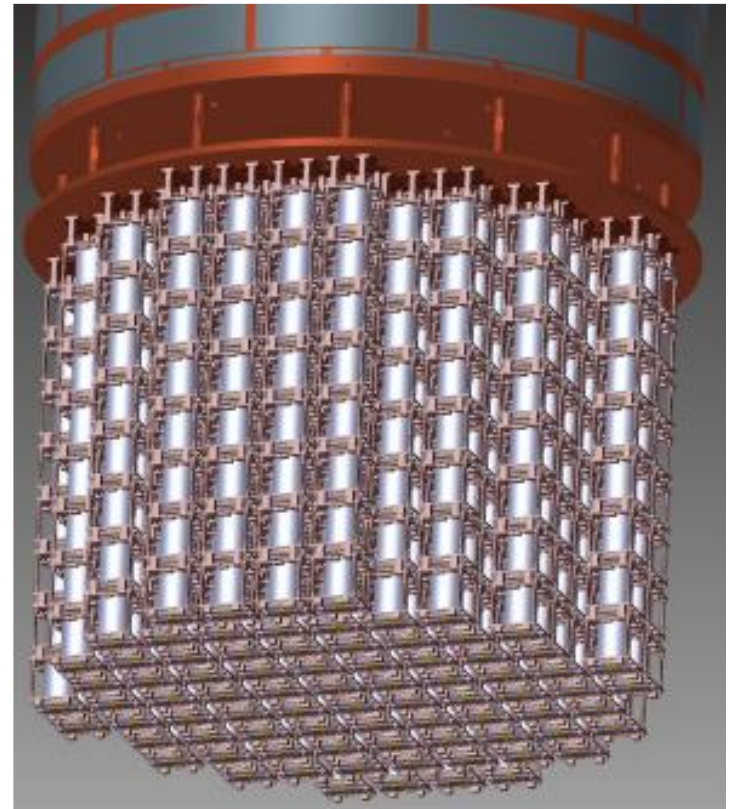
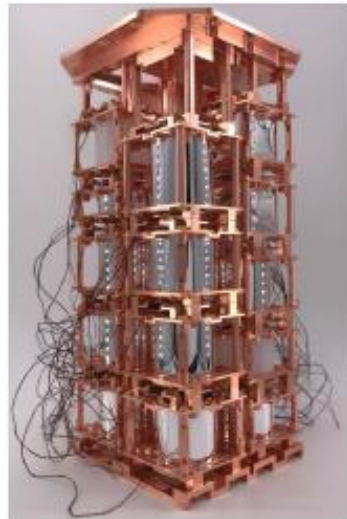
- ✿ 基于声子（或以声子为媒介的）探测的粒子探测器，称为低温粒子探测器/量热器 (Low Temperature Detector/Cryogenic phonon detector)



- ✿ **重要组成**: 吸收体、温度传感器、弱热连接、低温恒温器（热沉）
- ✿ **独特优势**: 吸收体多样、极低探测阈值(~ 15 eV)、极好能量分辨

AMoRE detectors

	AMoRE-Pilot	AMoRE-I	AMoRE-II
Crystal Mass	1.9 kg	6.2 kg	178 kg
Sensor channels	12	36	~ 900

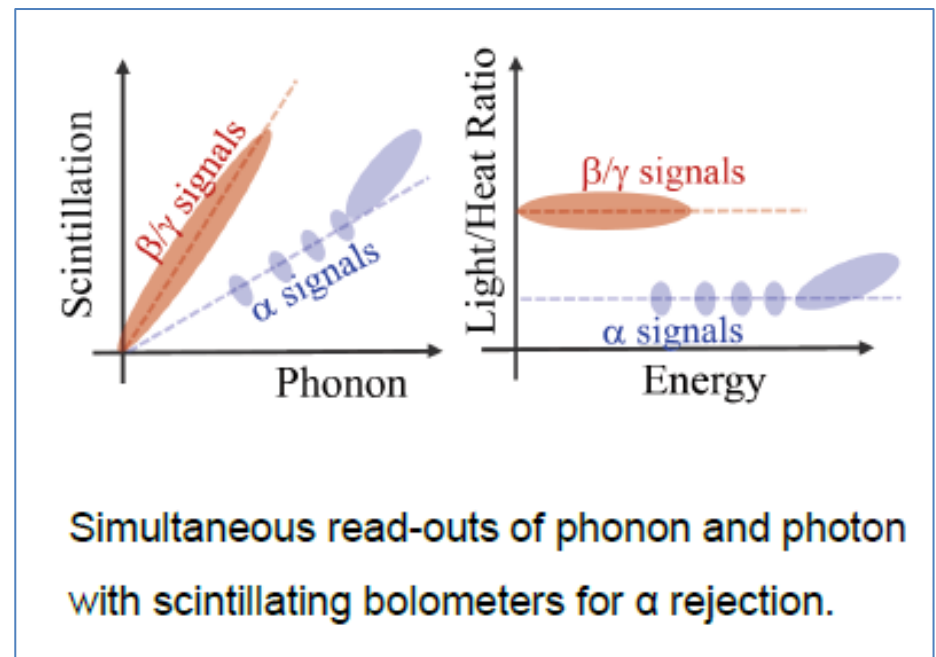
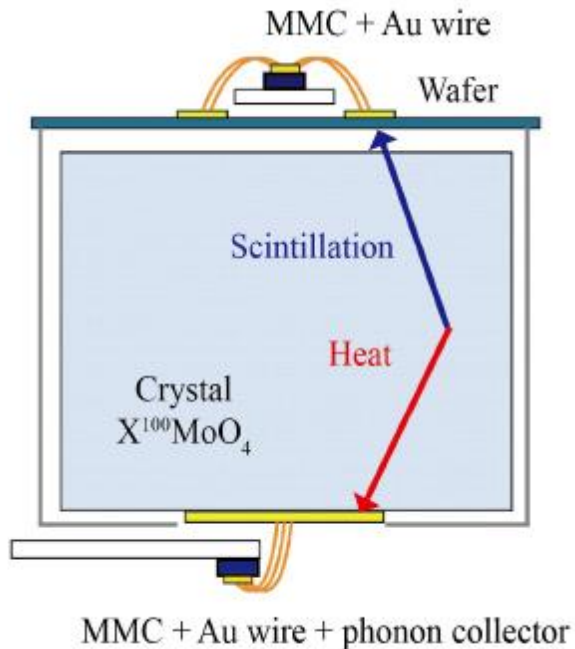


^{100}Mo :

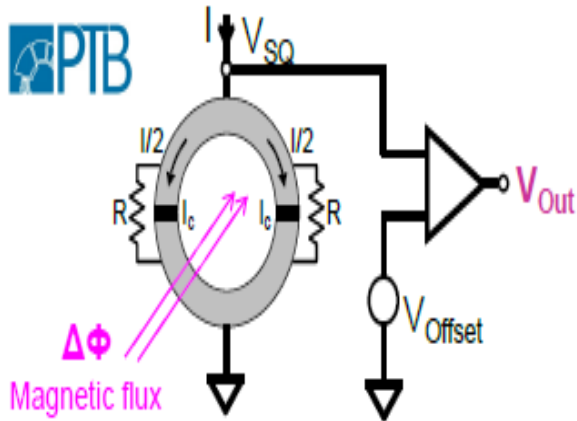
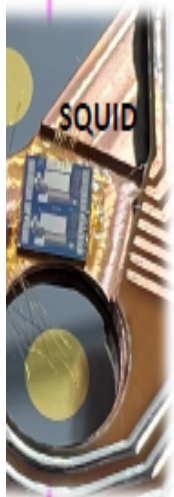
- Q (~ 3034 MeV) is higher than most gamma backgrounds
- High natural abundance of 9.7 %
- Relatively short half-life ($0\nu\beta\beta$) in theoretical expectation

AMoRE: Advanced Mo-based Rare process Experiment

An international collaboration project to search for **neutrinoless double beta decay** of ^{100}Mo using Mo-based scintillating crystals and low temperature sensors

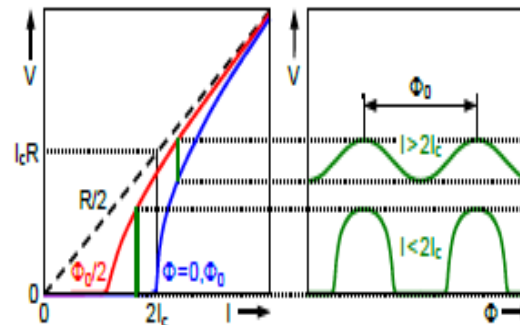


SQUID (superconducting quantum interference device)



Magnetic flux quantization (superconductor ring $T < T_c$)

$$\rightarrow \Phi_{\text{ring}} = n \times h/2e = n \times \Phi_0 \quad (n = 0, 1, 2, 3, \dots)$$

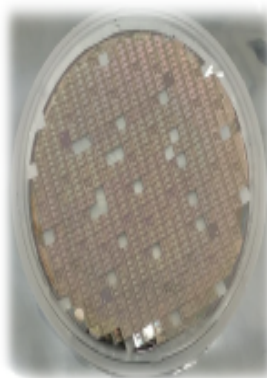


Josephson tunneling

SQUID critical current

$$\rightarrow I_{c,SQ}(\Phi) \propto |\cos(\pi\Phi/\Phi_0)|$$

New HD SQUID design for AMoRE-II



X114W & XS116
SQUIDs
for AMoRE
by PTB

HD SQUIDs
for AMoRE
by Heidelberg

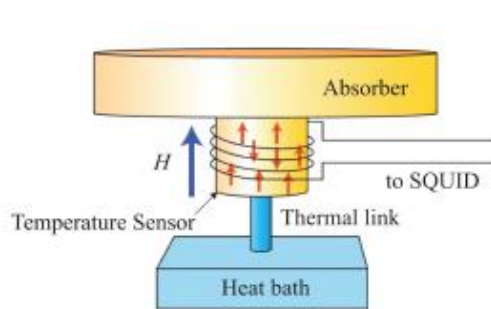


	X114W	XS116	HD SQUID
Li	2 nH	27 nH	5.5 nH
1/Mis	5.3 $\mu\text{A}/\Phi_0$	2.3 $\mu\text{A}/\Phi_0$	3.5 $\mu\text{A}/\Phi_0$
Relative signal size with 35nH MMC + 1 nH wire	1	1.07	1.29

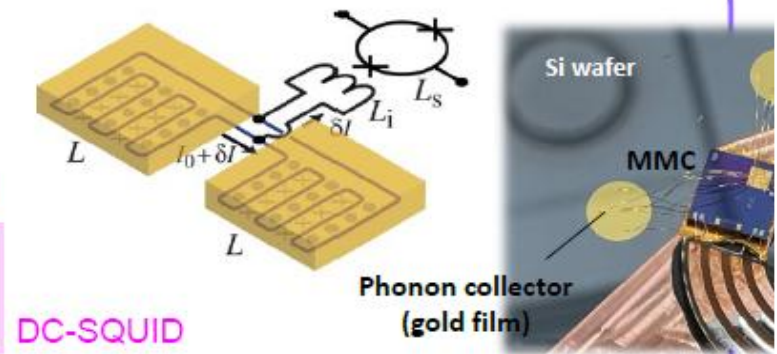
Major PTB design for AMoRE-I

SQUID超导量子干涉仪是一种能测量微弱磁信号的极其灵敏的仪器，实质是一种将磁通转化为电压的磁通传感器

MMC (Metallic magnetic calorimeter)



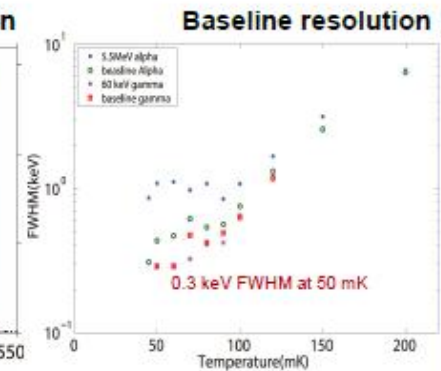
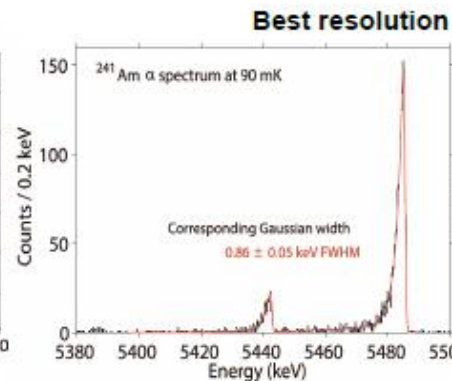
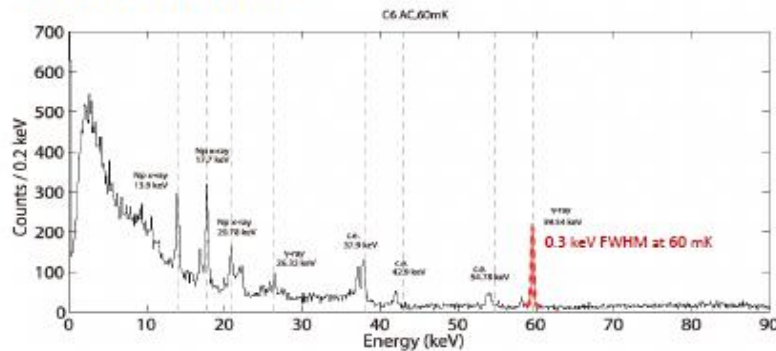
Energy (ΔE)
 → Temperature (ΔT)
 → Magnetization (ΔM)
 → Magnetic flux ($\Delta \Phi$)
 → Voltage (ΔV)



Advantages of MMCs

- Excellent energy sensitivities over the wide energy range
- Fast response time in the microsecond range even below 50 mK
- Adjustable parameters (field, current, meander size, pitch, ppm, temperature and so on..) for given experimental conditions

MMCs performance

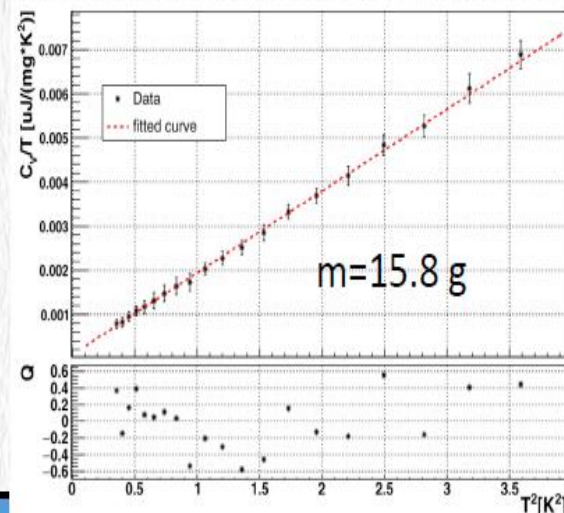
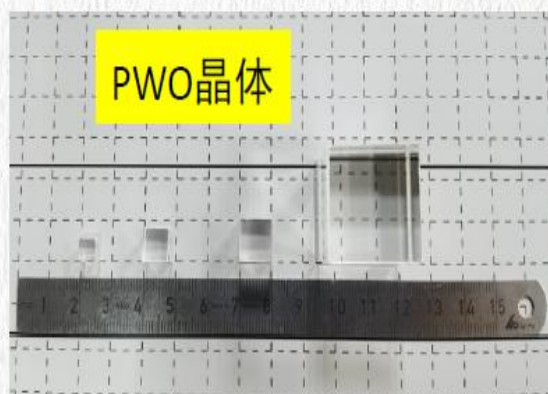


MMCs for AMoRE (Mass production)

MMC利用金属磁性材料作为温度传感器, 其温度线性区域非常宽, 一定程度上解决了TES线性度差和能量范围窄的问题, 因此它非常适合测量宽能量范围能谱

PWO晶体低温热容

- ✿ CEνNS极小的反冲核能量沉积 $\Delta E = E_R$ ，探测器灵敏度 $\Delta T = \Delta E/C \rightarrow$ 极小的热容
- ✿ 基于综合物性测量仪PPMS在低温2 K – 500 mK研究PWO热容，PWO产自硅酸盐所
- ✿ C/T 与 T^2 关系，PWO德拜温度 $\theta_D = (238 \pm 5) \text{ K}$



$$C(T) = \beta n \frac{m}{M} \left(\frac{T}{\theta_D} \right)^3, \beta = 1944 \text{ JK}^{-1} \text{mol}^{-1}$$

其中， m 为质量， M 为摩尔质量， n 为单位原子数

吸收体	德拜温度 θ_D [K]
Ge	374
Zn	327
Al ₂ O ₃	1041
CaWO ₄	335
PbWO₄	238

- ✿ 1 g PWO热容2 pJ/K @ 10mK
- ✿ 100 eV能量沉积，8 μ K温升
- ✿ NTD-Ge & TES 灵敏可读

CdMoO₄ 低温微量热器

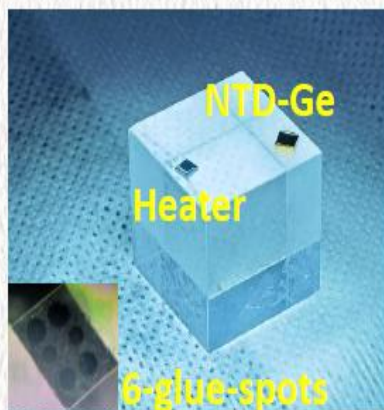
(¹⁰⁰Mo、¹¹⁶Cd)

LMO(2×2×2 cm³)量热器研制@USTC

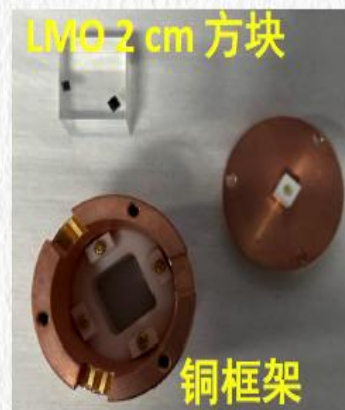
紫铜框架/PTFE支架/螺丝等清洗



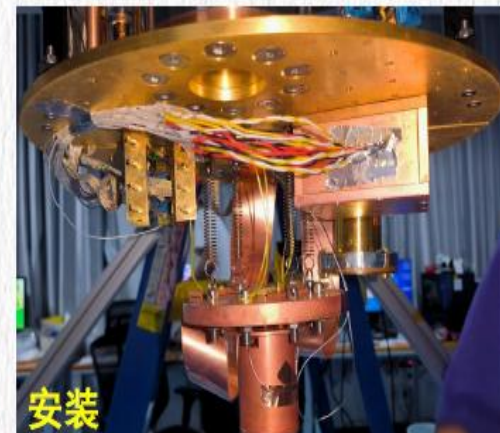
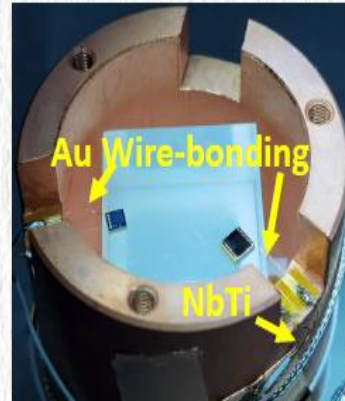
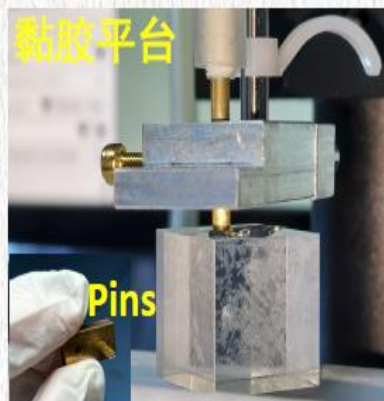
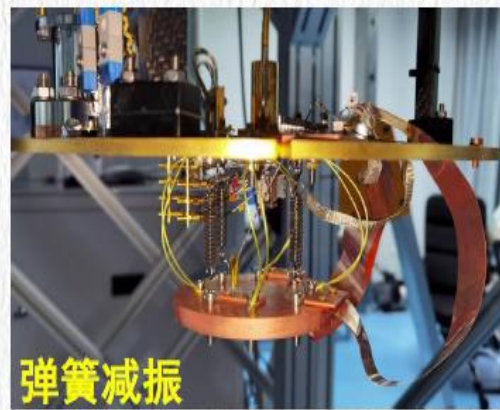
NTD/Heater等胶点阵列耦合晶体



探测器组装及电学引线

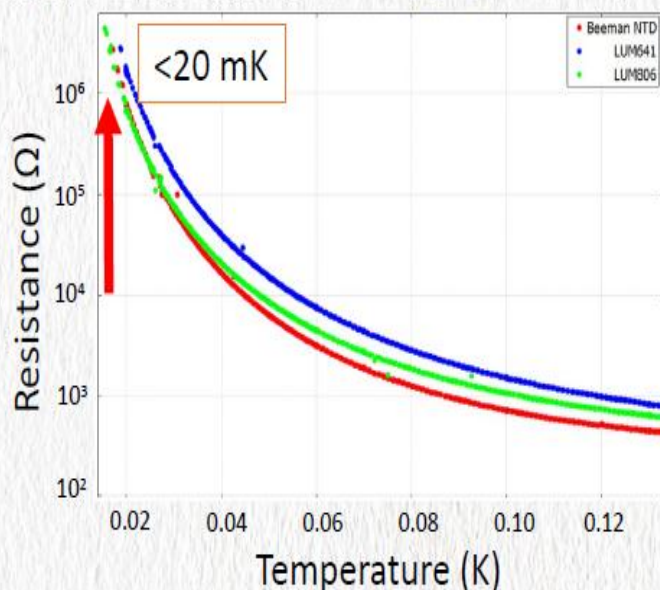


探测器安装至制冷机冷盘

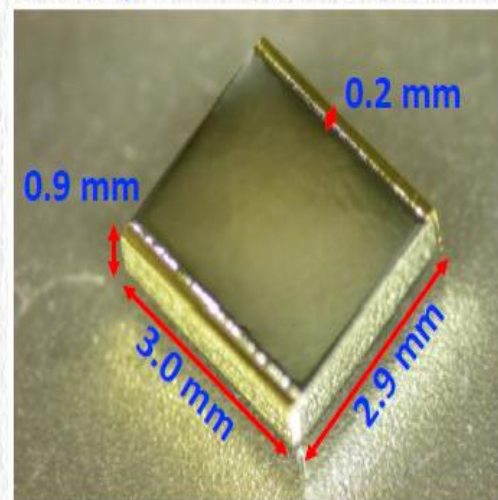


NTD低温探测

❁ 低温晶体量热器的核心部件之一，可以实现 μK 量级温度变化的精密测量



NTD-Ge传感器电阻-温度变化关系



尺寸 $3 \times 2.9 \times 0.9 \text{ mm}^3$

典型NTD-Ge传感器

❁ NTD-Ge电阻-温度R-T曲线关系描述

$$R = R_0 \exp\left(\left(\frac{T_0}{T}\right)^\alpha\right)$$

Ge本征属性 $\rightarrow R_0$

掺杂浓度 $\rightarrow T_0$

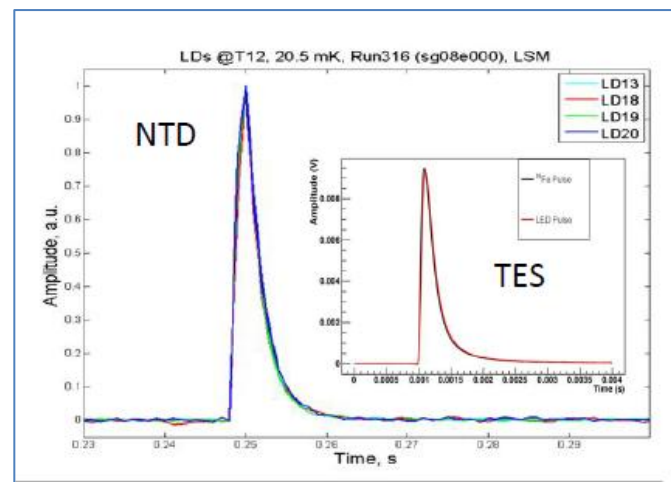
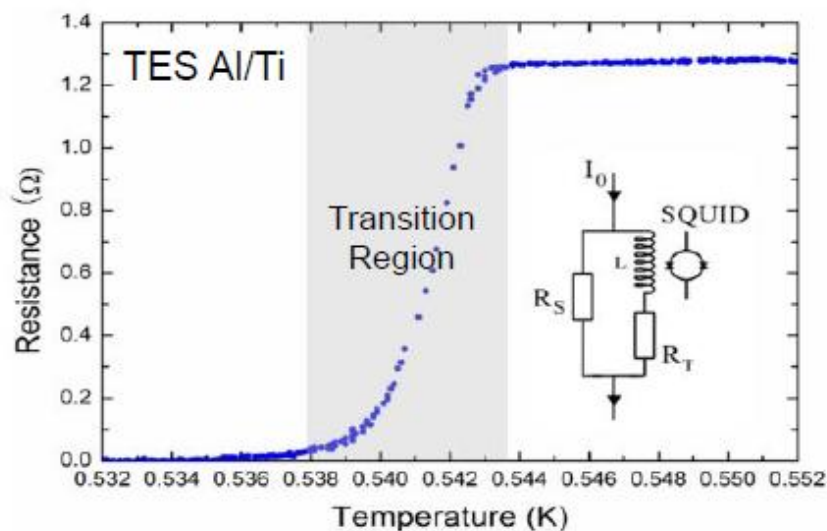
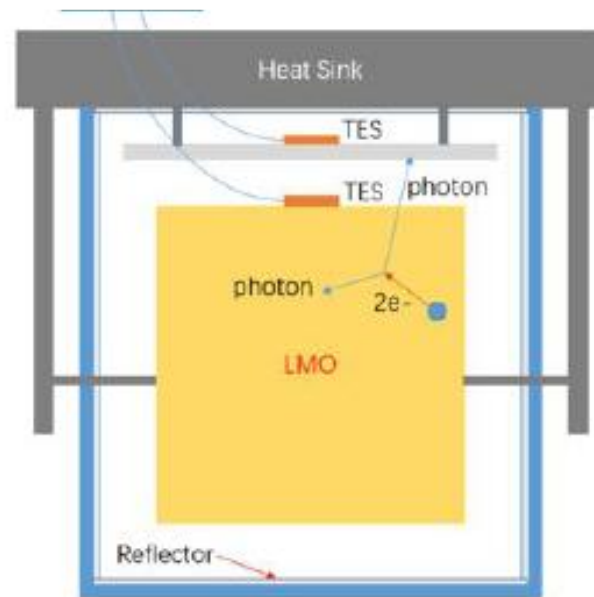
其中, $\alpha = 0.5$

❁ NTD-Ge由伯克利国家实验室研制，典型取值 $R_0 \sim 1.13 \Omega$, $T_0 \sim 3.84 \text{ K}$, **366 M Ω @10 mK**

363 M Ω @10.008 mK

Transition Edge Sensor TES

Transition Edge Sensor, TES



中微子研究的几个前沿热点物理

- 1, 无中微子的双贝塔衰变
- 2, 中微子与原子核的相干散射
- 3, 中微子反常磁矩实验

有/无中微子的双贝塔衰变

- Rare $(Z,A) \rightarrow (Z+2,A)$ nuclear transition, with emission of two electrons

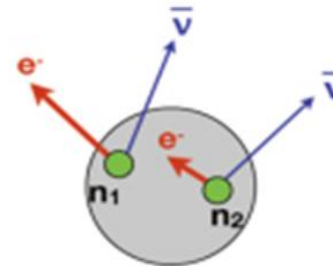
- Two basic decay modes

1, Two neutrino mode $2\nu\beta\beta$:

Standard Model allowed

Observed in several nuclei;

10^{19} - 10^{21} yr half-lives

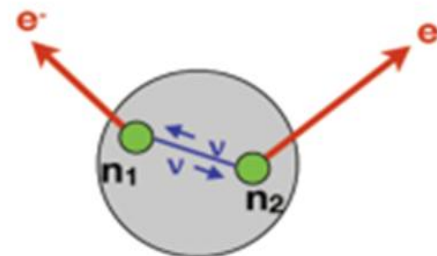


2, Neutrinoless mode $0\nu\beta\beta$

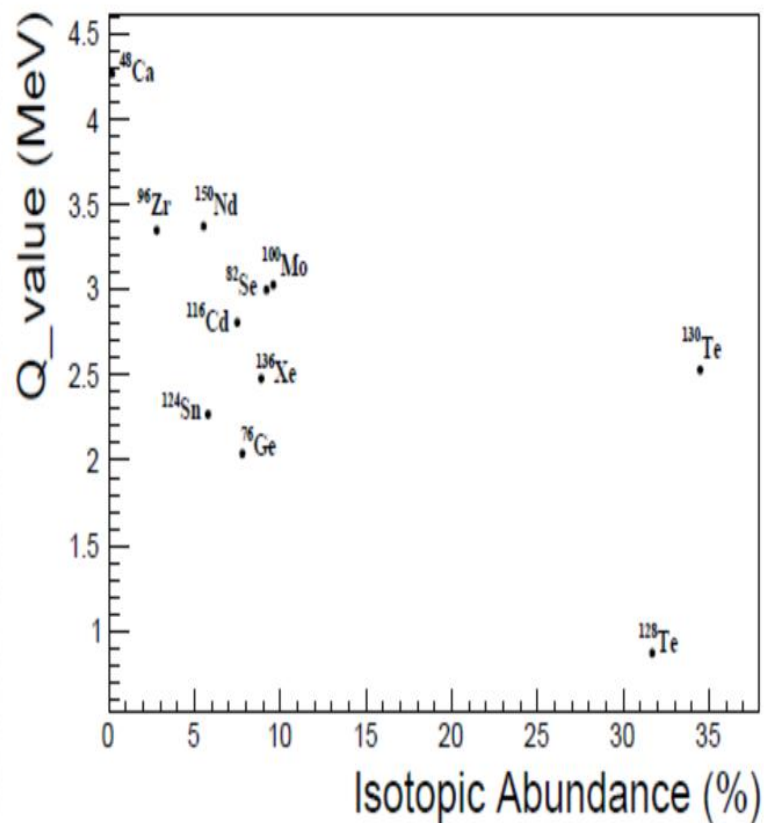
Not observed yet in Nature

$>10^{25}$ yr half-lives

Would signal Beyond-SM physics

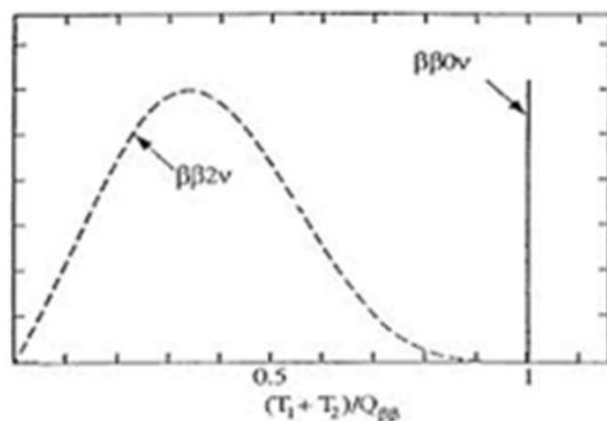


锆76等的衰变能和天然丰度

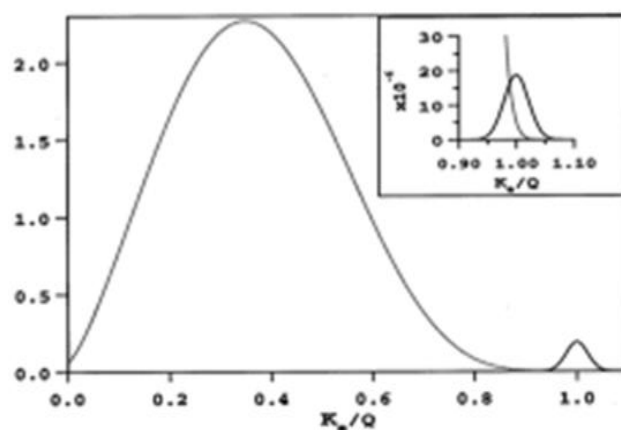


核素	衰变能 Q (MeV)	自然同位素丰度 (%)
⁴⁸ Ca	4.27	0.2
⁷⁶ Ge	2.04	7.8
⁸² Se	3.00	9.2
⁹⁶ Zr	3.35	2.8
¹⁰⁰ Mo	3.03	9.6
¹¹⁶ Cd	2.81	7.5
¹²⁴ Sn	2.27	5.8
¹²⁸ Te	0.87	31.7
¹³⁰ Te	2.53	34.5
¹³⁶ Xe	2.48	8.9
¹⁵⁰ Nd	3.37	5.6

$0\nu\beta\beta$ decay and the Background due to $2\nu\beta\beta$ decay



测量 2β 衰变能谱



选择具有 2β 衰变的元素，并能测量其能谱



2β 衰变的源 + 探测器

国际上现有实验对无中微子双贝塔衰变候选核素灵敏度限制

核素	半衰期 $T_{1/2}^{0\nu}$ (年)	有效中微子质量 $\langle m_{\beta\beta} \rangle$ (meV)	实验	探测器技术
^{48}Ca	$>5.8 \times 10^{22}$ [25]	3500-22000	ELEGANT-IV	$\text{CaF}_2(\text{Eu})$ 闪烁体
^{76}Ge	$>8.0 \times 10^{25}$ [26]	120-260	GERDA	高纯锗探测器
	$>1.9 \times 10^{25}$ [27]	240-520	Majorana-Demonstrator	高纯锗探测器
^{82}Se	$>3.6 \times 10^{23}$ [28]	890-2430	NEMO-3	径迹探测器
^{96}Zr	$>9.2 \times 10^{21}$ [29]	7200-19500	NEMO-3	径迹探测器
^{100}Mo	$>1.1 \times 10^{24}$ [30]	330-620	NEMO-3	径迹探测器
^{116}Cd	$>1.0 \times 10^{23}$ [31]	1400-2500	NEMO-3	径迹探测器
^{130}Te	$>1.5 \times 10^{25}$ [32]	110-520	CUORE	晶体微量热器
^{136}Xe	$>1.1 \times 10^{26}$ [33]	61-165	KamLAND-Zen	液体闪烁体
	$>1.8 \times 10^{25}$ [34]	150-400	EXO-200	时间投影室
^{150}Nd	$>2.0 \times 10^{22}$ [35]	1600-5300	NEMO-3	径迹探测器

中微子与原子核的相干散射

PHYSICAL REVIEW D

VOLUME 9, NUMBER 5

1 MARCH 1974

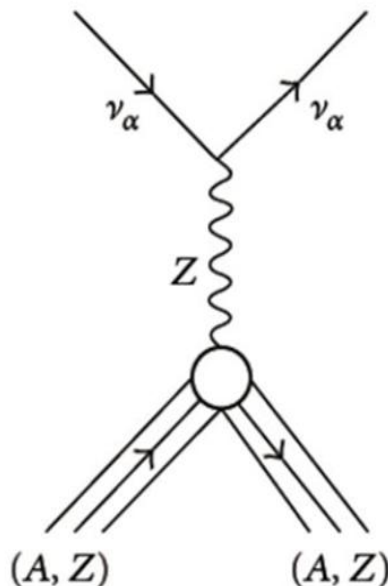
Coherent effects of a weak neutral current

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)



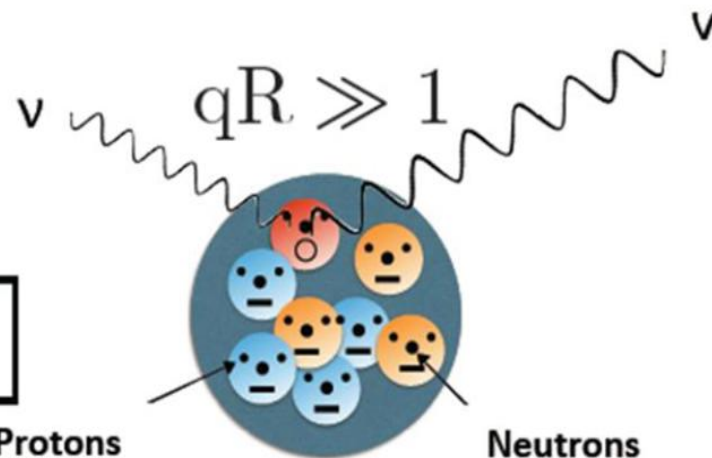
If there is a weak neutral current, then the elastic scattering process $\nu + A \rightarrow \nu + A$ should have a sharp coherent forward peak just as $e + A \rightarrow e + A$ does. Experiments to observe this peak can give important information on the isospin structure of the neutral current. The experiments are very difficult, although the estimated cross sections (about 10^{-38} cm² 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”:

$$qR \lesssim 1$$

q : momentum transfer
 R : nucleus size

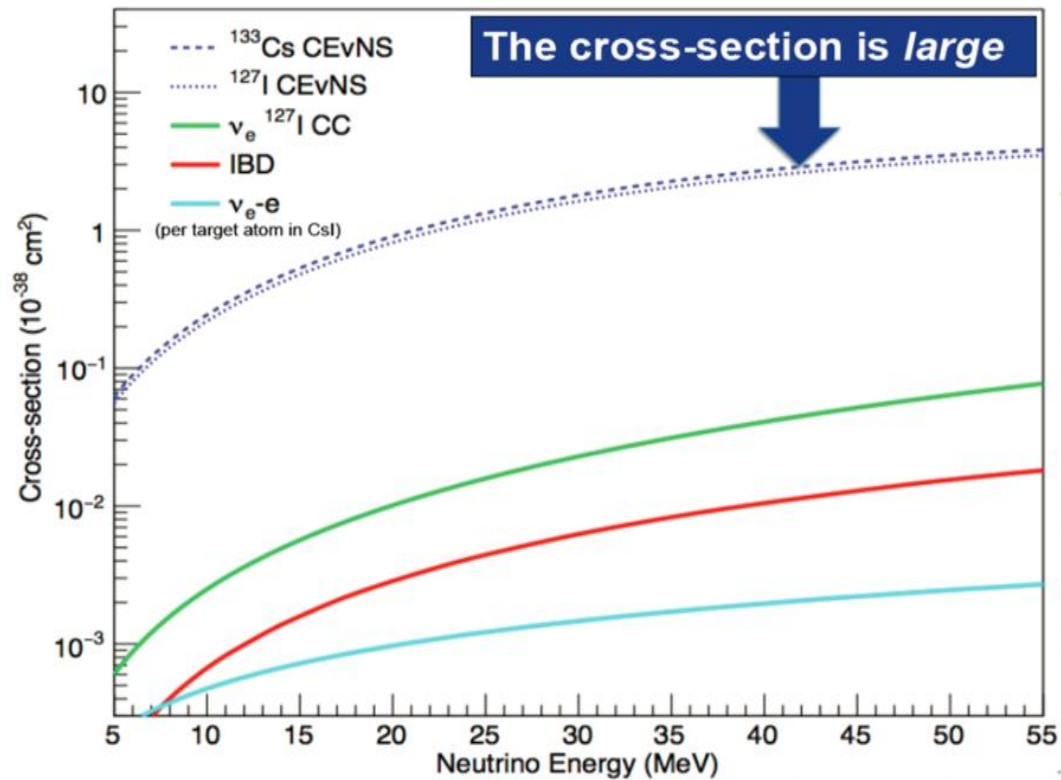
Aluminium: $1/R \approx 60$ MeV
Lead: $1/R \approx 30$ MeV



Protons

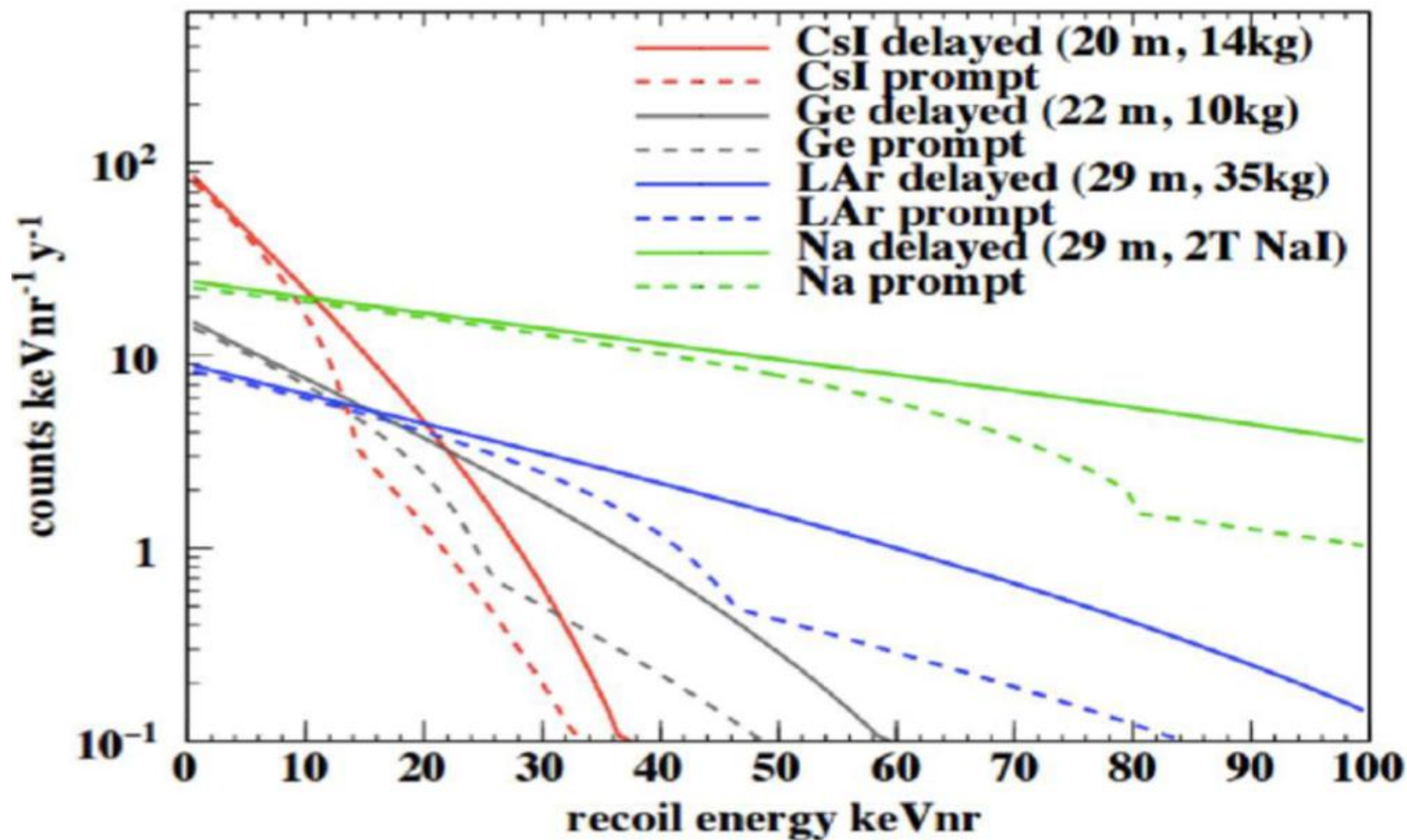
Neutrons

中微子相干散射截面大



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

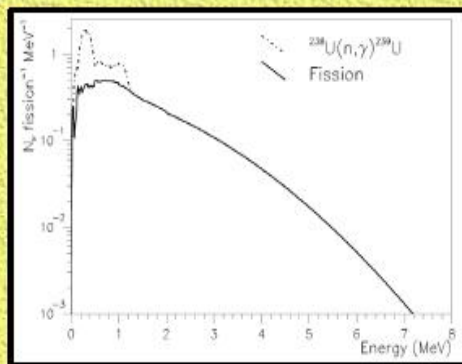
反冲核能量非常低



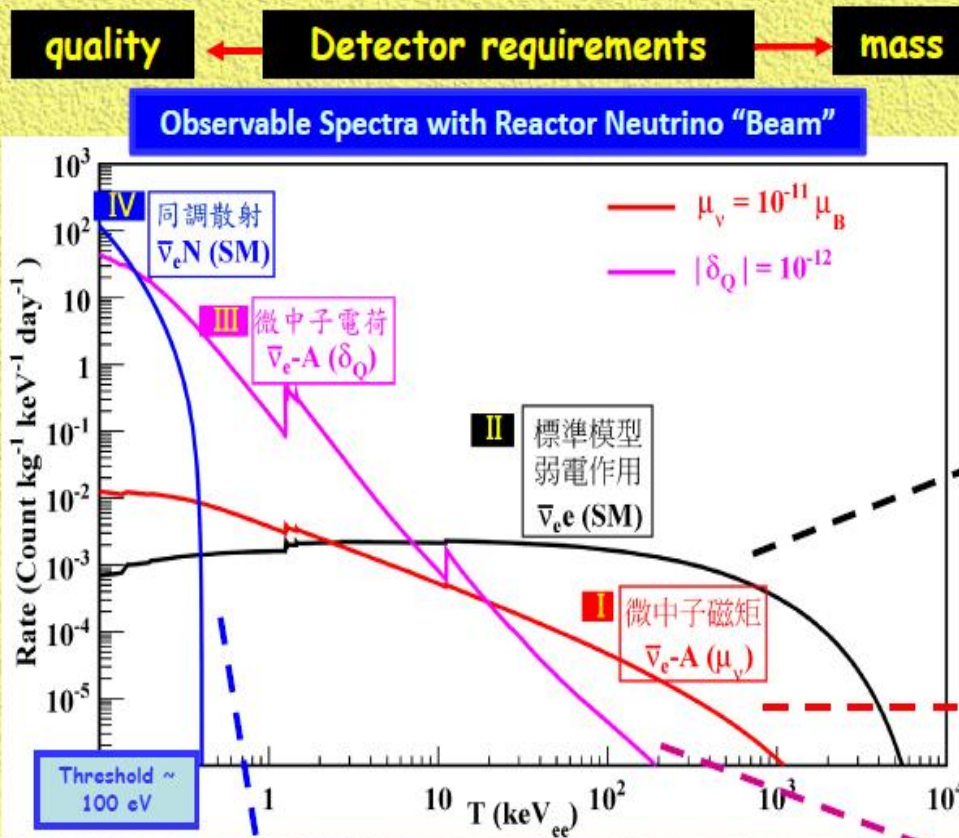
$$\frac{d\sigma(E_\nu, T)}{dT} = \frac{G_f^2}{4\pi} Q_w^2 M \left(1 - \frac{MT}{2E_\nu^2} \right) F(Q^2)^2$$

中微子反常磁矩測量

Neutrino Properties & Interactions at Reactor



Reactor Neutrino Spectrum



200 kg CsI(Tl)

v-e Scattering SM
[PRD10] & NSI/BSM
[PRD10, PRD12, PRD15, PRD17]
⇒ 200 kg CsI(Tl)

Magnetic Moments
[PRL03, PRD05, PRD07]
⇒ 1 kg HPGe

Neutrino Milli-charge
[PRD14]
⇒ sub-keV O(kg) PCGe

vN Coherent Scattering [Current Theme; PRD16, PRD21]

Pioneered sub-keV O(kg) ULEGe / PCGe [MPLA08, NIMA16]

⇒ Light Dark Matter Searches @ KSNL [PRD09, PRL13, AP14, PRD19]

⇒ CDEX DM Program @ CJPL [PRD13.....]

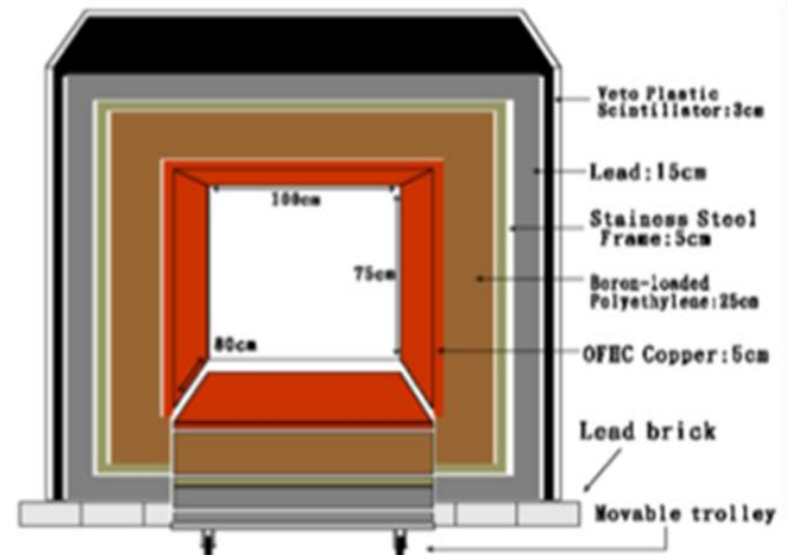
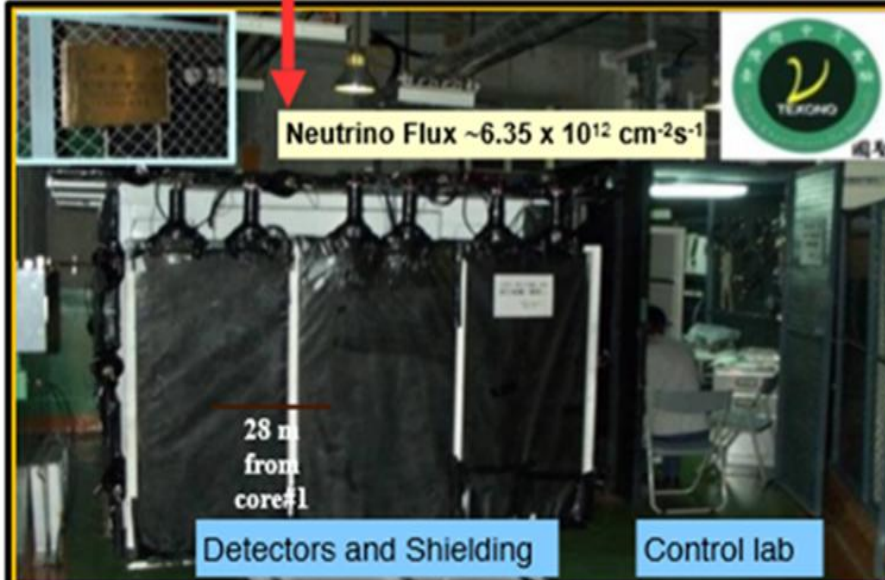
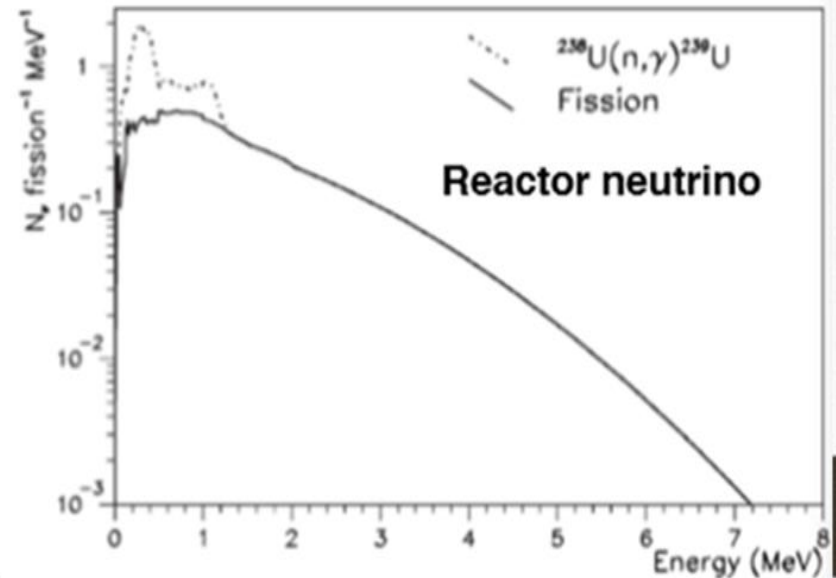
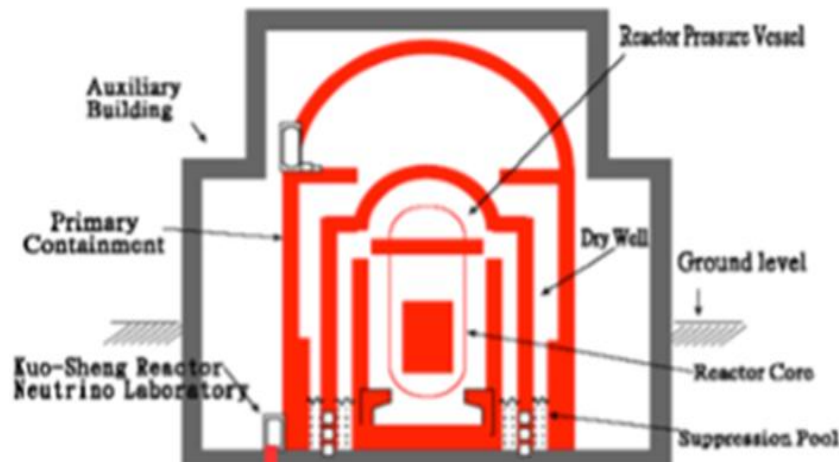
⇒ Theory Program [PLB14.....]



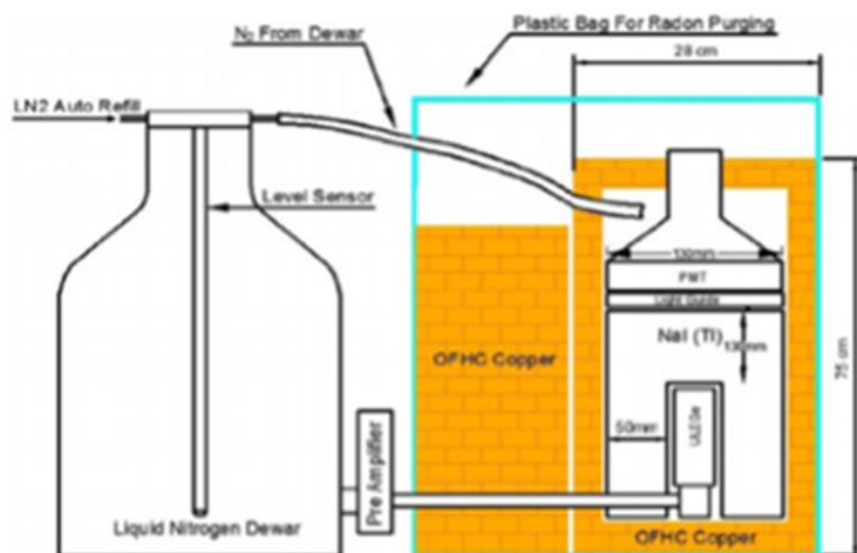
sub-keV PCGe

Kuo-Sheng Reactor Laboratory (KSNL)

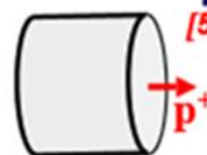
Kuo-Sheng Nuclear Power Station : Reactor Building



Hardware and Thresholds

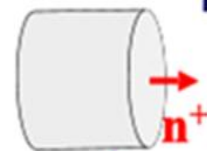


p- PCGe
[500g – 1 kg]



n^+ (~1mm Li diffused)

n- PCGe
[500 g]



p^+ (~0.5 μm Boron implanted)



900 g



500 g

Generation	Mass (g)	Pulsar FWHM (eV_{ee})	Threshold (eV_{ee})
G1	500	130	500
G2	900	100	300
G3	1430	soon	soon

谢谢