



清华大学

Tsinghua University

中微子探测

第二讲

王喆

清华大学



本讲内容

1. 中微子反应截面
2. 中微子探测方案

中微子反应截面



截面与平均自由程

▶ $L = 1/(n \times \sigma)$

1. L : 平均自由程, 量纲为距离量纲, 如m, cm
2. σ : 截面, 量纲为面积量纲, 如 cm^2
3. n : 靶粒子数密度, 量纲为 $1/\text{cm}^3$

▶ 对一束入射粒子:

- $I = I_0 e^{-x/L}$, 在位置 x , 束流的流强 I , 将从 I_0 减少 $e^{-x/L}$

▶ 对一个入射粒子:

- $P(x) = e^{-x/L}$, 表述经过距离 x 后的存活概率



中微子电子散射截面

- ▶ $\nu_e (\bar{\nu}_e) + e^- \rightarrow \nu_e (\bar{\nu}_e) + e^-$ CC和NC
 1. $\sigma(\nu_e e^-) \approx 0.9 \times 10^{-43} (E_\nu/10 \text{ MeV}) \text{ cm}^2$
 2. $\sigma(\bar{\nu}_e e^-) \approx 0.4 \times 10^{-43} (E_\nu/10 \text{ MeV}) \text{ cm}^2$

- ▶ $\nu_{\mu,\tau} (\bar{\nu}_{\mu,\tau}) + e^- \rightarrow \nu_{\mu,\tau} (\bar{\nu}_{\mu,\tau}) + e^-$ NC过程
 1. $\sigma(\nu_{\mu,\tau} e^-) \approx 0.15 \times 10^{-43} (E_\nu/10 \text{ MeV}) \text{ cm}^2$
 2. $\sigma(\bar{\nu}_{\mu,\tau} e^-) \approx 0.14 \times 10^{-43} (E_\nu/10 \text{ MeV}) \text{ cm}^2$



中微子核子散射截面

- ▶ 当中微子能量高时，中微子与核子的散射愈发表现为“中微子与夸克”的散射，当能量较低时，核子作为整体散射的效应就越明显。
- ▶ 与核子散射的截面一般会在 $10^{-38} - 10^{-40}\text{cm}^2$ 左右

计算方法及过程超出目前课程的水平，感兴趣可参考

《Fundamentals of Neutrino Physics and Astrophysics》 Carlo Giunti and Chung W. Kim

《Massive Neutrinos in Physics and Astrophysics》 Rabindra N. Mohapatra and Palash B. Pal

中微子探测方案



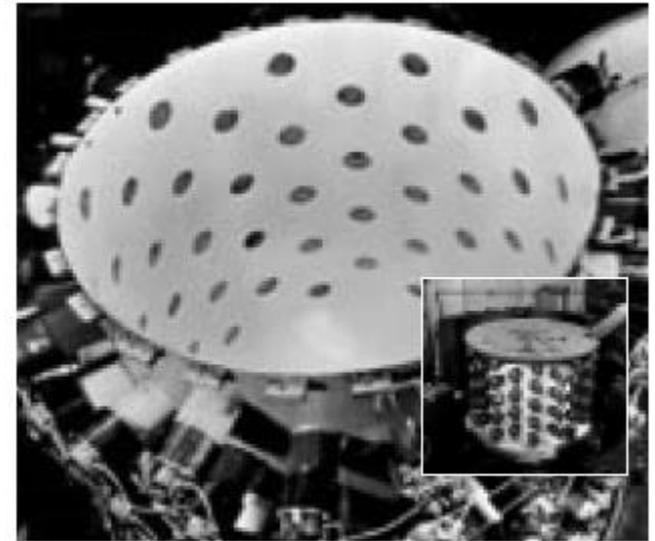
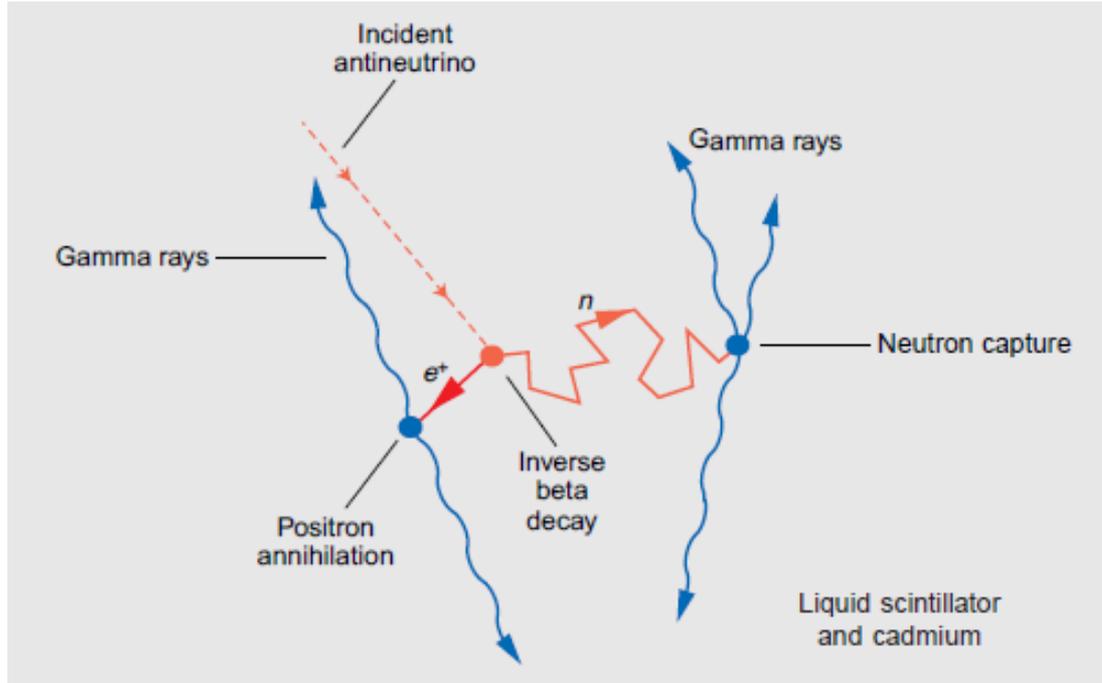
探测思想

- ▶ 电中性
- ▶ 弱相互作用

- ▶ 只能通过探测中微子反应的产物来探测中微子

发现中微子的过程

- ▶ 来自反应堆，中微子能量小于10 MeV
- ▶ $\bar{\nu}_e + p \rightarrow n + e^+$ 反 β 衰变过程
- ▶ $n + {}^{108}\text{Cd} \rightarrow {}^{109\text{m}}\text{Cd} \rightarrow {}^{109}\text{Cd} + \gamma$ 9 MeV, 延迟~5 us



重要中微子探测方案实例



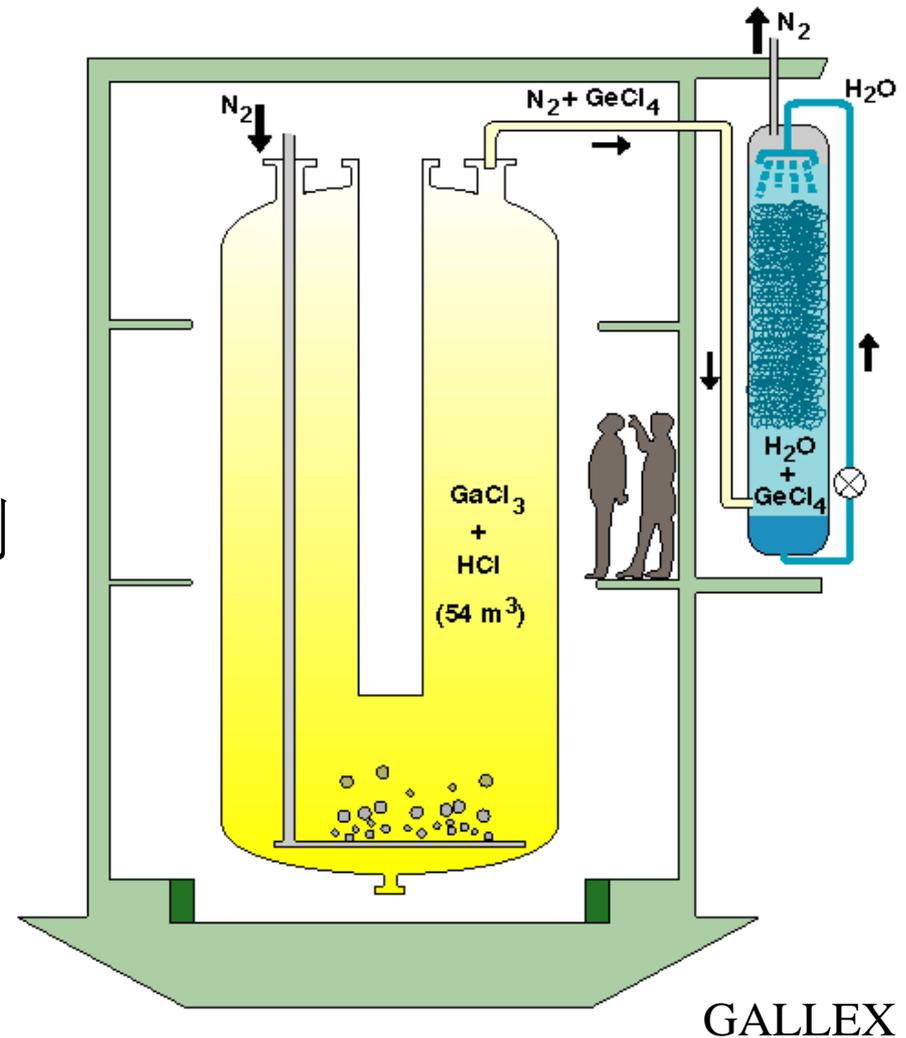
发现太阳中微子的实验，放射性化学方法

- ▶ 太阳中微子，能量小于20 MeV
- ▶ $\nu_e + {}^{37}\text{Cl} \rightarrow {}^{37}\text{Ar} + e^-$
 $E_{\text{th}}=0.814 \text{ MeV}$
- ▶ Raymond Davis在Homestake的地下准备了615吨 C_2Cl_4 ，每隔一段时间，如果有太阳中微子，会有一些的 ${}^{37}\text{Ar}$ 产生。 ${}^{37}\text{Ar}$ 常态为气体，在 C_2Cl_4 液体中通入大量的氦气，带出其中的 ${}^{37}\text{Ar}$ 。
- ▶ ${}^{37}\text{Ar}$ 气体导出后，纯化，利用正比室测量 ${}^{37}\text{Ar}$ 的含量。



GALLEX/GNO和SAGE实验

- ▶ $\nu_e + {}^{71}\text{Ga} \rightarrow {}^{71}\text{Ge} + e^-$
 $E_{\text{th}} = 0.233 \text{ MeV}$
- ▶ GALLEX/GNO: GaCl_3 - HCl 溶液形式的30.3 吨 gallium
- ▶ SAGE: 50吨Ga金属
- ▶ Ge被导出，利用正比室测量放射性物质含量





化学方法的一些短处

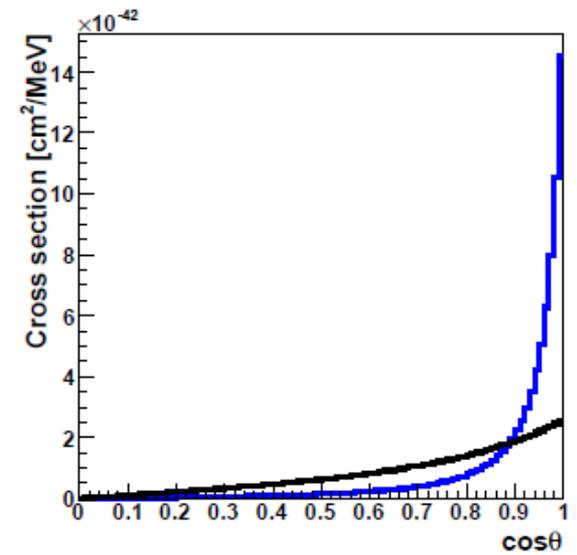
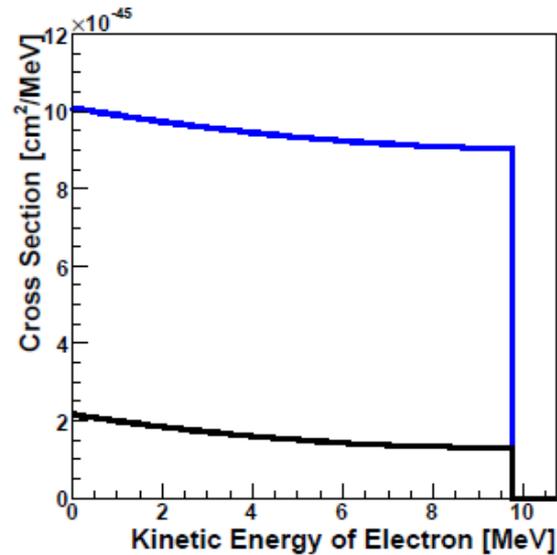
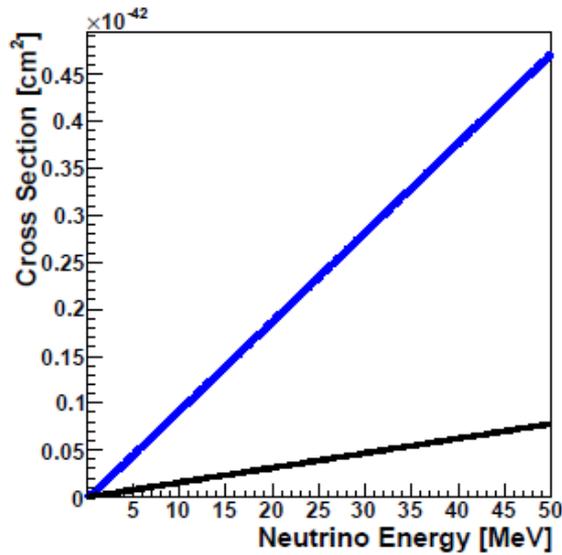
- ▶ 不是实时的，每个分析周期在一个月以上
- ▶ 无法探知中微子的能量，只知道能量阈值
- ▶ 无法知道中微子的方向

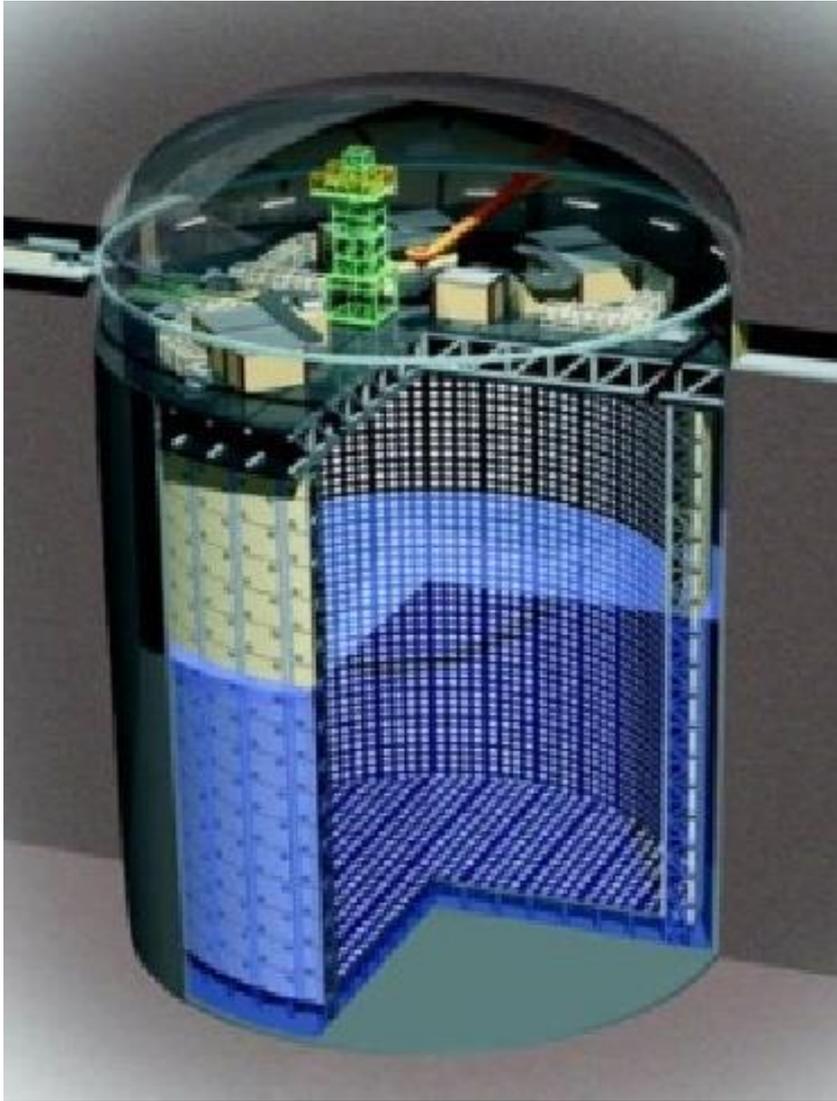


纯水探测

- ▶ IMB, Kaminokande, Super Kaminokande
- ▶ $\nu + e \rightarrow \nu + e$
- ▶ $\nu_{\mu} + N \rightarrow \mu + M$
- ▶ $\nu_e + N \rightarrow e + M$
- ▶ 通过该过程发现了1987A超新星爆发中微子
- ▶ 发现了大气中微子的振荡

- ▶ 通过探测散射出的电子能量和方向研究中微子的方向和能量





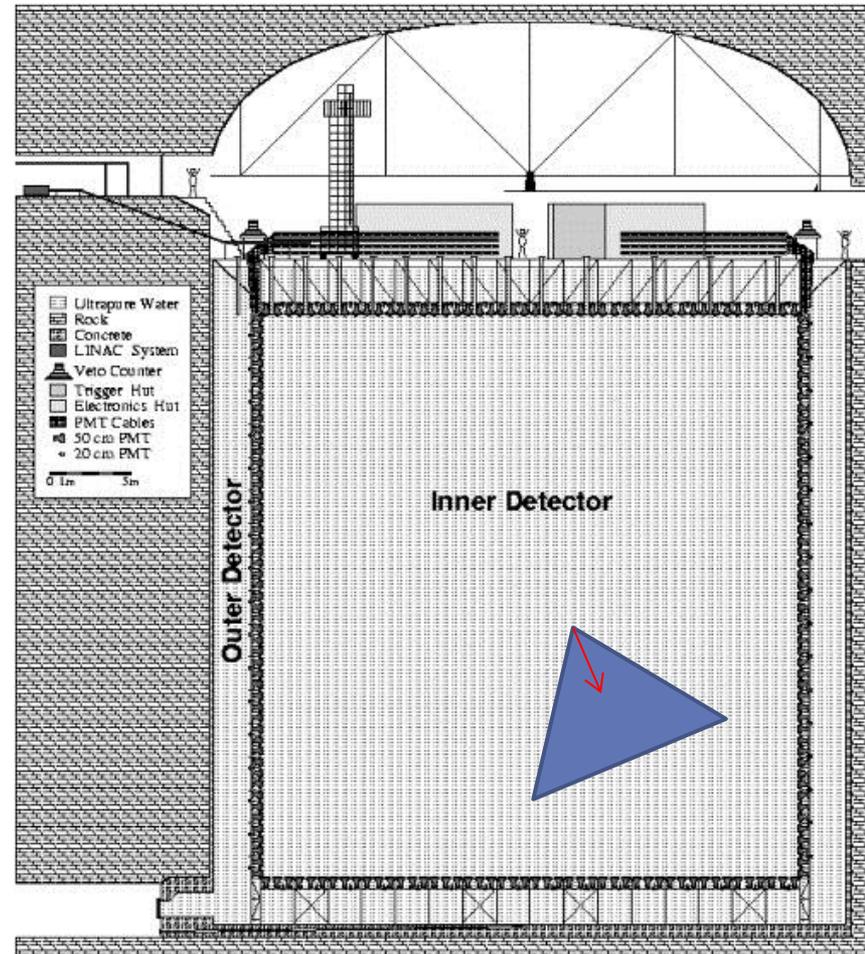
Super K

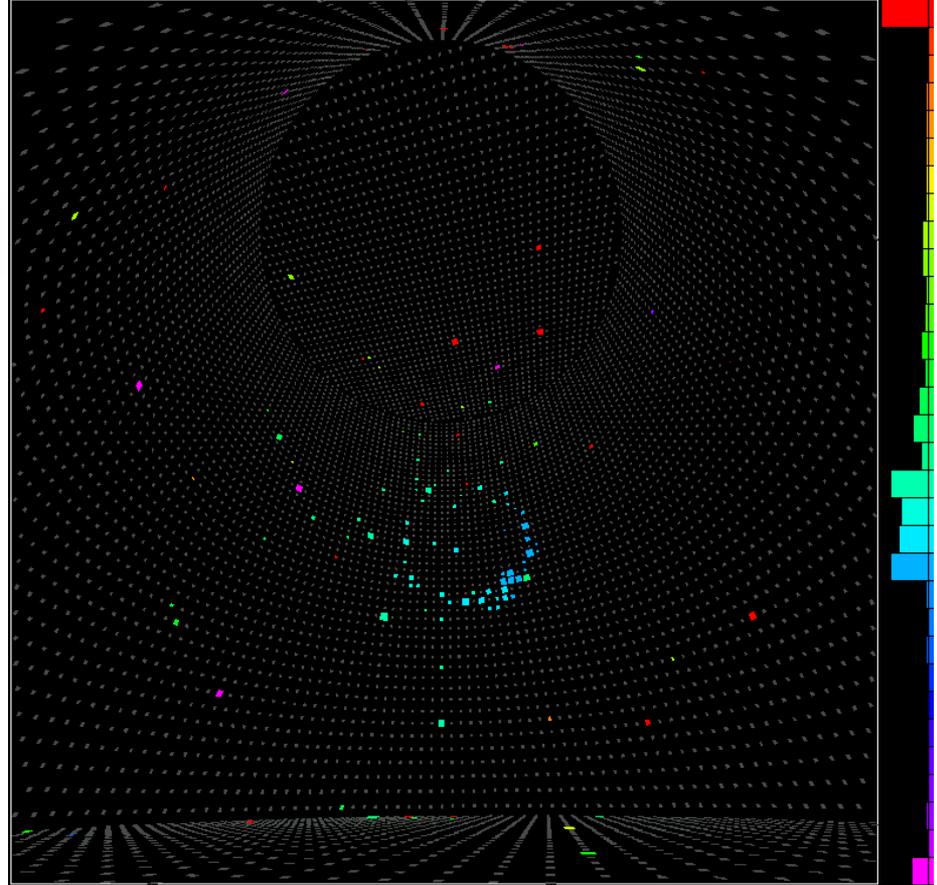
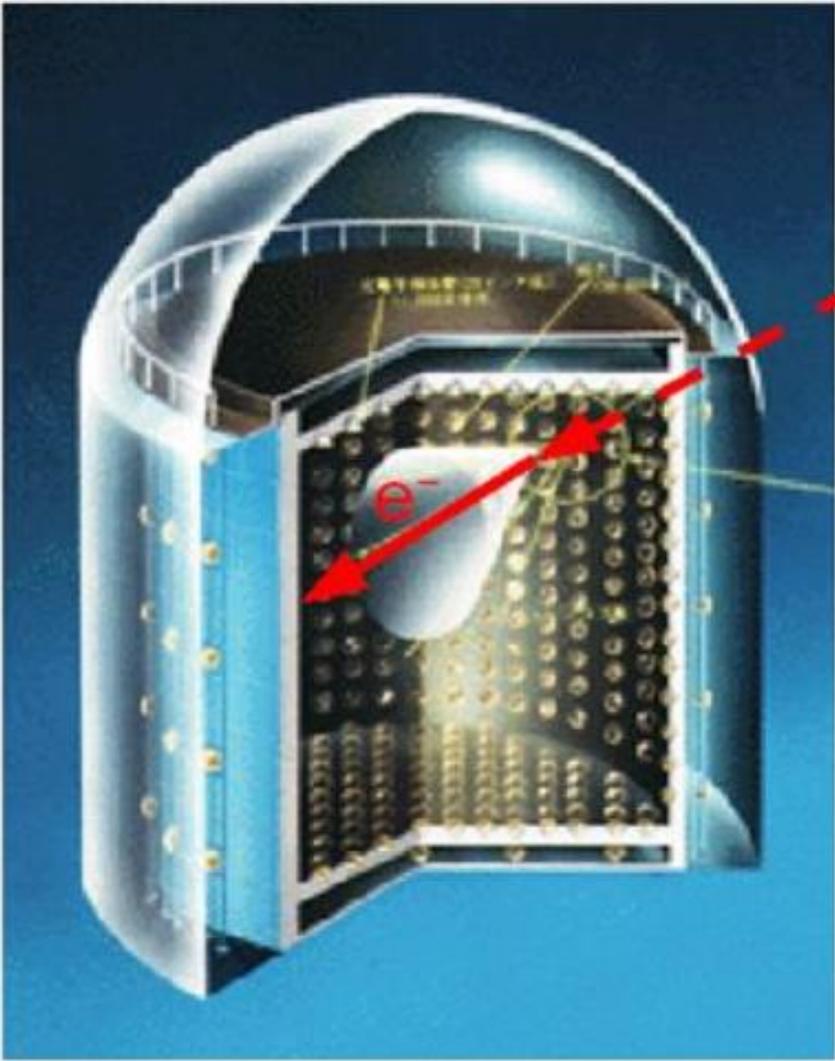


IMB

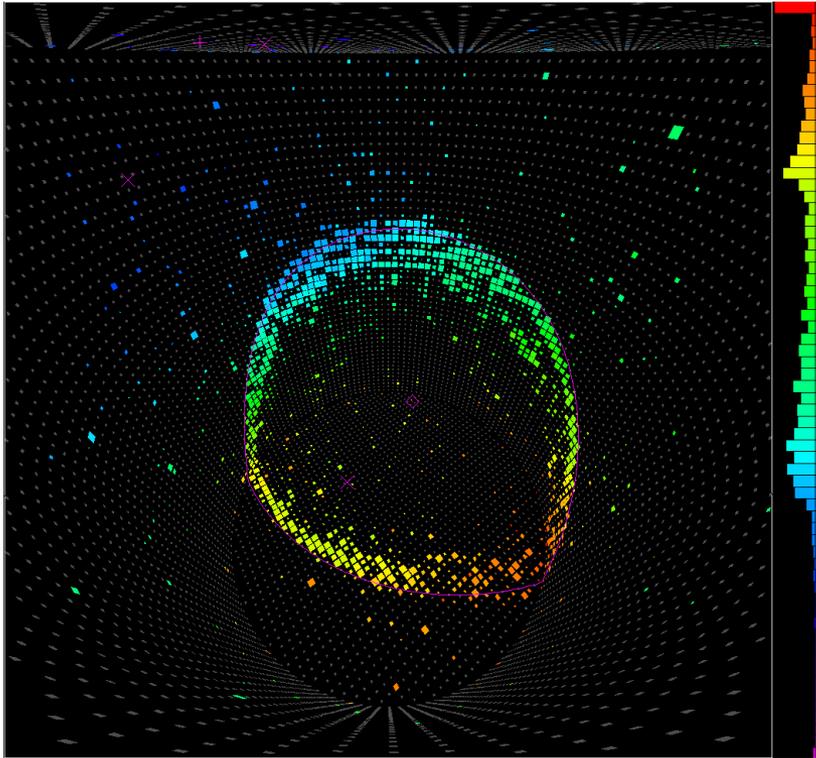
判选探测到中微子的标准

- ▶ 外探测器与内探测器
- ▶ 事例顶点必须在内探测器内
- ▶ 外探测器必须没有明显信号
- ▶ 以此排除宇宙线缪子的本底过程

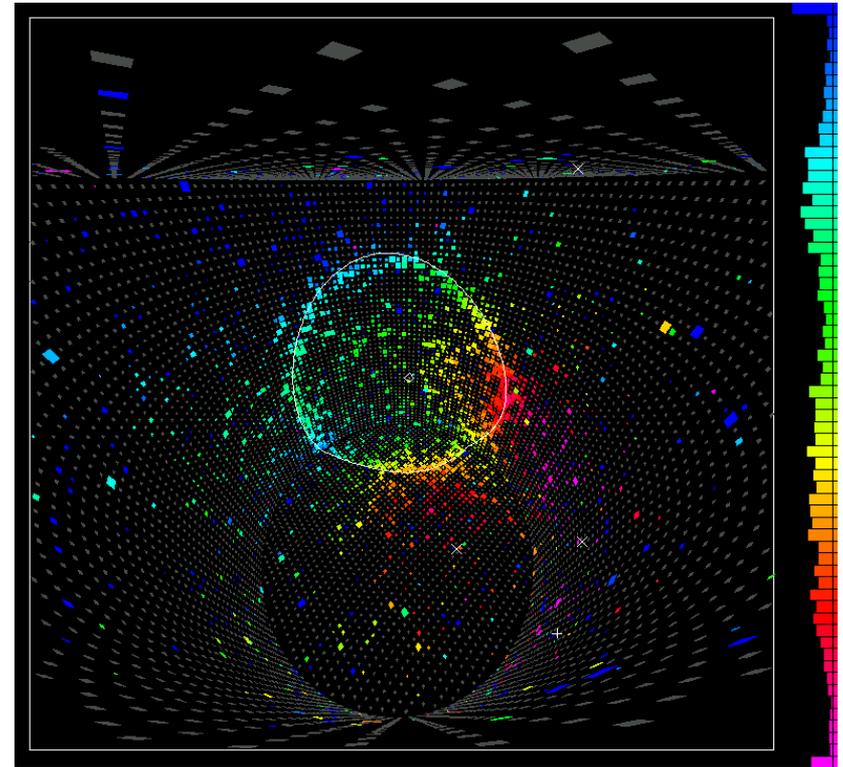




一个太阳中微子事例



高能缪中微子事例
光滑边界



高能电子中微子事例
粗糙边界

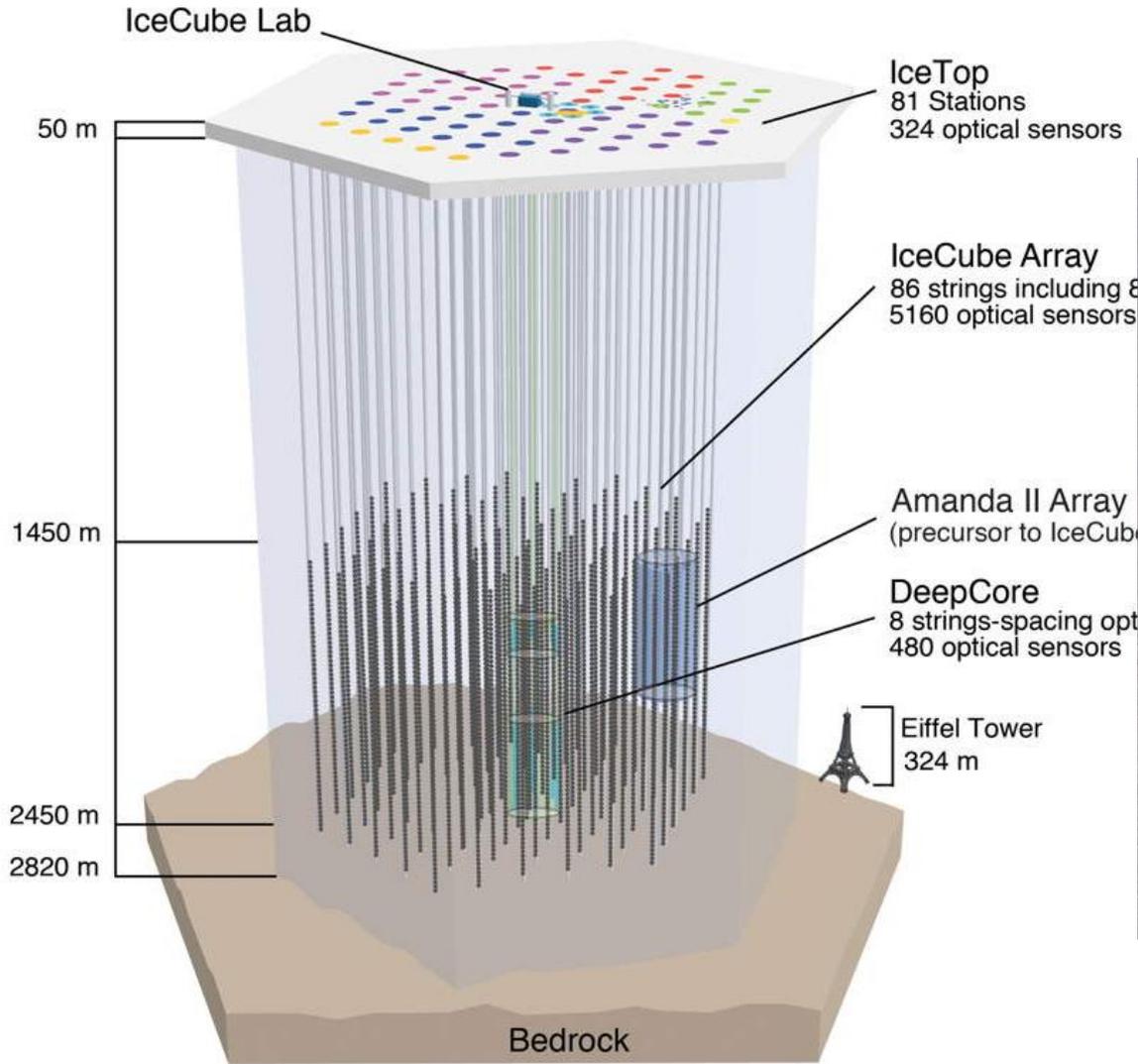


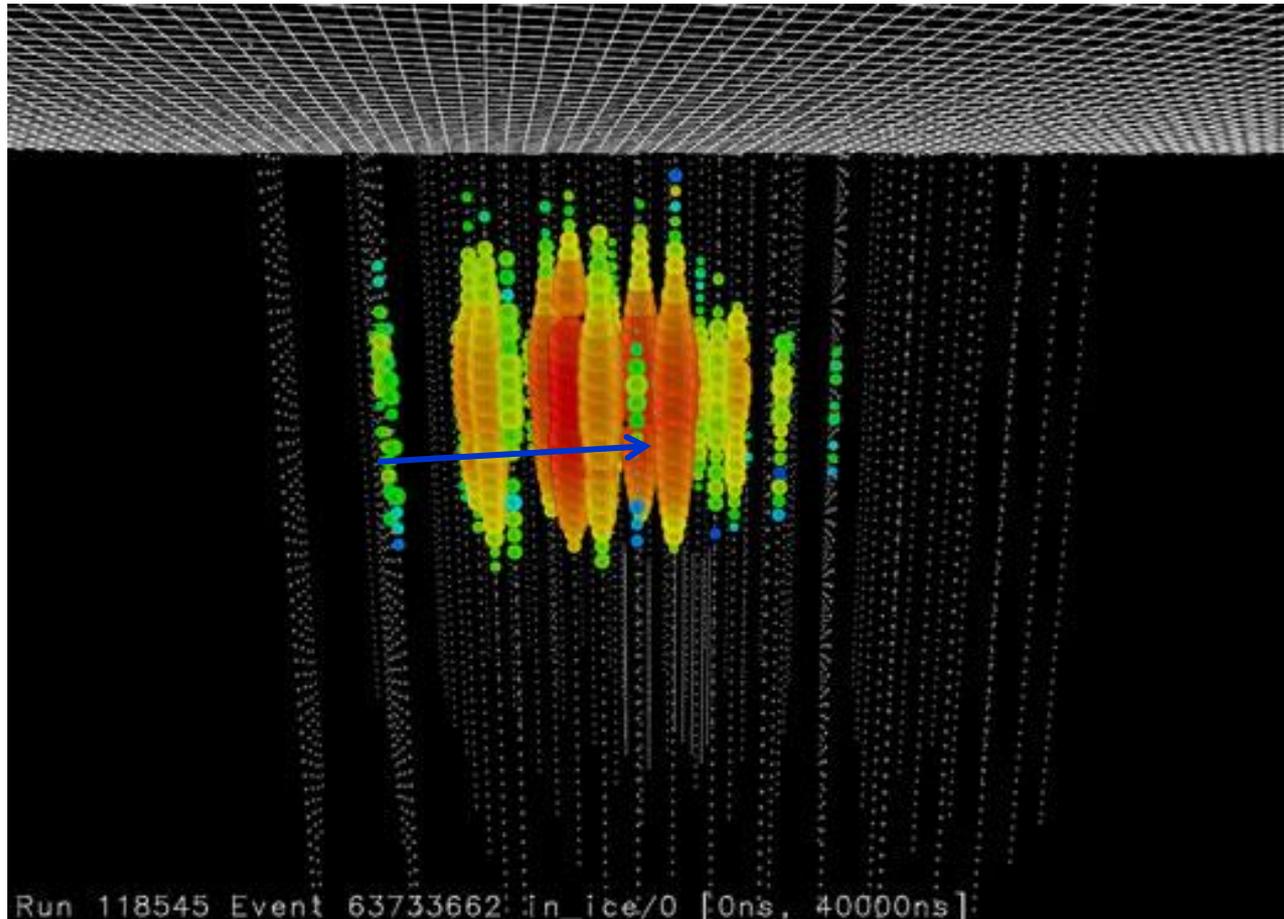
- ▶ 对低能的太阳中微子，只有一个中微子电子散射过程可以探测
- ▶ 纯水价格低，纯化去本底容易
- ▶ 但Cherenkov光的产额低
- ▶ 使用大量的PMT探测Cherenkov光，PMT上的暗噪声形成了主要的本底
- ▶ PMT的噪声限制了探测阈值，例如不能低于5 MeV



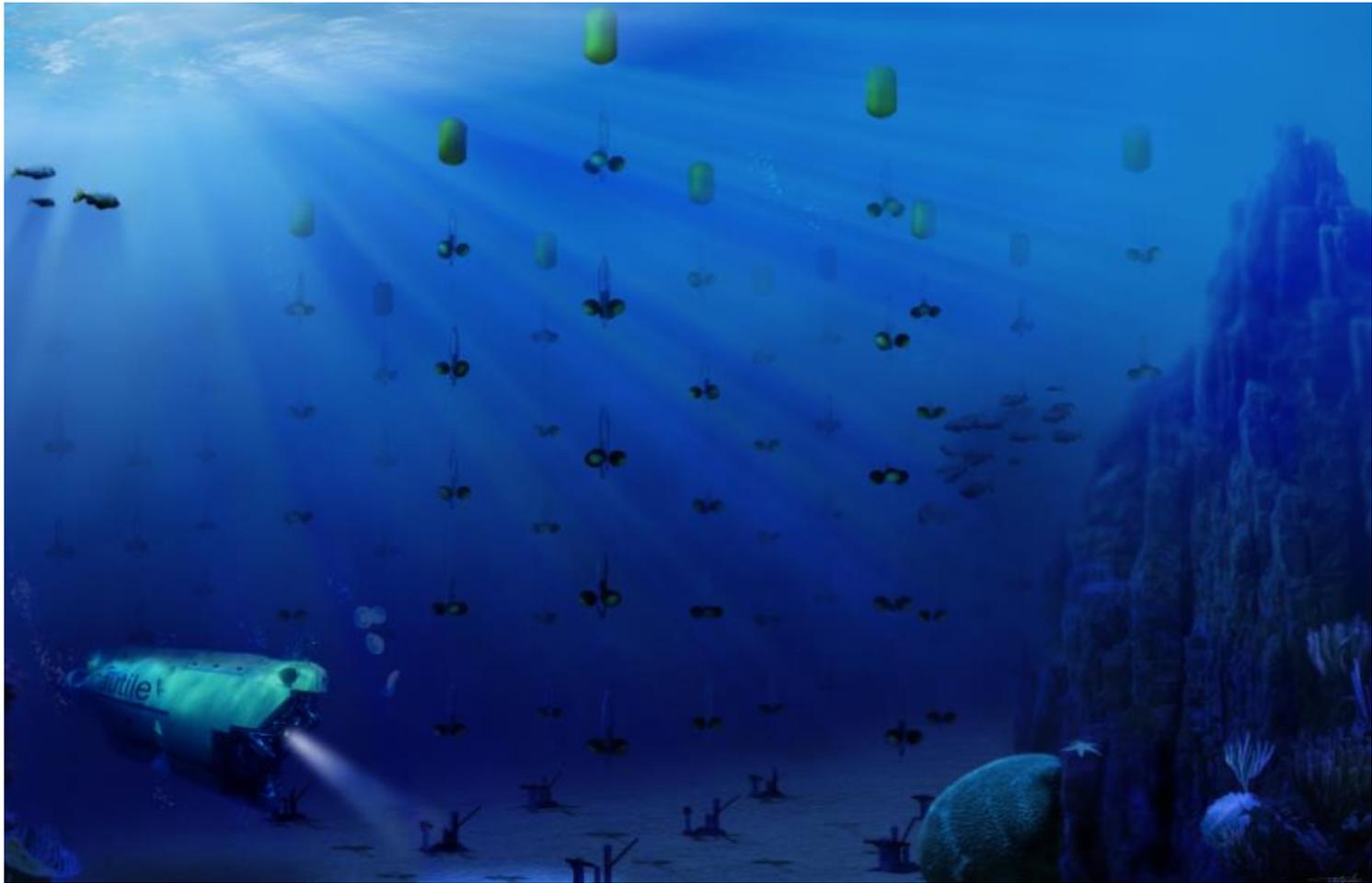
巨大水体或冰体

- ▶ 利用天然水体或冰体，提高探测器体积
- ▶ $\nu_{\mu} + N \rightarrow \mu + M$
- ▶ $\nu_e + N \rightarrow e + M$
- ▶ PMT的排布也变平均话，拟补衰减长度的不足
- ▶ 目标是可以探测高能，甚至超高能的中微子
- ▶ 实验：IceCube，ORCA等





- ▶ 中心的多串PMT看到了强的Cherenkov光，也必须不能出现在外部的反符合层



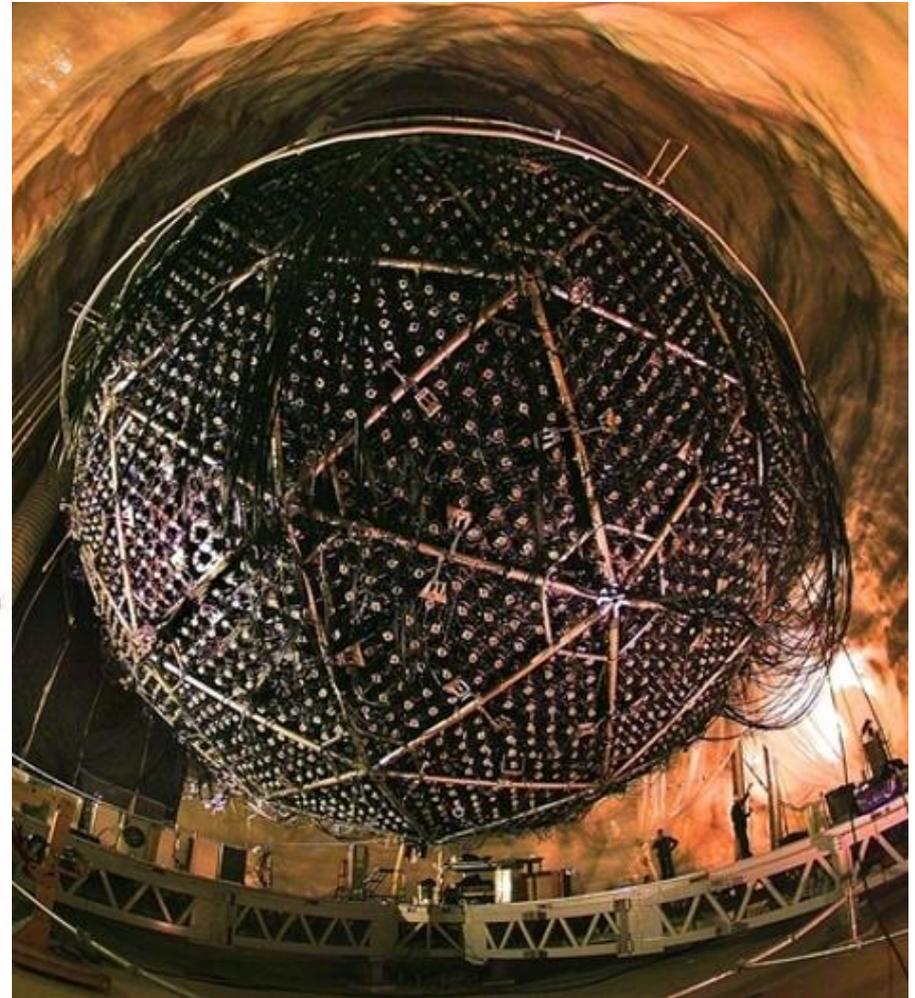
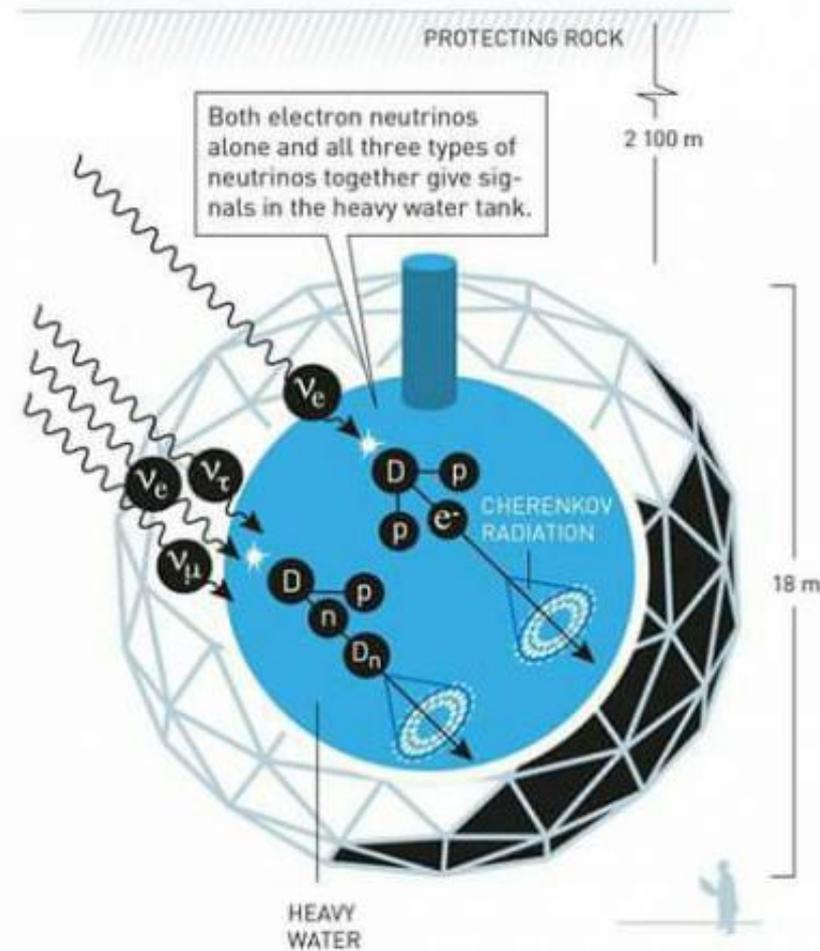
▶ 海底（湖底）探测器的假想图



重水探测器， D_2O

- ▶ SNO
- ▶ 重水很难获得，用在反应堆，其化学性质和水很不同，对生物有毒
- ▶ $\nu_e + d \rightarrow p + p + e^-$ CC (电子1-0.34 $\cos\theta$ 分布)
- ▶ $\nu + d \rightarrow p + n + \nu$ NC (中子俘获)
- ▶ $\nu + e \rightarrow \nu + e$ CC和NC (电子前冲)
- ▶ 通过探测散射出的电子能量和方向研究中微子的方向和能量，并且可以探测中性流中的中子
- ▶ Phase I: n俘获在氘核上，放出6.25 MeV 光子
- ▶ Phase II: 加入NaCl, n俘获在 ^{35}Cl , 8.6 MeV 光子
- ▶ Phase III: 加入中子计数器

SUDBURY NEUTRINO OBSERVATORY (SNO)
ONTARIO, CANADA

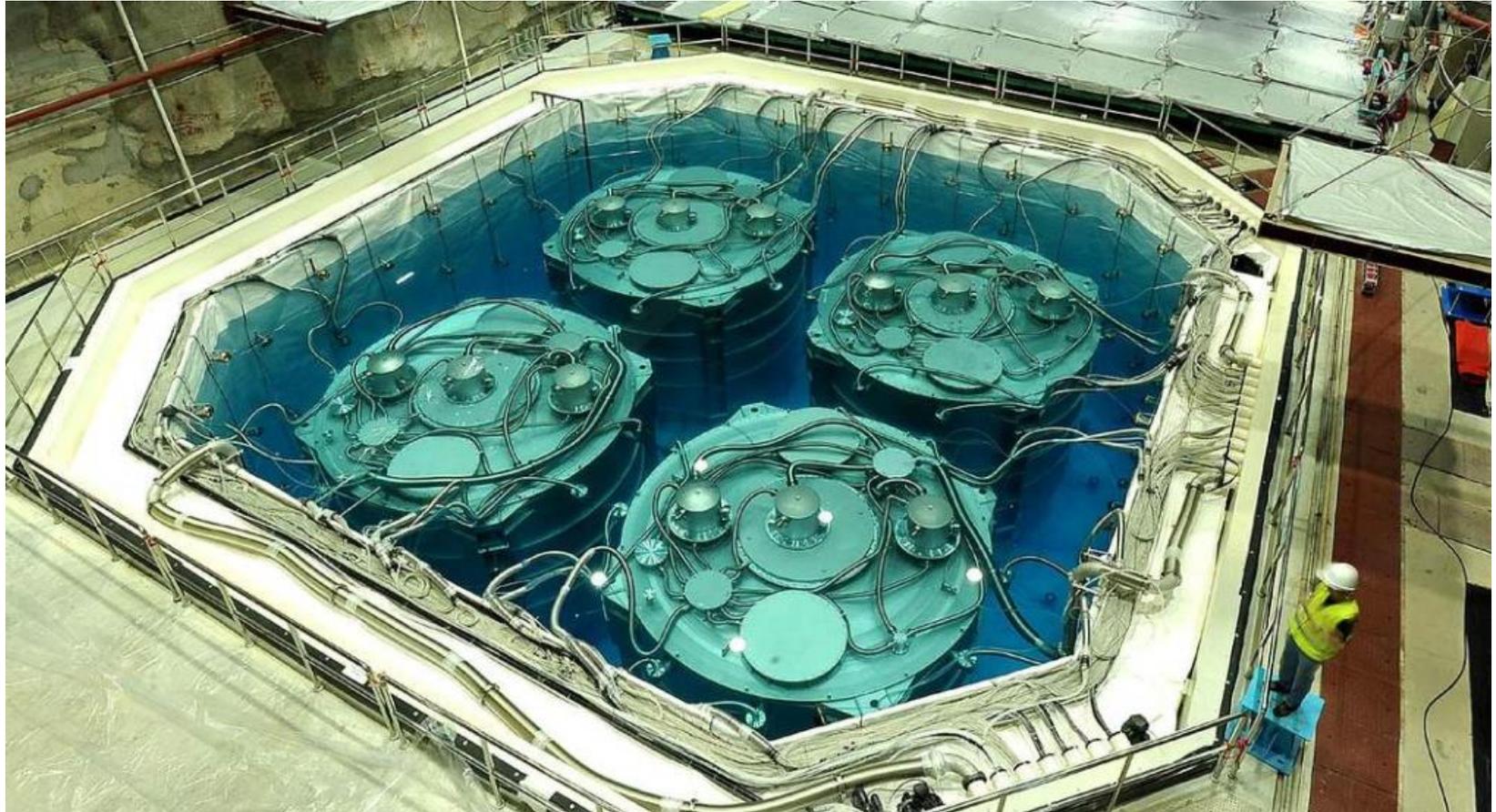


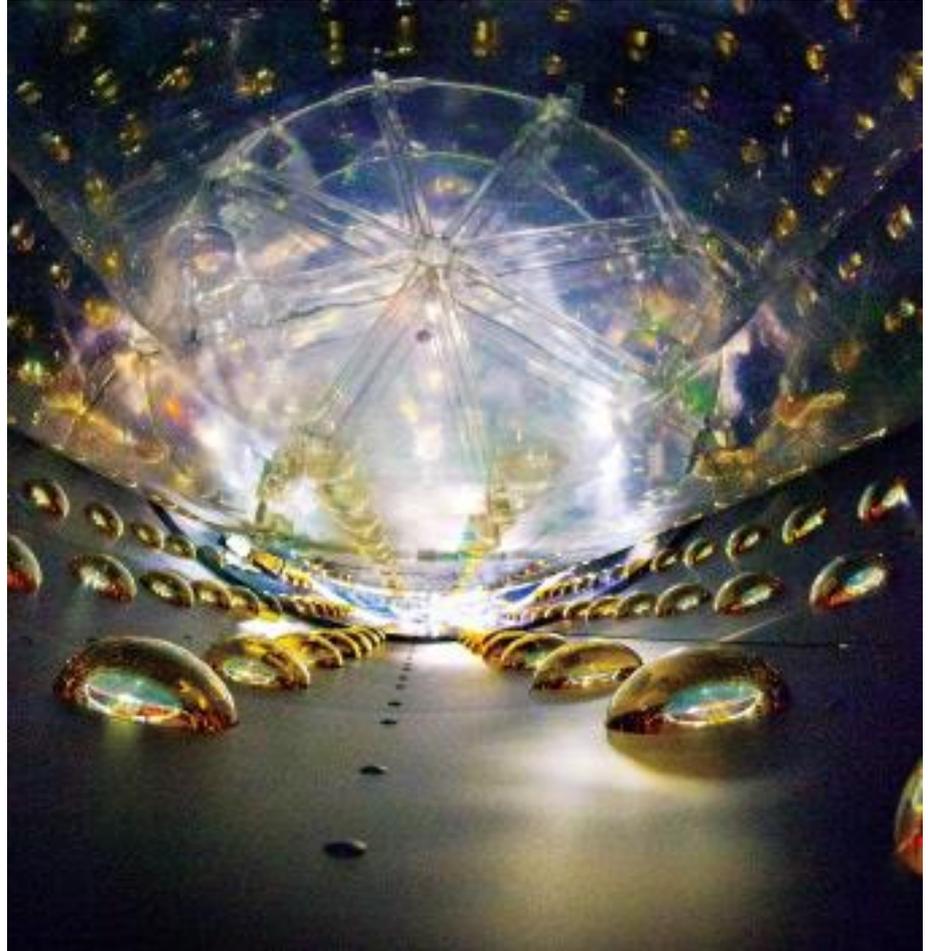
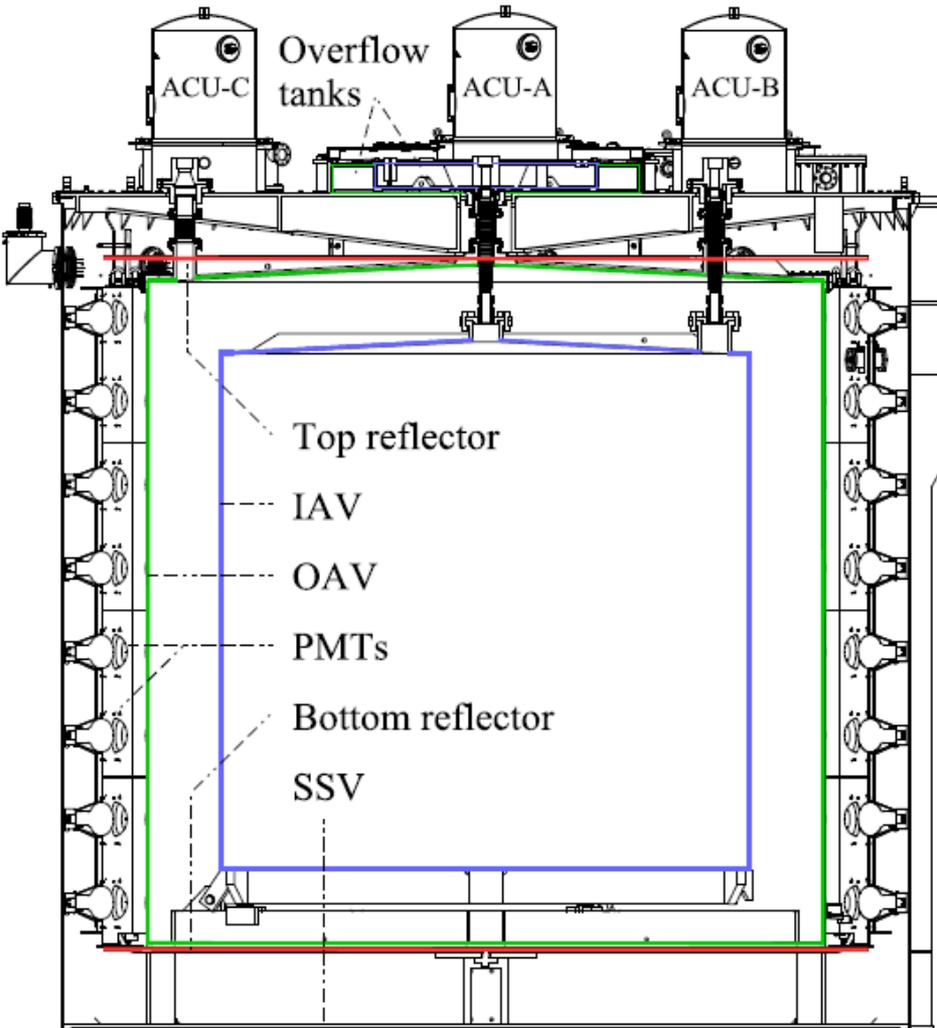
SNOLAB 虚拟游览 <http://www.snolab.ca/facility/vr-tour>

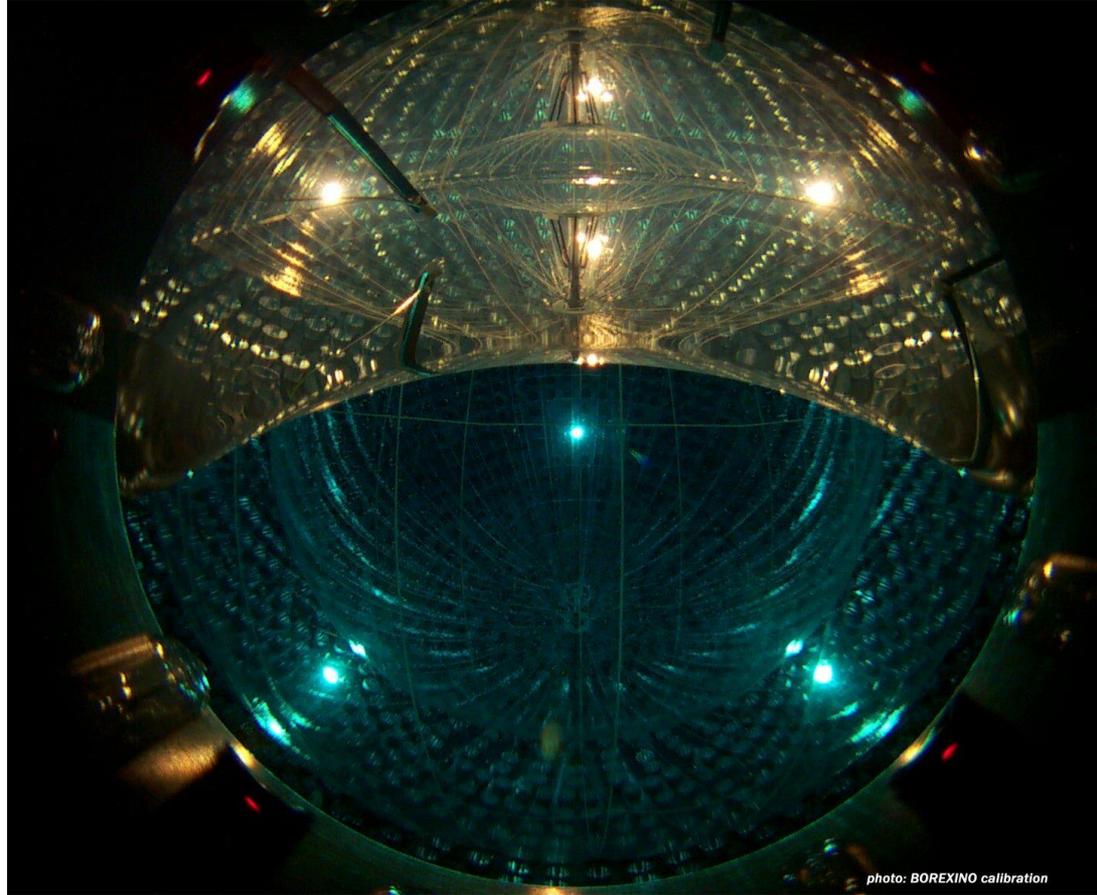
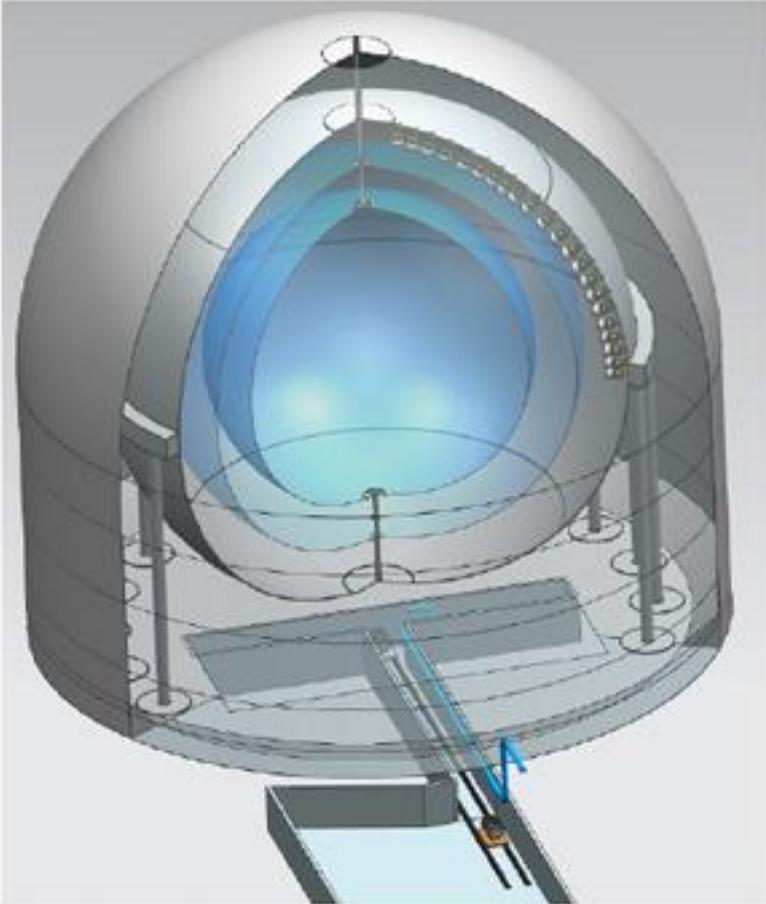


液体闪烁体

- ▶ Palo Verde, Borexino, KamLAND, Chooz (Double Chooz), RENO, 大亚湾, 江门等
- ▶ $\bar{\nu}_e + p \rightarrow n + e^+$ 反 β 衰变过程
- ▶ 可以掺Gd等, 提高中子的探测效率





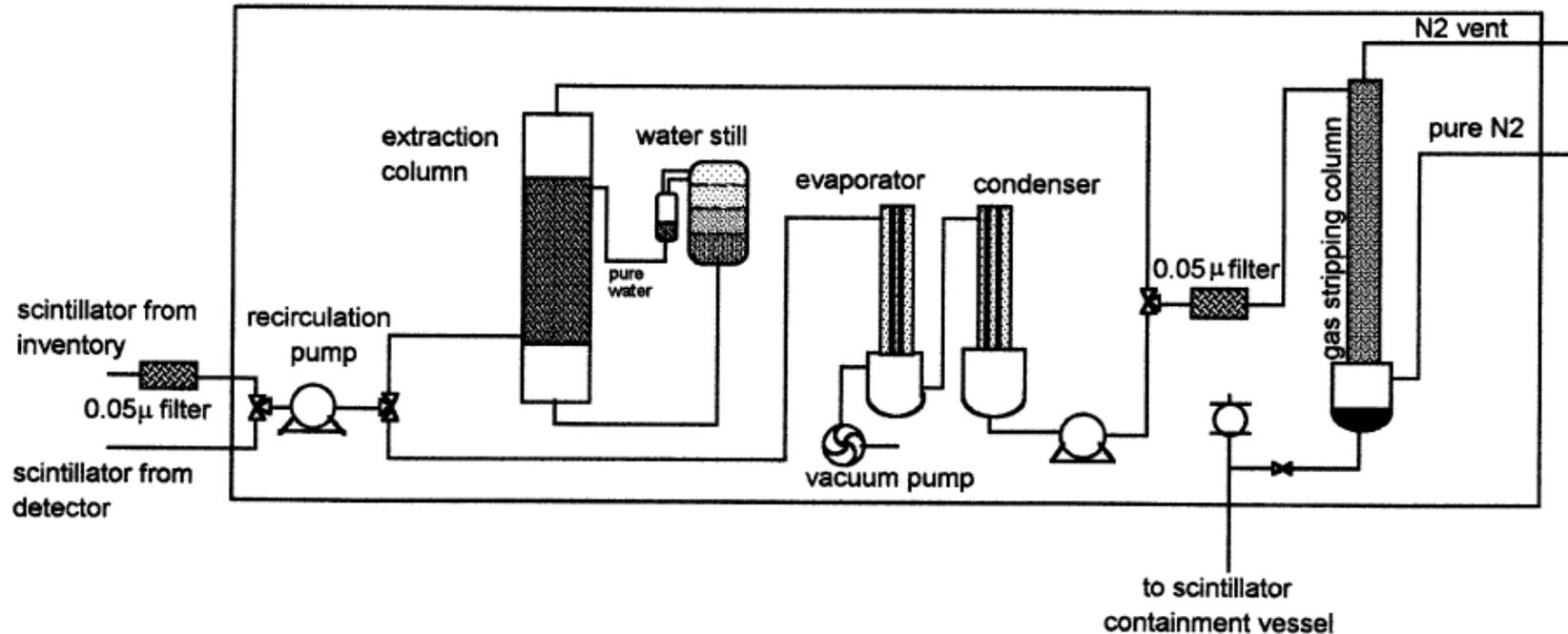


▶ 低本底要求

Isotope	Decay Rate [cpd/100 ton]
^{14}C	$(3.46 \pm 0.09) \times 10^6$
^{85}Kr	$(30.4 \pm 5.3 \pm 1.5)^{(a)}$ $(31.2 \pm 1.7 \pm 4.7)^{(b)}$
^{40}K	< 0.42 (95% C.L.)
^{39}Ar	~ 0.4

^{238}U	(0.57 ± 0.05)
^{222}Rn	(1.72 ± 0.06)
^{210}Bi	$(41.0 \pm 1.5 \pm 2.3)$
^{210}Po	$5 \times 10^2 - 8 \times 10^3$
^{232}Th	(0.13 ± 0.03)

Purification System Clean Room

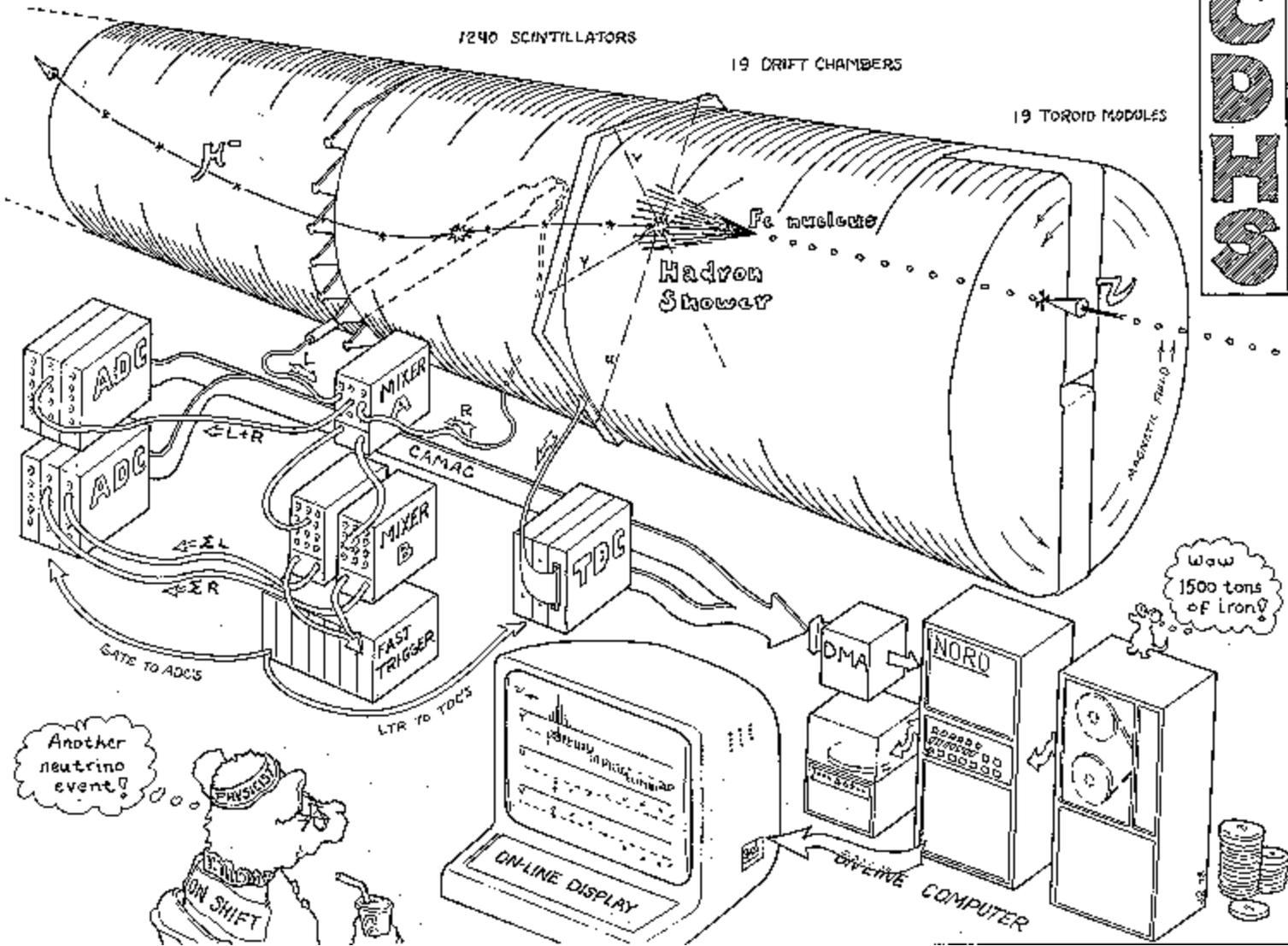




缪子探测器

- ▶ 主要用于探测 $\nu_{\mu} + N \rightarrow \mu + M$ 中的高能缪子
- ▶ 加速器中微子， μ 能量的 GeV 量级
- ▶ 添加磁场，缪子的正负电荷可以区分
- ▶ 电子的径迹短，也可以和缪子区分
- ▶ Minos, Nova 等

CDS





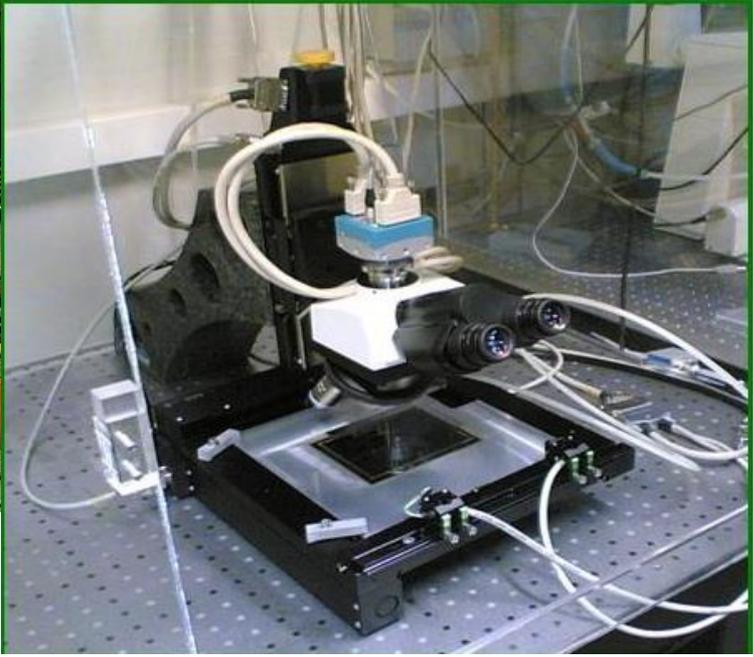
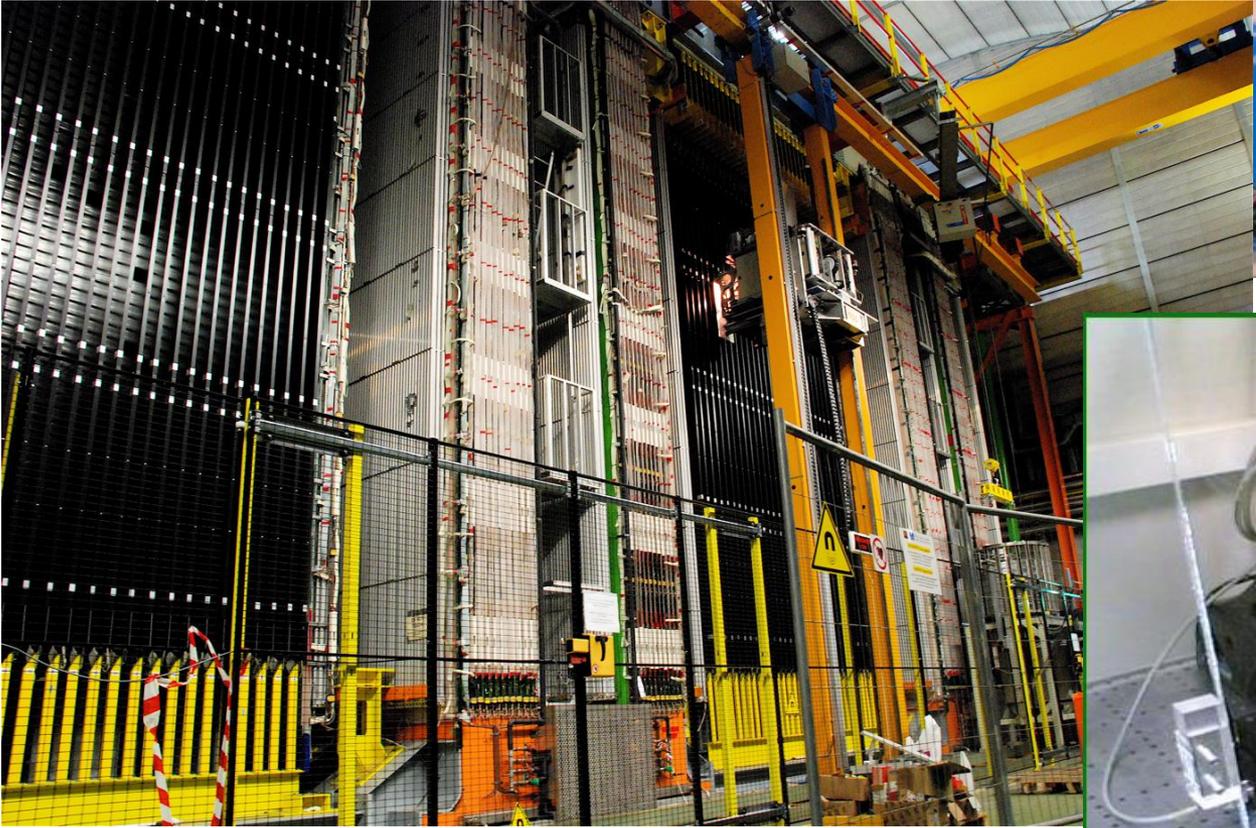
粉色为磁场导线走向，提供非均匀磁场





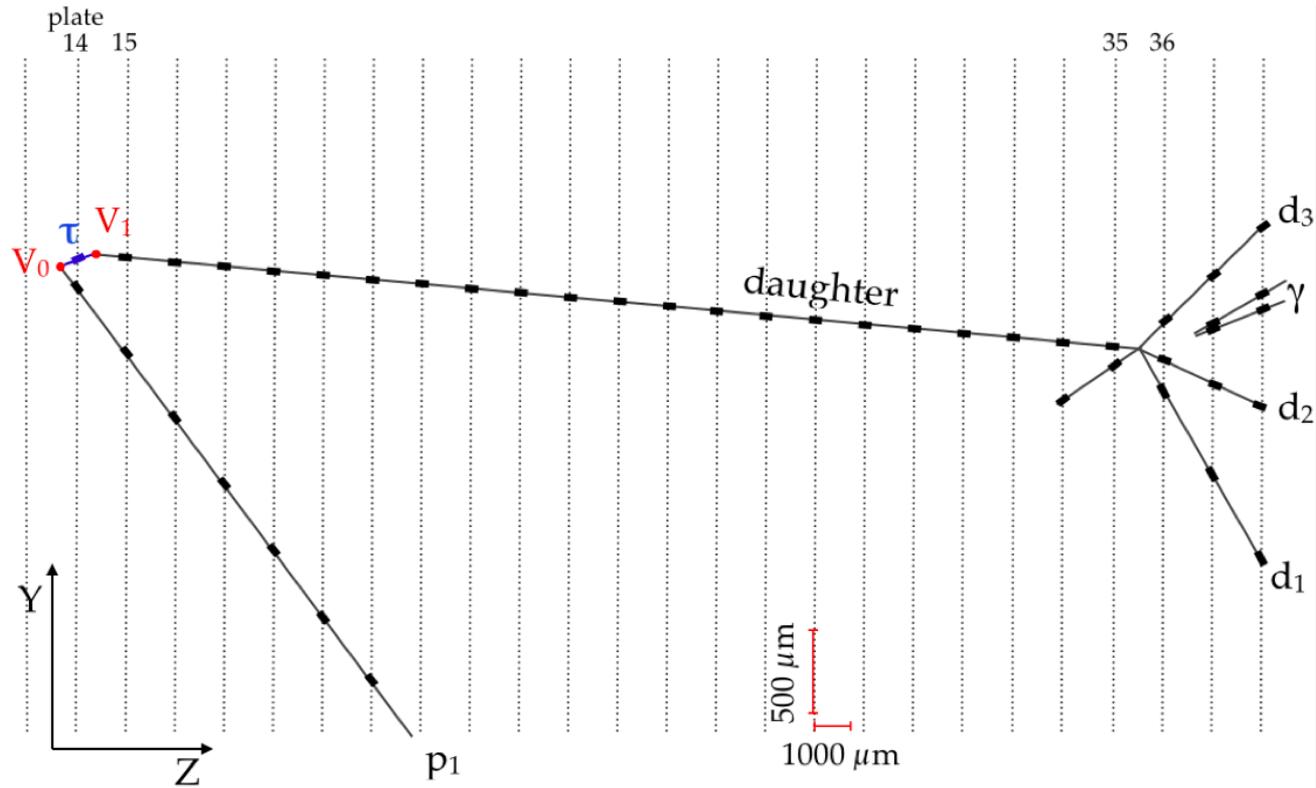
核乳胶探测器

- ▶ 核乳胶探测器，有着最好的位置分辨
- ▶ $v_\tau + N \rightarrow \tau + M$, $\tau \rightarrow \mu + v_\tau + v_\mu$
- ▶ τ 有一定的寿命，如果探测器的位置分辨足够高，可以分辨M的顶点和m的顶点间有一个小的位移，有一个短径迹





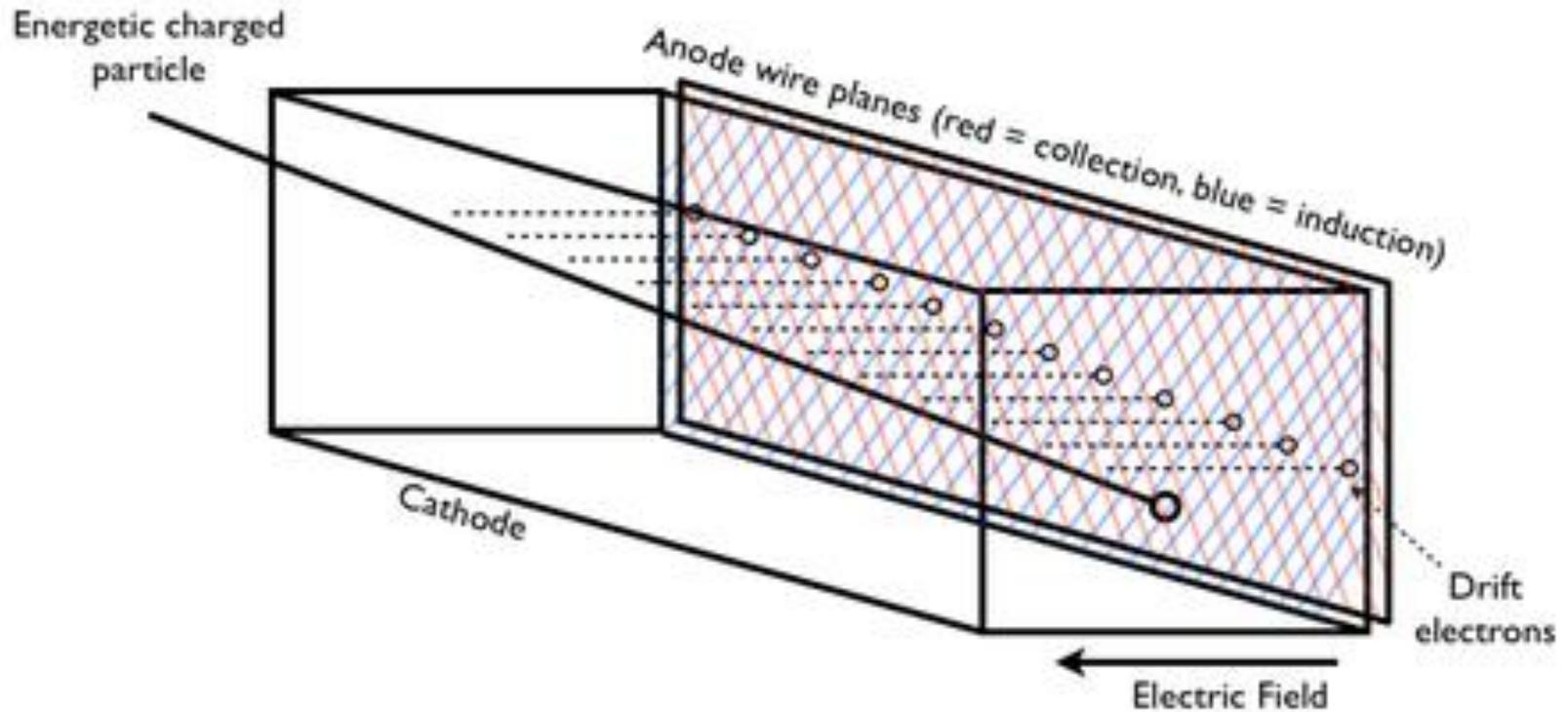
发现加速器中微子振荡到 τ 中微子



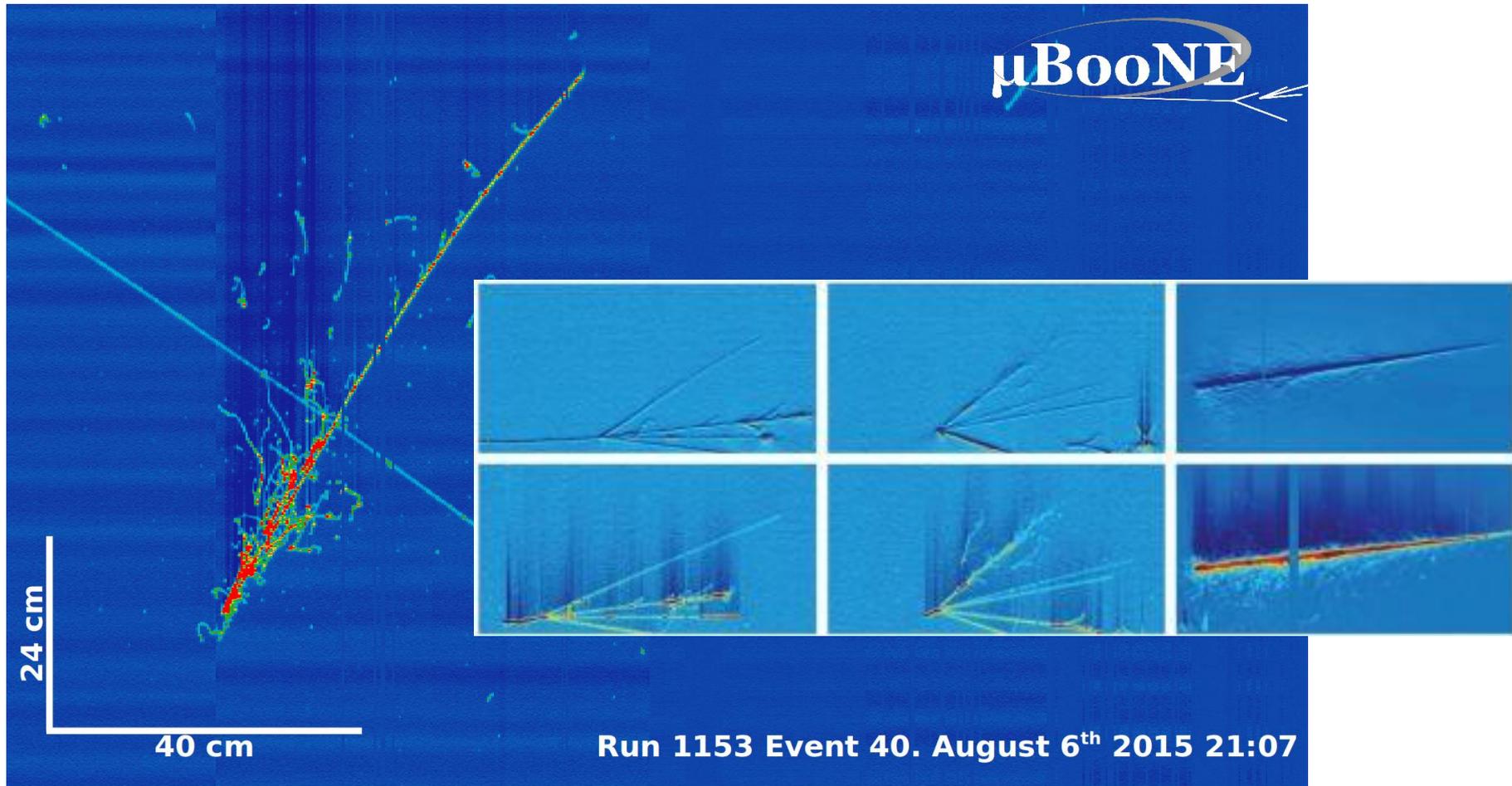
液氙时间投影室

▶ 原理

- X, Y, 由阳极平面的击中位置决定
- Z, 由阳极平面上的击中时间及漂移速度决定



▶ 小模型的测试结果:





- ▶ 能够区分各种粒子, p , e , μ , 等等
- ▶ 未来的DUNE实验的目标方案
- ▶ 目前在低能段有些限制, 但主要是来自于读出装置的空间分辨

还没有涉及到关于中微子其他性质研究的探测

▶ 中微子质量的研究

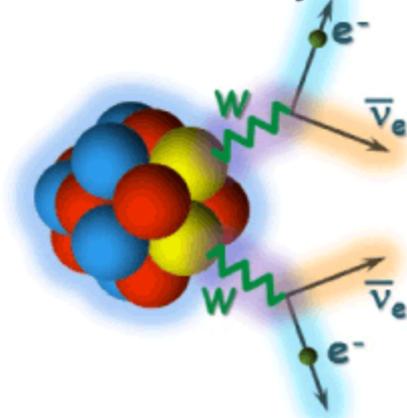
1. β 衰变研究



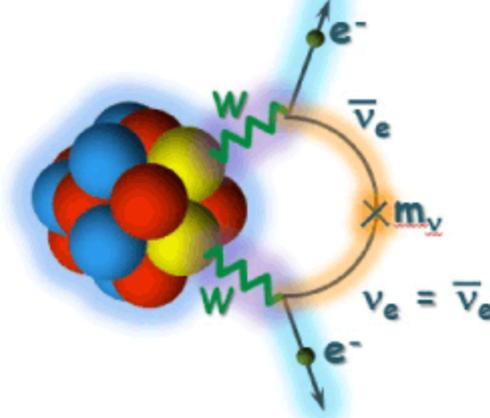
只研究 e 的能量

2. 无中微子的双 β 衰变研究

[Double beta decay]



Double beta decay
which emits anti-neutrinos

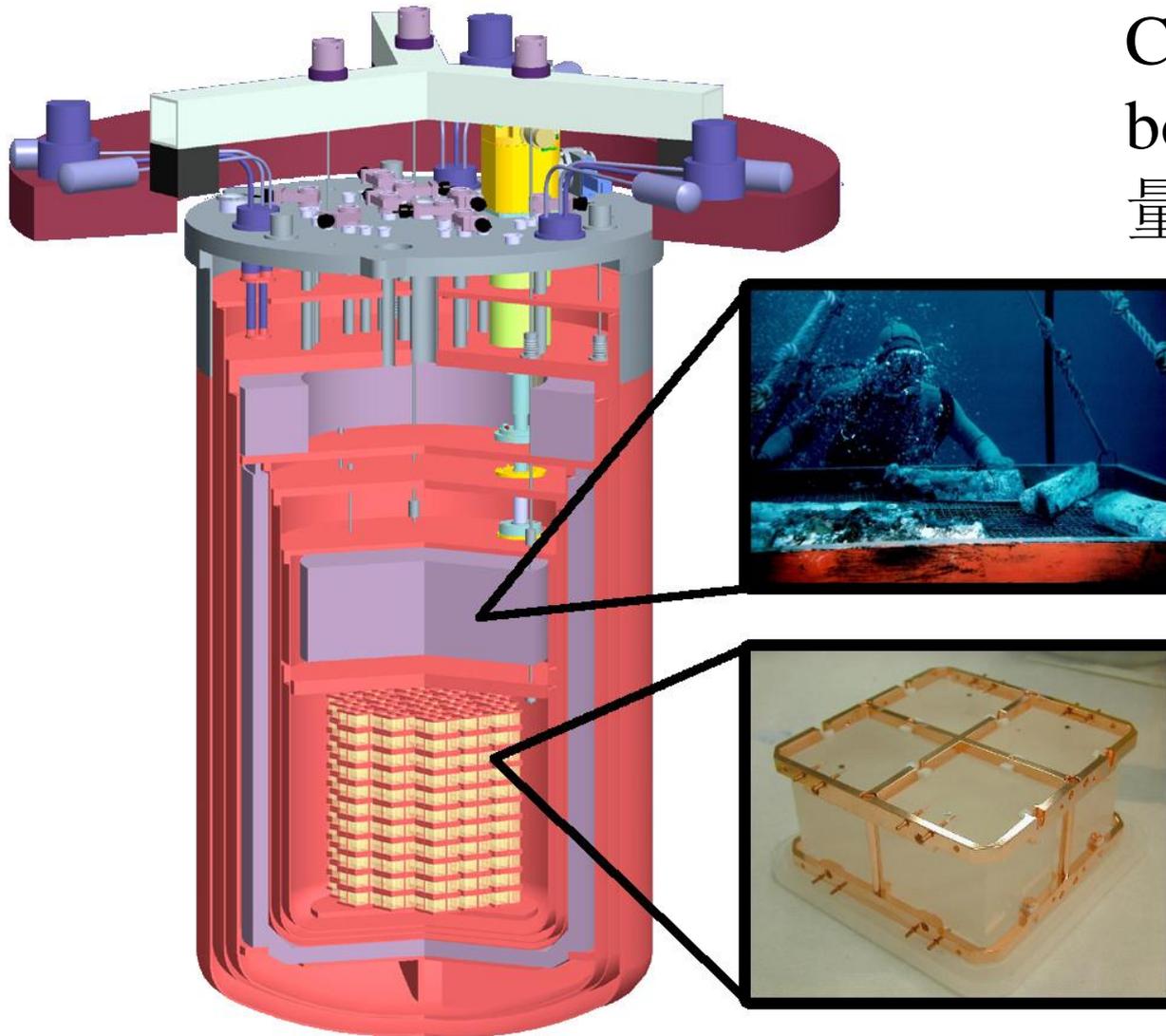


Neutrinoless
double beta decay

Katrin Detector



Cuore Detector bolometer 量热器





总结

- ▶ 探测中微子的相互作用产物
- ▶ 纯水，重水
- ▶ 大型水体，冰体
- ▶ 液体闪烁体，掺杂液闪
- ▶ 化学方法
- ▶ 核乳胶
- ▶ LArTPC
- ▶ 缪子探测器
- ▶ 还有一大系列关于中微子性质的探测器和方案，因时间关系，没有全部介绍