



核子、轻子和玻色子 (Nucleons, leptons and bosons)



- § 1. μ 子和 π 介子
- § 2. 奇异介子和超子
- § 3. 带电 π 介子的量子数
- § 4. 带电轻子和中微子
- § 5. 狄拉克方程
- § 6. 正电子
- § 7. 反质子

§ 3. 带电轻子和中微子 (Charged leptons and neutrinos)

电子: 1897, J.J. Thomson

μ 子: 1937, Anderson &
Neddermeyer
1947, Conversi *et al.*



Want
more?

Leptons spin = 1/2		
Flavor	Mass GeV/c ²	Electric charge
ν_e electron neutrino	$<1 \times 10^{-8}$	0
e electron	0.000511	-1
ν_μ muon neutrino	<0.0002	0
μ muon	0.106	-1
ν_τ tau neutrino	<0.02	0
τ tau	1.7771	-1

- τ 轻子的寻找

$$\begin{array}{l}
 e^+ + e^- \rightarrow e^+ + \mu^- \\
 e^+ + e^- \rightarrow e^- + \mu^+
 \end{array}
 \quad ?$$

轻子数守恒要求这两个过程不能发生！

$$\begin{array}{l}
 e^+ + e^- \rightarrow \tau^+ + \tau^- \\
 \tau^+ \rightarrow e^+ + \nu_e + \bar{\nu}_\tau \\
 \tau^- \rightarrow \mu^- + \bar{\nu}_\mu + \nu_\tau
 \end{array}$$

但是上述过程可以发生，过程末态观测到 $e^- \mu^+$ 或 $e^+ \mu^-$

由于末态的四个中微子，电子和 μ 子不与束流方向在同一平面

1967年，ADONE正负电子对撞机，未找到 τ 子，
束流能量1.5 GeV

1976年，SLAC-SPEAR正负电子对撞机，找到 τ 子，
束流能量4 GeV

1992年，北京正负电子对撞机BES实验，精确测量 τ 子质量...

- 中微子

非常小的质量！

不带电

仅参与弱相互作用

$$\sigma_{\nu N} \sim 10^{-43} \text{ cm}^2$$

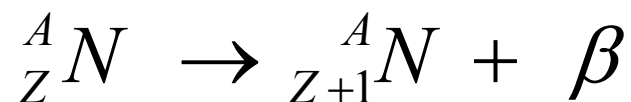
非常难于直接探测

Leptons spin = 1/2		
Flavor	Mass GeV/c ²	Electric charge
ν_e electron neutrino	$<1 \times 10^{-8}$	0
e electron	0.000511	-1
ν_μ muon neutrino	<0.0002	0
μ muon	0.106	-1
ν_τ tau neutrino	<0.02	0
τ tau	1.7771	-1

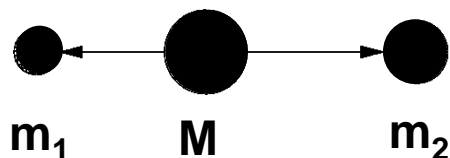
- β 衰变

1899, 发现 β 射线是电子流

1930年之前, 人们认为 β 射线是二体过程

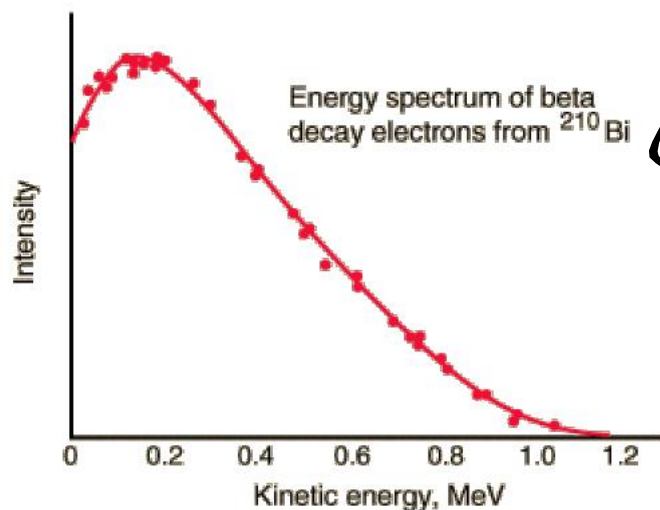


二体过程发射的电子是单能的



$$E_2 = \sqrt{m_2^2 + p^2} = \frac{M^2 + m_2^2 - m_1^2}{2M}$$

但是

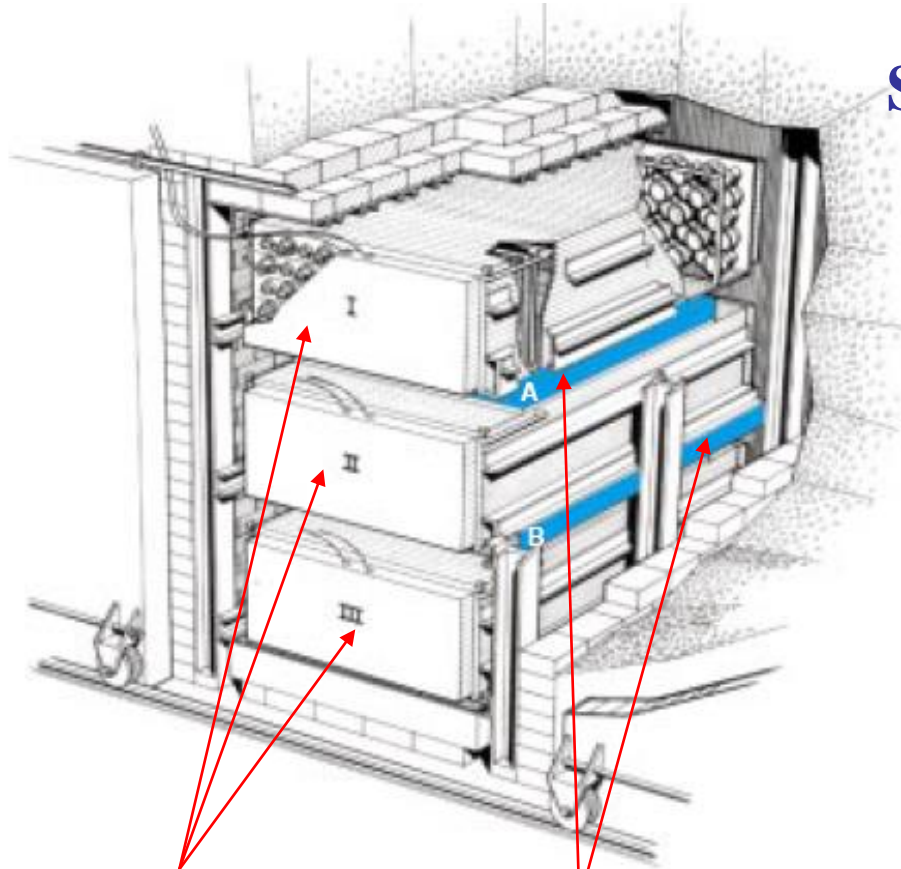


N. Bohr: 能量不守恒!

W. Pauli: 不是两体过程, 末态还存在一个中性粒子, 偷走了能量!

- 反电子中微子的发现

Reines-Cowan Experiment with reactor $\bar{\nu}_e$ at Savannah River (1953-1956),
1995 Nobel prize



Each with 1000 l of
liquid scintillator
viewed with PMTs

Each with 100 l
of water with
 CdCl_2

Savannah反应堆发射反电子中微子

$\bar{\nu}_e$ 通量 $\Phi = 10^{17} \text{m}^{-2}\text{s}^{-1}$

最大几个MeV的连续能谱

$$\bar{\nu}_e + p \rightarrow e^+ + n$$

$$\sigma \approx 10^{-47} (E_\nu / \text{MeV})^2 \text{m}^2$$

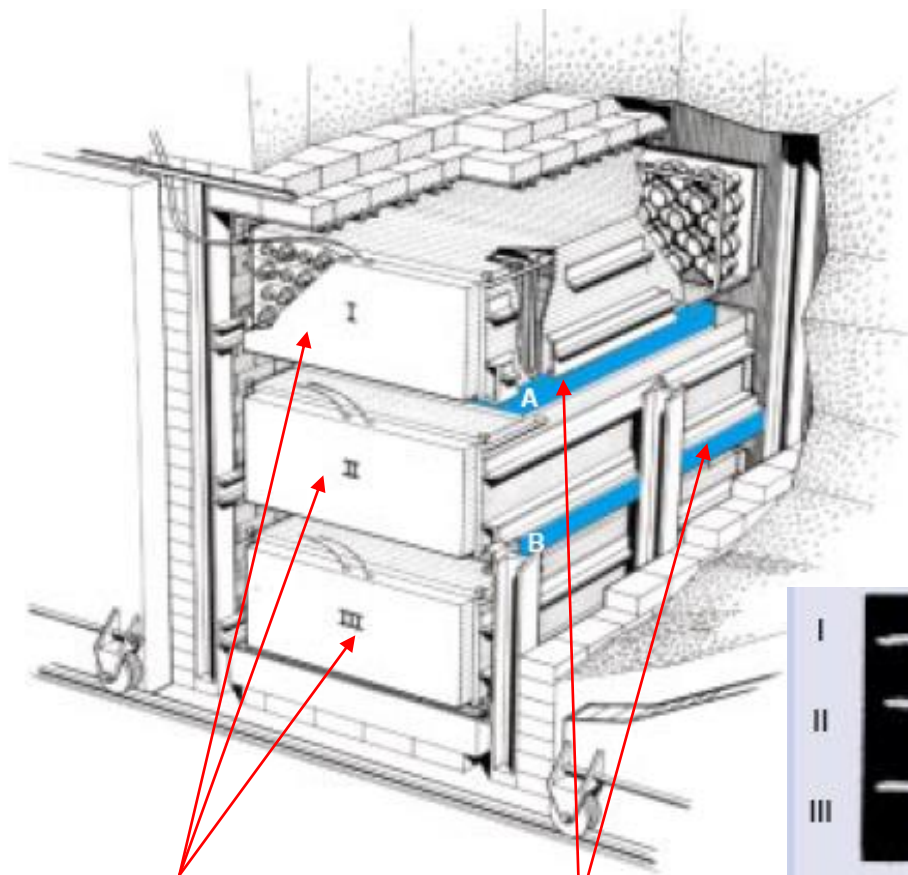
200kg的水做靶子，反应率 10^{-3}Hz

需要在大量本底事例中鉴别出信号

本底来源：

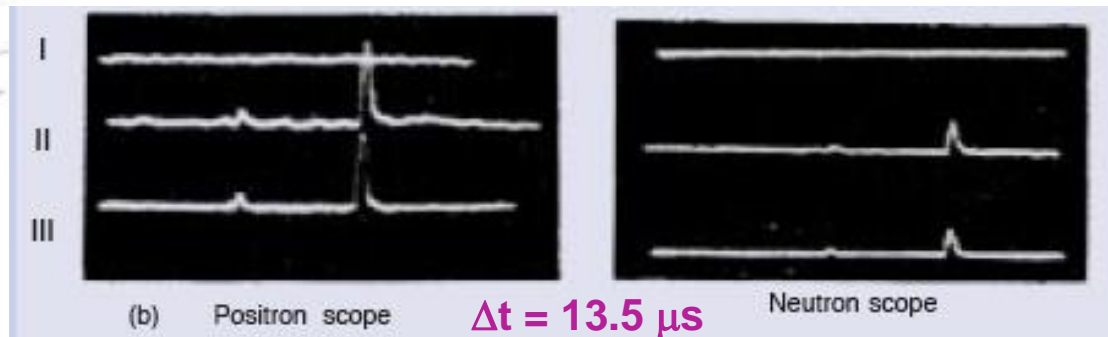
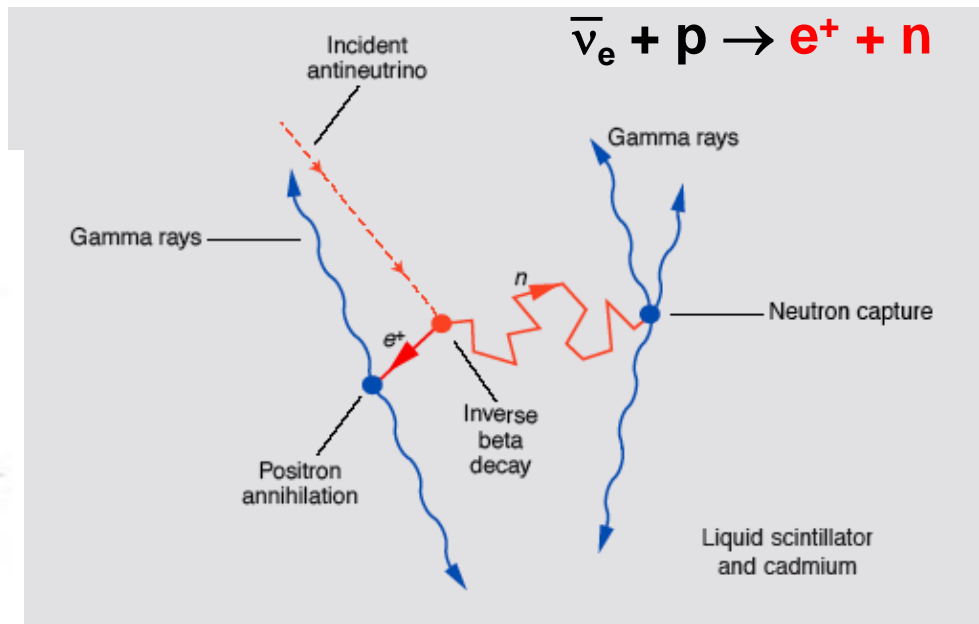
反应堆中子，宇宙线，
探测器周围及水中杂质的放射性

- 反电子中微子的发现



Each with 1000 l of liquid scintillator viewed with PMTs

Each with 100 l of water with CdCl_2



事件率每小时 3 ± 0.2 个

$\bar{\nu}_e$ is seen in 25 years after prediction !

- 有几种中微子？

β 衰变中微子

$$n \rightarrow p + e^{-} + \bar{\nu}_e$$

π 衰变中微子

$$\pi^{-} \rightarrow \mu^{-} + \bar{\nu}_{\mu}$$

$$\pi^{+} \rightarrow \mu^{+} + \nu_{\mu}$$



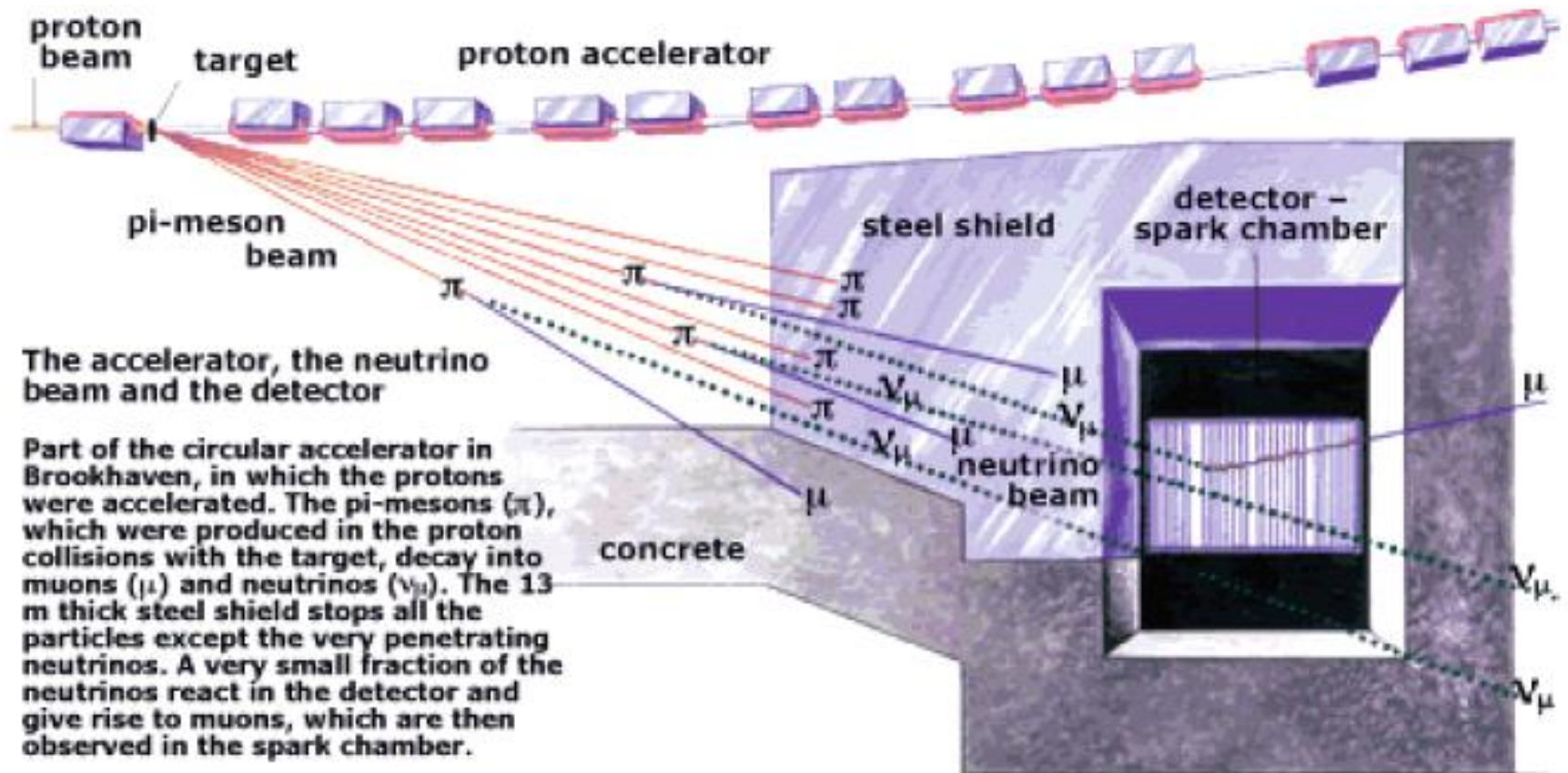
$\bar{\nu}_e$ $\bar{\nu}_{\mu}$ 是否是同种粒子？

$$\bar{\nu}_e + p \rightarrow e^{+} + n$$

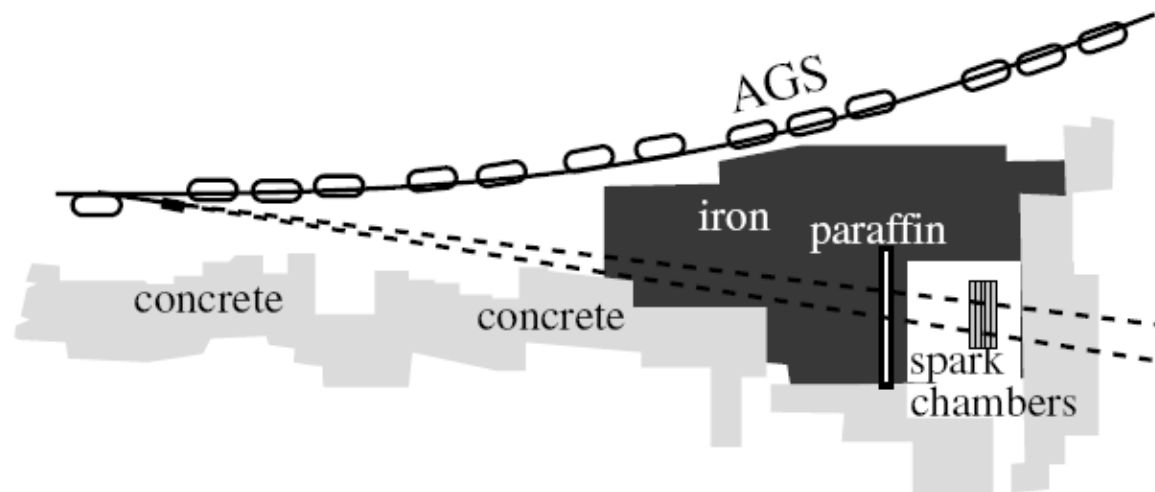
$$\bar{\nu}_{\mu} + p \rightarrow e^{+} + n \quad ?$$

- 第二代中微子—— μ 子中微子的发现

Lederman, Schwartz and Steinberger, BNL-AGS, 1962
1988 Nobel prize



Based on a drawing in Scientific American, March 1963.



13米厚的铁层，仅中微子可以通过
混凝土层，对实验人员进行辐射防护

探测器需要同时作为中微子靶，因为截面小，要求探测器质量大~10吨

探测器不能用气泡室，采用多层火花室

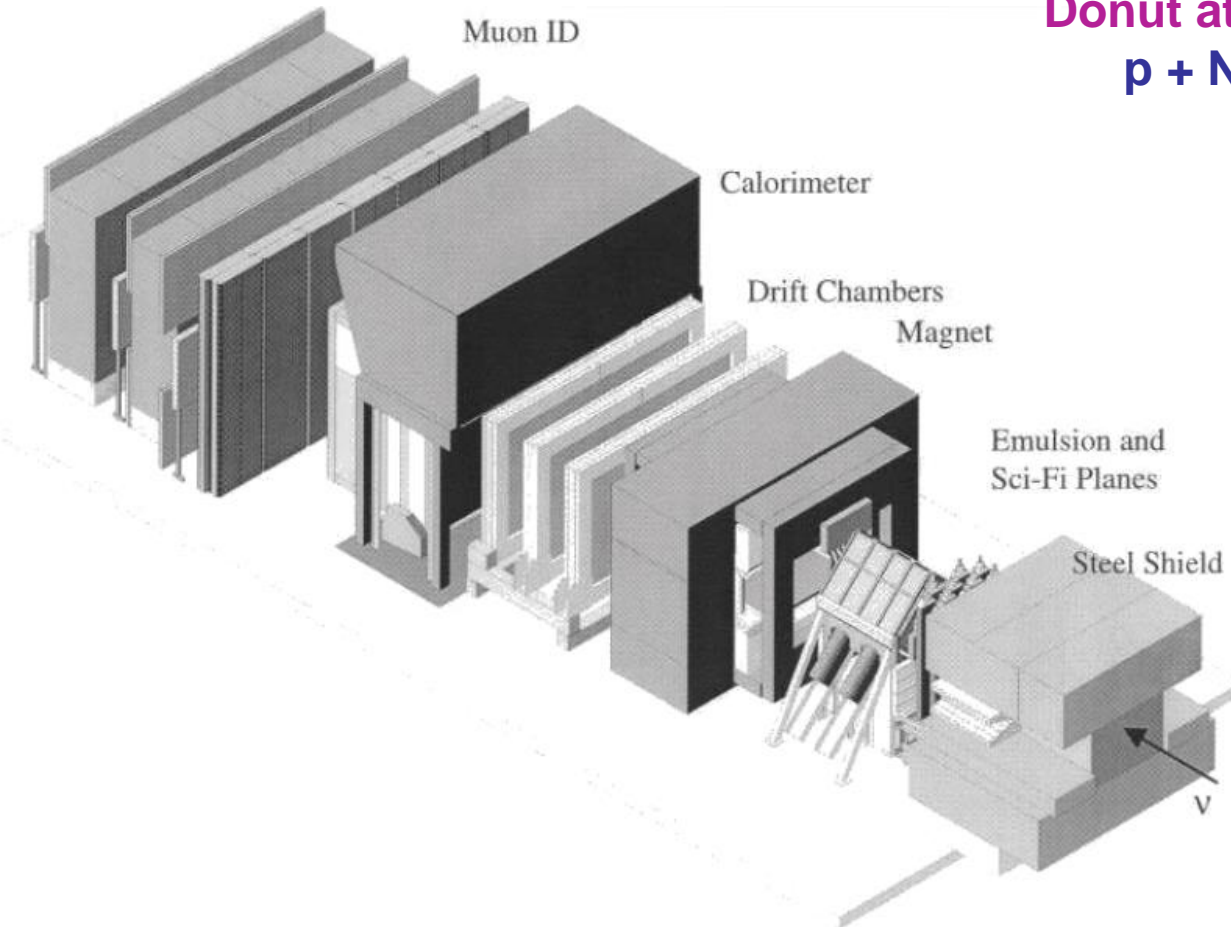
火花室的极板物质质量达10吨，作为中微子的靶

产生的末态粒子易于鉴别：电子产生电磁簇射， μ 子穿透能力强

实验结果没有看到电磁簇射，但看到次级 μ 子径迹



- 第三代中微子—— τ 子中微子的发现

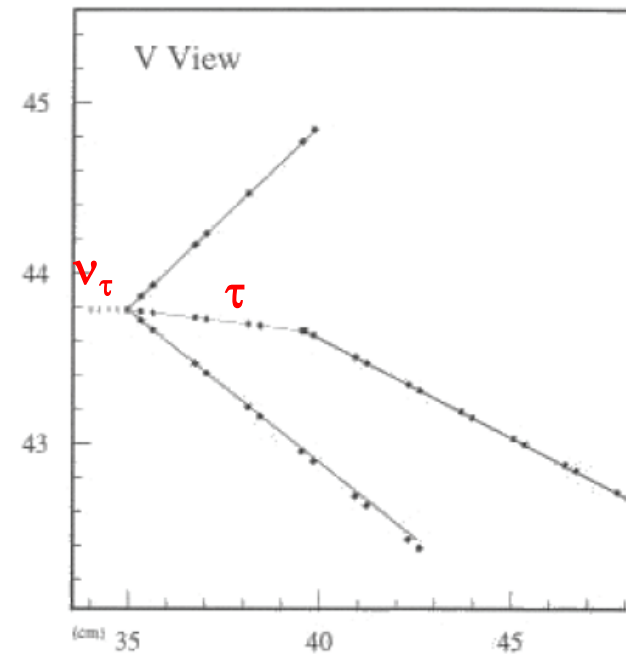


Donut at Fermilab (2000):

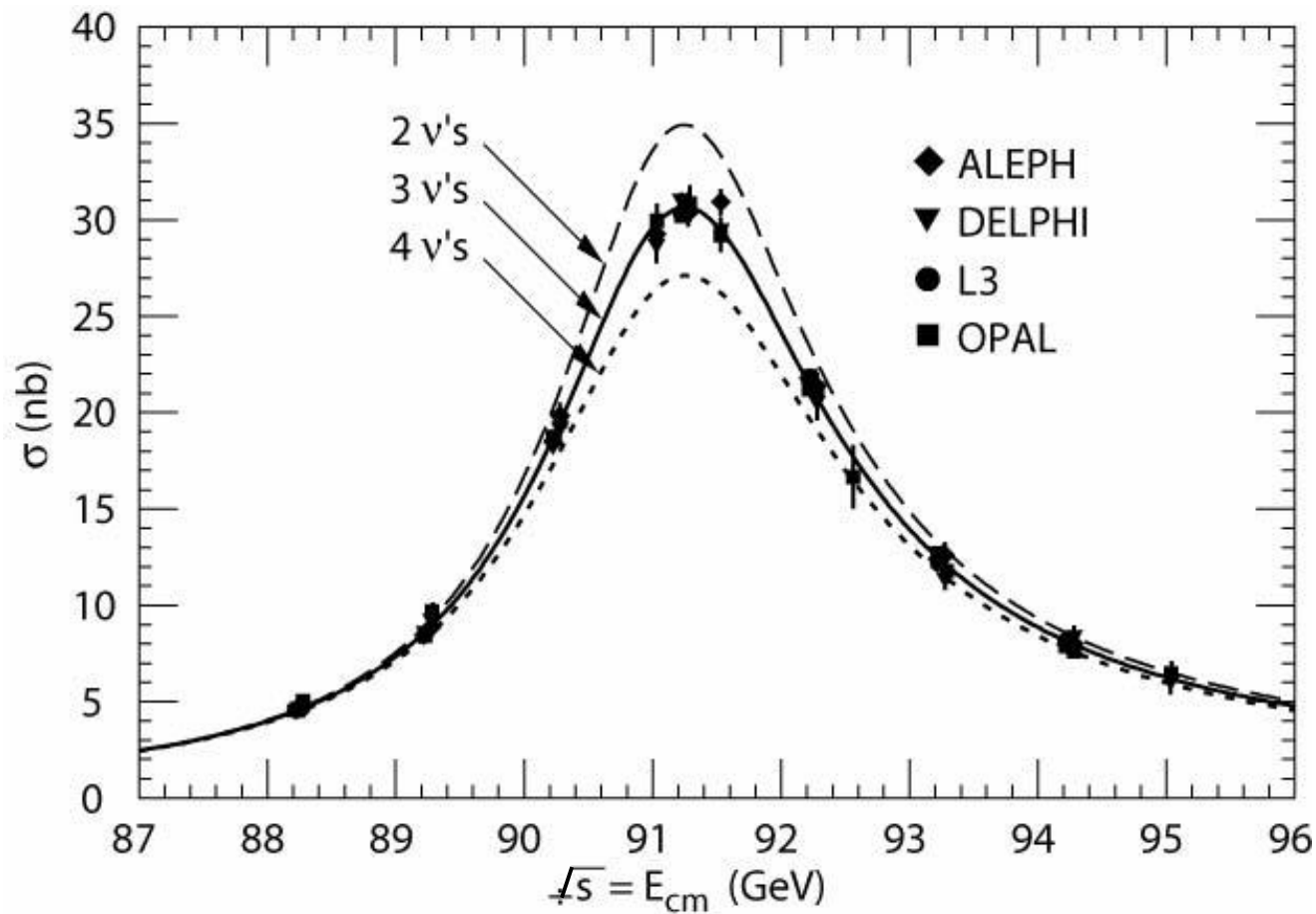
$$p + N \rightarrow D_s + \text{others}$$

$$D_s \rightarrow \tau + \nu_\tau$$

$$\nu_\tau + N \rightarrow \tau + \text{hadrons}$$



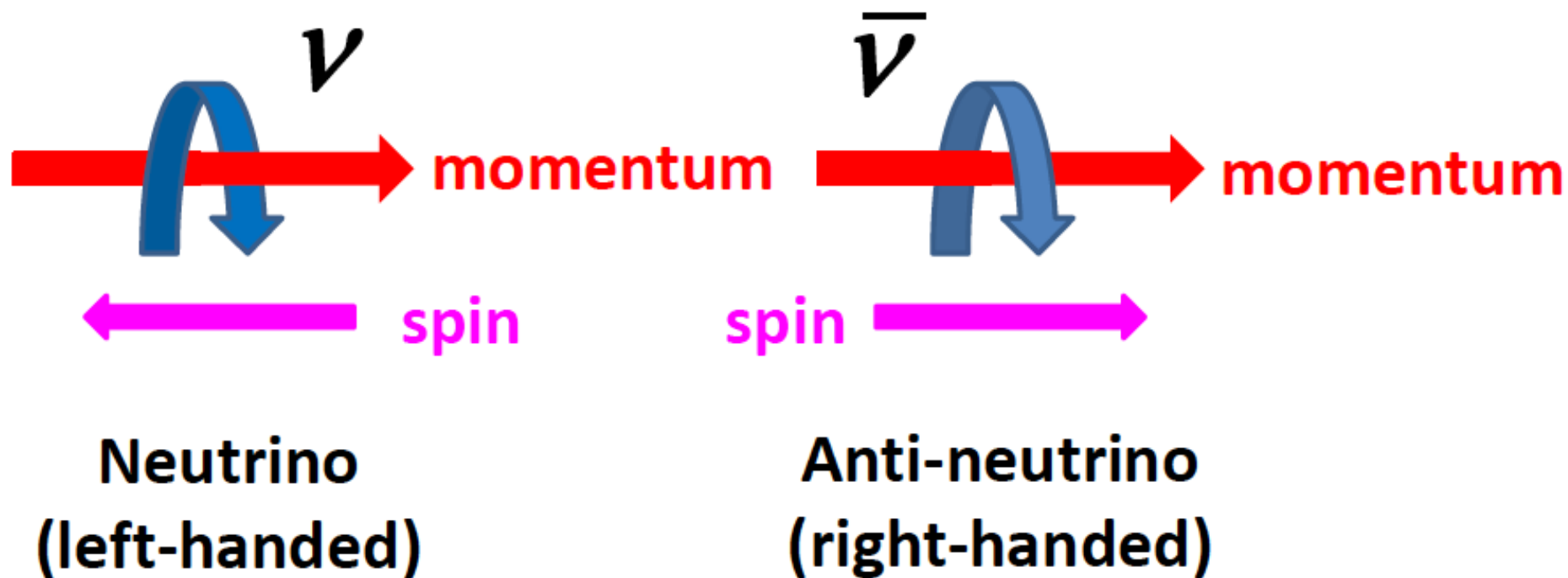
- 还有更多代的中微子吗？



- 中微子和反中微子

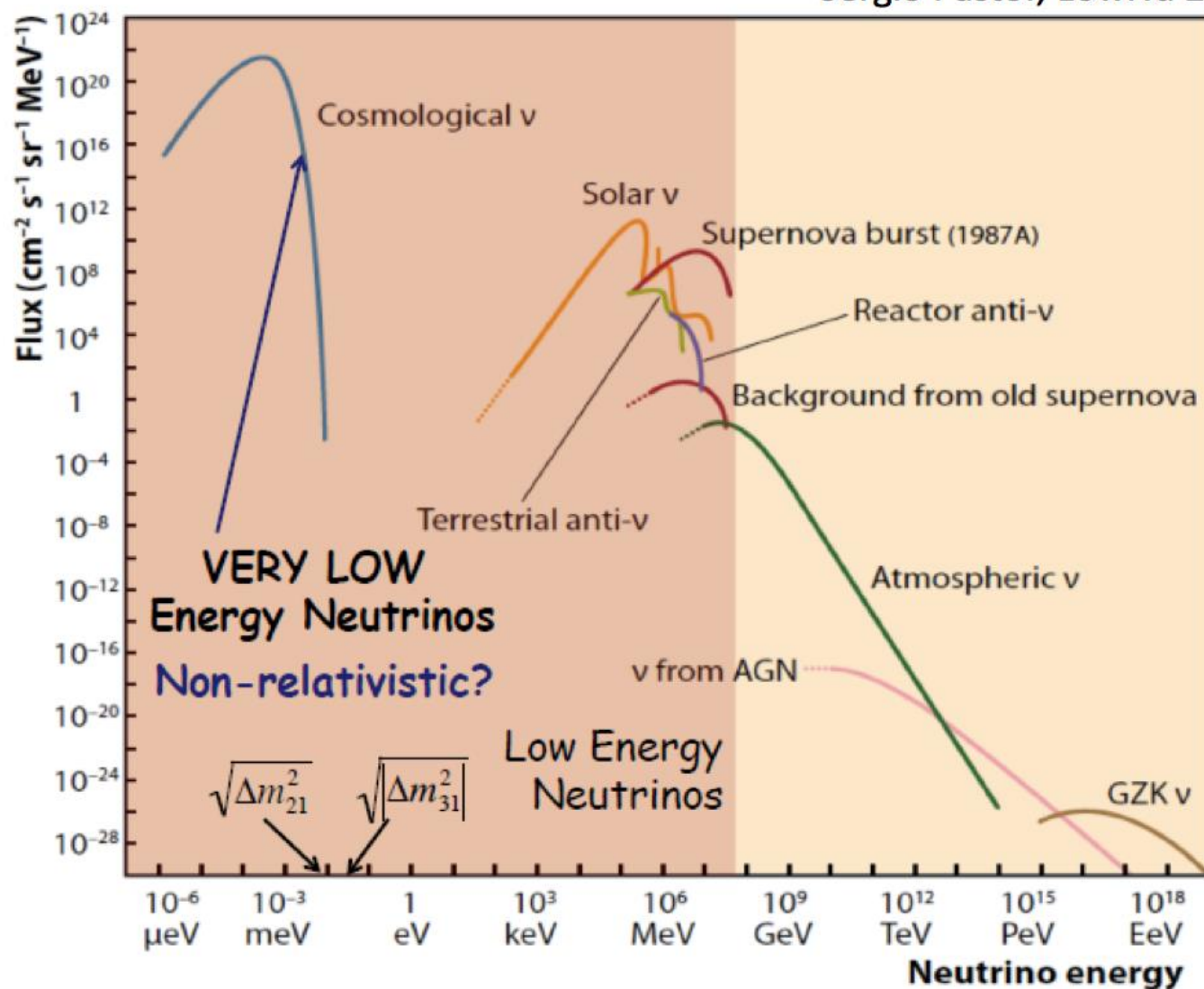
如果中微子没有质量，则螺旋度（Helicity）是固定的

$$H = \frac{\vec{p} \cdot \vec{\sigma}}{|\vec{p}| \cdot |\vec{\sigma}|} = \begin{cases} -1 & \text{Neutrinos (Left-handed)} \\ +1 & \text{Anti-neutrinos (Right-handed)} \end{cases}$$

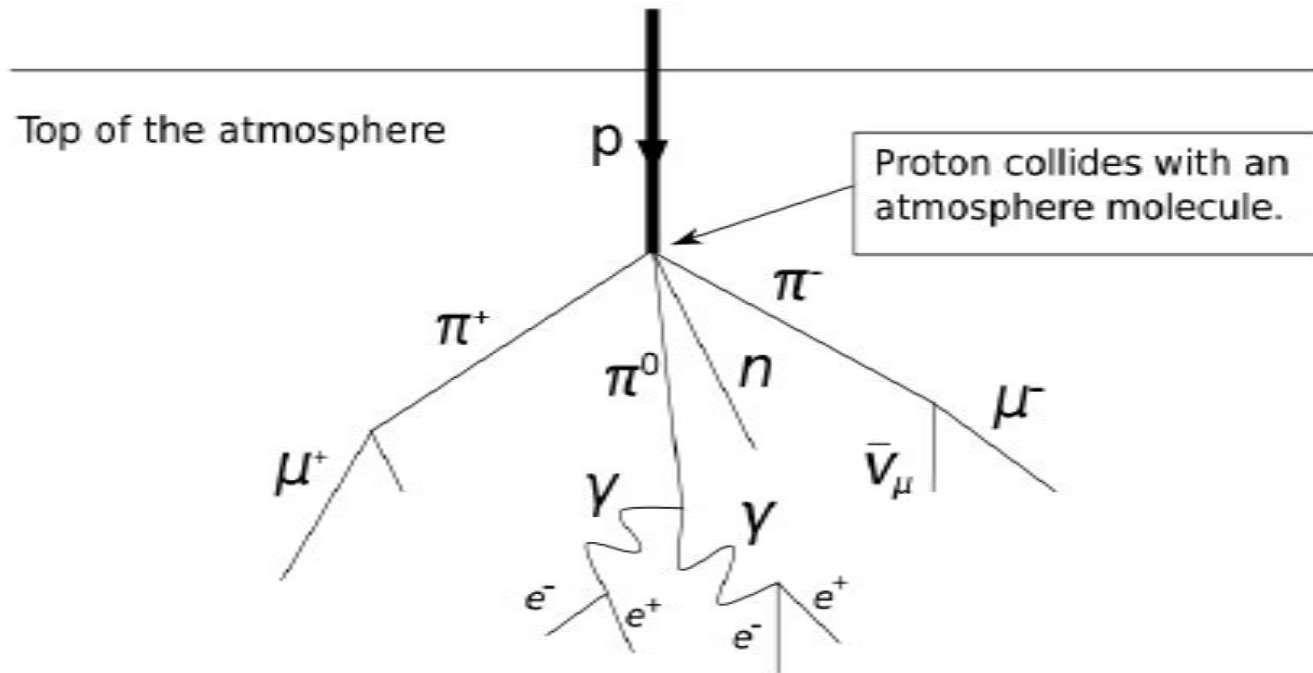


- 非加速器的中微子来源

Sergio Pastor, LowNu 2009



- 大气中微子

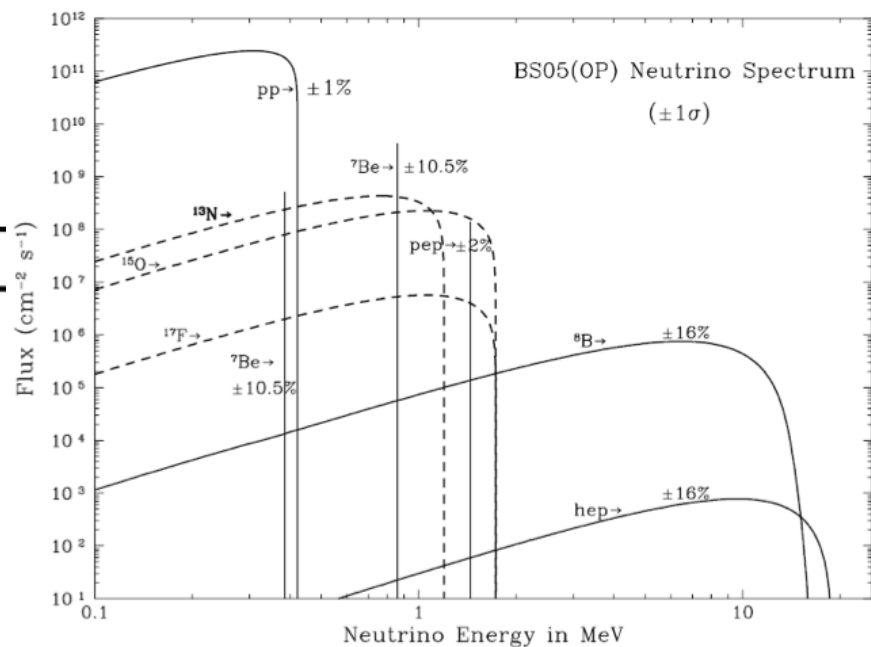
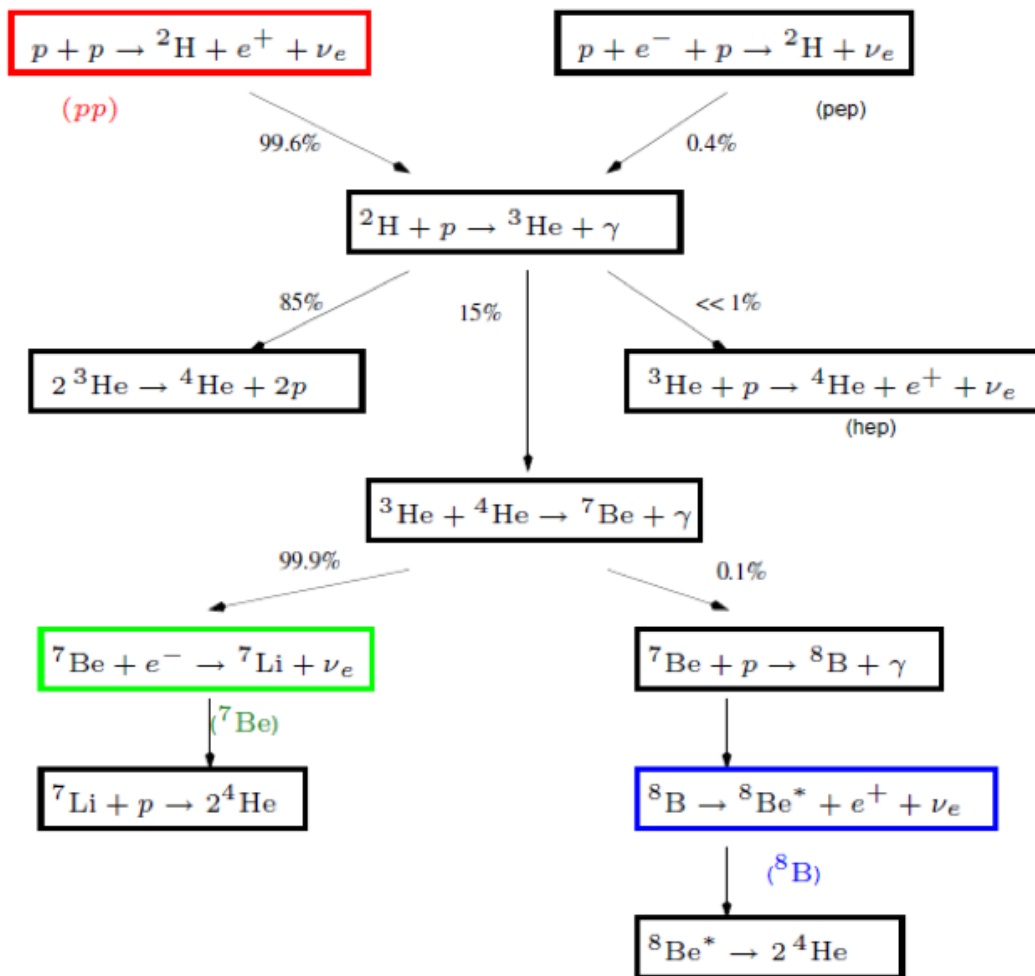


$$\pi^- \rightarrow \mu^- + \bar{\nu}_\mu \quad \mu^- \rightarrow e^- + \bar{\nu}_e + \nu_\mu$$

$$\pi^+ \rightarrow \mu^+ + \nu_\mu \quad \mu^+ \rightarrow e^+ + \bar{\nu}_\mu + \nu_e$$

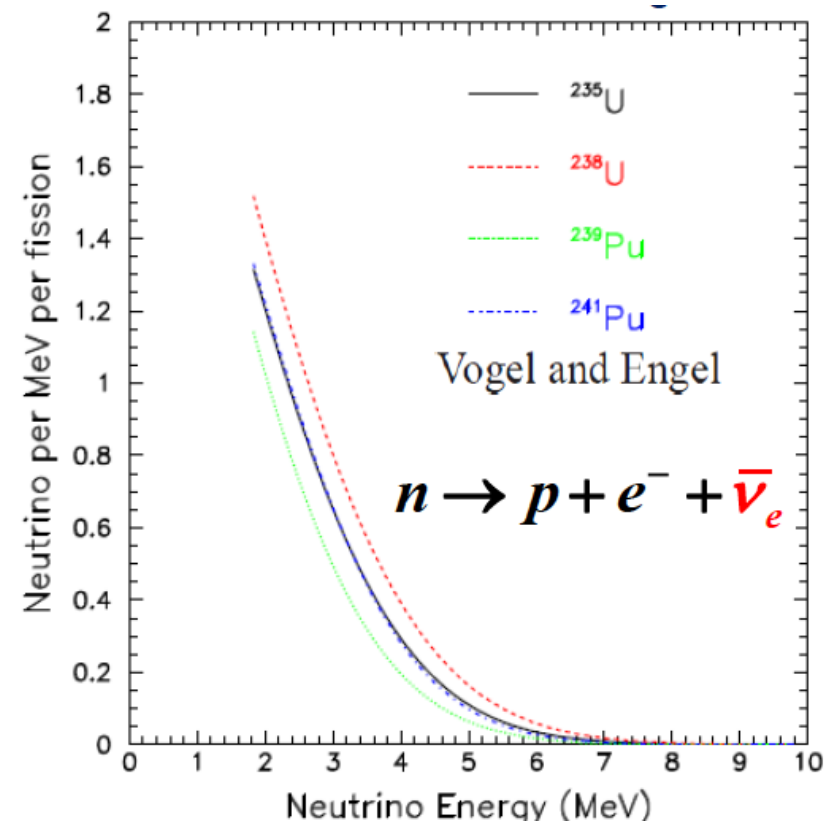
$$\frac{\Phi(\nu_\mu + \bar{\nu}_\mu)}{\Phi(\nu_e + \bar{\nu}_e)} \simeq 2$$

• 太阳中微子



太阳中微子都是 ν_e ，没有 $\bar{\nu}_e$

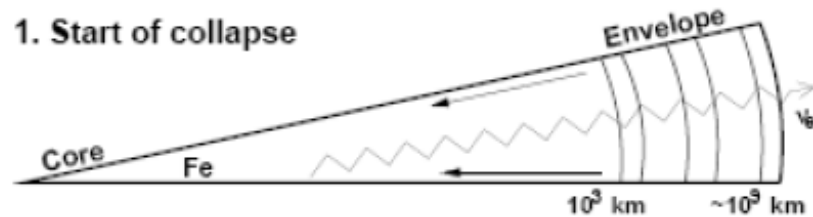
• 反应堆中微子



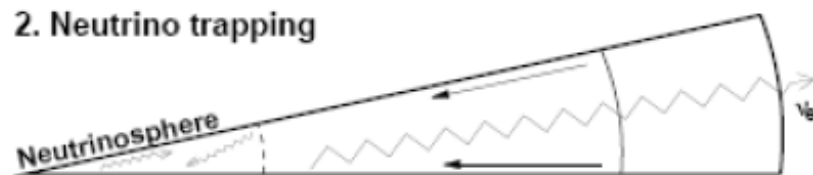
反应堆中微子都是 $\bar{\nu}_e$
功率1GW的反应堆每秒产生
 $2 \times 10^{20} \bar{\nu}_e$

- 超新星中微子

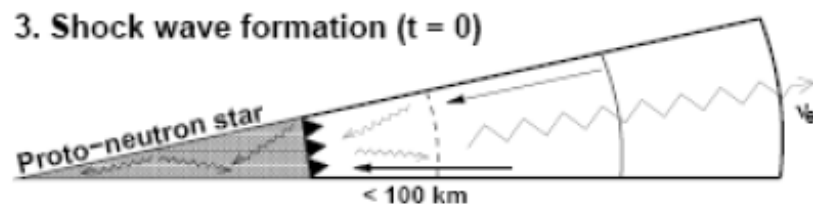
1. Start of collapse



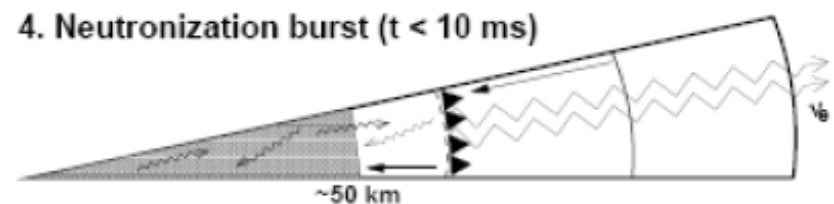
2. Neutrino trapping



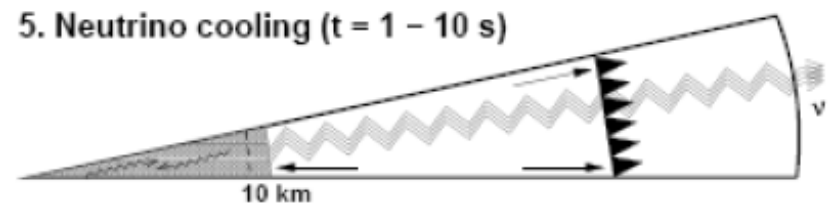
3. Shock wave formation ($t = 0$)



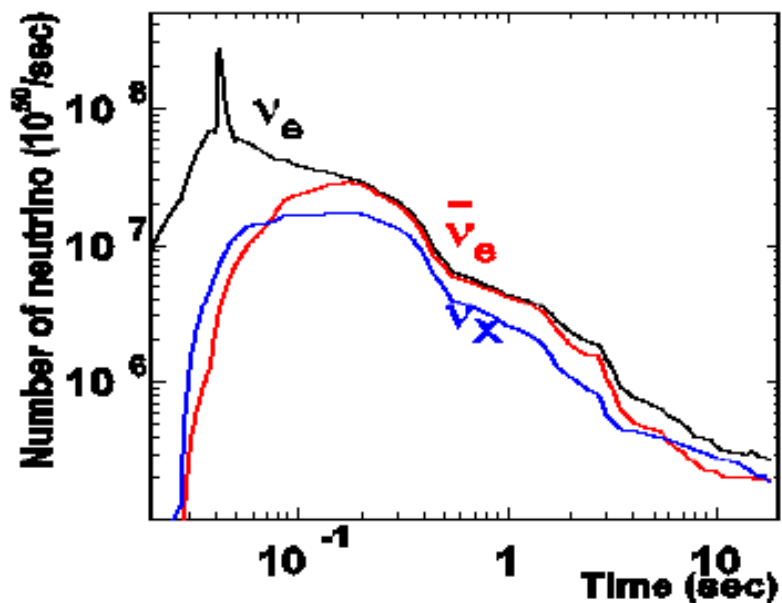
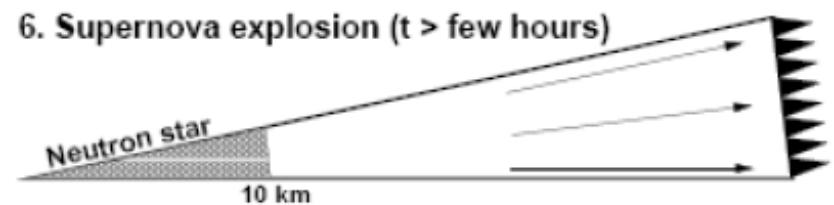
4. Neutronization burst ($t < 10$ ms)



5. Neutrino cooling ($t = 1 - 10$ s)



6. Supernova explosion ($t > \text{few hours}$)



T.Totani, K.Sato,
H.E.Dalhed and
J.R.Wilson,
ApJ.496,216(1998)

- 中微子观测站

看到中微子有多困难？

以太阳中微子为例： $\nu_e + e^- \rightarrow \nu_e + e^-$

$$N_e = \sigma_{\nu e} \cdot \Phi_\nu \cdot N_{\text{target}}$$

地球上的太阳中微子通量

$$\Phi_\nu \simeq 7 \times 10^{10} / \text{cm}^2 / \text{s}, \quad \sigma_{\nu e} \sim 10^{-45} \text{cm}^2$$

1千吨水靶中

$$N_{\text{target}} = (6 \times 10^{23} \text{ molecules}) \times (18 e^-) / \text{molecule} \times (10^3)^3 / 18 \\ \sim 10^{32}$$

事例率

$$N_e \sim 0.01 / \text{s} \quad \text{or} \quad 1000 / \text{day}$$

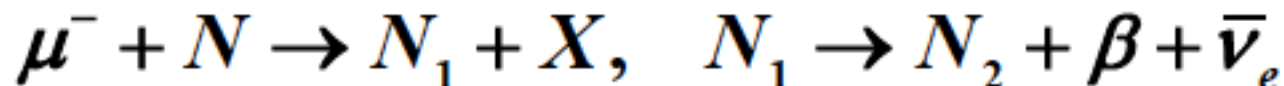
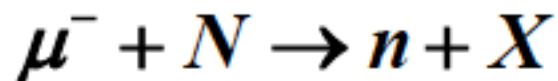
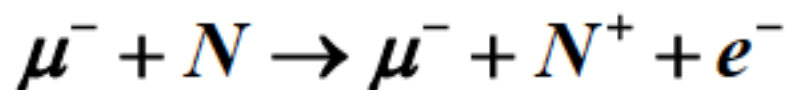
宇宙线对中微子测量影响
海平面，宇宙线μ子通量

$$\Phi_{\mu} = 1 / \text{cm}^2 / \text{min}$$

在海平面的1千吨水（假设是立方体），每秒穿过μ子数

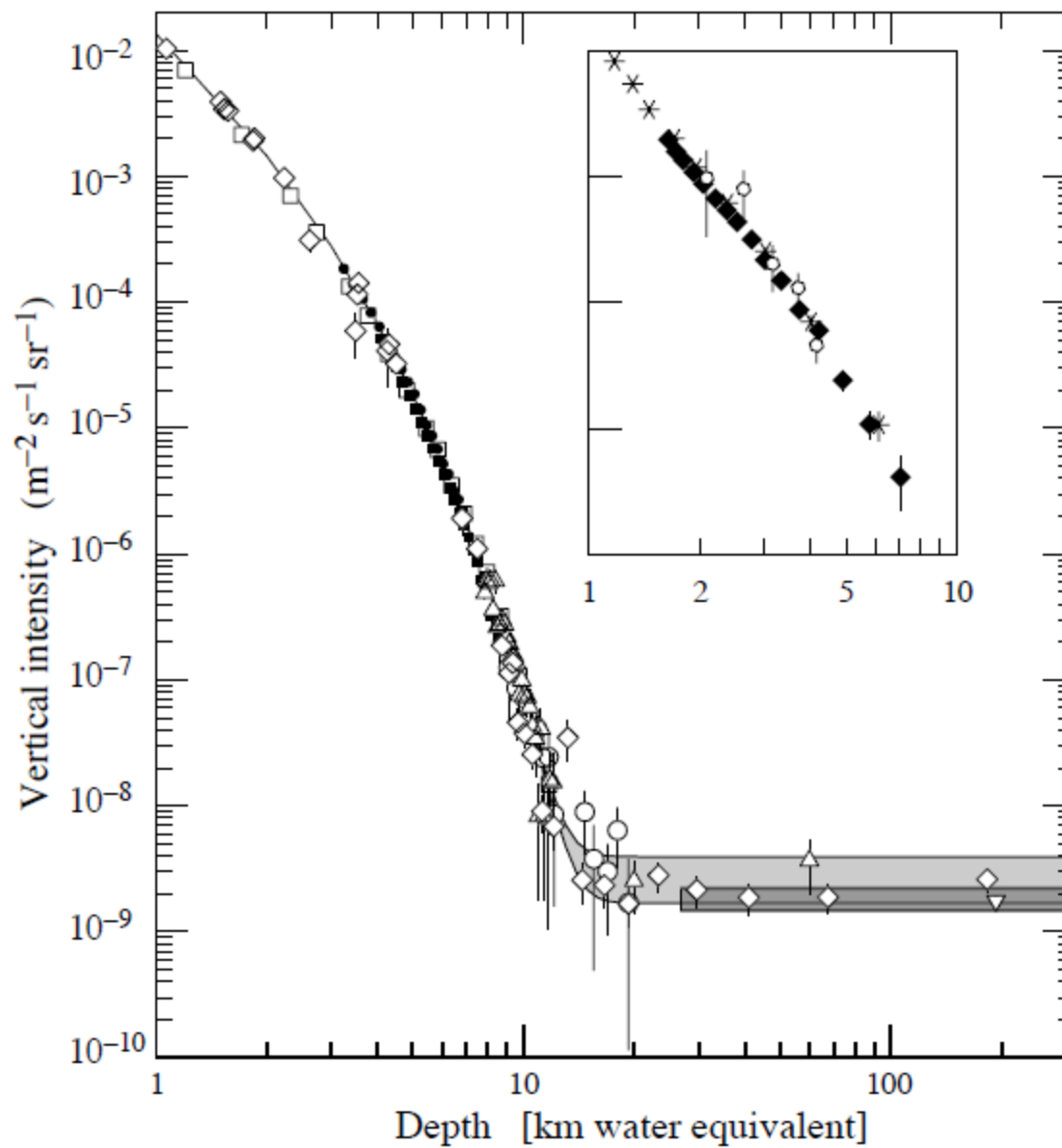
$$\sim (10 \times 100)^2 \times 1 \text{min}^{-1} = 1.7 \times 10^4 / s$$

μ子跟核反应

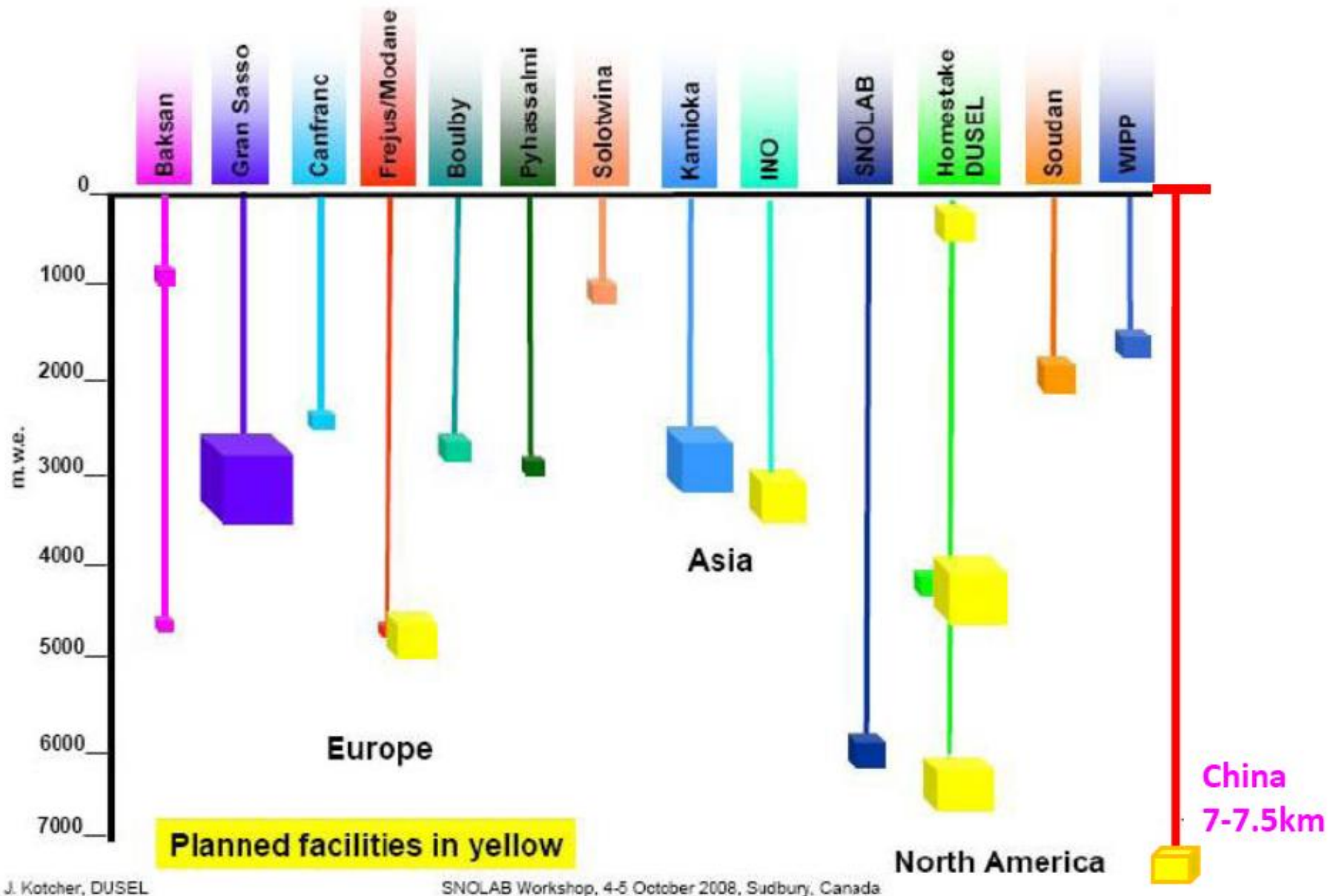


信号与中微子反应相似

如何降低宇宙线本底？



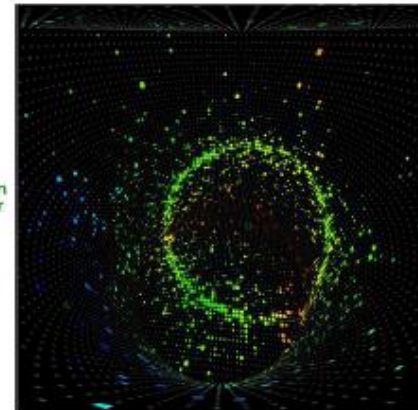
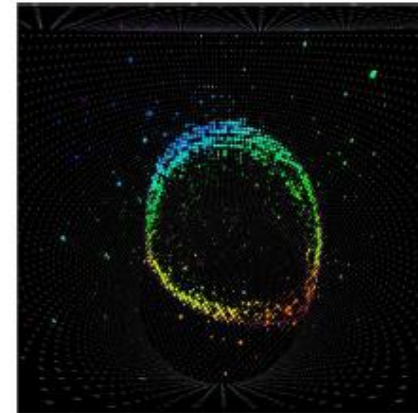
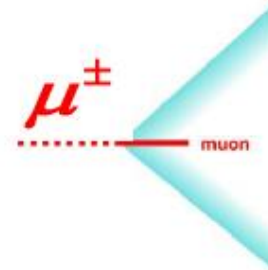
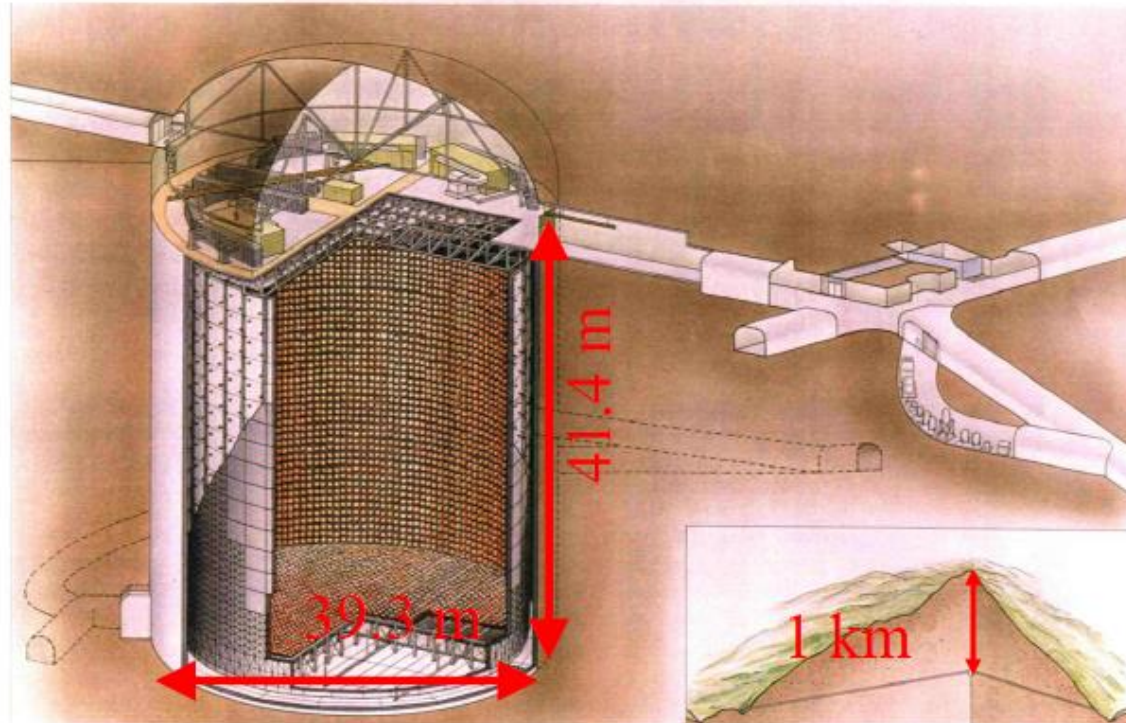
现在的中微子观测站都在极深的地下...



Super Kamiokande Experiment

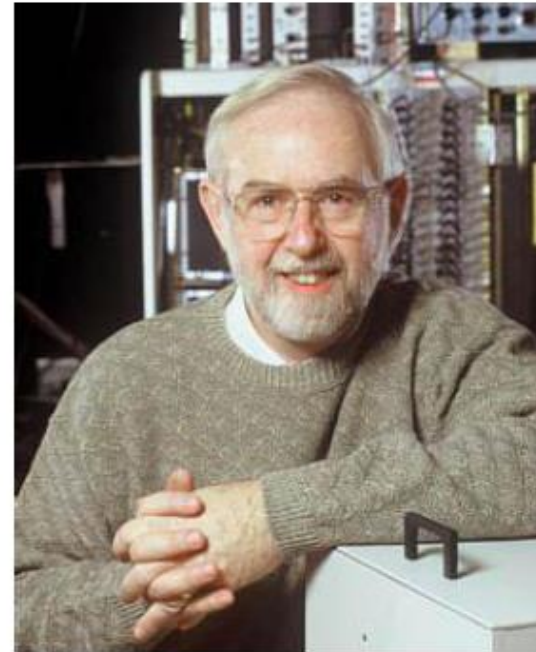
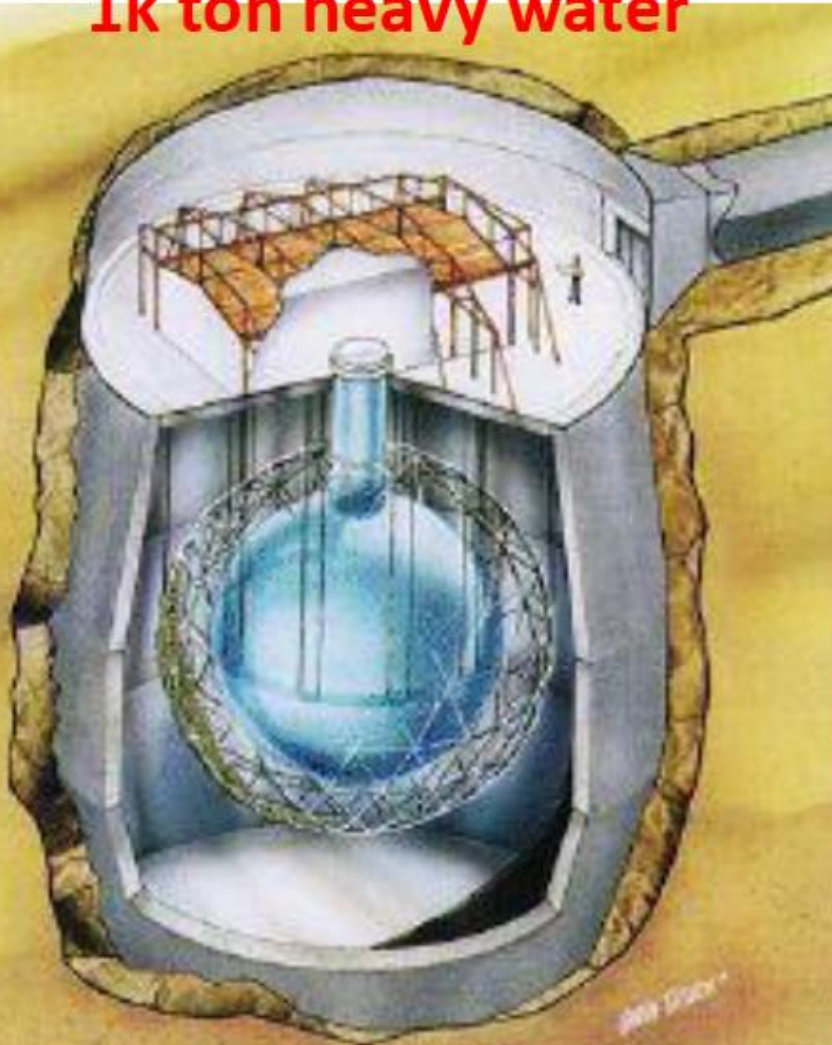


A 50k tons water Č detector
located at 1k m underground

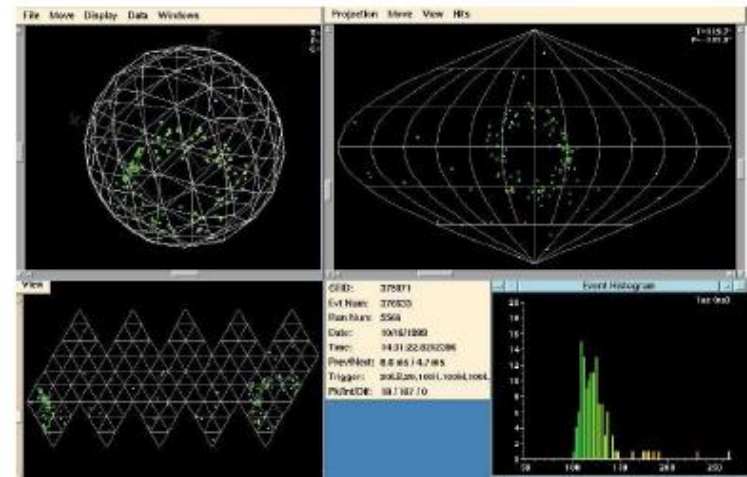


SNO Experiment

2092m to Surface
1k ton heavy water



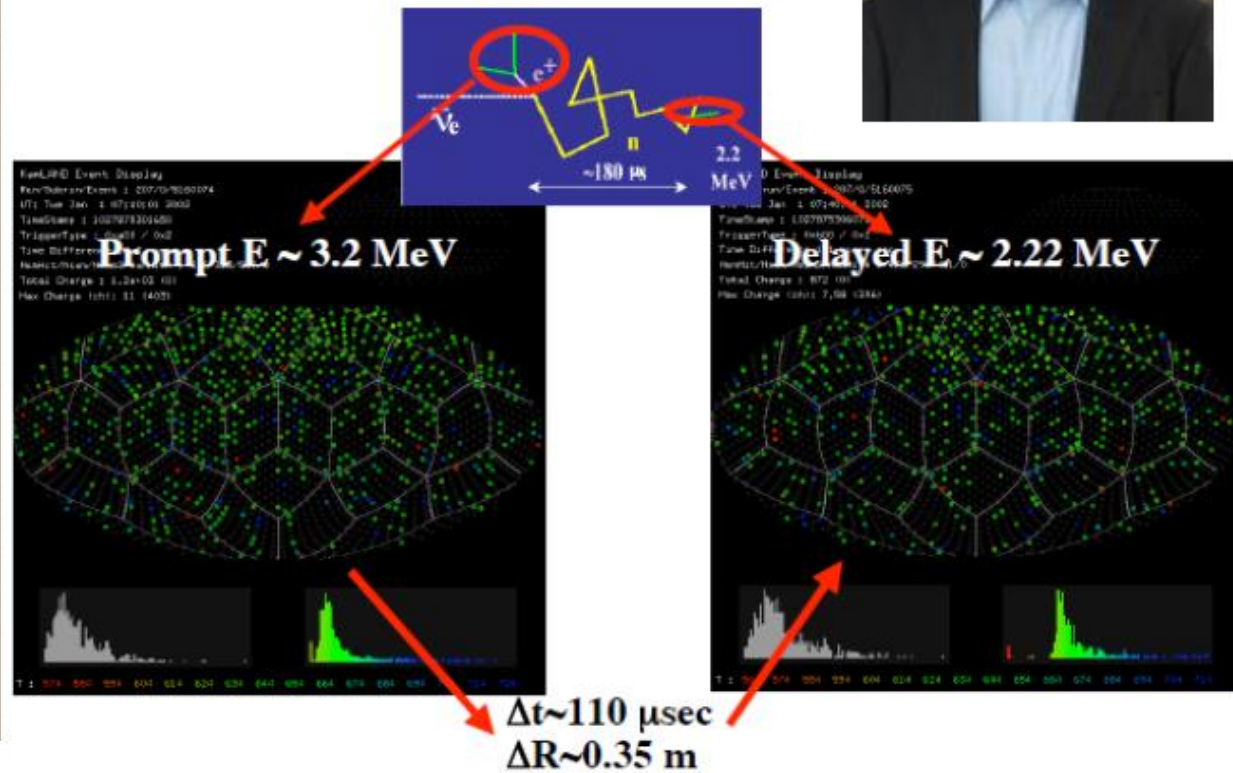
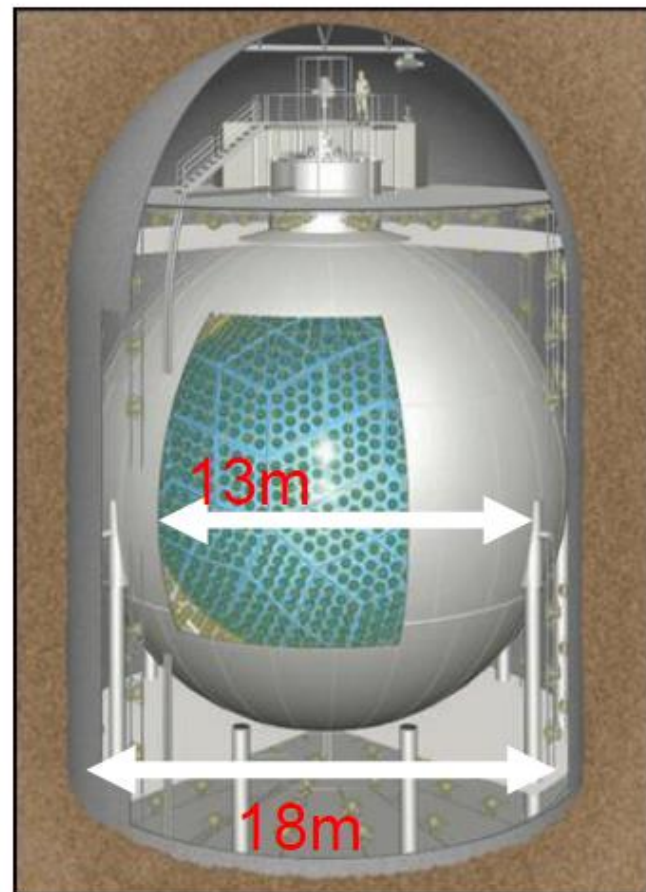
Arthur B. McDonald



KamLAND Experiment

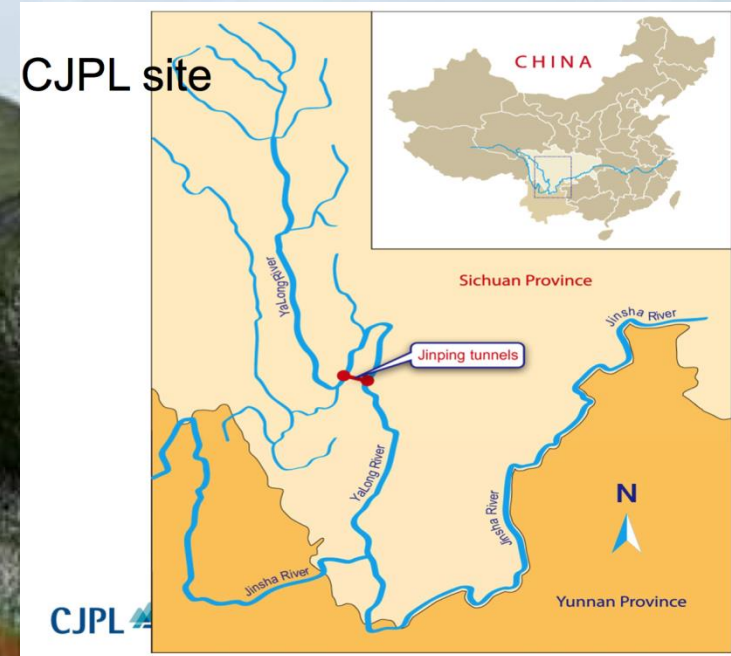
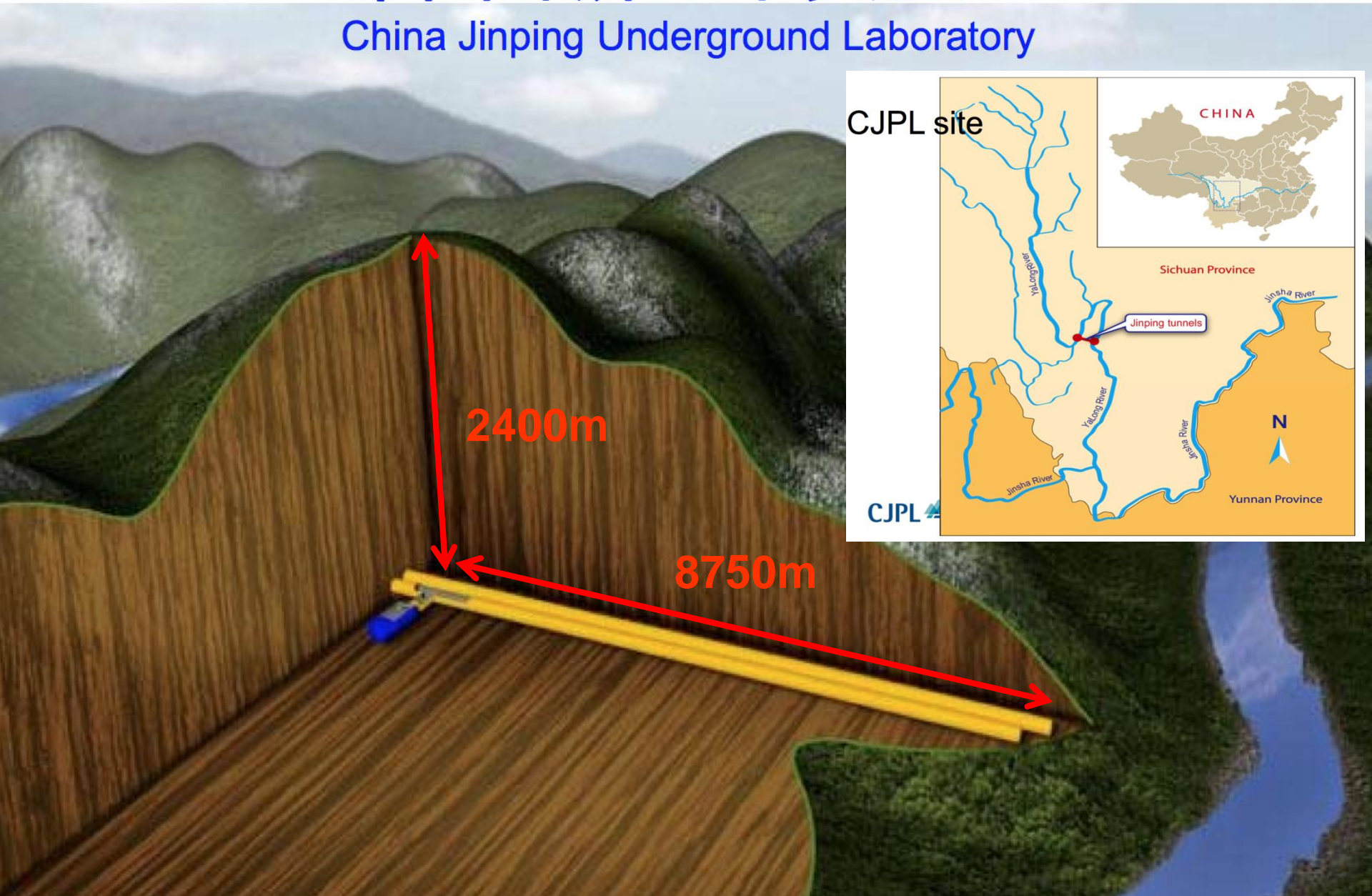
Observation of the reactor neutrino disappearance at L/E value where the solar neutrino effect occurs

Located at Kamioka, using 1k ton liquid scintillator as the target.



中国锦屏地下实验室

China Jinping Underground Laboratory



- 轻子数

	e^-	ν_e	μ^-	ν_μ	τ^-	ν_τ	e^+	$\bar{\nu}_e$	μ^+	$\bar{\nu}_\mu$	τ^+	$\bar{\nu}_\tau$
L_e	1	1	0	0	0	0	-1	-1	0	0	0	0
L_μ	0	0	1	1	0	0	0	0	-1	-1	0	0
L_τ	0	0	0	0	1	1	0	0	0	0	-1	-1

轻子数守恒可以解释

(a) $n \rightarrow p + e^- + \bar{\nu}_e$

(b) $\mu^- \rightarrow e^- + \bar{\nu}_e + \nu_\mu$

(c) $\tau^- \not\rightarrow e^- + \gamma$ ($< 2.6 \times 10^{-6}$, 90% CL)

(d) $\mu^- \not\rightarrow e^- + e^- + e^+$ ($< 1 \times 10^{-12}$, 90% CL)