



# 中微子物理

葛韶锋

gesf@sjtu.edu.cn



上海交通大学

SHANGHAI JIAO TONG UNIVERSITY

地球中微子暑期学校  
Aug/27, 2024 @ 清华大学

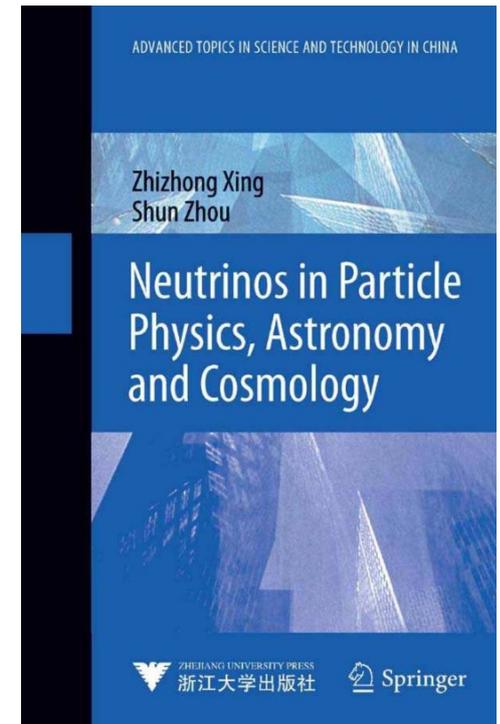
李政道研究所  
Tsung-Dao Lee Institute

上海交大非物理类研究生公共选修课 《新物理》

## 第 1 讲：粒子物理标准模型和新物理

## 第 2 讲：中微子

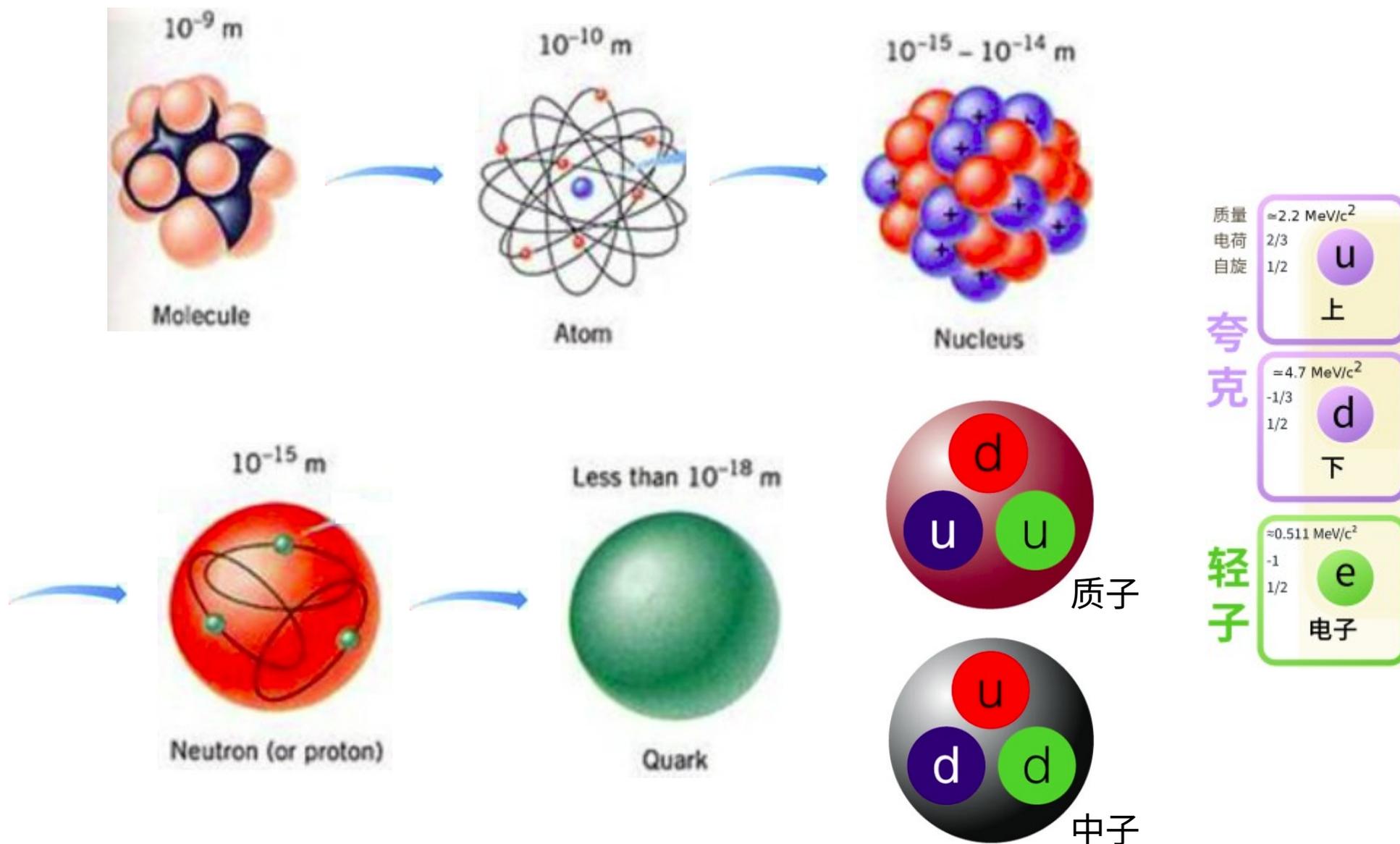
- 2.1 中微子的发现
- 2.2 中微子振荡
- 2.3 中微子质量
- 2.4 中微子的应用

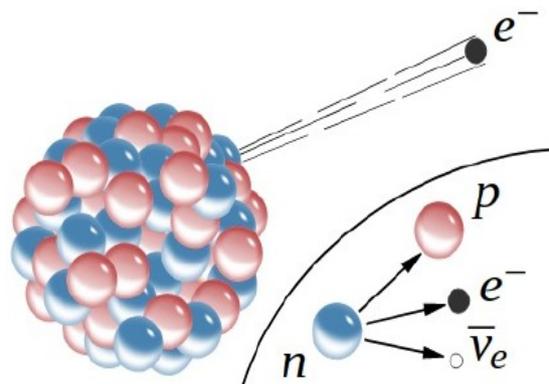
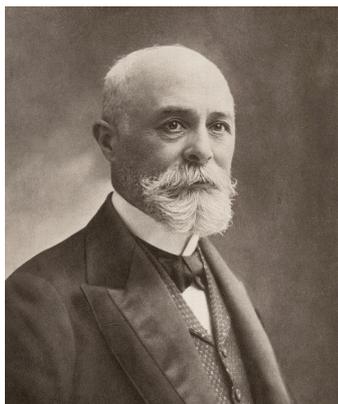


## 第 3 讲：暗物质

## 第 4 讲：粒子宇宙学和天体物理

# 组成物质的基本粒子



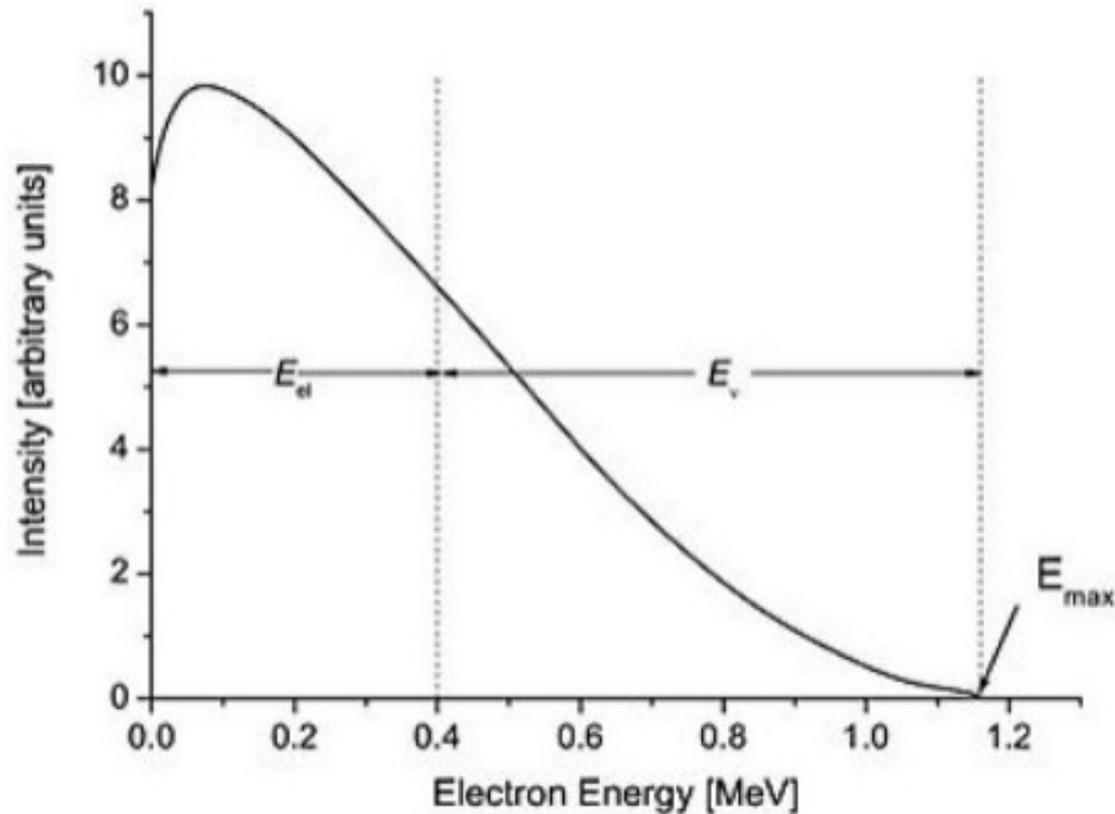


1896：贝克勒尔发现铀的放射性

$$E_e = \frac{M_N^2 - M_{N'}^2 + m_e^2}{2M_N}$$

**两体末态的能动量应该是确定值！**

vs 质心系的两体弹性散射



- 1920-1927 – Charles Drummond Ellis establish **continuous spectrum**
- 1932 – 王淦昌 《物理学期刊》 74 卷 《关于 RaE 的连续  $\beta$  射线谱的上限》

- 1924 – Slater, Bohr, Kramers,



**在单个贝塔衰变中能量不守恒，只在统计意义上成立！**

# 能量不守恒?

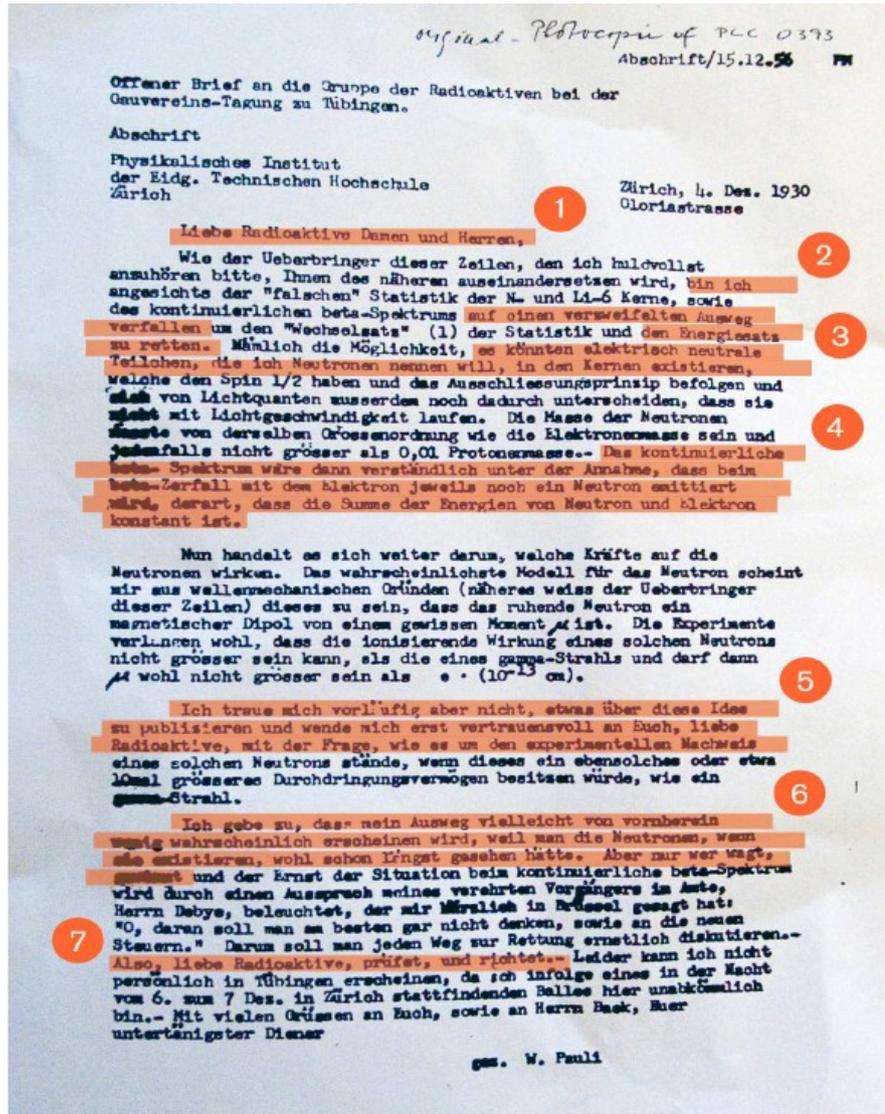


**能量不守恒!**

**泡利: 别瞎扯淡!**

1924 - Bohr, Kramers, Slater

# 泡利的解决方案：新粒子



“亲爱的放射性女士先生们：

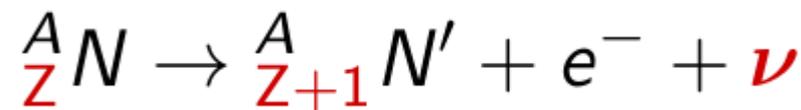
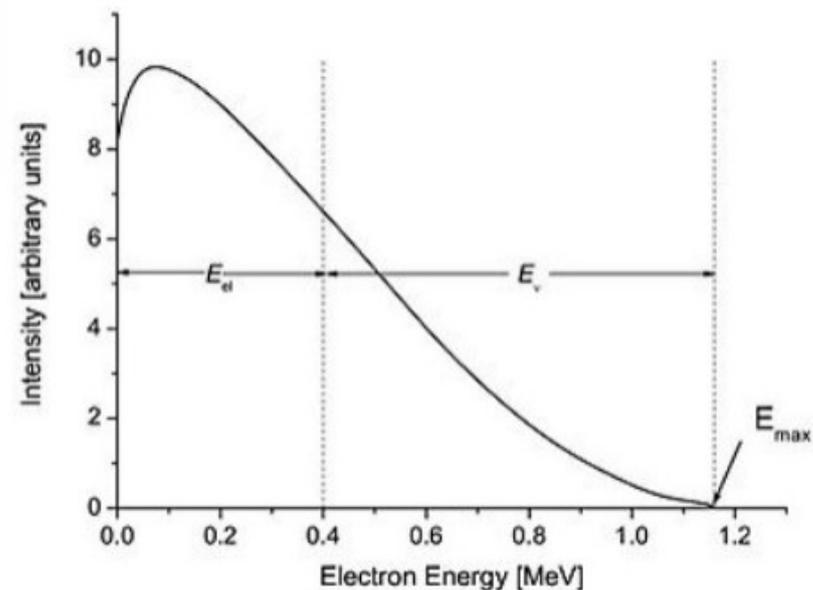
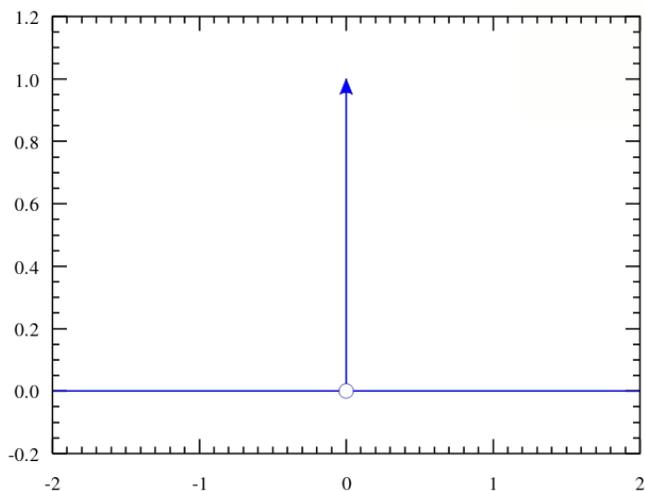
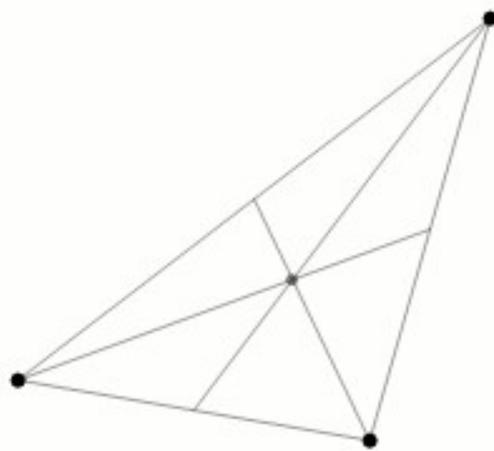
关于氮 (N) 和锂 (Li) 6 (译注：6 是原子核的质量数，现在我们知道是质子数加上中子数，中子与质子质量差不多，当时只知道是质子质量的倍数) 原子核的“错误”的统计定律和连续  $\beta$  谱，**我想到一个绝望的补救方法**，能够挽救统计定律以及能量守恒定律。这就是，**原子核中可能存在一个电中性的粒子，我称它为中子**，它的自旋是  $1/2$ ，满足不相容原理，而且与光子不同，它不以光速运动。中子的质量应该与电子同一数量级，而且肯定不大于质子质量的  $0.01$  倍。假设  $\beta$  衰变时，1 个中子和 1 个电子同时放出，它们的能量之和是常数，这就可以理解连续  $\beta$  谱。

还有一个问题，中子受到什么力？在波动力学基础上……中子最可能的模型似乎是，静止的中子是个磁矩为  $\mu$  的磁偶极矩。实验似乎要求中子的电离效应不能大于  $\gamma$  射线，因此  $\mu$  不能大于  $e \times 10^{-13} \text{ cm}$ 。

目前我不敢就此想法发表任何东西，所以私下询问你们，亲爱的放射性朋友，如何在实验上证实这个中子，如果它的穿透能力等于或者十倍于  $\gamma$  射线。

我承认从先验的角度，我的方案不大可能，因为如果它们存在，早就应该被看到。但是敢拼才能赢，我的前任得拜 (P. Debye) 先生最近在布鲁塞尔向我表达了连续谱问题的严重性：‘哦，就像新的税一样，最好完全不去想它。’因此需要认真讨论每条拯救的道路。——因此，亲爱的放射性朋友，请检查并判断。——**不幸的是，我不能亲临图宾根，因为 12 月 6 日晚至 7 日有个舞会，我必须参加……你们谦卑的侍者，沃尔夫冈·泡利。**”

# 三体过程 → 复杂性



# 费米理论 (四费米有效理论)

- 1933 - Fermi gave the name “**Neutrino**”
- 1934 - Fermi’s theory

红色部分是相应费米子的场~  
两分量波函数 (s=1/2)

$$\mathcal{L}_F = \frac{G_F}{\sqrt{2}} [(\bar{p}\gamma_\mu n)(\bar{e}\gamma^\mu \nu) + h.c.]$$

where  $G_F = 10^{-5}/m_p^2$  is the Fermi Constant.

Spin structure already require 4 fermions

如果没有中微子,  
“转动” 不对称无法保持!

$$(\bar{p}\gamma_\mu n) : \frac{1}{2} \times \frac{1}{2} = 1 \oplus 0$$

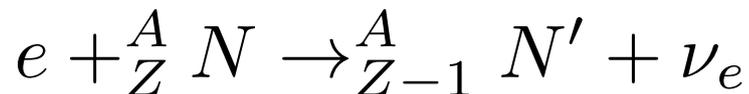
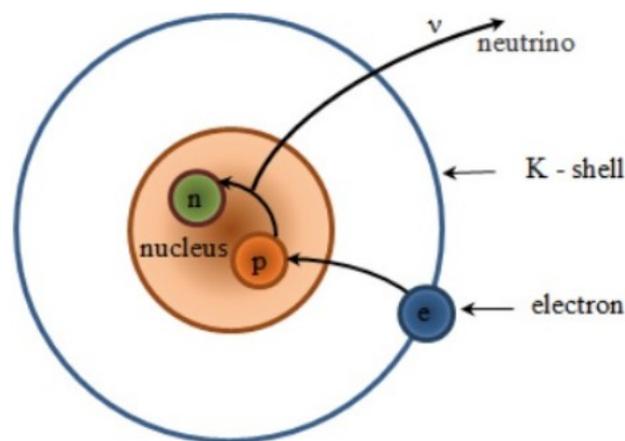
$$(\bar{e}\gamma_\mu \nu) : \frac{1}{2} \times \frac{1}{2} = 1 \oplus 0$$

$$(\bar{p}\gamma_\mu n)(\bar{e}\gamma^\mu \nu) : 1 \times 1 = 0$$

转动不变性  
角动量守恒

# K 层电子俘获：三体 → 两体

- 1942 - K 层电子俘获 proposed by Kan Chang Wang (王淦昌)  
几个月后艾伦按照王淦昌的建议测到  ${}^7\text{Li}$  的**单能反冲**

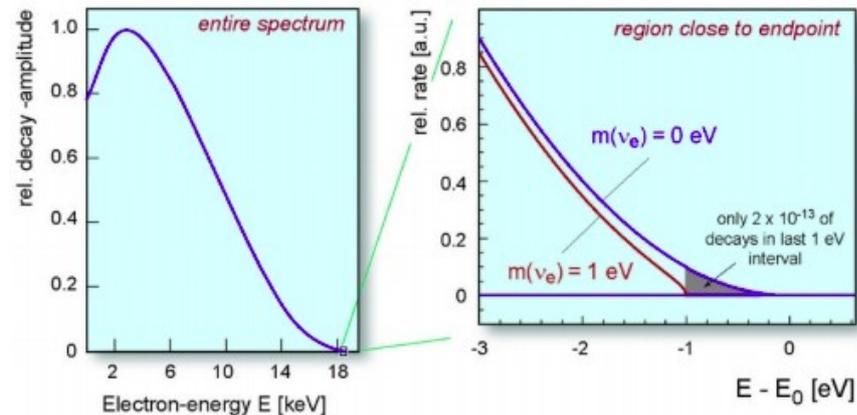


王淦昌

- 1952 - 艾伦和罗德拜克用  ${}^{37}\text{Ar}$  的 K 电子俘获第一次测出  ${}^{37}\text{Cl}$  的单能反冲
- 1952 - Davis 用  ${}^7\text{Be}$  的电子俘获测出  ${}^7\text{Li}$  的单能反冲

- 1897 – Radioactivity ( $\beta$  decay) discovered by Becquerel
- 1911 – (Lise Meitner and Otto Hahn) & 1912 (Jean Danysz)  
– **Kinetic spectrum**
- 1915 – **Noether Theorem** (published in 1918)
- 1920-1927 – Charles Drummond Ellis establish **continuous spectrum**
- 1924 – Bohr, Kramers, Slater - **energy non-conservation**
- 1928 – **Dirac Equation**
- 1930 – **Pauli's proposal of a neutrino**
- 1932 – **王淦昌 《物理学期刊》 74 卷 《关于 RaE 的连续  $\beta$  射线谱的上限》**
- 1942 - K 层电子俘获 proposed by **Kan Chang Wang (王淦昌)**
- 1956 - Reines & Cowan detected reactor anti-neutrino
- 1956 - 李政道、杨振宁提出宇称不守恒；吴建雄贝塔衰变实验验证

# 贝塔衰变能谱的精确测量

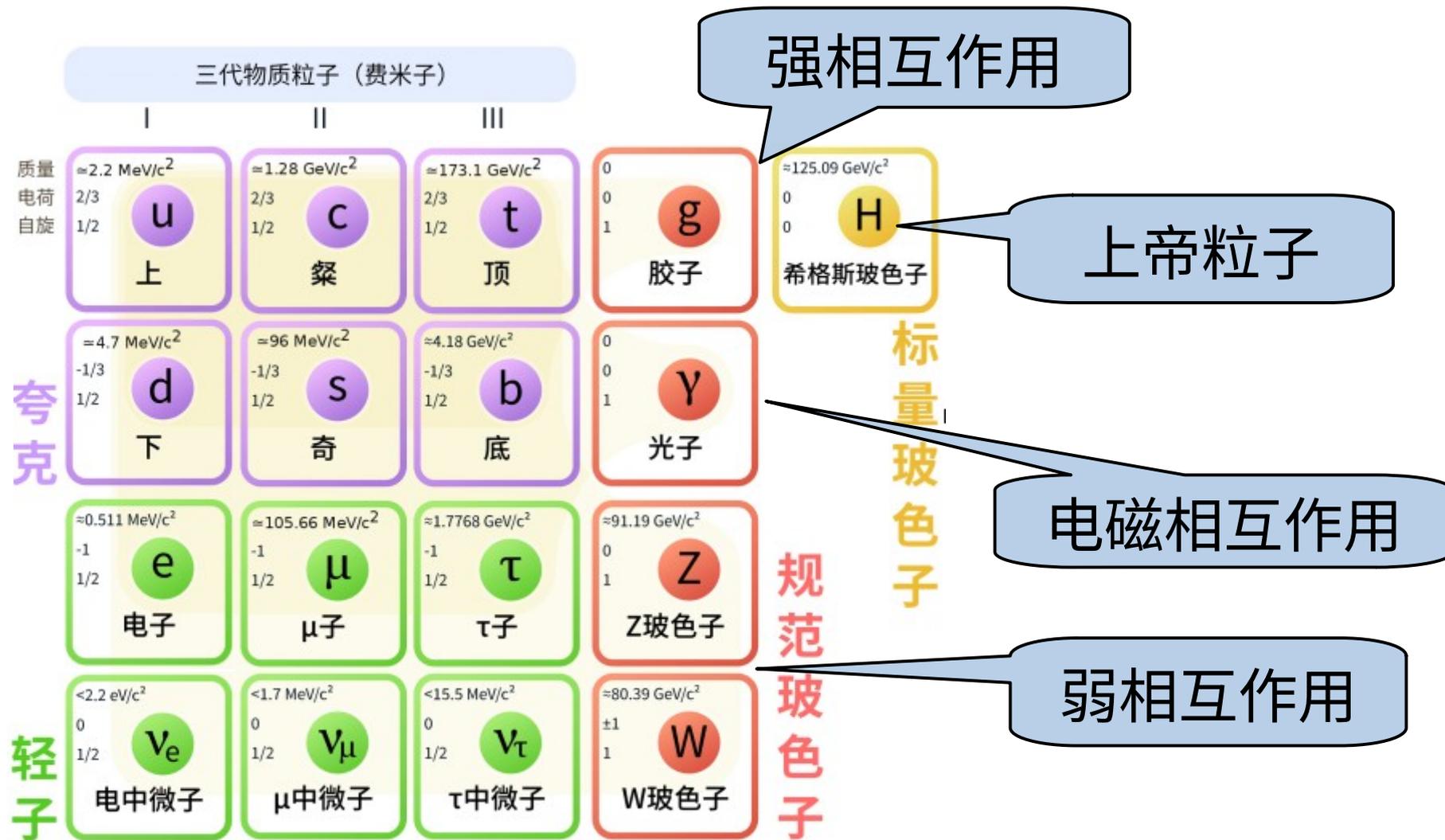


德国卡尔斯鲁厄的 Katrin 实验



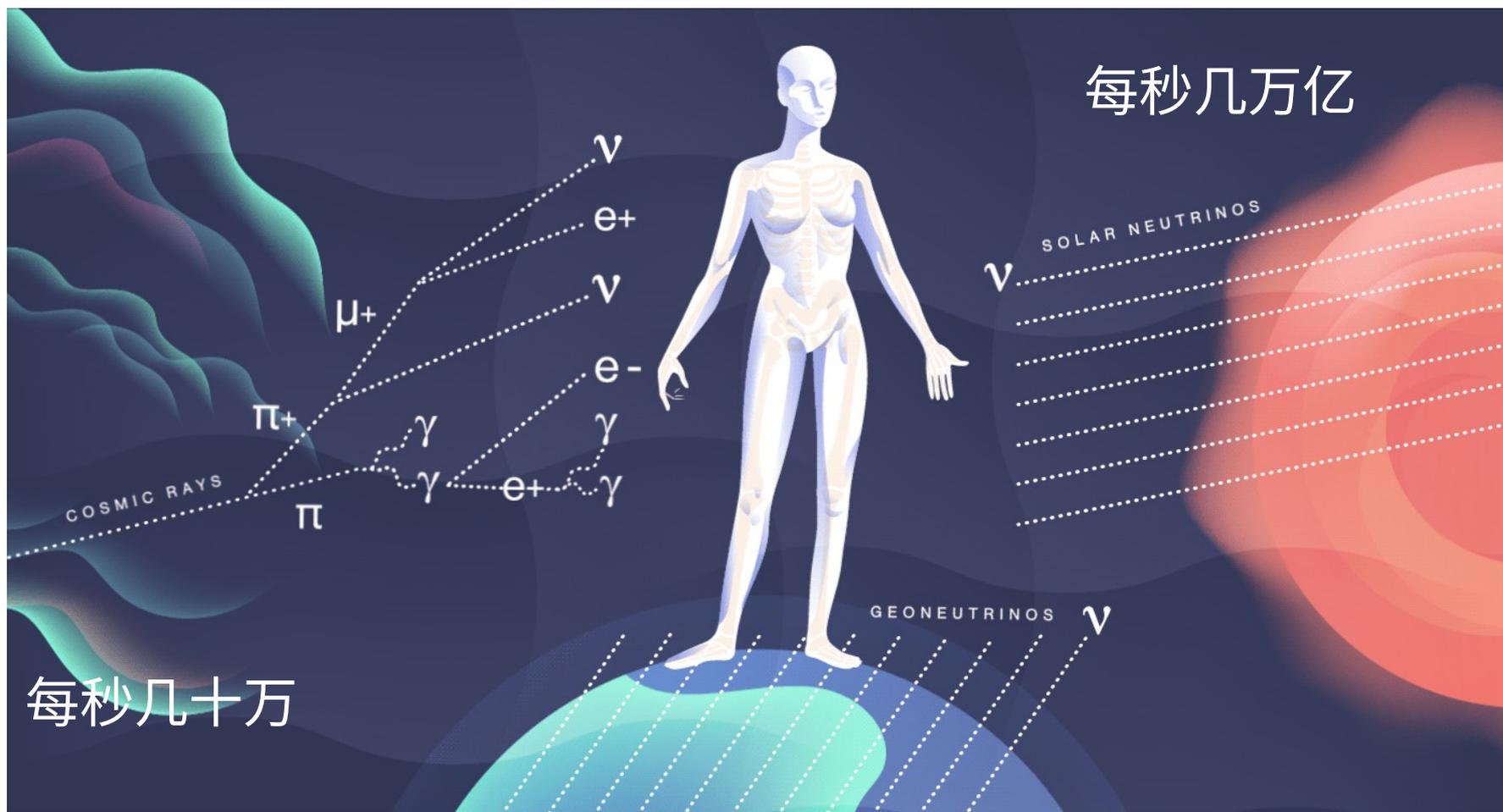
# 中微子振荡

# 粒子物理标准模型



中微子只参与弱相互作用!

# 自然界的中微子



每秒几千万



**358 mg / 100gm**  
1 million neutrinos/day



**312 mg / 100gm**



**485 mg / 100gm**

beta decay 89% (Ca) and  
electron capture 11% (Ar)

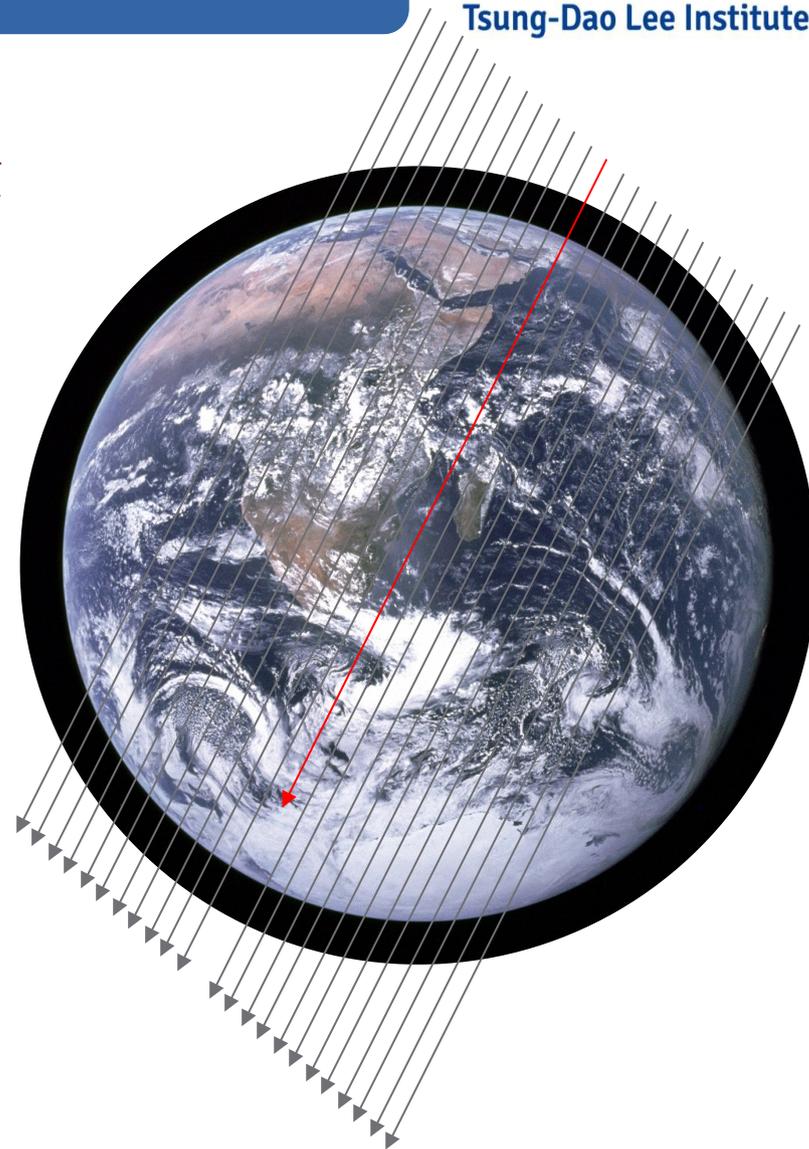
无电荷

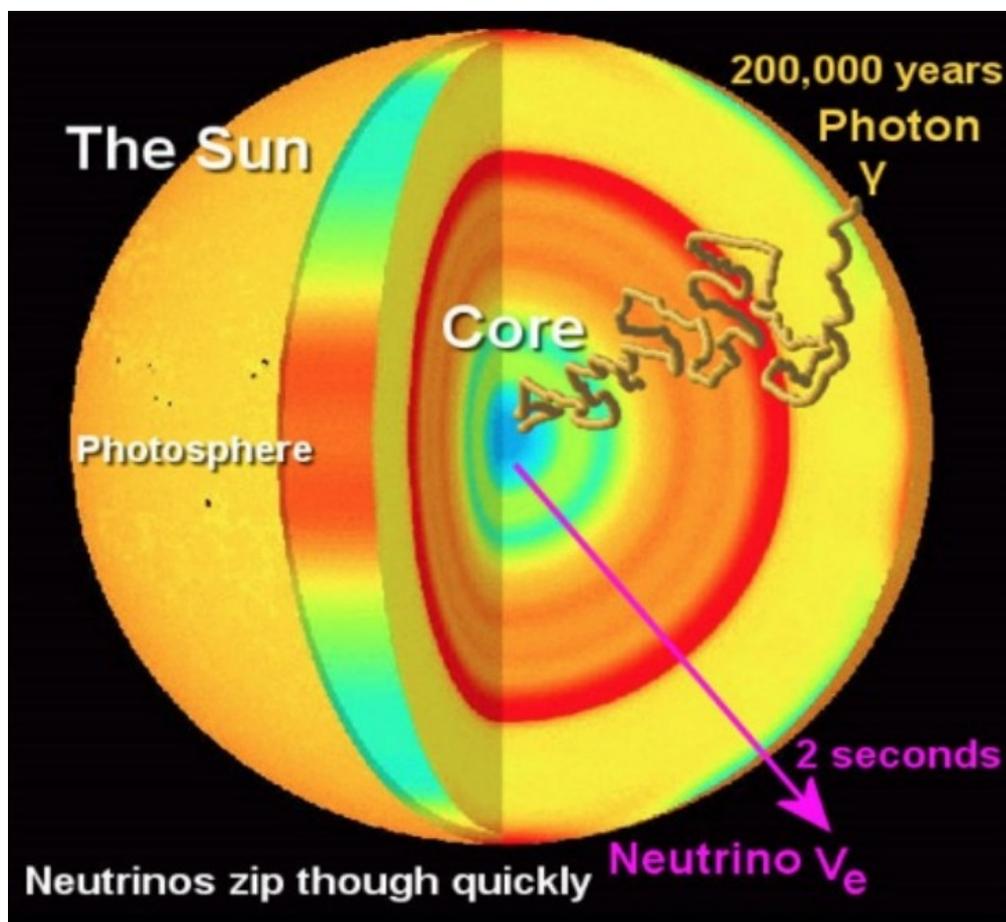
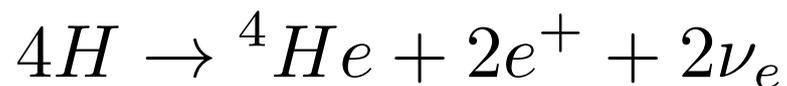
中微子可以轻松穿  
透 10 光年的铅板!

“无”质量

仅仅参与“弱”  
相互作用

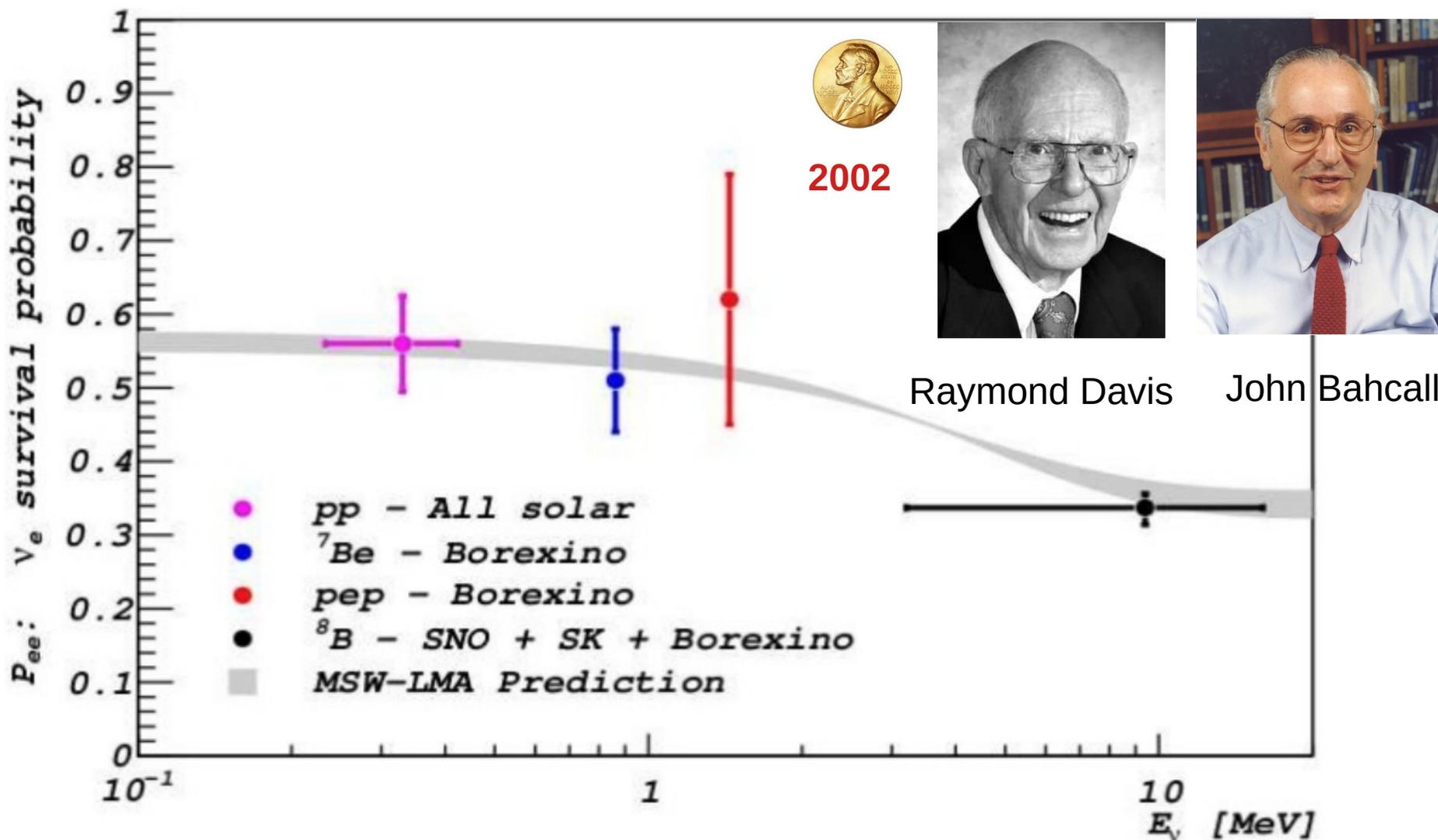
每一亿个中微子穿过地球，只有一个和地球反应





**因为中微子，人类对太阳内部的了解远远超过对地球内部的了解！**

# 太阳中微子丢失之谜



只看到了理论预言的 1/3

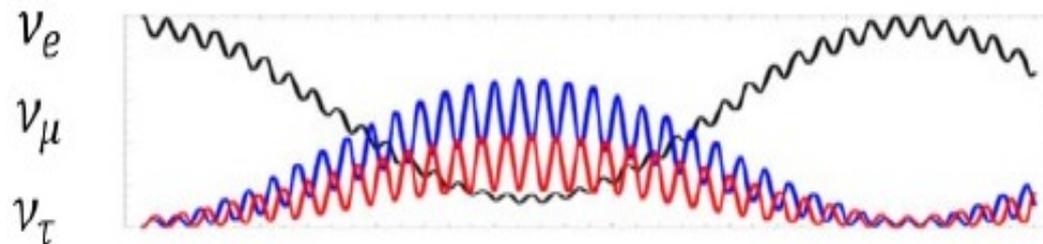
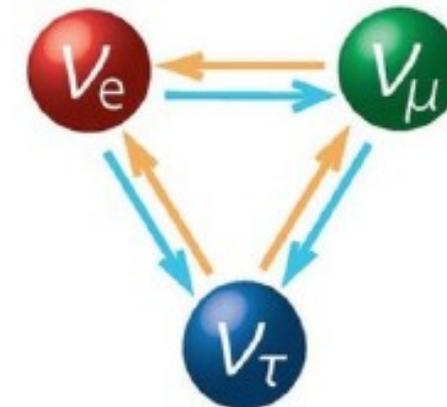
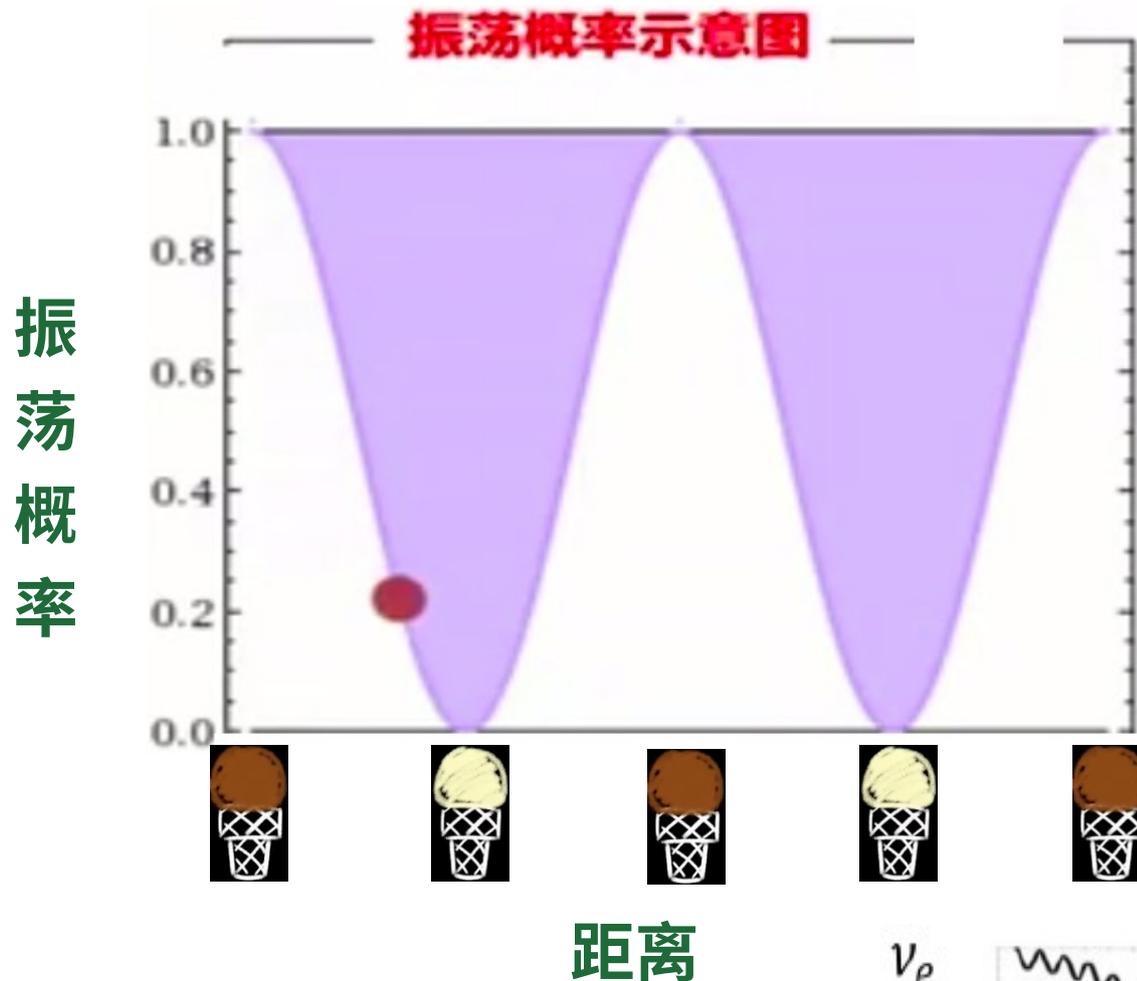
# 中微子的三种味道

$<2.2 \text{ eV}/c^2$   
0  
1/2  $\nu_e$   
电中微子

$<1.7 \text{ MeV}/c^2$   
0  
1/2  $\nu_\mu$   
 $\mu$ 中微子

$<15.5 \text{ MeV}/c^2$   
0  
1/2  $\nu_\tau$   
 $\tau$ 中微子





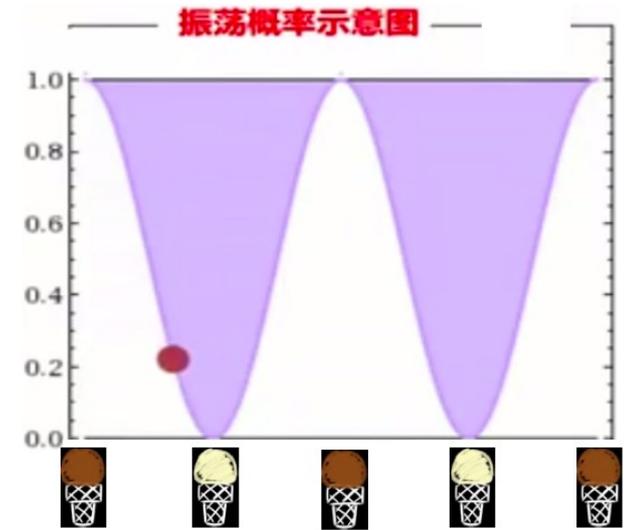
# 中微子振荡：混合 + 质量

## ➤ 两中微子振荡

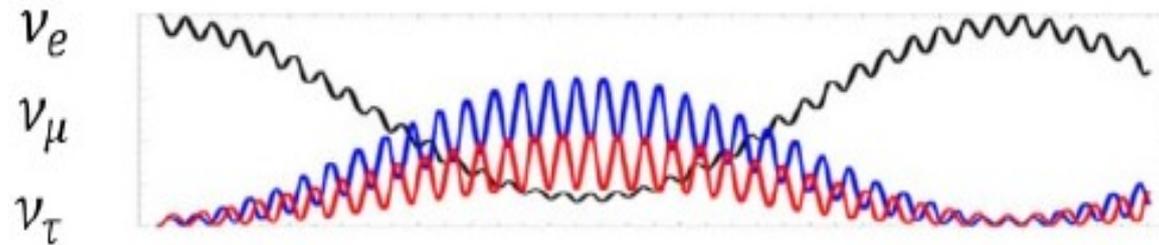
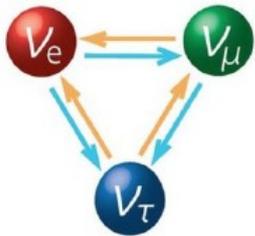
$$P_{\alpha\beta} |_{\alpha \neq \beta} = \sin^2 2\theta \sin^2 \left( \delta m^2 \frac{L}{4E} \right)$$

振幅

频率

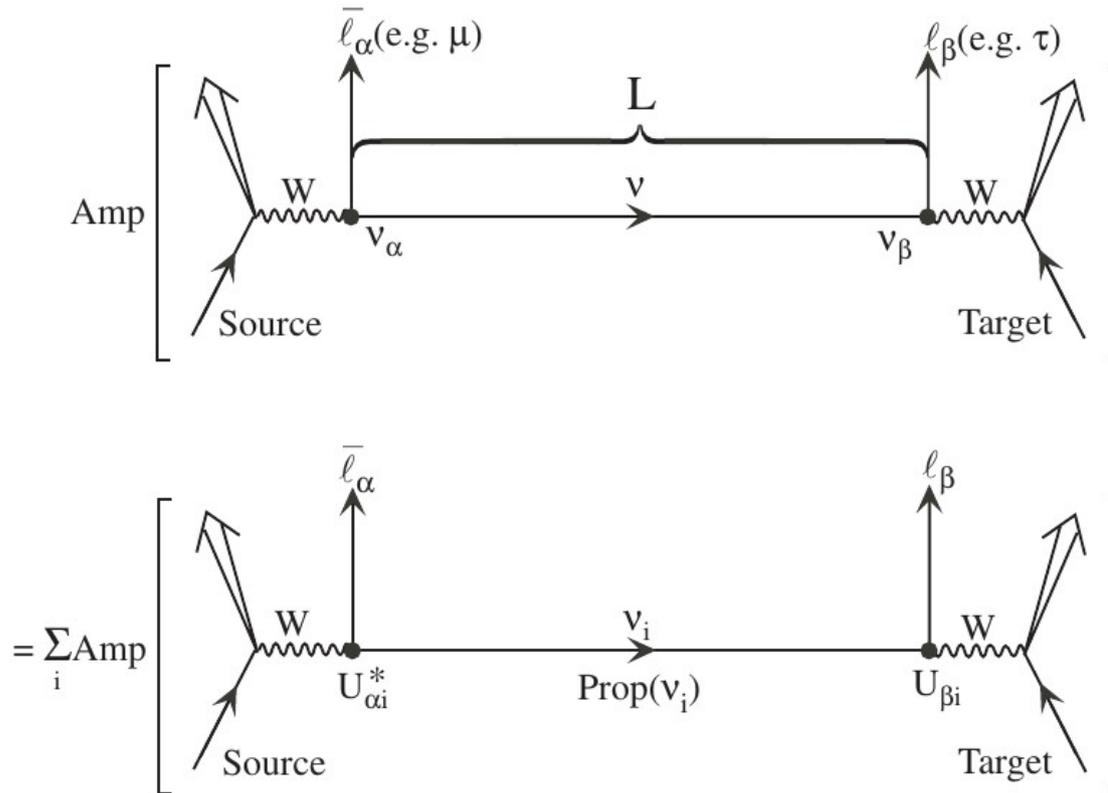


## ➤ 三中微子振荡



混合 + 质量差 → 中微子振荡

# Neutrino Oscillation (中微子振荡)



[Kayser, <https://arxiv.org/abs/hep-ph/0506165>]

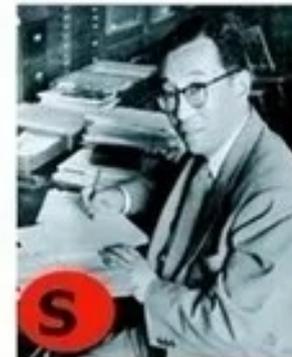
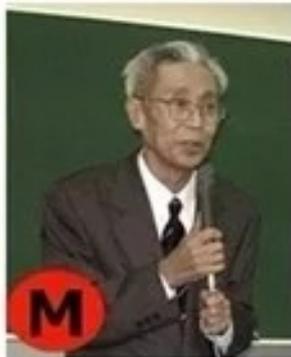
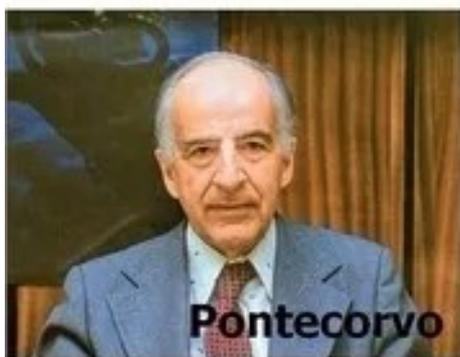
$$\nu_\alpha = \sum_i U_{\alpha i} \nu_i \rightarrow \boxed{\sum_i U_{\alpha i} e^{i(E_i t - \vec{P}_i \cdot \vec{x})} \nu_i} = \boxed{\sum_i U_{\alpha i} P_i U_{\beta i}^\dagger \nu_\beta} \equiv \sum_\beta A_{\alpha\beta} \nu_\beta$$

# 三中微子混合：PMNS 矩阵

两中微子混合：
$$U_{2 \times 2} = \begin{pmatrix} \cos \theta & \sin \theta \\ -\sin \theta & \cos \theta \end{pmatrix}$$



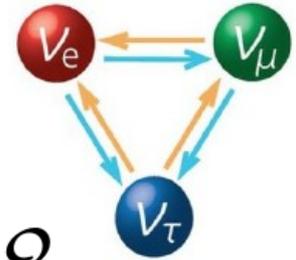
$$U_{\text{PMNS}} = \begin{pmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & c_{23} & s_{23} \\ 0 & -s_{23} & c_{23} \end{pmatrix} \begin{pmatrix} c_{13} & 0 & s_{13}e^{-i\delta_{\text{CP}}} \\ 0 & 1 & 0 \\ -s_{13}e^{i\delta_{\text{CP}}} & 0 & c_{13} \end{pmatrix} \begin{pmatrix} c_{21} & s_{12} & 0 \\ -s_{12} & c_{12} & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{pmatrix}$$



# Three Neutrino Oscillation

- PMNS Matrix

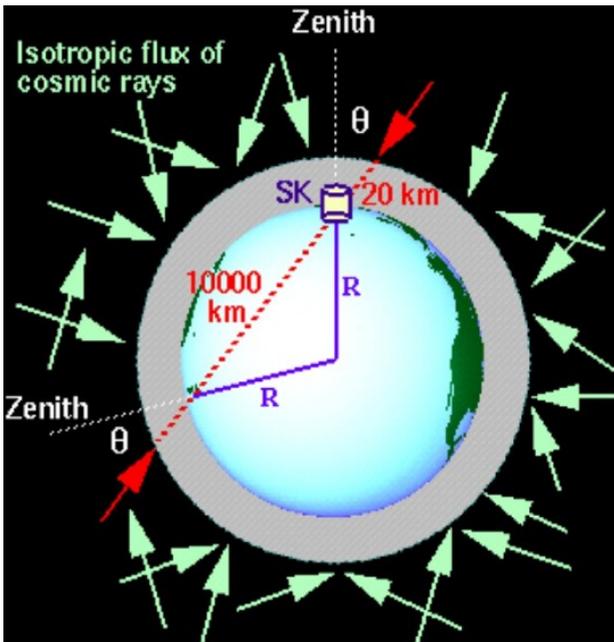
$$U_{\text{PMNS}} = \mathcal{P} \begin{pmatrix} c_s c_r & s_s c_r & s_r e^{-i\delta_D} \\ -s_s c_a - c_s s_a s_r e^{i\delta_D} & +c_s c_a - s_s s_a s_r e^{i\delta_D} & s_a c_r \\ +s_s s_a - c_s c_a s_r e^{i\delta_D} & -c_s s_a - s_s c_a s_r e^{i\delta_D} & c_a c_r \end{pmatrix} \mathcal{Q}$$



with  $\mathcal{P} \equiv \text{diag}(e^{i\phi_1}, e^{i\phi_2}, e^{i\phi_3})$  &  $\mathcal{Q} \equiv \text{diag}(e^{i\delta_{M1}}, 1, e^{i\delta_{M3}})$   
 [(s, a, r)  $\equiv$  (12, 23, 13) for (solar, atmospheric, reactor) angles]

$$\begin{aligned} P(\nu_\alpha \rightarrow \nu_\beta) &= |\text{Amp}(\nu_\alpha \rightarrow \nu_\beta)|^2 \\ &= \delta_{\alpha\beta} - 4 \sum_{i>j} \Re(U_{\alpha i}^* U_{\beta i} U_{\alpha j} U_{\beta j}^*) \sin^2(\Delta m_{ij}^2 \frac{L}{4E}) \\ &\quad + 2 \sum_{i>j} \Im(U_{\alpha i}^* U_{\beta i} U_{\alpha j} U_{\beta j}^*) \sin(\Delta m_{ij}^2 \frac{L}{2E}) \end{aligned}$$

$$\Delta m_{ij}^2 \equiv m_i^2 - m_j^2 \qquad \Delta m_{ij}^2 \frac{L}{4E} = 1.27 \Delta m_{ij}^2 (\text{eV}^2) \frac{L (\text{km})}{E (\text{GeV})}$$

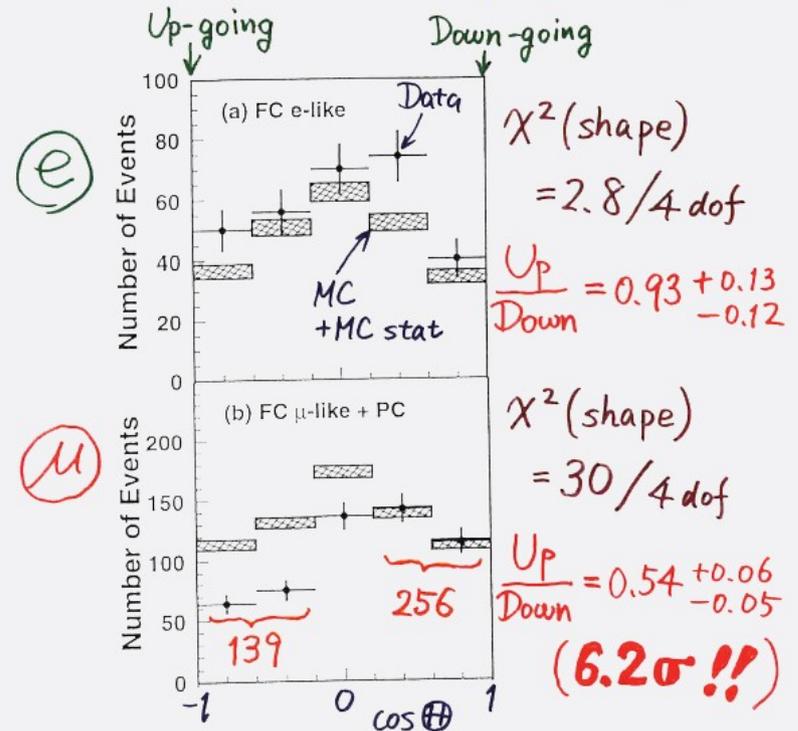


Kajita



2015

## Zenith angle dependence (Multi-GeV)



\* Up/Down syst. error for  $\mu$ -like

Prediction (flux calculation  $\dots \lesssim 1\%$   
1km rock above SK  $\dots 1.5\%$ ) 1.8%

Data (Energy calib. for  $\uparrow\downarrow \dots 0.7\%$   
Non  $\nu$  Background  $\dots < 2\%$ ) 2.1%

Super-K, 1998

## “高山”之巅——1998年那个中微子物理学的春天

2018-08-14 | 文章来源：邢志忠 | 浏览次数： | 【大 中 小】

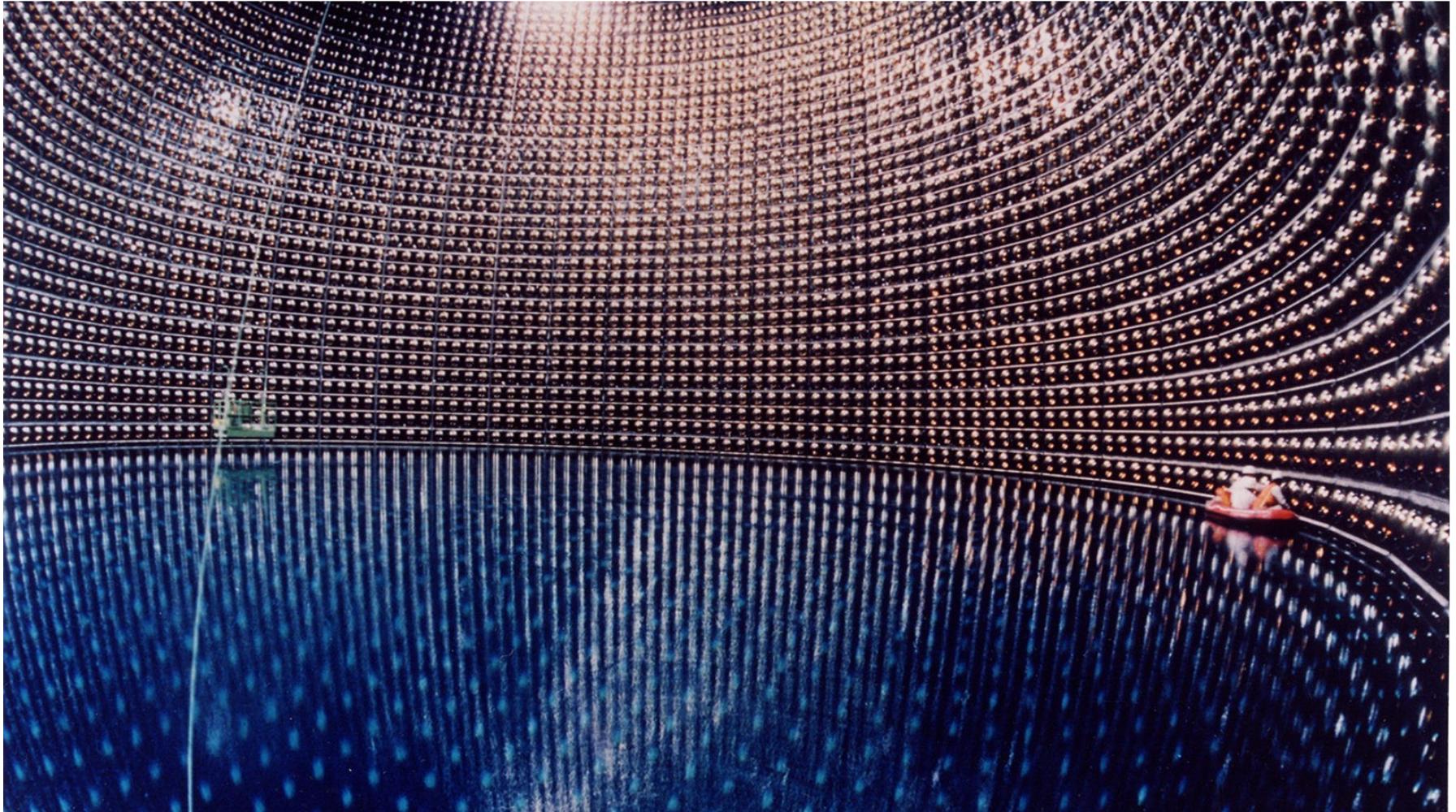
[http://www.ihep.cas.cn/kxcb/kpwz/201808/t20180814\\_5055420.html](http://www.ihep.cas.cn/kxcb/kpwz/201808/t20180814_5055420.html)

1998年6月4日至9日，中微子物理学界的盛会NEUTRINO'98在日本高山（Takayama）召开，它开启了中微子物理学的春天。在随后的20年间，中微子振荡实验取得了一个又一个突破性的成果。回过头来看，那次会议的规格之高和历史意义之深远，怎么说都不过分。



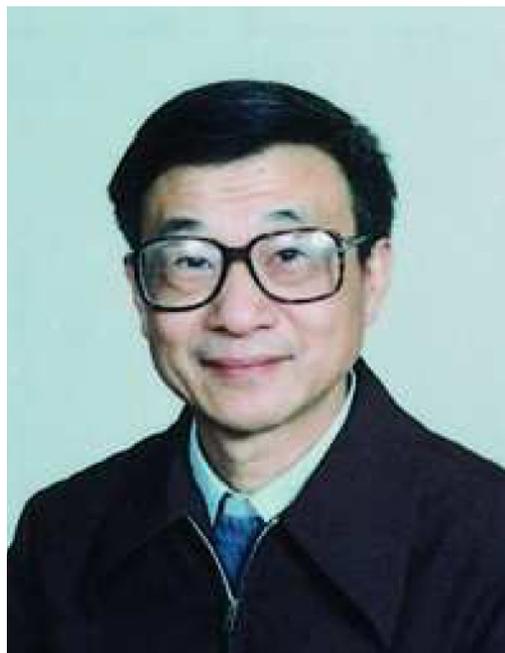
至少七位诺贝尔奖得主现身于 1998 年的中微子大会，这种场面几乎是空前绝后的

# 超级神冈实验 ( Super-K )



1000 米地下， 11 层楼高的超纯水球， 1 万支 “眼睛”

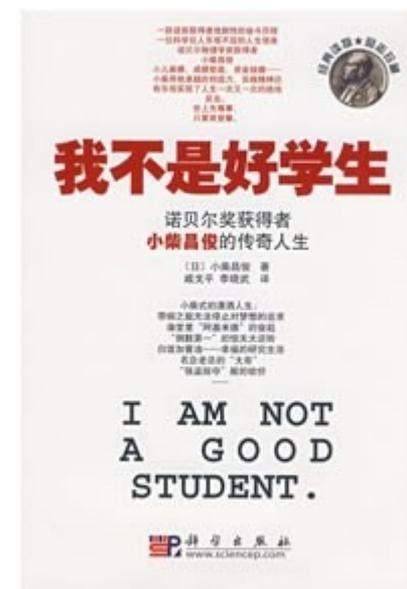
# 唐孝威 & 小柴昌俊



2002



Super-K 实验本来应该是中日合资



# 大自然不按规划出牌

目标：质子衰变

发现：超新星中微子！

Koshiba



2002



Davis



目标：太阳中微子

发现：太阳中微子的消失！

Kajita



目标：研究质子衰变中大气中微子本底

发现：大气中微子振荡

2015



McDonald



未来将是更加激动人心的！

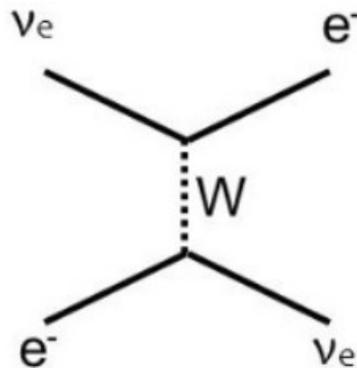
## Neutrino oscillations in matter

L. Wolfenstein

*Carnegie-Mellon University, Pittsburgh, Pennsylvania 15213*

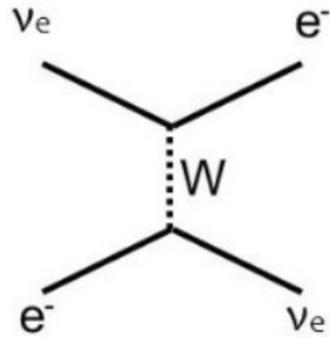
(Received 6 October 1977; revised manuscript received 5 December 1977)

The effect of coherent forward scattering must be taken into account when considering the oscillations of neutrinos traveling through matter. In particular, for the case of massless neutrinos for which vacuum oscillations cannot occur, oscillations can occur in matter if the neutral current has an off-diagonal piece connecting different neutrino types. Applications discussed are solar neutrinos and a proposed experiment involving transmission of neutrinos through 1000 km of rock.



$$\mathcal{H} = \frac{MM^\dagger}{2E_\nu} \pm \mathbf{V}$$





$$\mathcal{H} = \frac{MM^\dagger}{2E_\nu} \pm \mathbf{V}$$
$$= \frac{\Delta m^2}{4E} \begin{bmatrix} -\cos 2\theta & \sin 2\theta \\ \sin 2\theta & \cos 2\theta \end{bmatrix} + V_W \begin{bmatrix} 1 & 0 \\ 0 & 0 \end{bmatrix}$$

## 有效形式

$$\mathcal{H}_M = \frac{\Delta m_M^2}{4E} \begin{bmatrix} -\cos 2\theta_M & \sin 2\theta_M \\ \sin 2\theta_M & \cos 2\theta_M \end{bmatrix}$$

$$\Delta m_M^2 \equiv \Delta m^2 \sqrt{\sin^2 2\theta + (\cos 2\theta - x)^2}$$

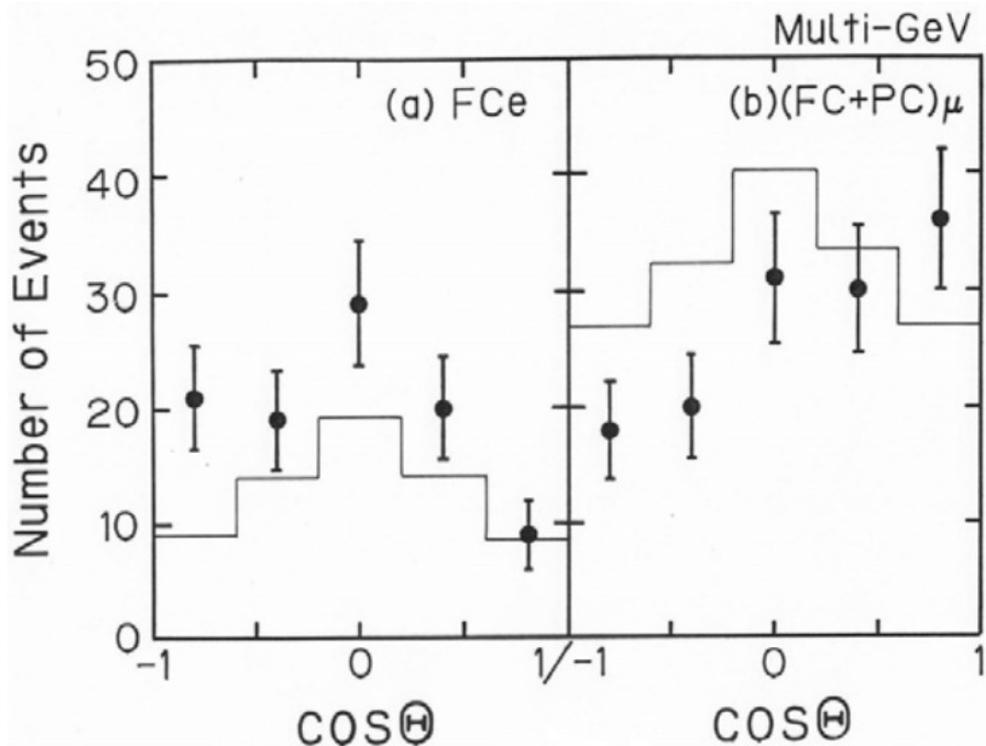
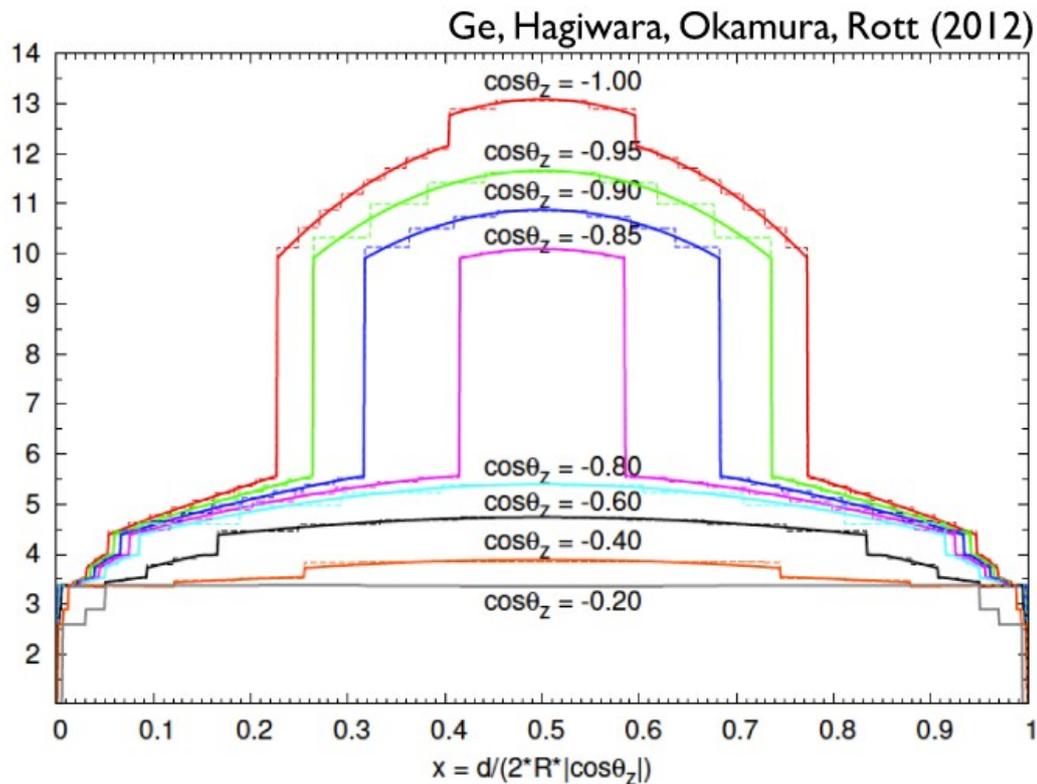
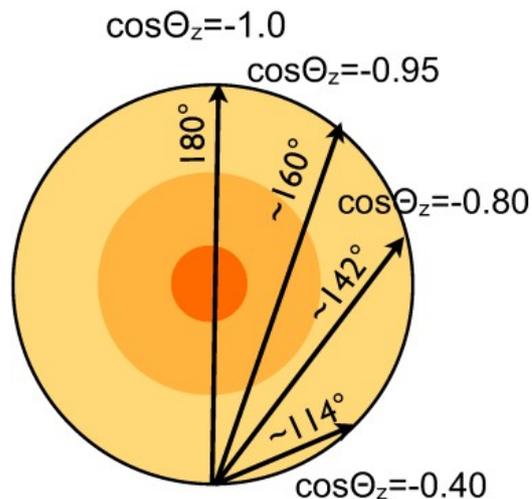
$$\sin^2 2\theta_M \equiv \frac{\sin^2 2\theta}{\sin^2 2\theta + (\cos 2\theta - x)^2}$$

## 共振

$$x \equiv \frac{V_W/2}{\Delta m^2/4E} = \cos 2\theta$$

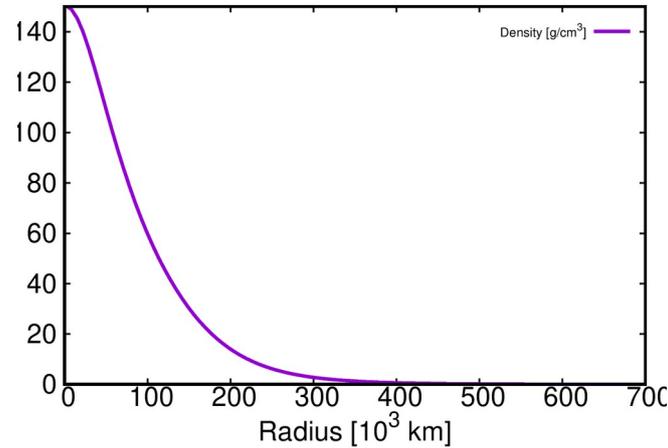
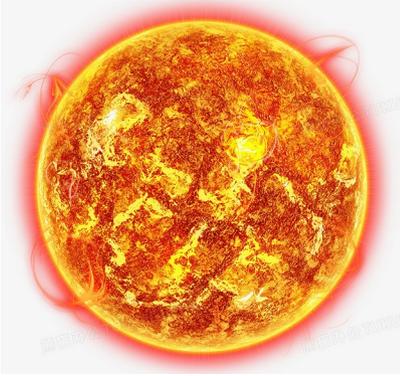
$$\sin^2 2\theta_M \rightarrow 1 \quad \theta_M \rightarrow \frac{\pi}{4}$$

**极大混合!**

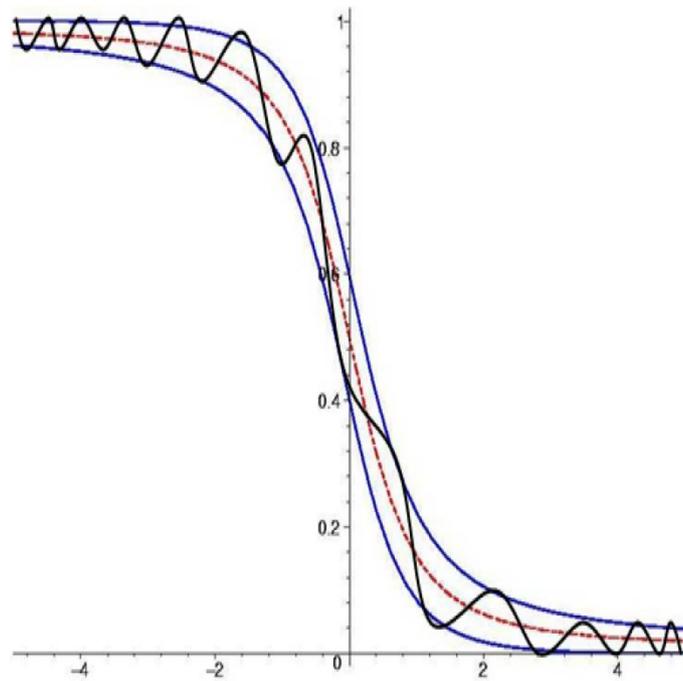


不同方向的中微子经历不同距离的传播，获得不同的味道组成！

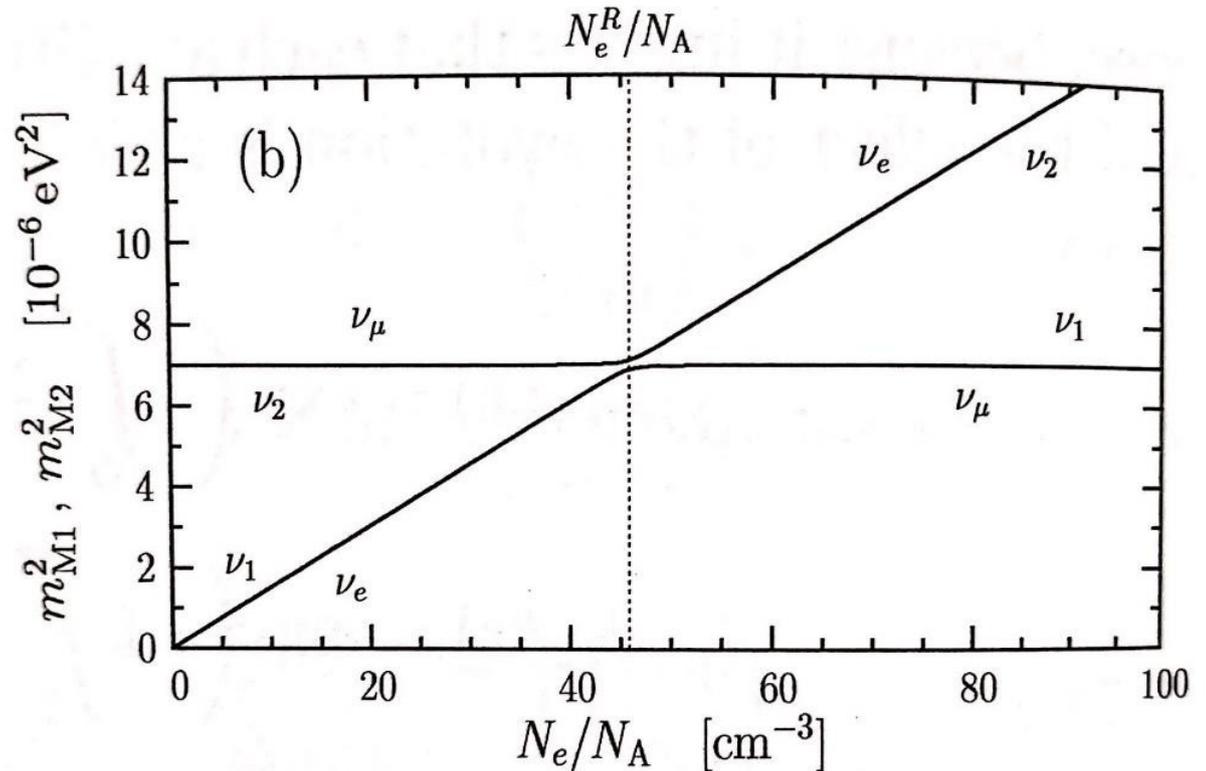
# 太阳中微子绝热演化



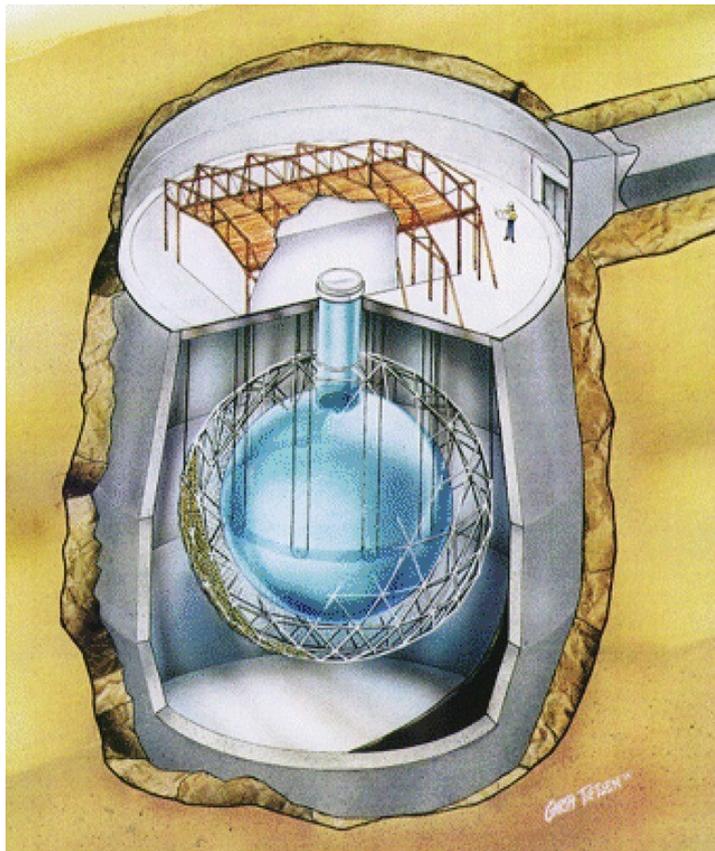
太阳密度由内  
而外缓慢变化



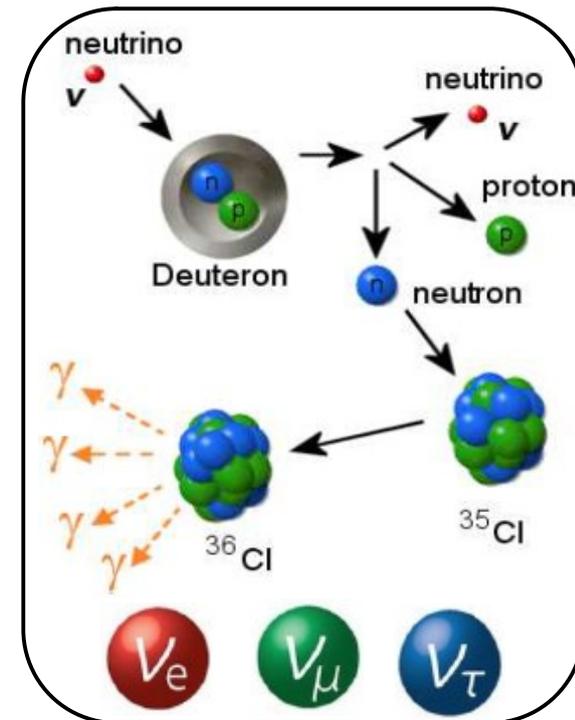
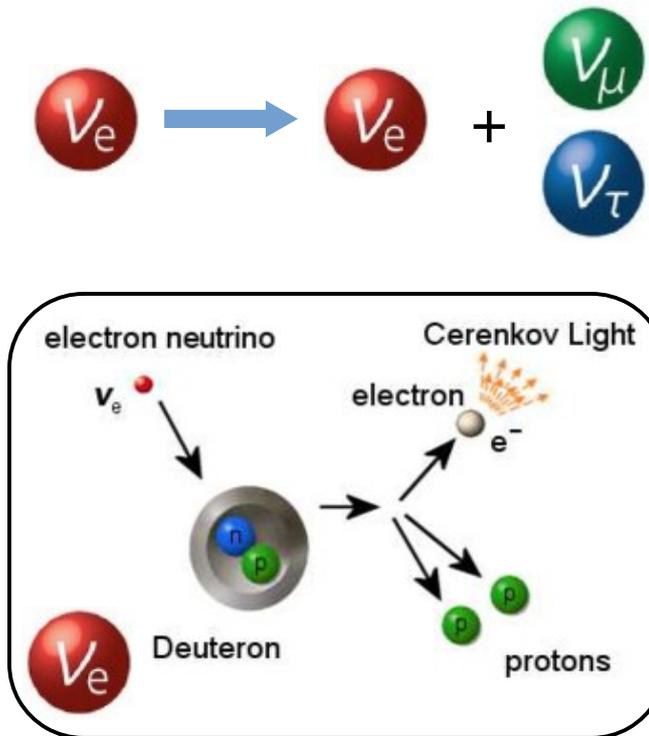
Smirnov [1609.02386]



# 确认太阳中微子丢失



2002 年 SNO 实验确认太阳电子中微子变成了其它类型



Herbert Hwa-sen  
Chen (陈华森)



Arthur B.  
McDonald

2015



# 中微子振荡参数

		Normal Ordering (best fit)		Inverted Ordering ( $\Delta\chi^2 = 7.0$ )			
		bfp $\pm 1\sigma$	$3\sigma$ range	bfp $\pm 1\sigma$	$3\sigma$ range		
with SK atmospheric data	$\sin^2 \theta_{12}$	$0.304^{+0.012}_{-0.012}$	0.269 $\rightarrow$ 0.343	$0.304^{+0.013}_{-0.012}$	0.269 $\rightarrow$ 0.343	太阳	
	$\theta_{12}/^\circ$	$33.45^{+0.77}_{-0.75}$	31.27 $\rightarrow$ 35.87	$33.45^{+0.78}_{-0.75}$	31.27 $\rightarrow$ 35.87		
	$\sin^2 \theta_{23}$	$0.450^{+0.019}_{-0.016}$	0.408 $\rightarrow$ 0.603	$0.570^{+0.016}_{-0.022}$	0.410 $\rightarrow$ 0.613	大气	
	$\theta_{23}/^\circ$	$42.1^{+1.1}_{-0.9}$	39.7 $\rightarrow$ 50.9	$49.0^{+0.9}_{-1.3}$	39.8 $\rightarrow$ 51.6		
	$\sin^2 \theta_{13}$	$0.02246^{+0.00062}_{-0.00062}$	0.02060 $\rightarrow$ 0.02435	$0.02241^{+0.00074}_{-0.00062}$	0.02055 $\rightarrow$ 0.02457	反应堆	
	$\theta_{13}/^\circ$	$8.62^{+0.12}_{-0.12}$	8.25 $\rightarrow$ 8.98	$8.61^{+0.14}_{-0.12}$	8.24 $\rightarrow$ 9.02		
	$\delta_{CP}/^\circ$	$230^{+36}_{-25}$	144 $\rightarrow$ 350	$278^{+22}_{-30}$	194 $\rightarrow$ 345		
		$\frac{\Delta m_{21}^2}{10^{-5} \text{ eV}^2}$	$7.42^{+0.21}_{-0.20}$	6.82 $\rightarrow$ 8.04	$7.42^{+0.21}_{-0.20}$	6.82 $\rightarrow$ 8.04	
		$\frac{\Delta m_{3\ell}^2}{10^{-3} \text{ eV}^2}$	$+2.510^{+0.027}_{-0.027}$	+2.430 $\rightarrow$ +2.593	$-2.490^{+0.026}_{-0.028}$	-2.574 $\rightarrow$ -2.410	

Gonzalez-Garcia, Maltoni & Schwetz [2111.03086]

**Daya Bay heralded a new era of precision measurement in 2012!**

Kam-Biu Luk @ Neutrino 2022

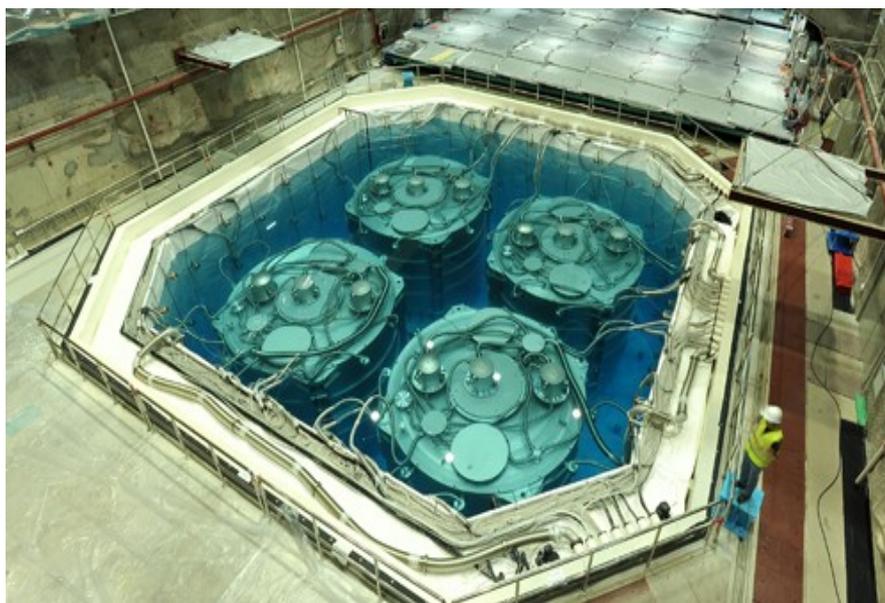
# 大亚湾反应堆中微子实验



王贻芳



陆锦标



# 反应堆中微子振荡

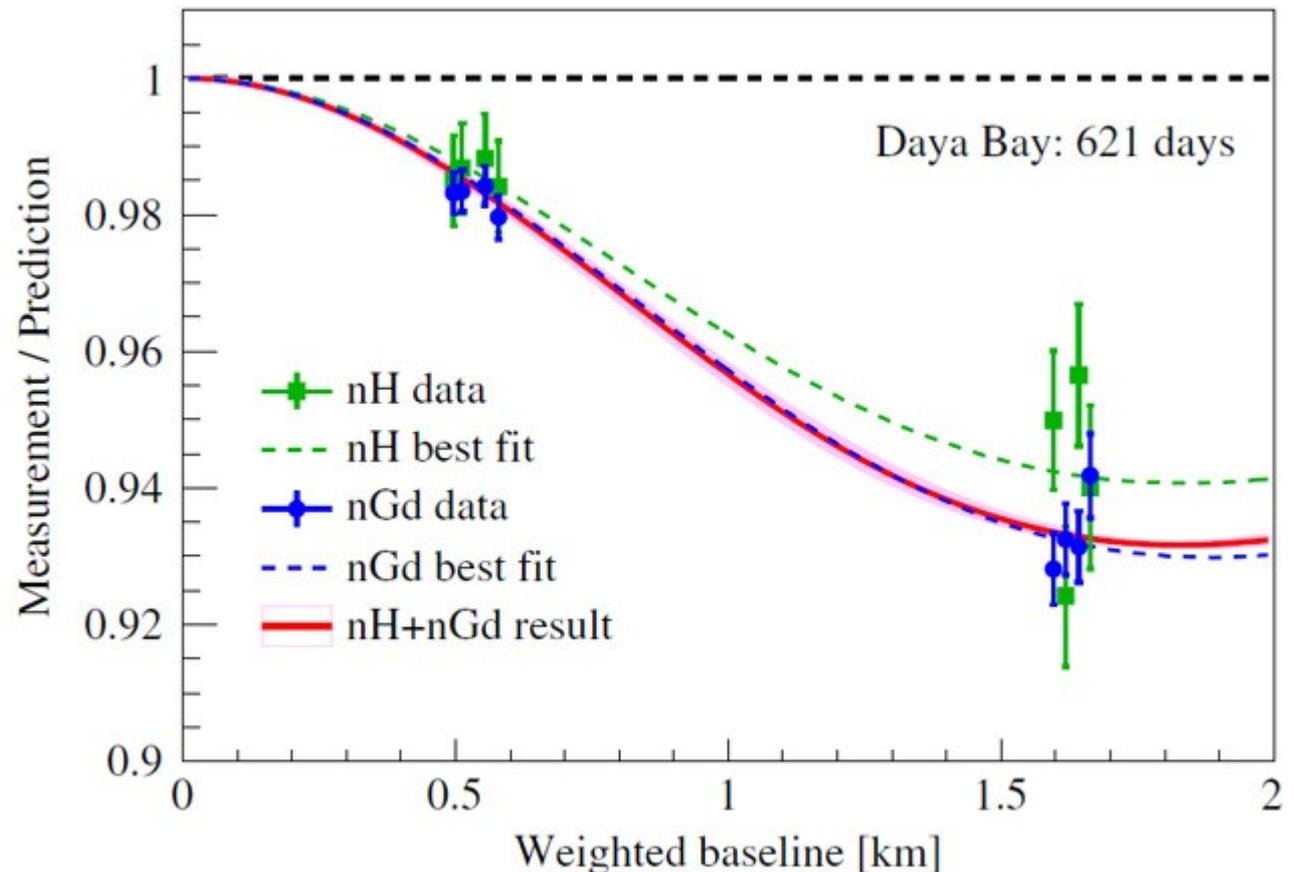
$$P_{ee} = 1 - \cos^4 \theta_{13} \sin^2 2\theta_{12} \sin^2 (\Delta_{21}) - \sin^2 2\theta_{13} \sin^2 (|\Delta_{31}|) - \sin^2 \theta_{12} \sin^2 2\theta_{13} \sin^2 (\Delta_{21}) \cos (2|\Delta_{31}|) \pm \frac{\sin^2 \theta_{12}}{2} \sin^2 2\theta_{13} \sin (2\Delta_{21}) \sin (2|\Delta_{31}|),$$



质量排序

@

江门中微子实验



# 质量、跷跷板、物质

# 超出标准模型的第一个新物理

左手 ———— **质量** ———— 右手

中微子  $\nu$   $\begin{pmatrix} \nu_L \\ \nu_R \end{pmatrix}$   ?   
带电轻子  $l$   $\begin{pmatrix} l_L \\ l_R \end{pmatrix}$    $l_R$  

1957

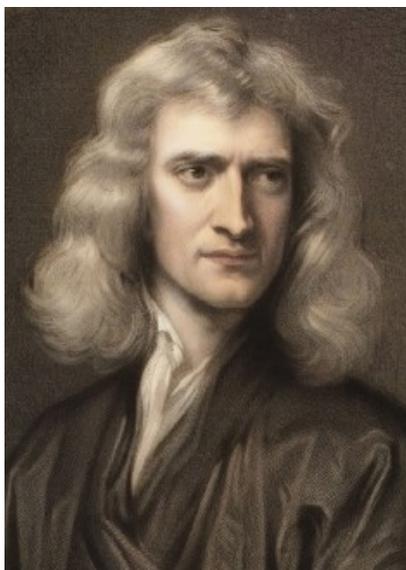


标准模型  $m_\nu = 0$

宇称不守恒



- 质量的研究有很长的历史



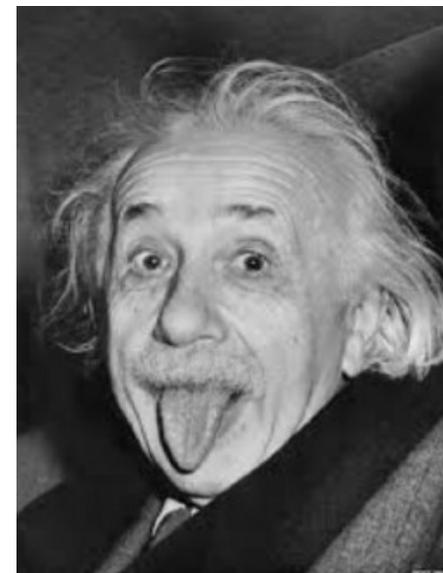
$$F = ma$$

惯性质量

VS

引力质量

$$F_g = \frac{GMm}{r^2}$$



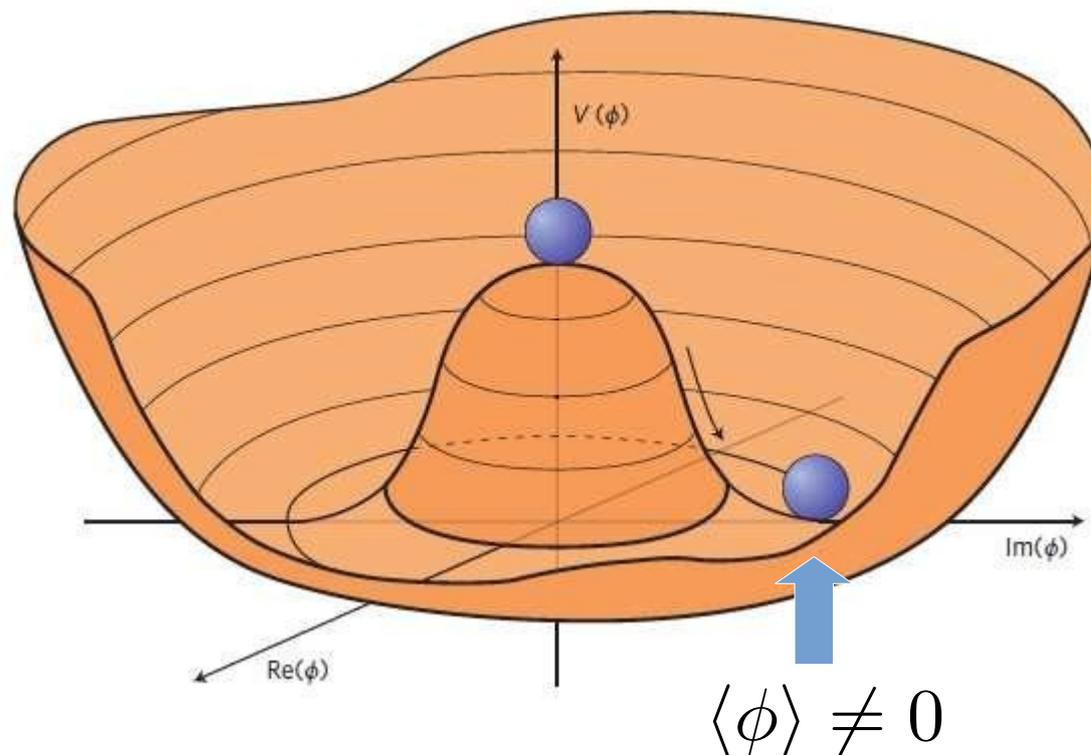
- 希格斯机制 (Higgs Mechanism)

$$y\bar{\psi}\phi\psi \quad \longrightarrow \quad \bar{\psi}M\psi = \bar{\psi}y\langle\phi\rangle\psi$$

质量问题在粒子物理中才得到真正解决!



# 希格斯机制 vs 墨西哥草帽



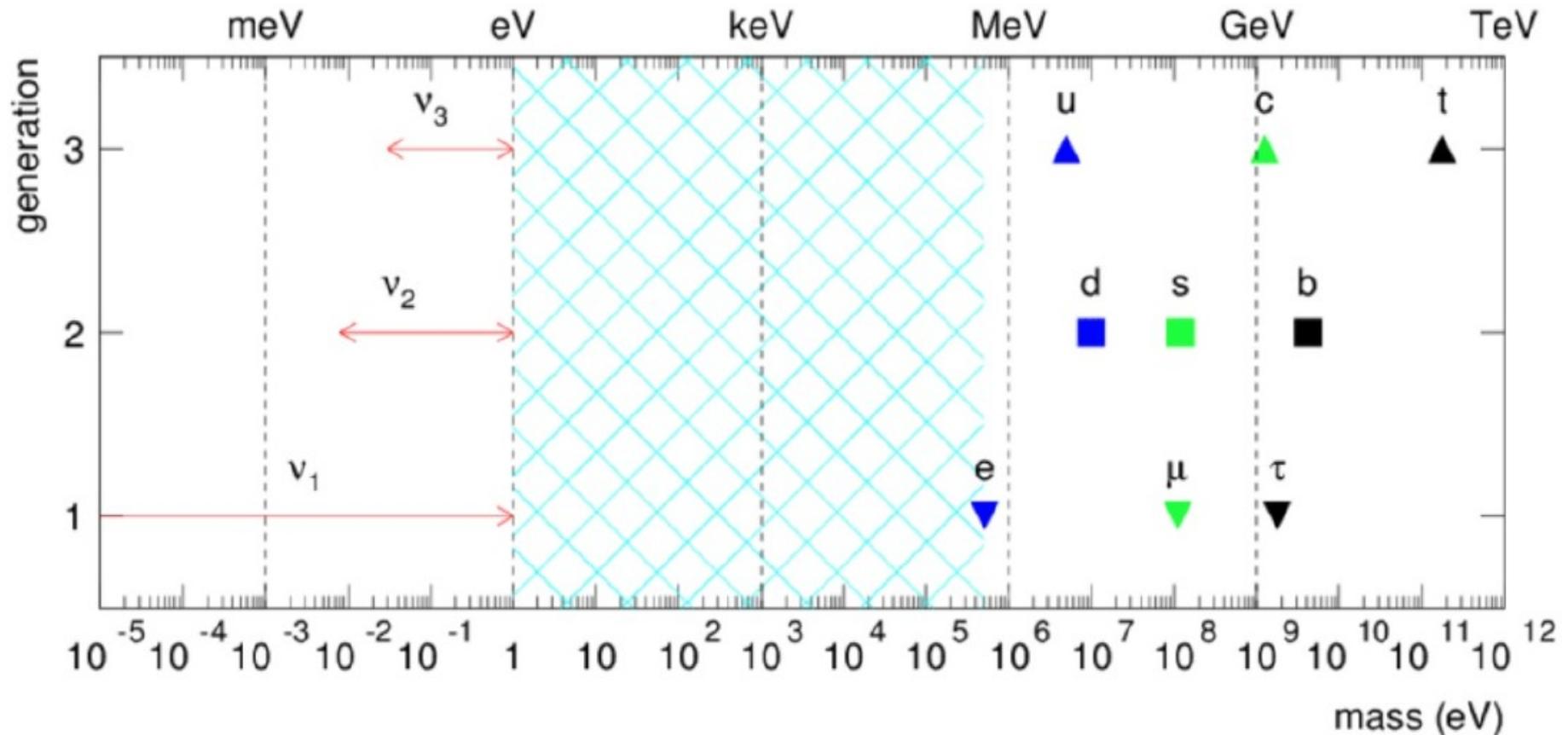
- 希格斯机制 (Higgs Mechanism)

$$y\bar{\psi}\phi\psi \quad \longrightarrow \quad \bar{\psi}M\psi = \bar{\psi}y\langle\phi\rangle\psi$$

**质量问题在粒子物理中才得到真正解决!**



# 中微子的微小质量



$$m_t = 173 \text{ GeV} = 1.73 \times 10^{11} \text{ eV}$$

$$m_e = 0.51 \text{ MeV} = 5.1 \times 10^5 \text{ eV}$$

$$m_\nu \lesssim 10^{-2} \text{ eV}$$

**如何解释不同粒子质量之间的巨大等级差别?**

- **大统一理论**要求存在一个重的中微子 ( $N$ )

重中微子的质量  $M_N$

- 跷跷板机制

$$M_\nu = -M_D \frac{1}{M_N} M_D^T$$

轻中微子质量被重中微子质量压低



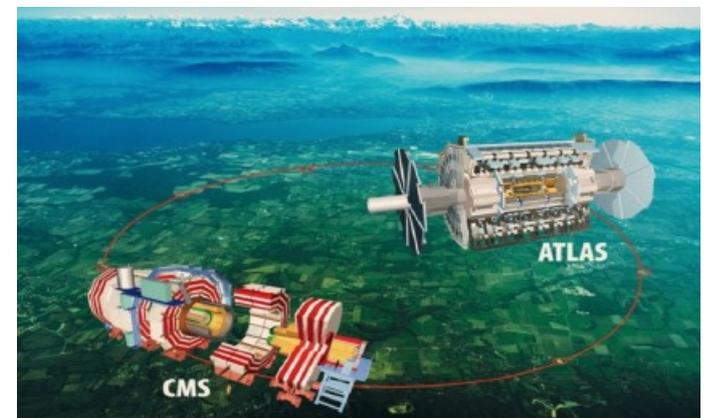
第一类跷跷板：柳田勉 et al  
第三类跷跷板：何小刚 et al

**这两位都是李政道研究所的  
全职资深教授**

- **Higgs boson**  $\Rightarrow$  electroweak symmetry breaking & mass.  $\sim O(100)\text{GeV}$
- **QCD (量子色动力学)**  $\Rightarrow$  majority of mass.
- The world seems not affected by the tiny neutrino mass?
  - Neutrino mass  $\Rightarrow$  Mixing
  - 3 Neutrino  $\Rightarrow$  possible **CP violation**
  - CP violation  $\Rightarrow$  **Leptogenesis**
  - $\Rightarrow$  **Matter-Antimatter Asymmetry**
  - There is something left in the Universe.
  - **EW Baryogenesis** is not enough.

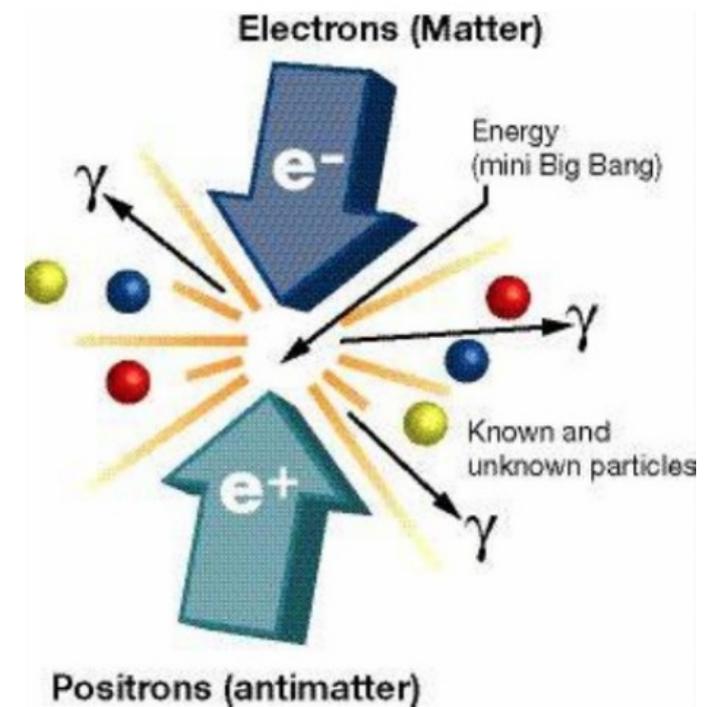
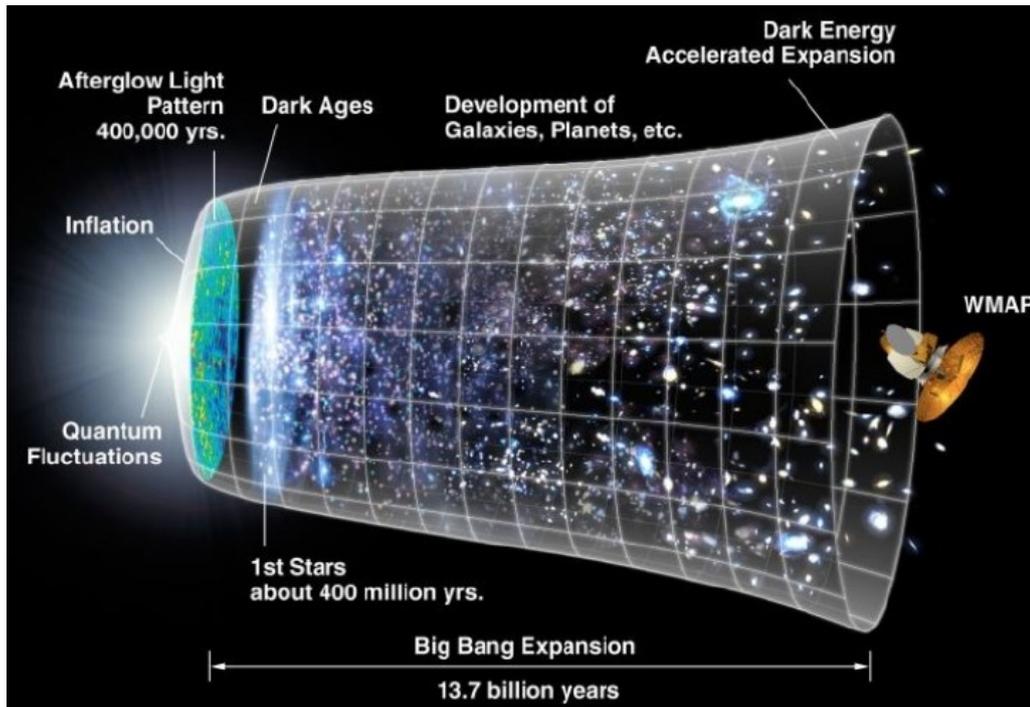


大亚湾实验 @ March 8, 2012



LHC @ **July 4, 2012**

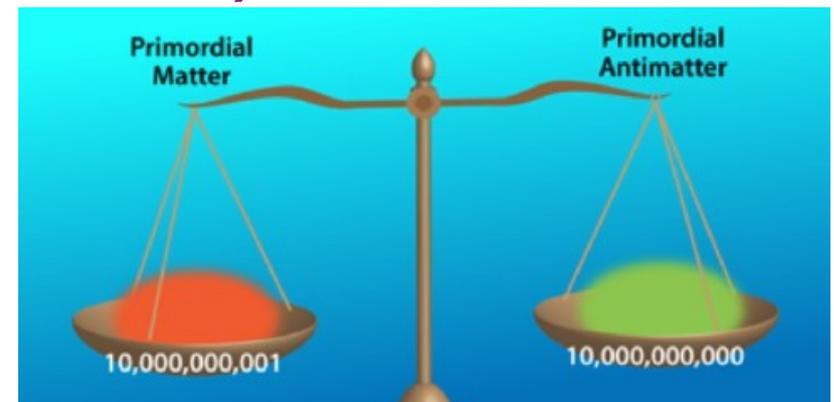
# 为什么存在物质世界？



- Primordial asymmetry diluted by **Inflation (暴涨理论)**

$$a(t) = e^{Ht}$$

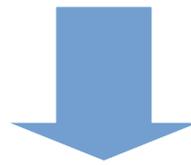
- Starting from symmetric phase
- Why still some asymmetry?
- **Something is wrong!**



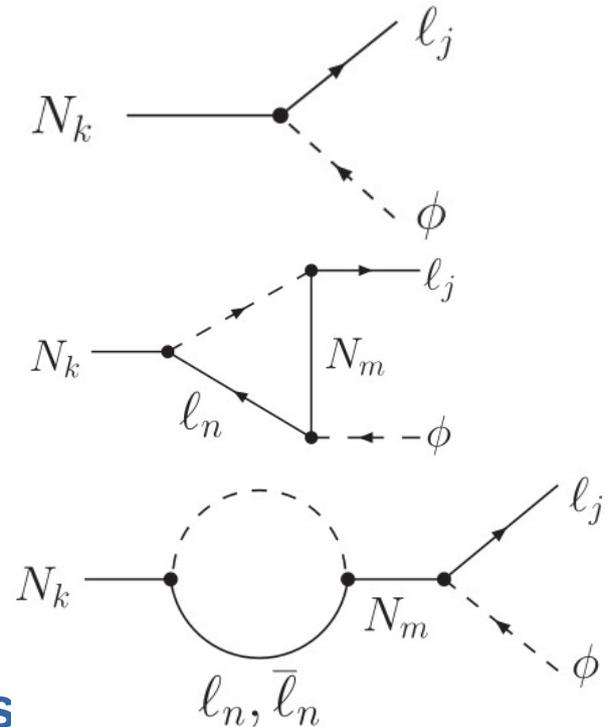
# Leptogenesis (轻子生成机制)

宇宙早期有大量  
右手中微子，随  
着宇宙温度下  
降，衰变到轻的  
粒子

$$N_k \rightarrow \begin{cases} l_j + \bar{\phi} \\ \bar{l}_j + \phi \end{cases}$$



**正反物质不对称**



## ● Interference between tree & loop diagrams

$$\Gamma = \Gamma_{\text{tree}} + \Gamma_{\text{loop}}(+\delta_D, +\delta_M)$$

$$\bar{\Gamma} = \Gamma_{\text{tree}} + \Gamma_{\text{loop}}(-\delta_D, -\delta_M)$$

**The matter-antimatter asymmetry needs  
Dirac/Majorana CP phases.**



Yanagida



Fukugita



# 中微子的应用

**粒子物理实验处于科学研究的最前沿，将人类对自然的探测手段推到极致：**

例子 1：密封膜

例子 2：光电倍增管 vs 国防

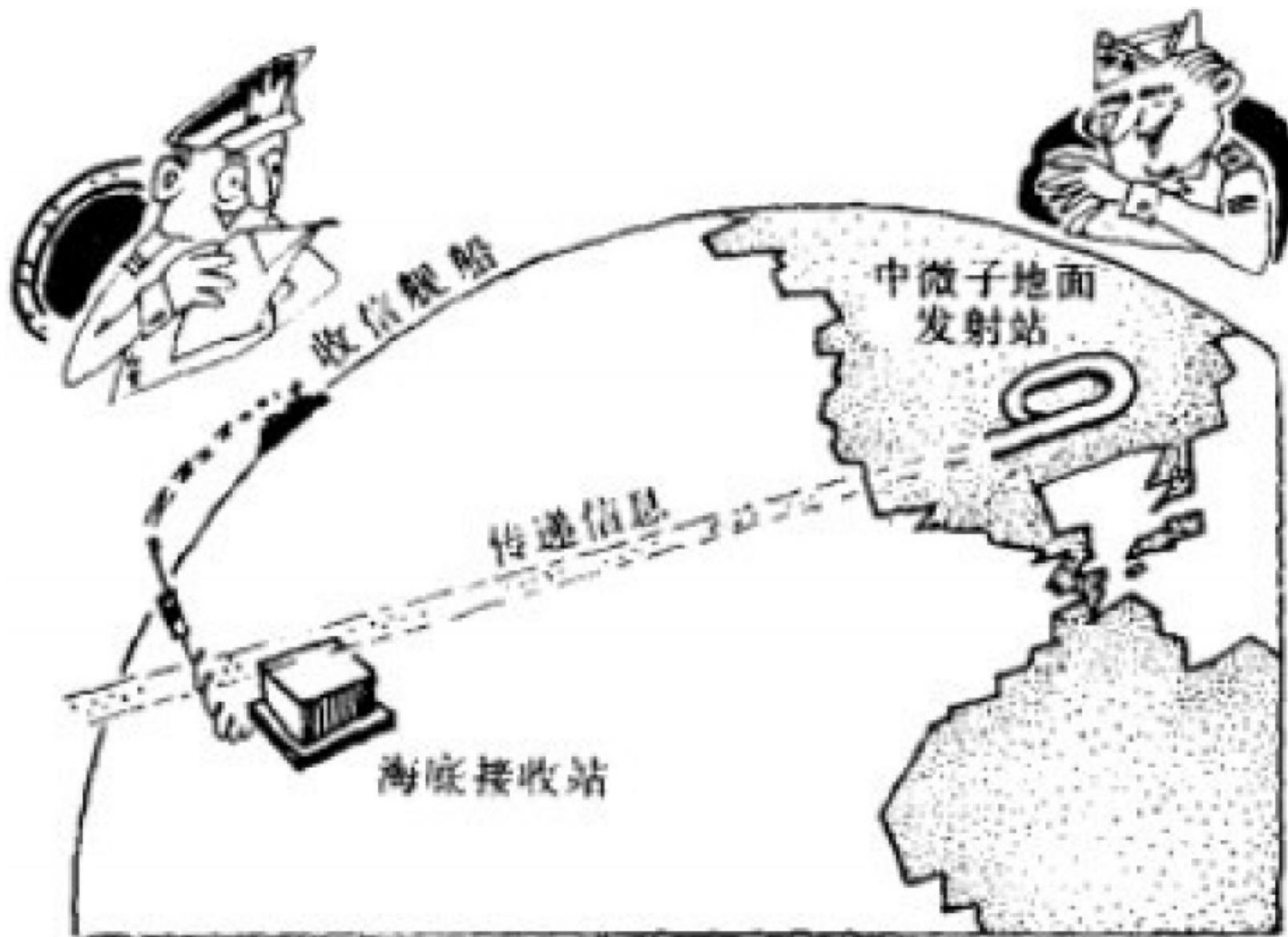
**其它：**

例子 3：超导核磁共振

例子 4：质子刀

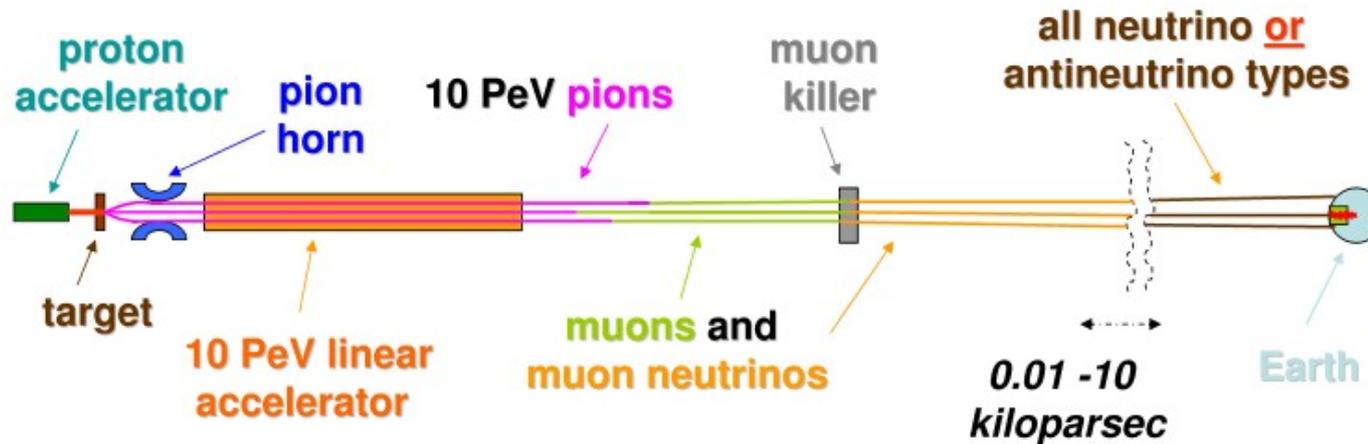
例子 5：电子束密封技术

例子 6：散裂中子源



潘来星、于永源 《水下通讯》

## Pion Accelerator Neutrino Beam Concept



## FEASIBILITY OF USING HIGH-ENERGY NEUTRINOS TO STUDY THE WEAK INTERACTIONS

M. Schwartz\*

Columbia University, New York, New York  
(Received February 23, 1960)

Phys.Rev.Lett. 4  
(1960) 306-307

## THEORETICAL DISCUSSIONS ON POSSIBLE HIGH-ENERGY NEUTRINO EXPERIMENTS\*

T. D. Lee

Columbia University, New York, New York

and

C. N. Yang

Institute for Advanced Study, Princeton, New Jersey  
(Received February 23, 1960)

Phys.Rev.Lett. 4  
(1960) 307-311

李政道、杨振宁参与  
提出加速器中微子

## 历史印记——60年前高能加速器中微子实验原理诞生

🕒 2021-01-04    👁 49

作者：葛韶锋

<https://tdli.sjtu.edu.cn/CN/customize/436?columnId=35>

这项60年前的工作，今天还在为粒子物理研究指引着前进的方向

中微子是粒子物理标准模型中非常独特而重要的基本粒子。中微子只参与弱相互作用，能够穿透几光年的铅板，是非常难以探测的鬼魅粒子。然而，恰恰是中微子率先给出了超出标准模型的第一个新物理现象——中微子振荡——这已经得到大量实验的证实，并于2015年获诺贝尔物理学奖，成为指引超出标准模型新物理研究的重要线索。在上世纪五六十年代粒子物理发展的黄金期，施瓦兹、李政道与杨振宁提出的高能加速器中微子实验原理，是一个非常革命性的思想，一直在有力地推动着包括中微子在内的粒子物理不断向前发展。

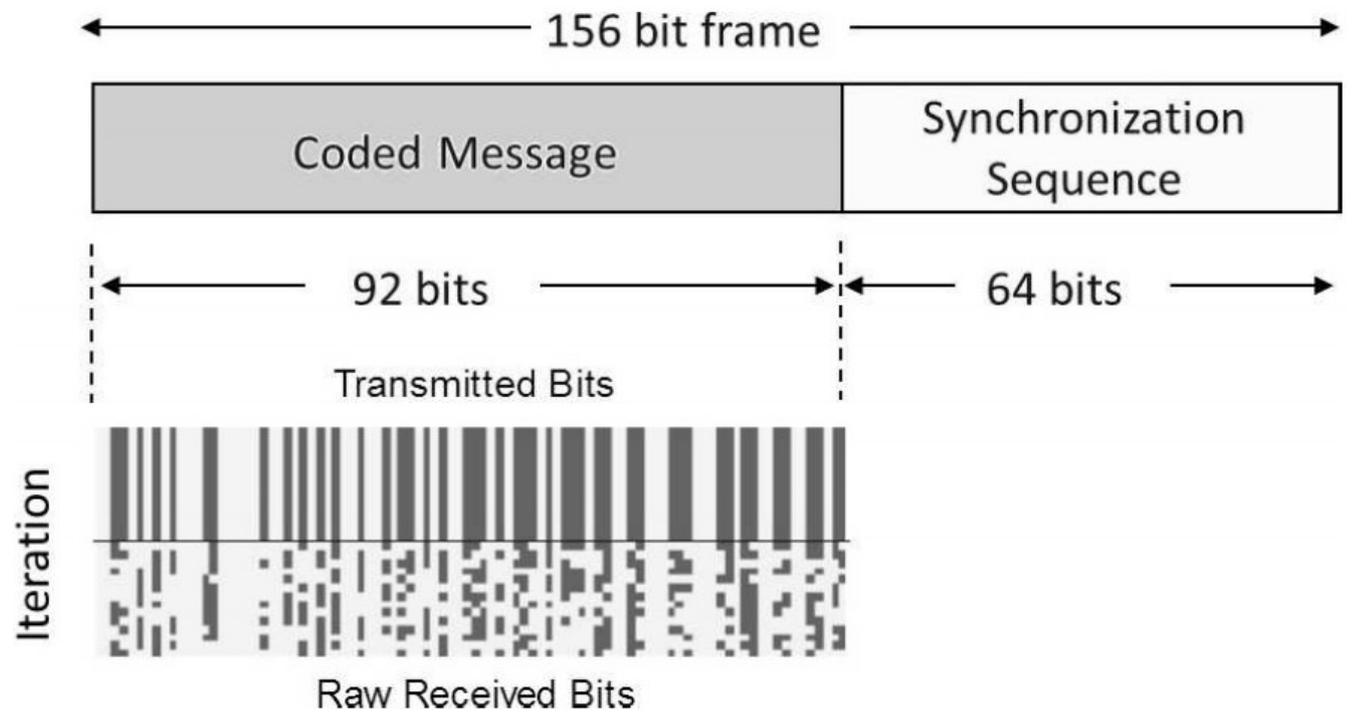
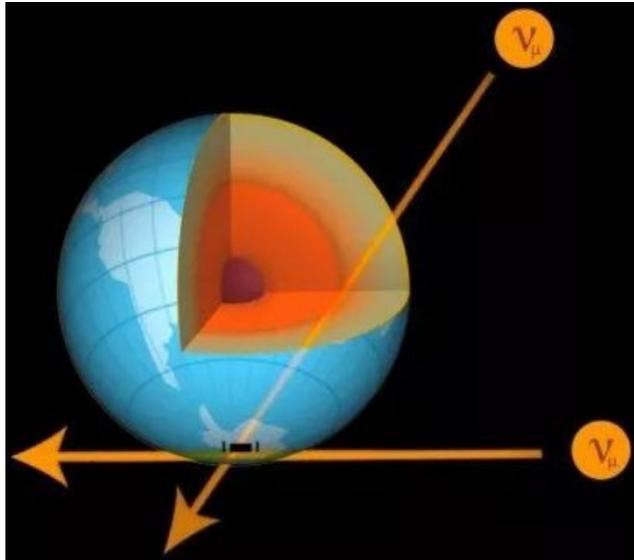
1959年11月24日，在哥伦比亚大学物理系每天下午的咖啡点（coffee hour）上，李政道先生引导众人探讨在高能量探测弱相互作用的实验方法。在当时的弱相互作用研究中，已经可以通过费米1933年建立的四费米相互作用，以及盖尔曼-费曼-马夏克-苏达山1958年建立的V-A耦合理论完美地解释贝塔衰变。然而，由于四费米相互作用无法重整，在高能时会出现无穷大的发散。这意味着四费米相互作用只是低能量条件下的有效算符，是高能完整理论的近似。要想进一步探究弱相互作用的完整面貌，必须寻找更高能量的实验探针。当天李政道先生带着大家探讨了高能加速器可能产生的各种粒子，包括质子、电子、派介子、缪子等等。但这些都因为会涉及到电磁相互作用或强相互作用，无法避免对探测弱相互作用产生干扰，从而一一被否决。

虽然下午的讨论无果而终，但引起了施瓦兹（Melvin Schwartz）对这个问题的强烈兴趣。当天晚上施瓦兹突然意识到，中微子只参与弱相互作用，可以天然地避免电磁相互作用或强相互作用的干扰，是探测弱相互作用的理想探针。虽然中微子参与的相互作用非常弱，但探测中微子也不是完全不可能。难以抑制兴奋的施瓦兹连夜拨通了李政道家的电话，而李政道听了这个想法后也非常激动，很快便着手通过计算验证施瓦兹的想法。不久之后的1960年3月15日，施瓦兹、李政道和杨振宁在《物理学评论快报》（Physical Review Letters）上发表了两篇背靠背的文章：

## DEMONSTRATION OF COMMUNICATION USING NEUTRINOS

D. D. STANCIL, P. ADAMSON, M. ALANIA, L. ALIAGA, M. ANDREWS, C. ARAUJO DEL CASTILLO, L. BAGBY, J. L. BAZO ALBA, A. BODEK, D. BOEHNLEIN, R. BRADFORD, W. K. BROOKS, H. BUDD, A. BUTKEVICH, D. A. M. CAICEDO, D. P. CAPISTA, C. M. CASTROMONTE, A. CHAMORRO, E. CHARLTON, ... See all authors

<https://doi.org/10.1142/S0217732312500770>

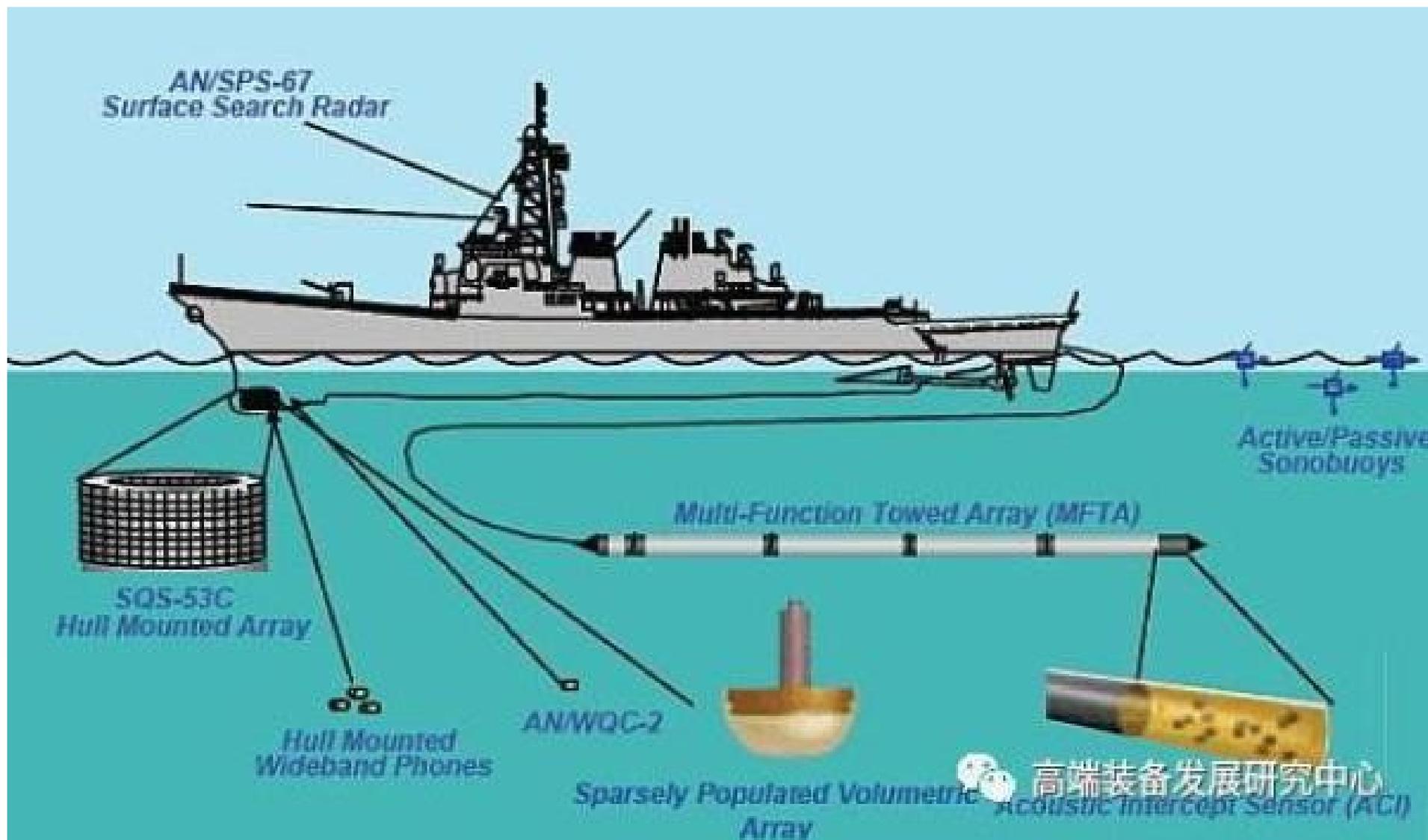


<https://blog.sciencenet.cn/blog-296183-547622.html>



潘来星、于永源《水下通讯》

# 核潜艇寻找

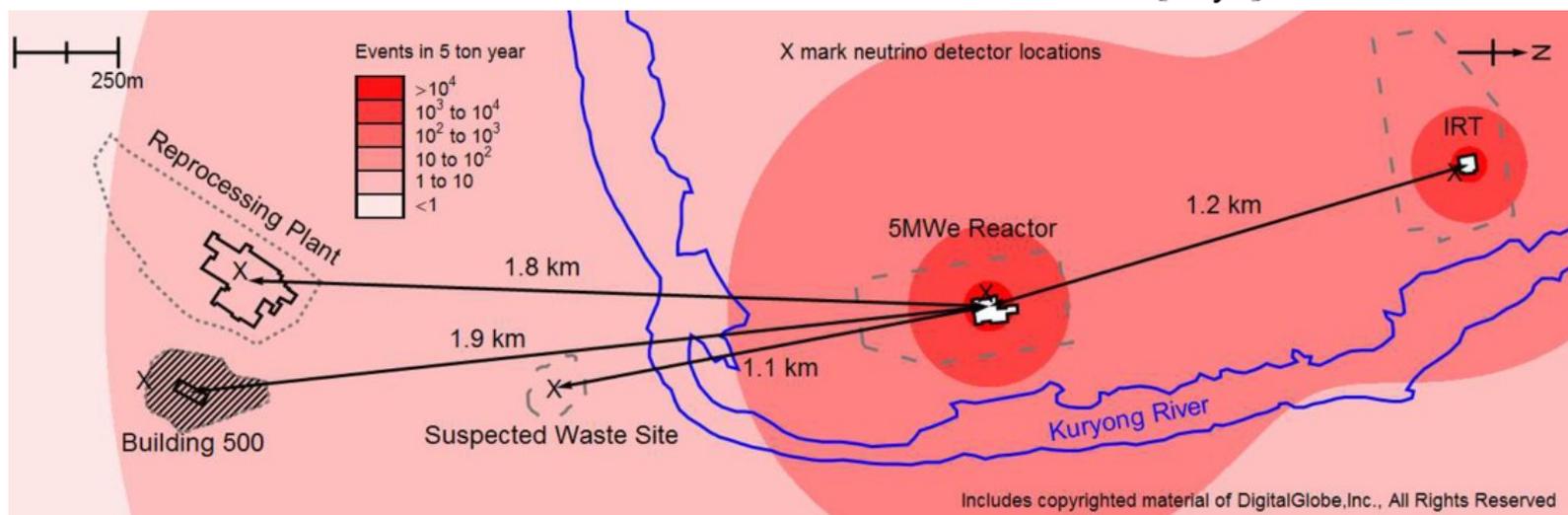
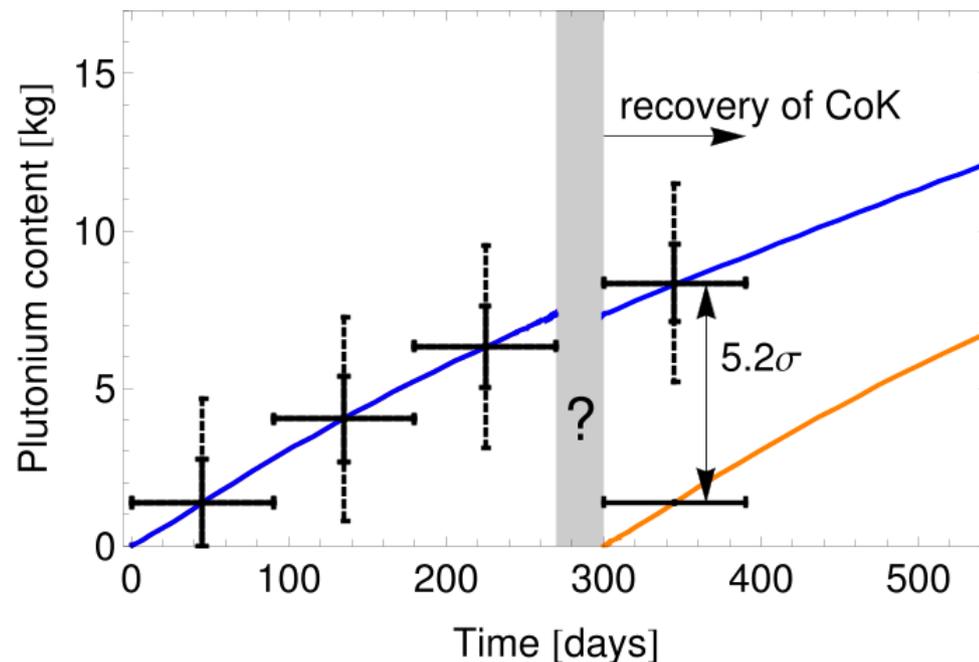


## How did we get here?

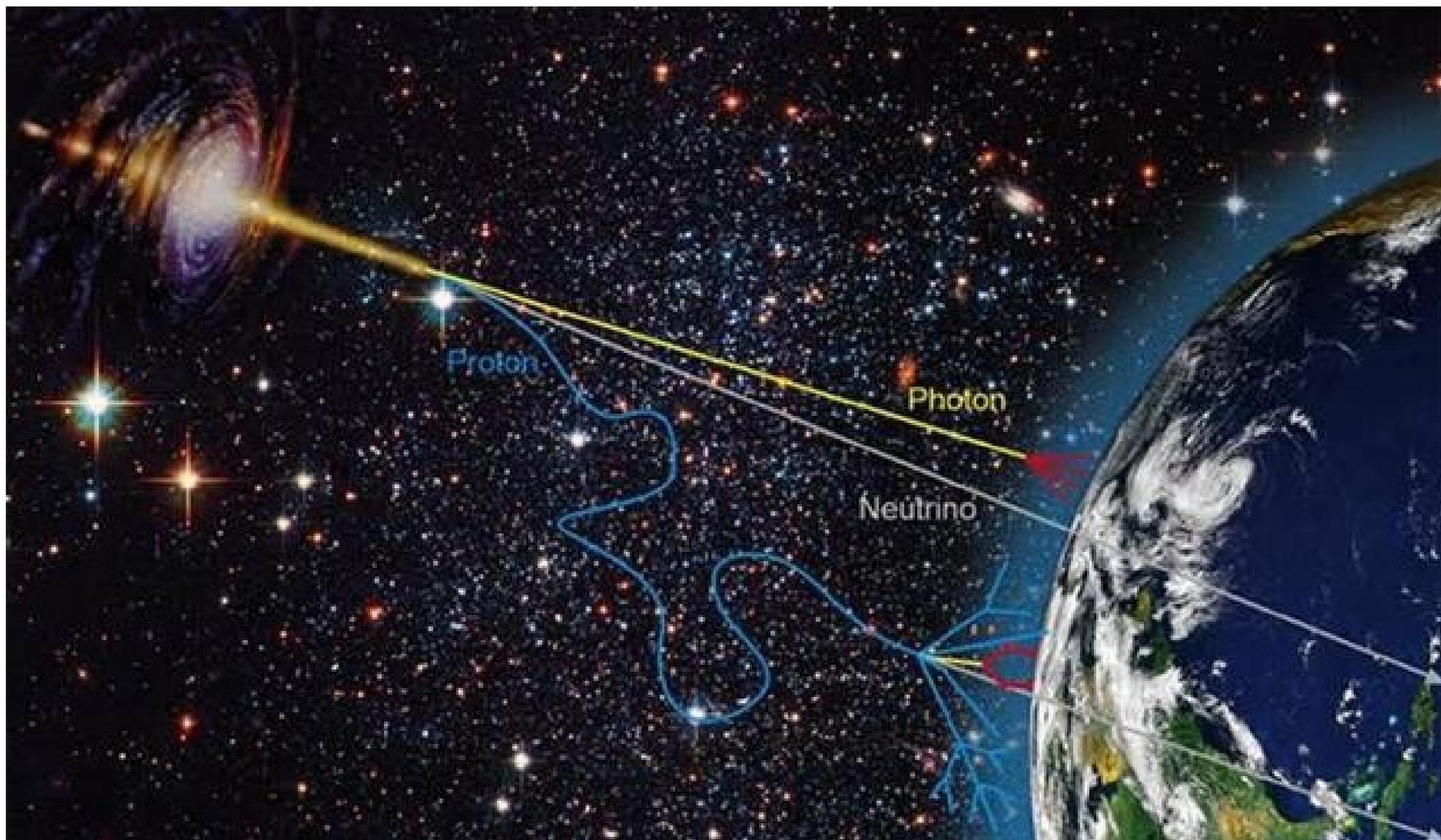


<https://indico.cern.ch/event/849464/>

# 反应堆检测

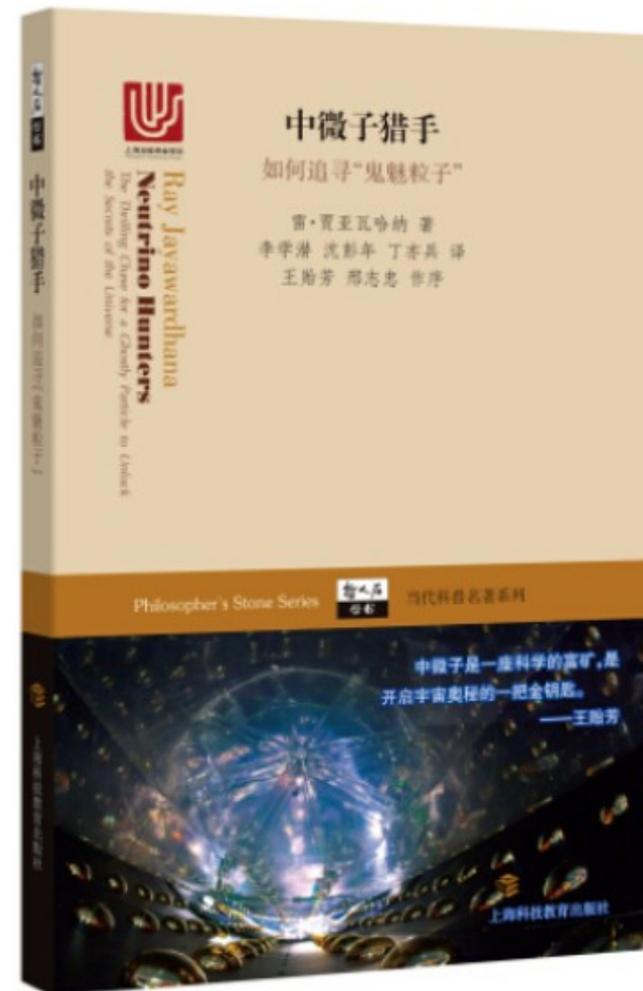
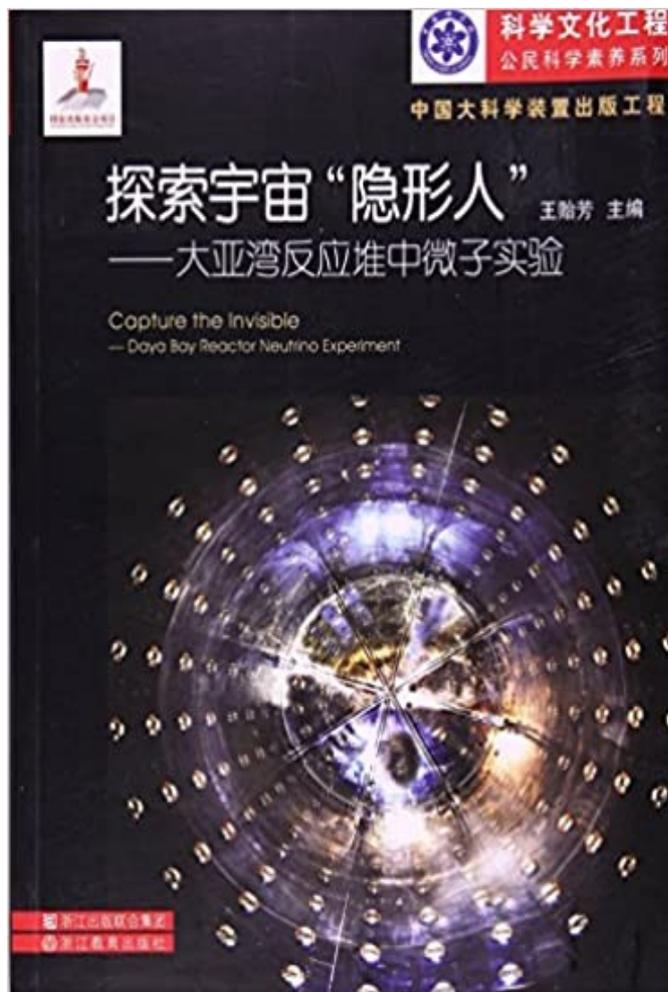


<https://indico.cern.ch/event/849464/>



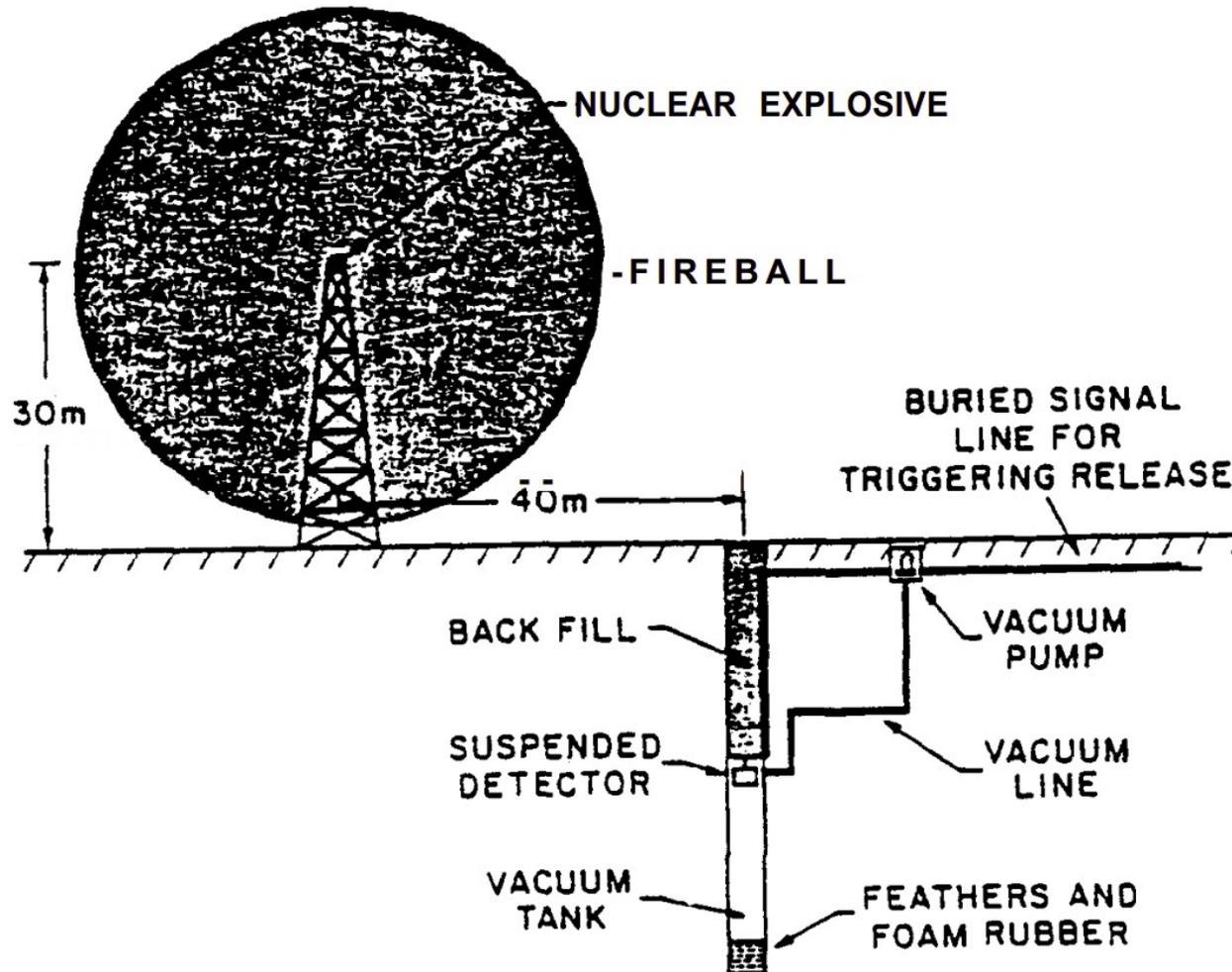
- 中微子的发现
- 中微子振荡：宇宙变色龙
- 中微子质量：大统一理论 & 跷跷板
- 中微子应用

# 中微子方面的科普书



# 原子弹 vs 中微子探测

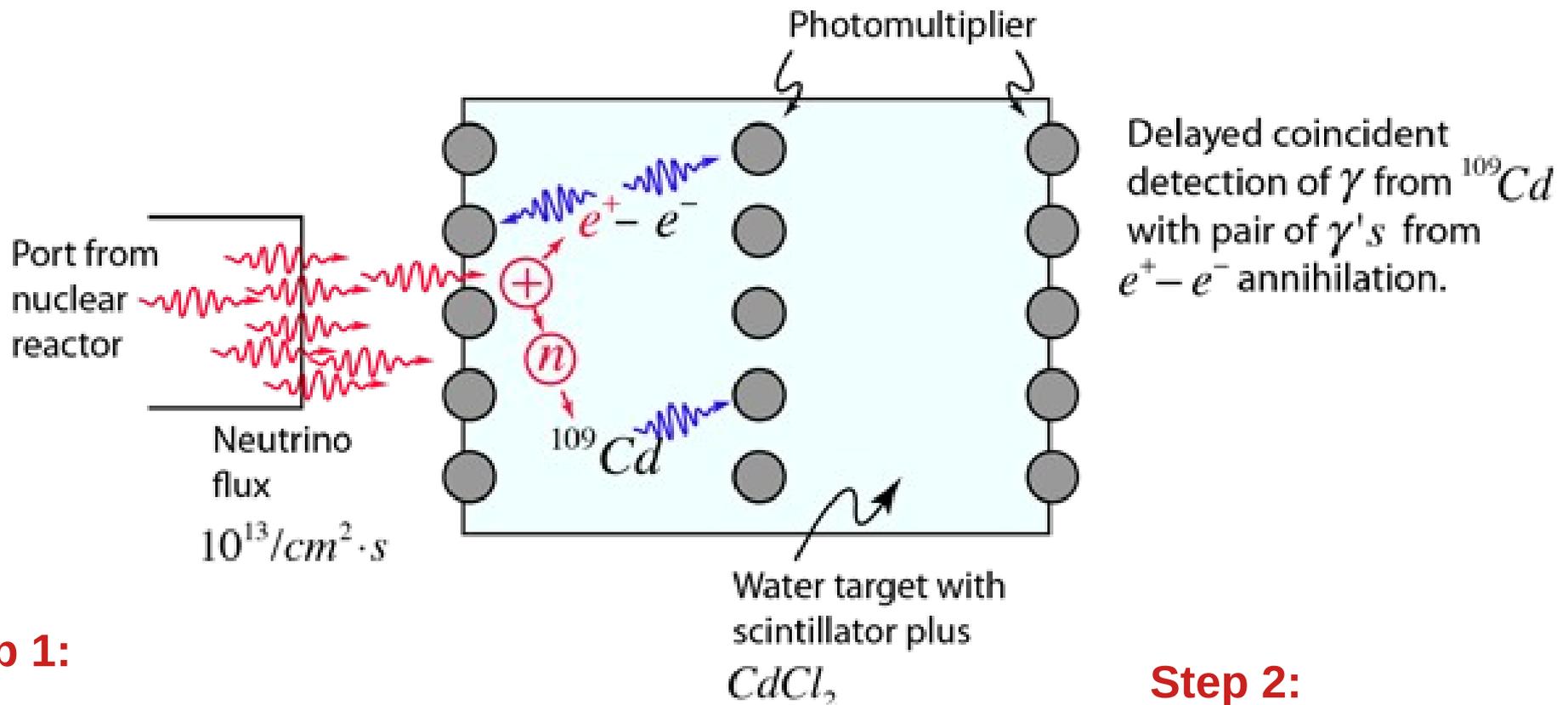
- 1951 - Reines (Nuclear weapon expert) meet Cowan at airport



Reines' Nobel Lecture, 1995

<https://www.nobelprize.org/prizes/physics/1995/reines/lecture/>

- 1956 - Reines & Cowan detected reactor anti-neutrino



**Step 1:**



**Step 2:**

