



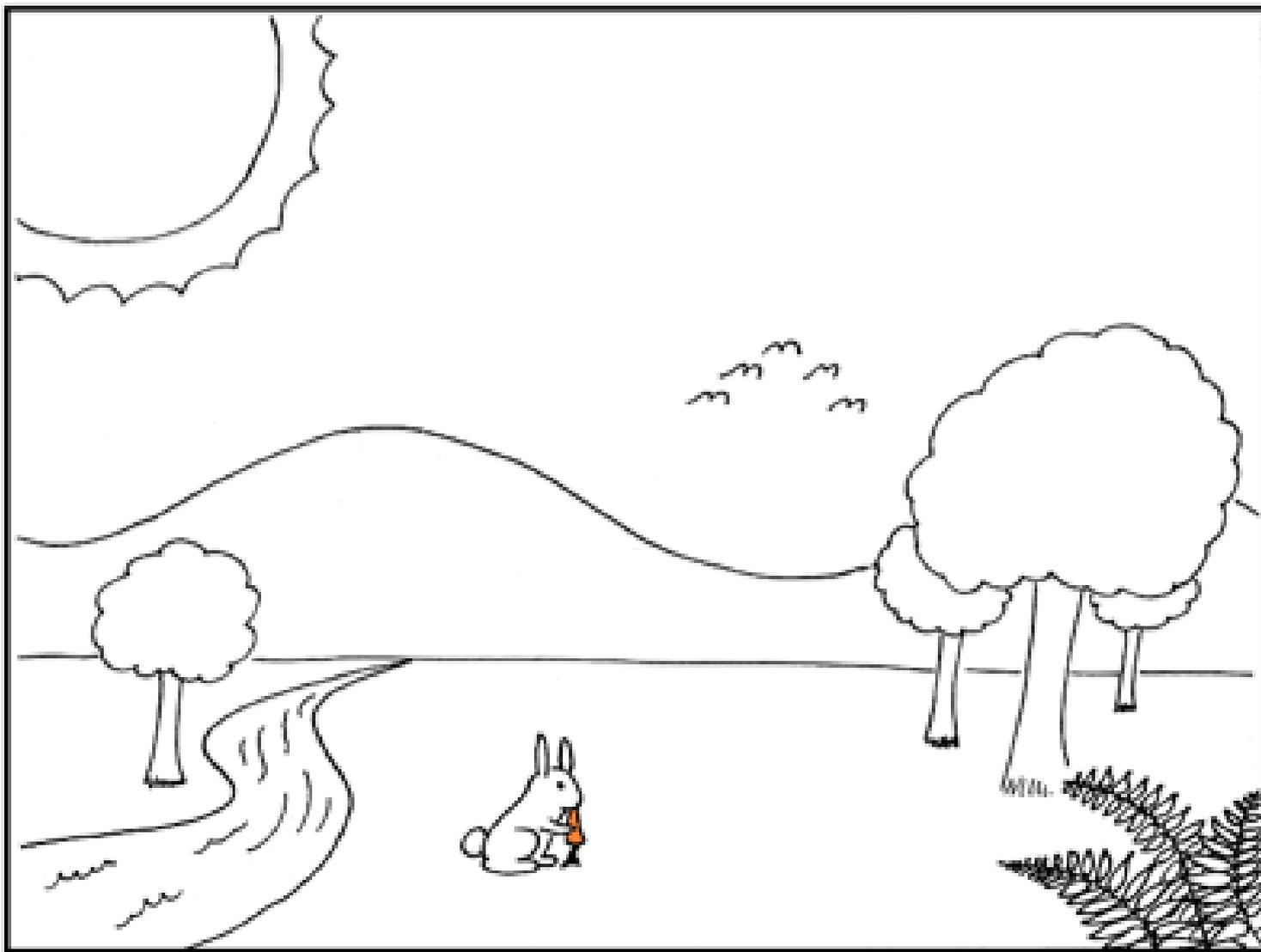
清华大学

太阳中微子

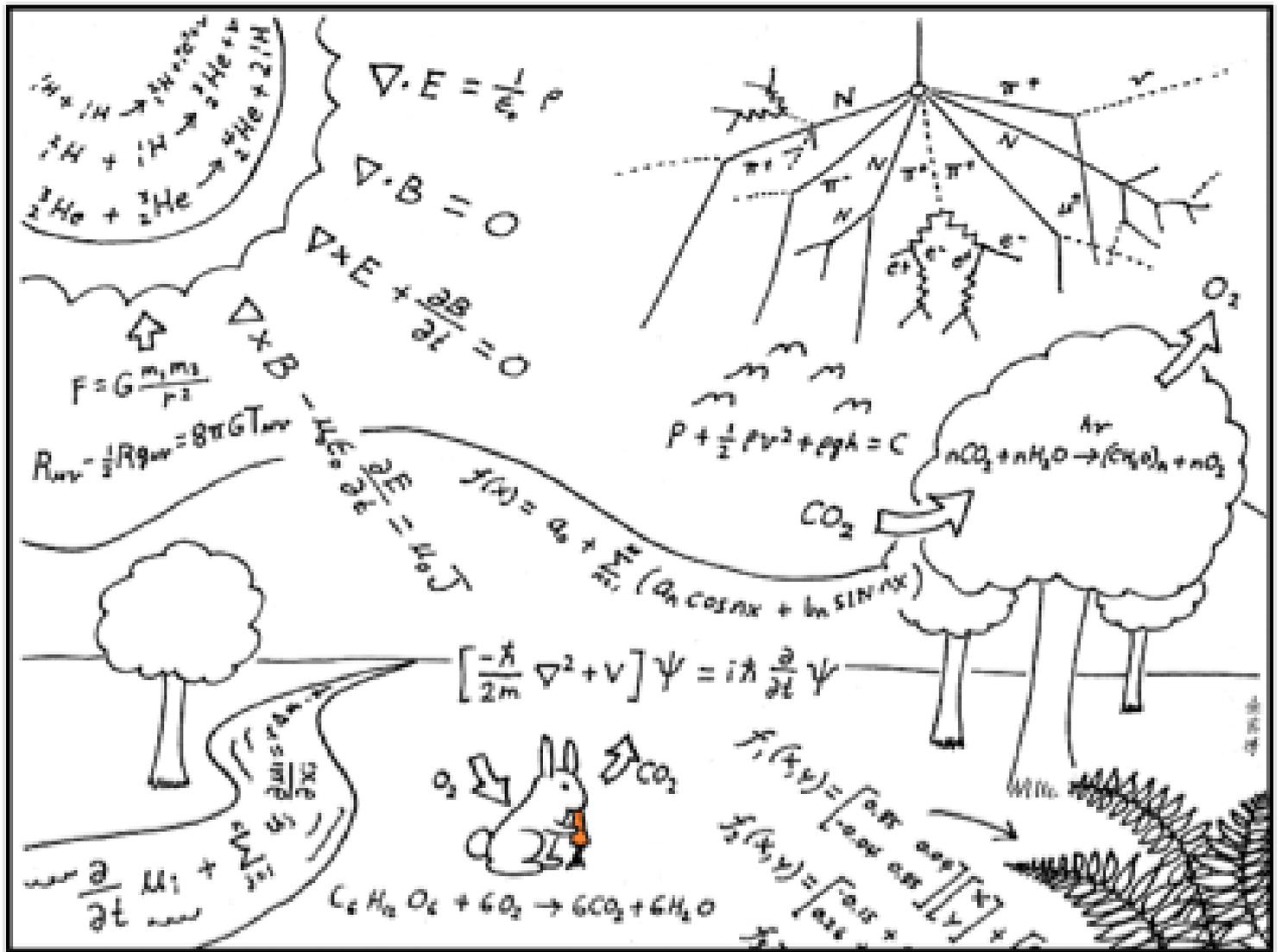
王喆
清华大学

2023年6月23日

科学家如何看待世界

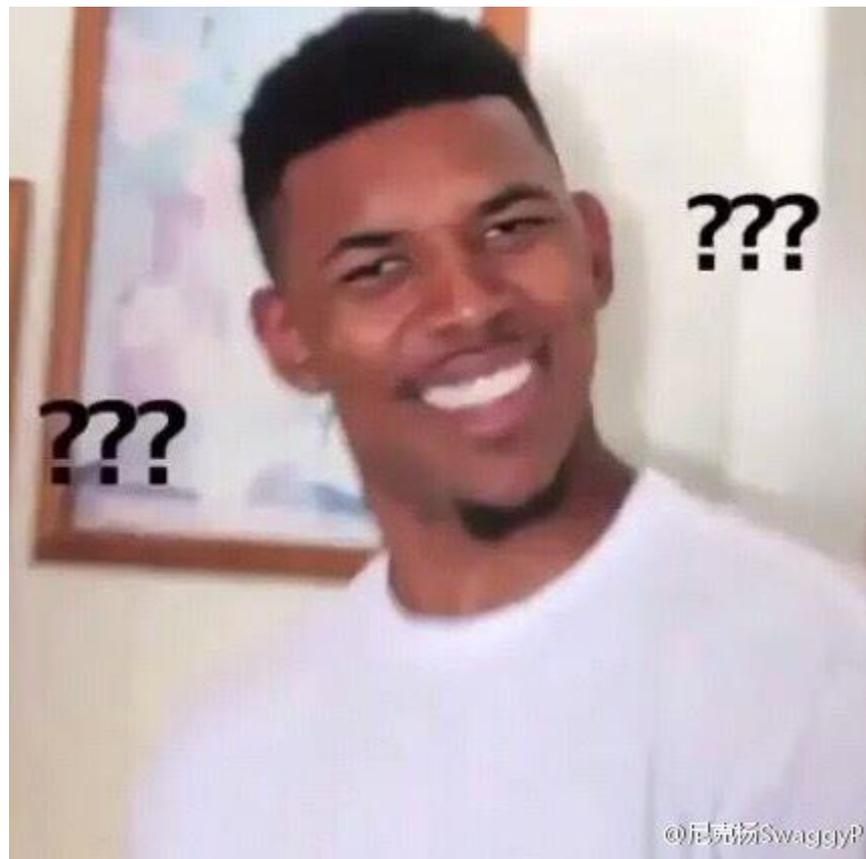


科学家如何看待世界



This is how scientists see the world.

中微子物理学家咋看



中微子物理学家咋看



This is how solar neutrino scientists see the world.

内容提要：

1. 太阳中微子研究的历史
2. 太阳模型
3. 太阳中微子传播
4. 太阳中微子的探测方法
5. 实验进展
6. 新物理、新技术探索

1. 研究历史

中微子概念 – 实验发现 – 探索工具

1931年 Pauli提出中微子的概念

1956年 Cowan和Reines探测到中微子

1995 Nobel

1962年 发现缪子中微子

1988 Nobel

1962年 R. Davis探测到太阳中微子及反常

1980年代 SK超新星、太阳中微子观测

} 2002 Nobel

2001年 太阳中微子振荡与大气中微子振荡

2015 Nobel

2012年 大亚湾非0混合角 θ_{13}

2012 Science 十大突破

2013年 IceCube甚高能宇宙中微子

2013 Phys. World十大突破

最近还有 δ_{CP} 和mass hierarchy等的初步结果

- 大约在1850, 生物学家地质学家, 例如Charles Darwin估计地球寿命有3亿年, 而物理学家, 例如Kelvin, 猜测太阳的引力势能消耗只能使太阳有0.3亿年寿命
- 约1890, 发现放射性 (Becquerel, Curie, Laborde 等)
- 1905, 质能方程, Einstein
- 1920, $4M_{\text{H}} > M_{\text{He}}$, Aston
- 约1930, 利用量子隧道效应, Gamow, Teller等
- 约1940, pp聚变, CNO循环, $4\text{H} \rightarrow \text{He} + 2\text{e} + 2\nu_{\text{e}}$, Bethe, von Weizsacker等
- 约1960, 提议并探测太阳中微子, Bahcall, Davis等
- 约1990, 太阳中微子缺失, 发现中微子振荡, 开始大量的中微子实验

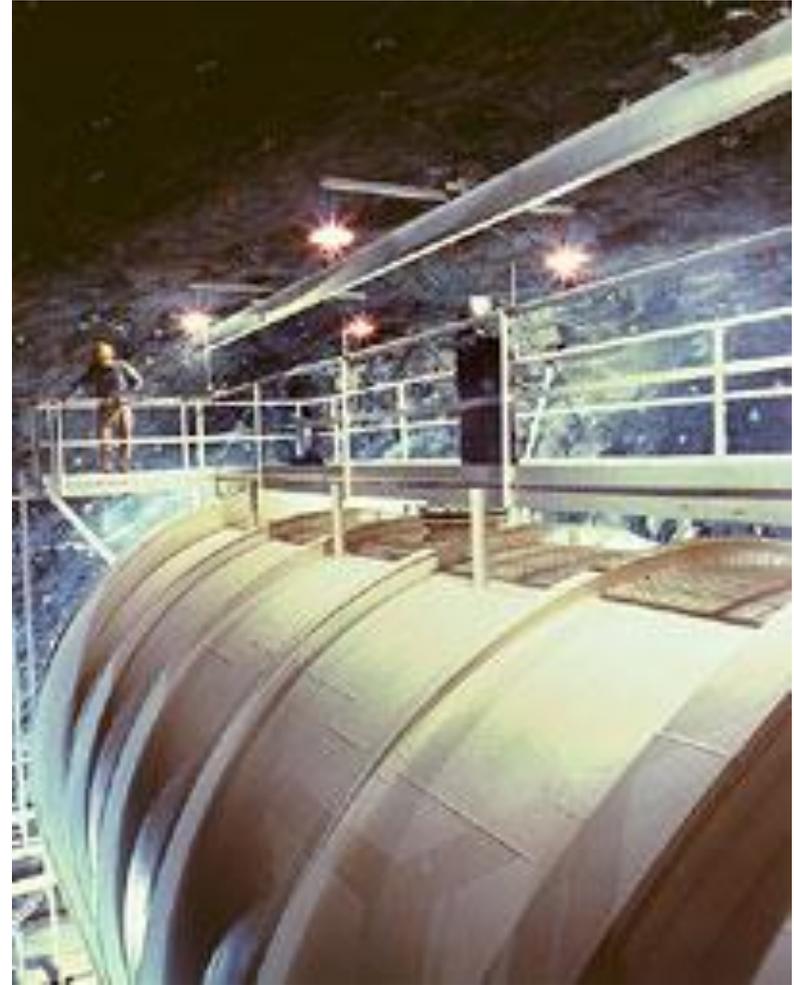
John Bahcall和Ray Davis

约1960，提议并开始探测太阳中微子，Bahcall, Davis

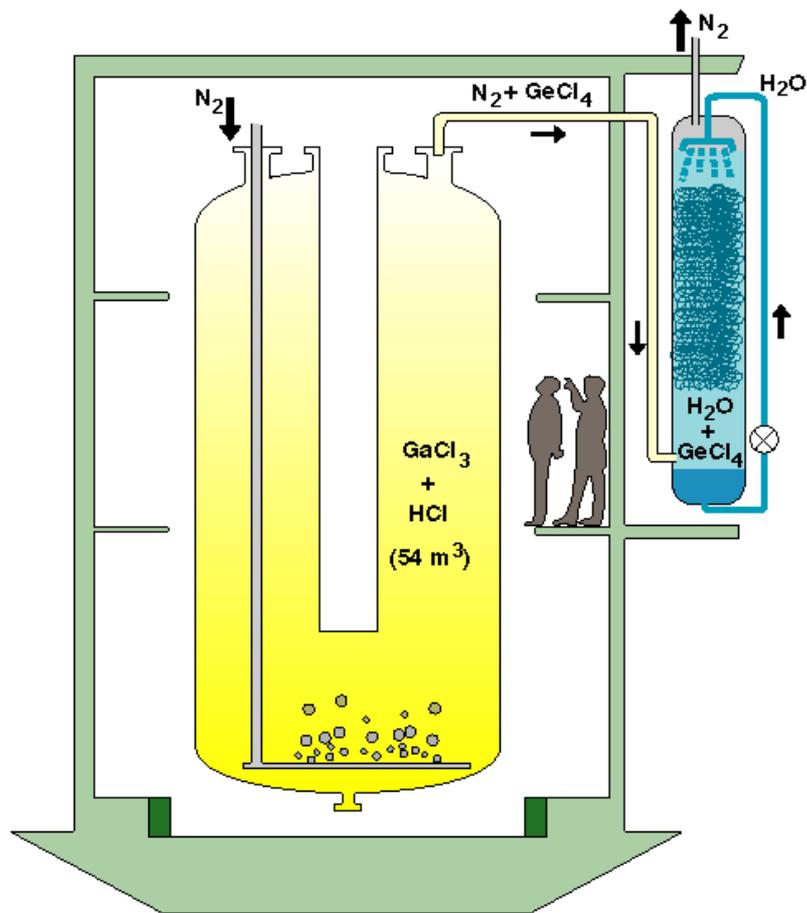
Bahcall做了大量的太阳模型的计算工作，做太阳中微子的通量和能谱的预期

Davis首先开始了利用化学方法探测太阳中微子的实验

发现实验结果总比预期要少



GALLEX/GNO, SAGE确认太阳中微子缺失



GALLEX

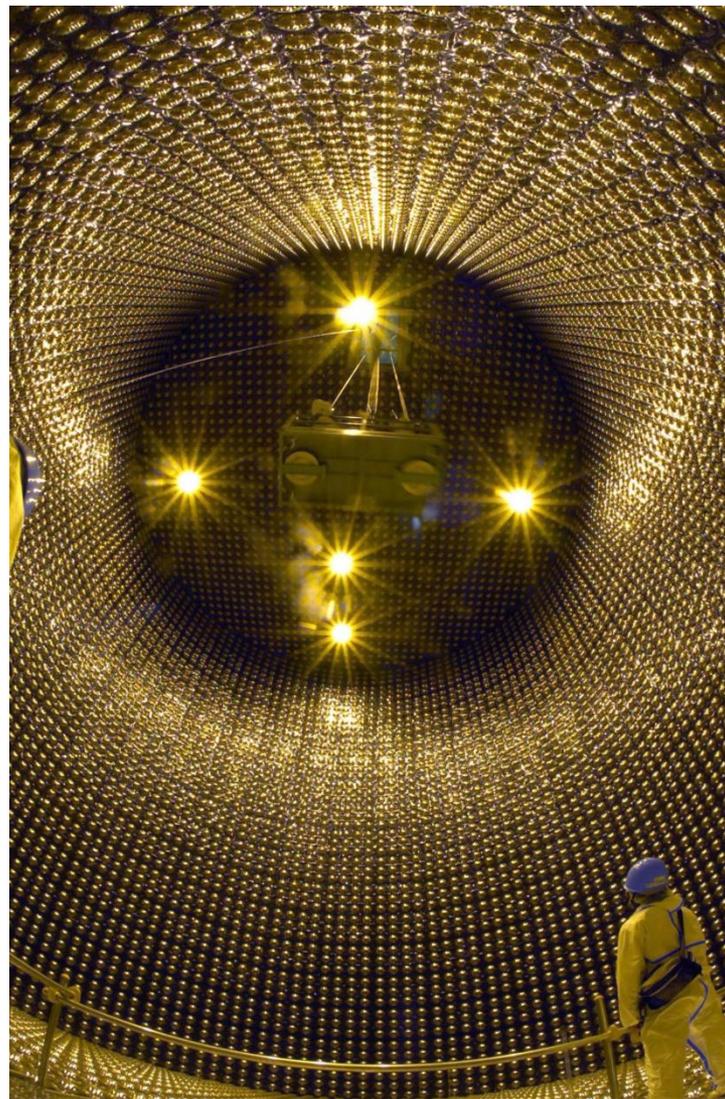


SAGE

神冈，超级神冈确认太阳中微子缺失

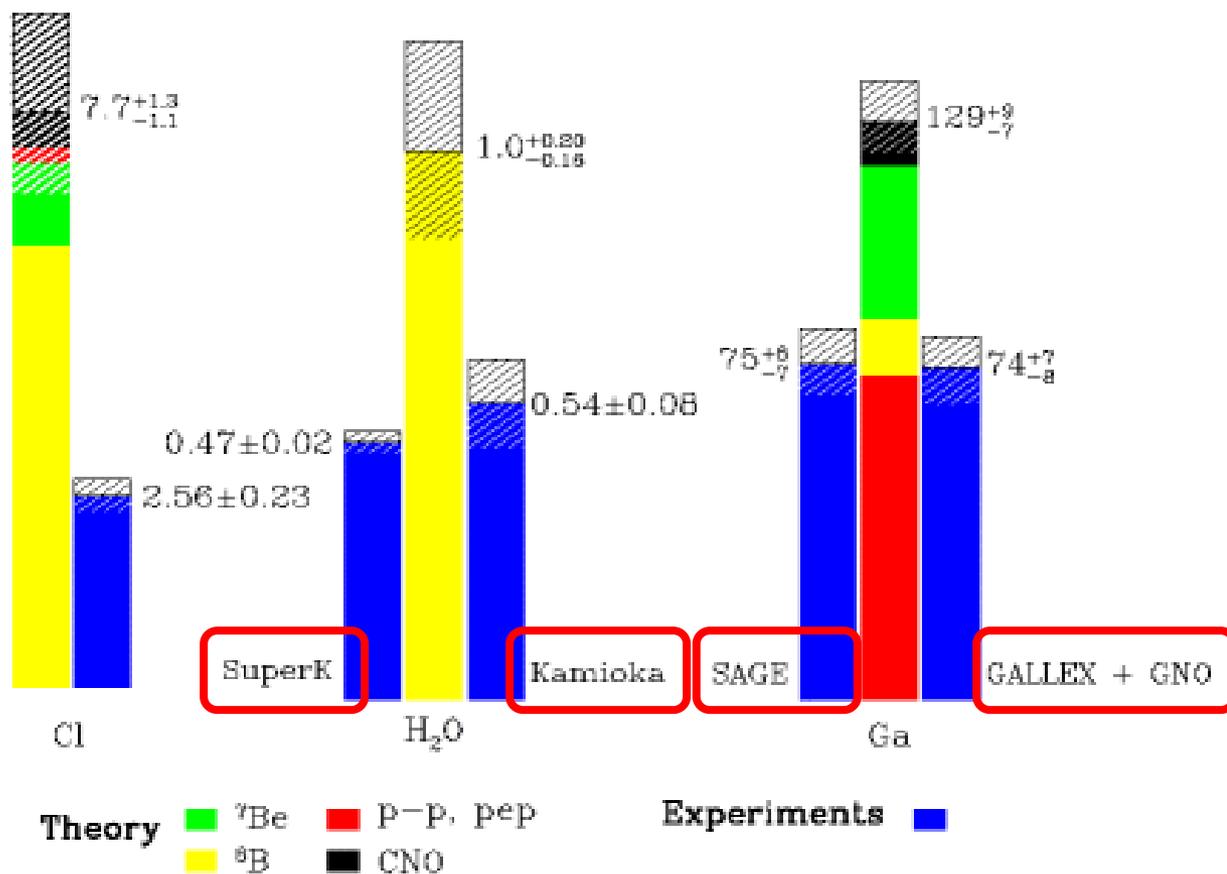
神冈，超级神冈探测的
探测中微子弹性散射的
数据继续小于太阳中微
子模型的预期

只有40%-50%左右

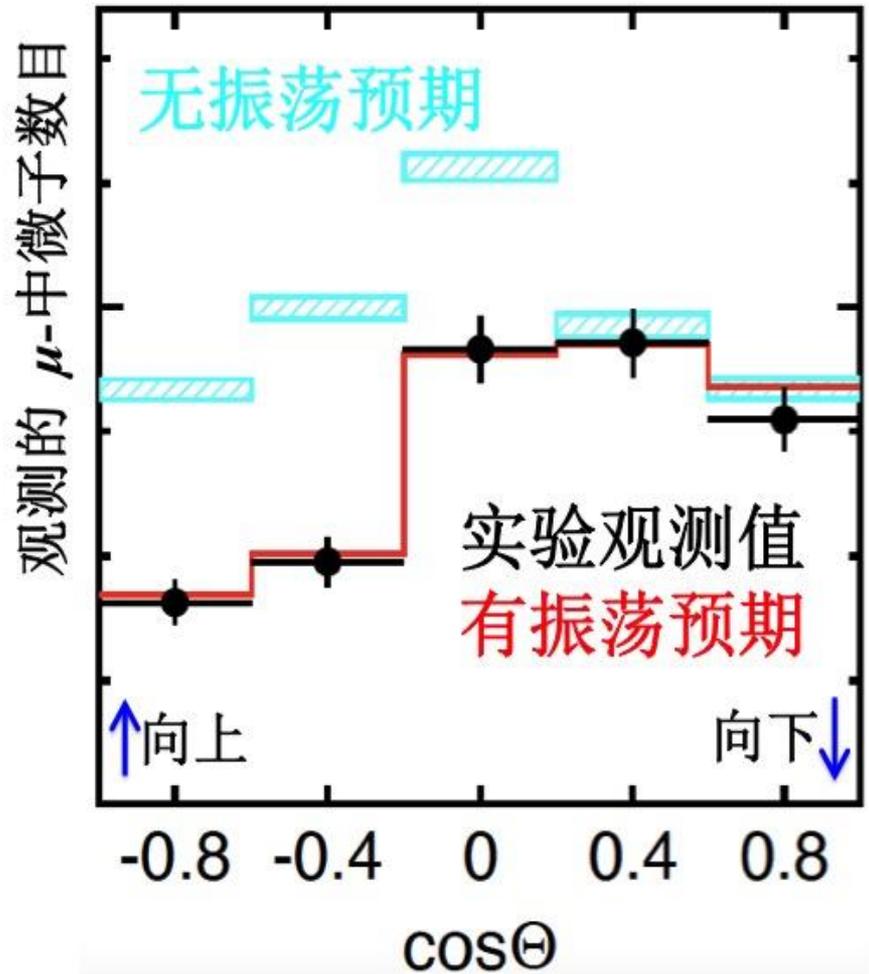
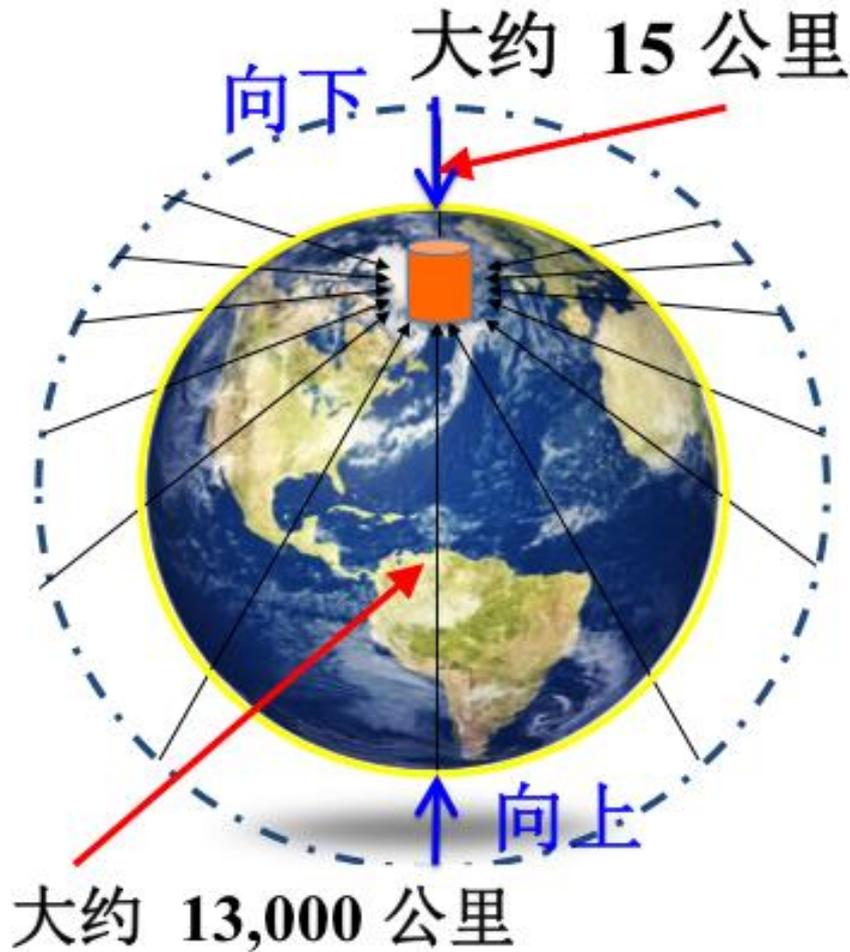


太阳中微子缺失 (相对于太阳模型)

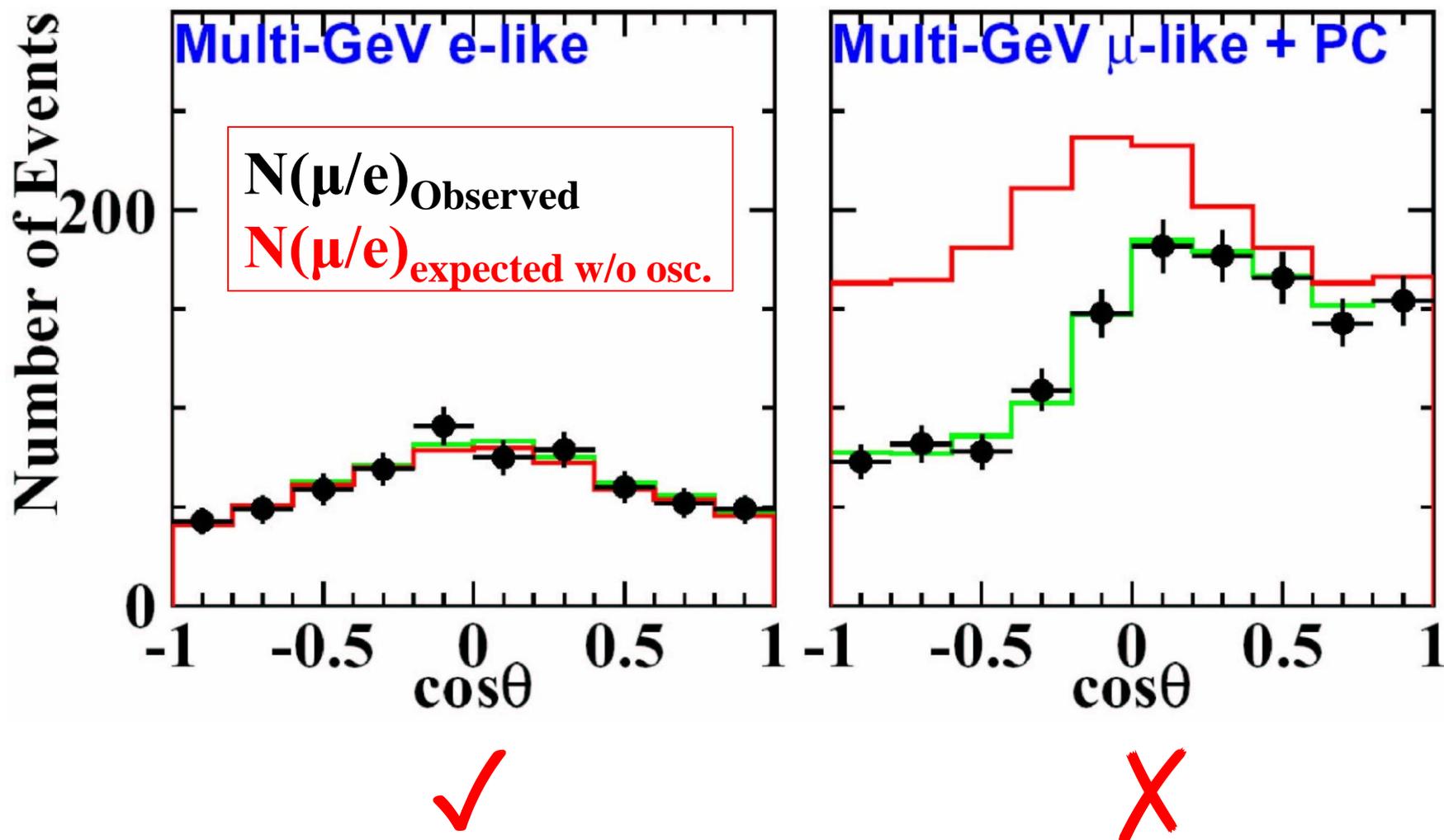
Total Rates: Standard Model vs. Experiment
Bahcall-Pinsonneault 2000



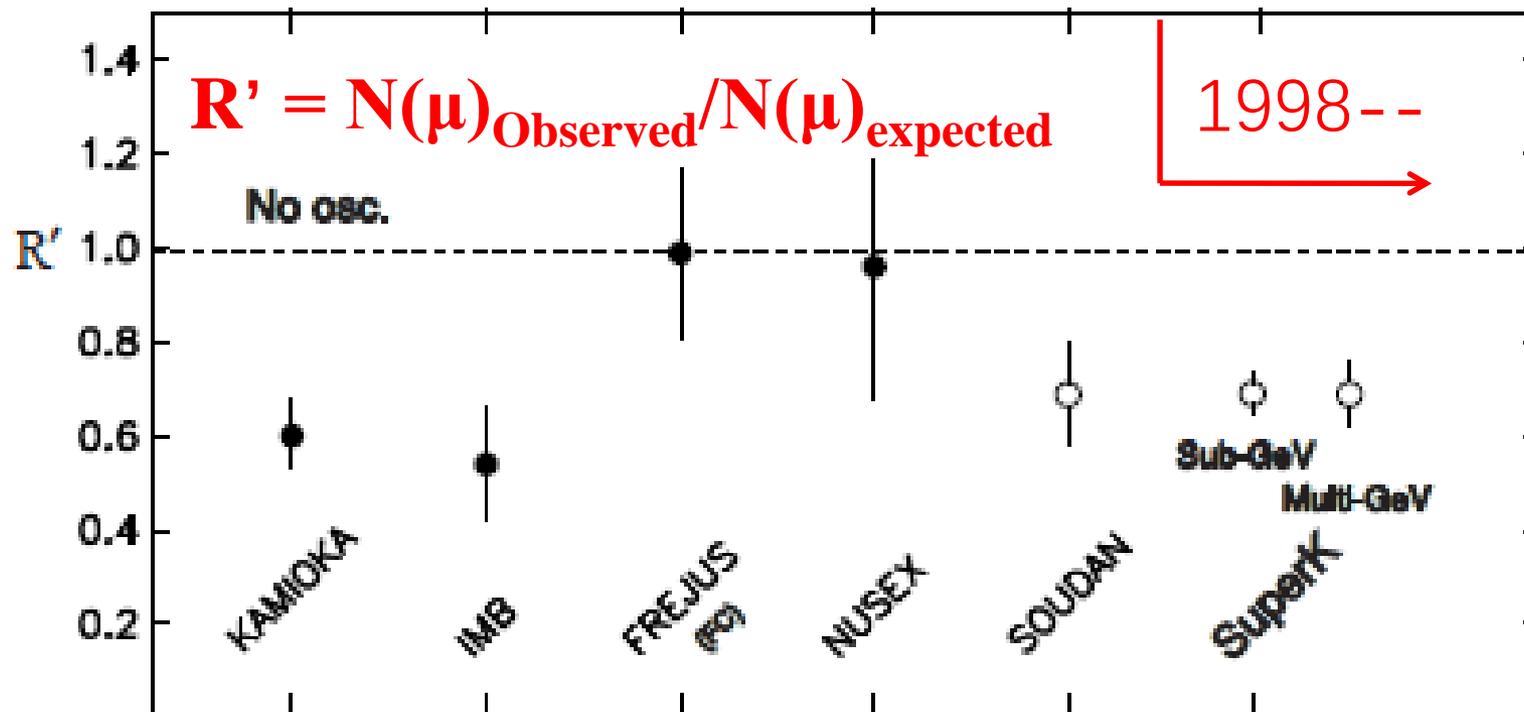
大气中微子的上下不对称性



Super-Kamiokande的实验结果

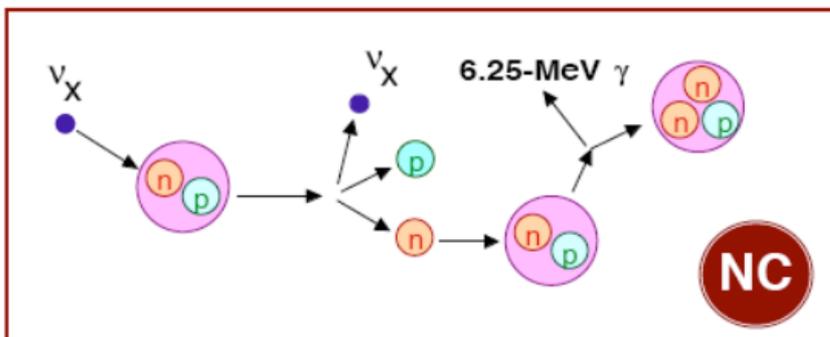


大气中微子的总结



In early 1998, there are three observed hints of neutrino oscillation, and thus of neutrino mass. These hints are the behavior of solar neutrinos, the behavior of atmospheric neutrinos, and the results of the LSND experiment. PDG1998

太阳中微子振荡的确认，SNO实验

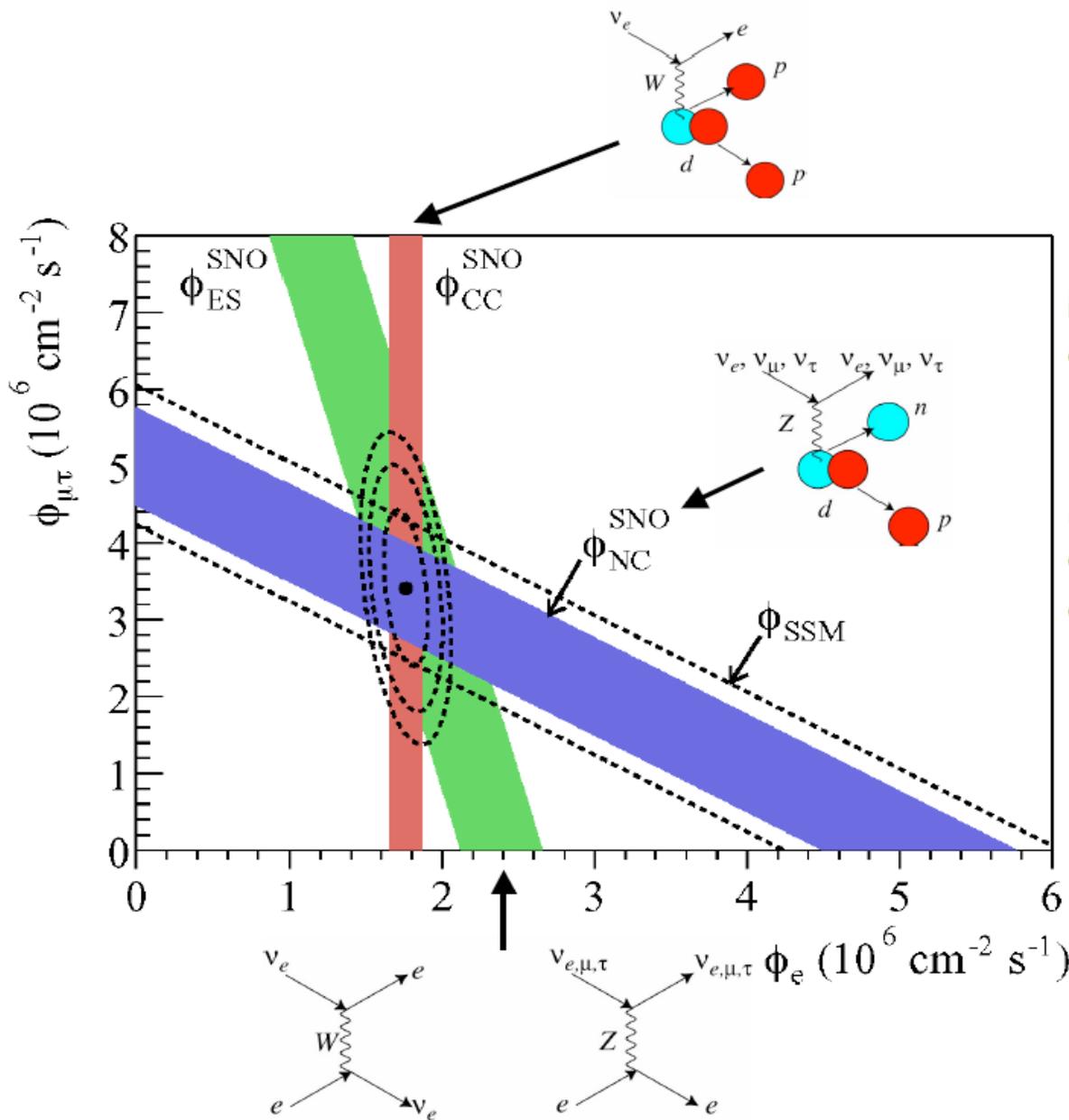


$$\nu_x + d \rightarrow p + n + \nu_x$$

- Measure the total flux of ν from ${}^8\text{B}$
- $\sigma(\nu_e) = \sigma(\nu_\mu) = \sigma(\nu_\tau)$

SNO实验利用中性流事件测量了太阳中微子的总通量

缺失的电子中微子是转化到了其他味道中微子



Prediction:

$$\Phi(\nu_e) \approx 5 \times 10^6 \text{ cm}^{-2} \text{ s}^{-1}$$

Measured:

$$\Phi(\nu_e) \approx 1.8 \times 10^6 \text{ cm}^{-2} \text{ s}^{-1}$$

$$\Phi(\nu_{\mu\tau}) \approx 3.4 \times 10^6 \text{ cm}^{-2} \text{ s}^{-1}$$

2. 太阳模型

太阳标准模型(恒星演化模型)的四个要素:

1. 太阳供能方式:

质子-质子聚变链 pp

碳氮循环 CNO

2. 太阳内能量的传输机制:

辐射 (内部), 依赖于辐射不透明度

对流 (外部)

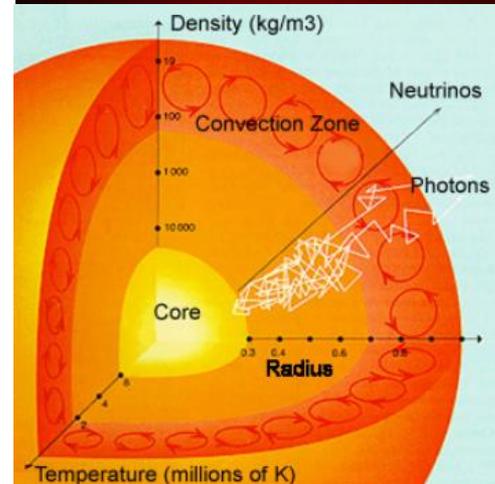
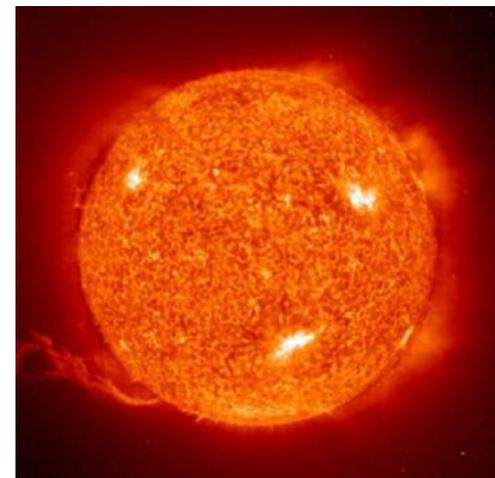
3. 太阳各处处于一个液态局域平衡状态:

引力与辐射压力

4. 边界条件:

原初星的氢、氦、金属含量,

目前太阳半径, 质量, 亮度、年龄约束。



标准太阳模型，原理

原理

压力平衡

数学表达

$$\frac{dP}{dr} = -\frac{GM_r \rho(r)}{r^2}$$

核聚变能来源

$$\epsilon_{nucl}(\rho, T, X_i)$$

聚变对密度，温度，丰度依赖

$$\int_{star} \epsilon_{nucl} dv = L_{\odot}(today) \quad \text{等于光亮度}$$

能量运输

$$L_r \propto \left(\frac{r^2}{\kappa \rho}\right) T^3 \left(\frac{dT}{dr}\right)$$

原初组分

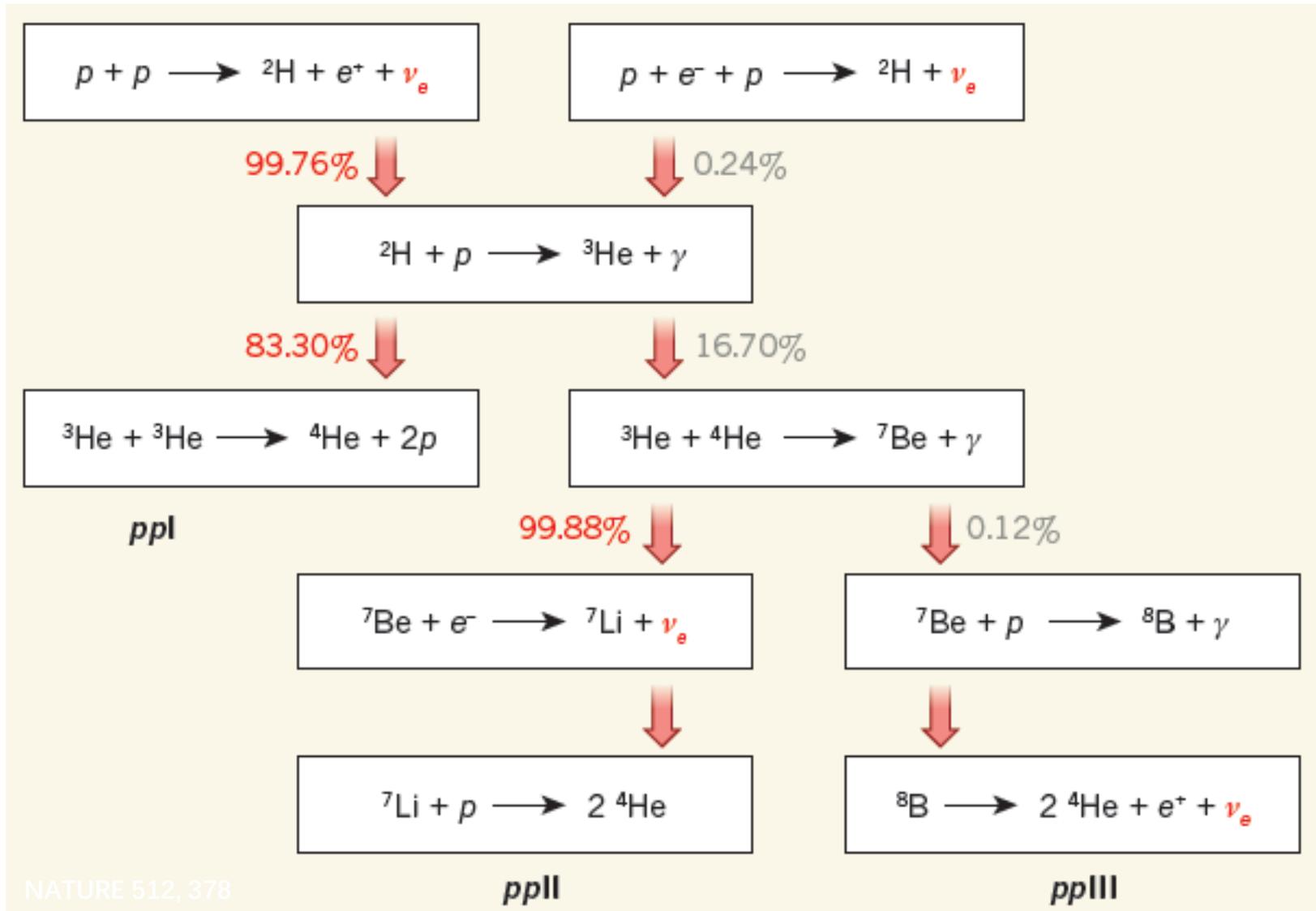
太阳目前的表面丰度

目前最好的猜测

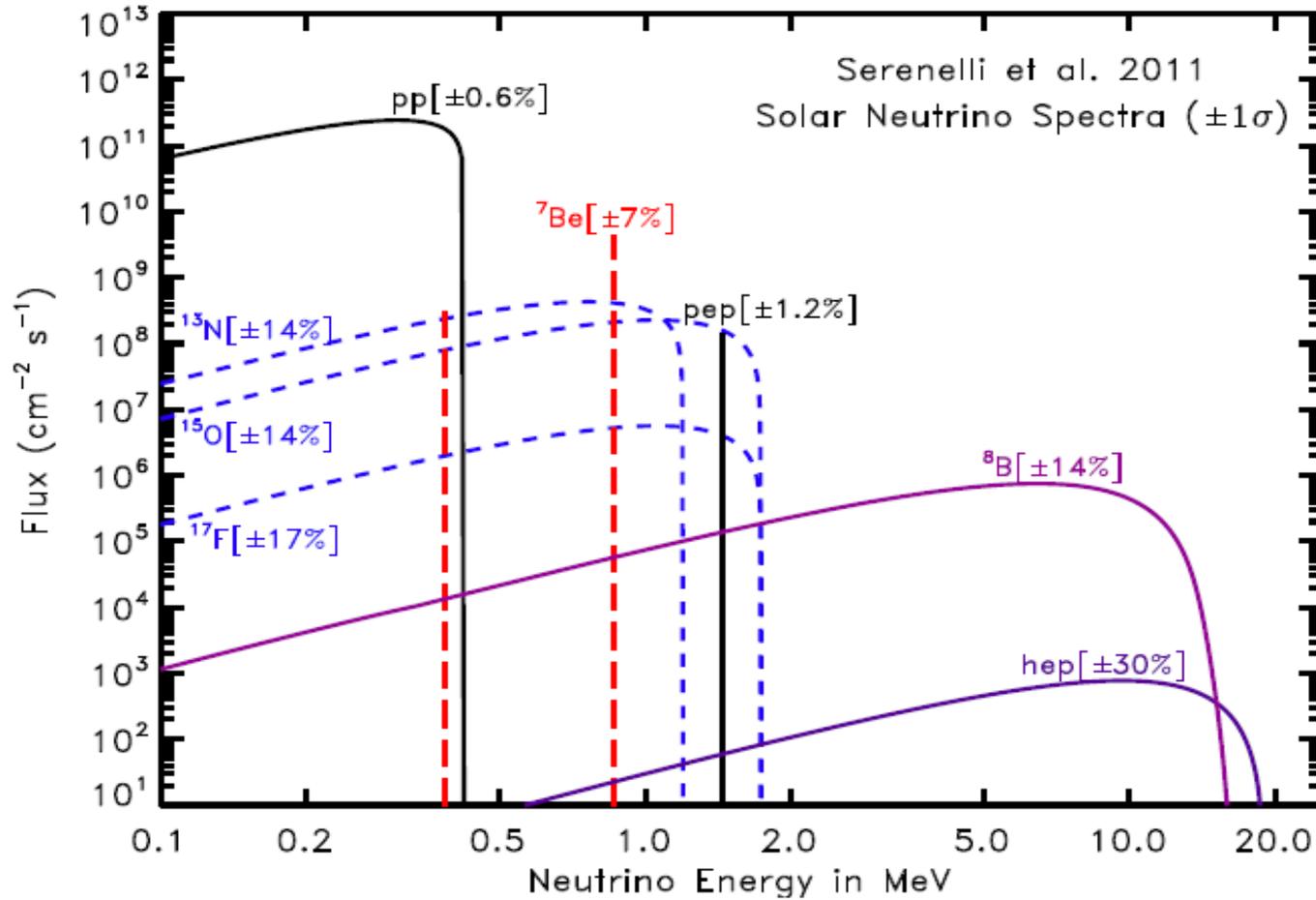
演化

5×10^9 年，目前的质量，大小和光亮度

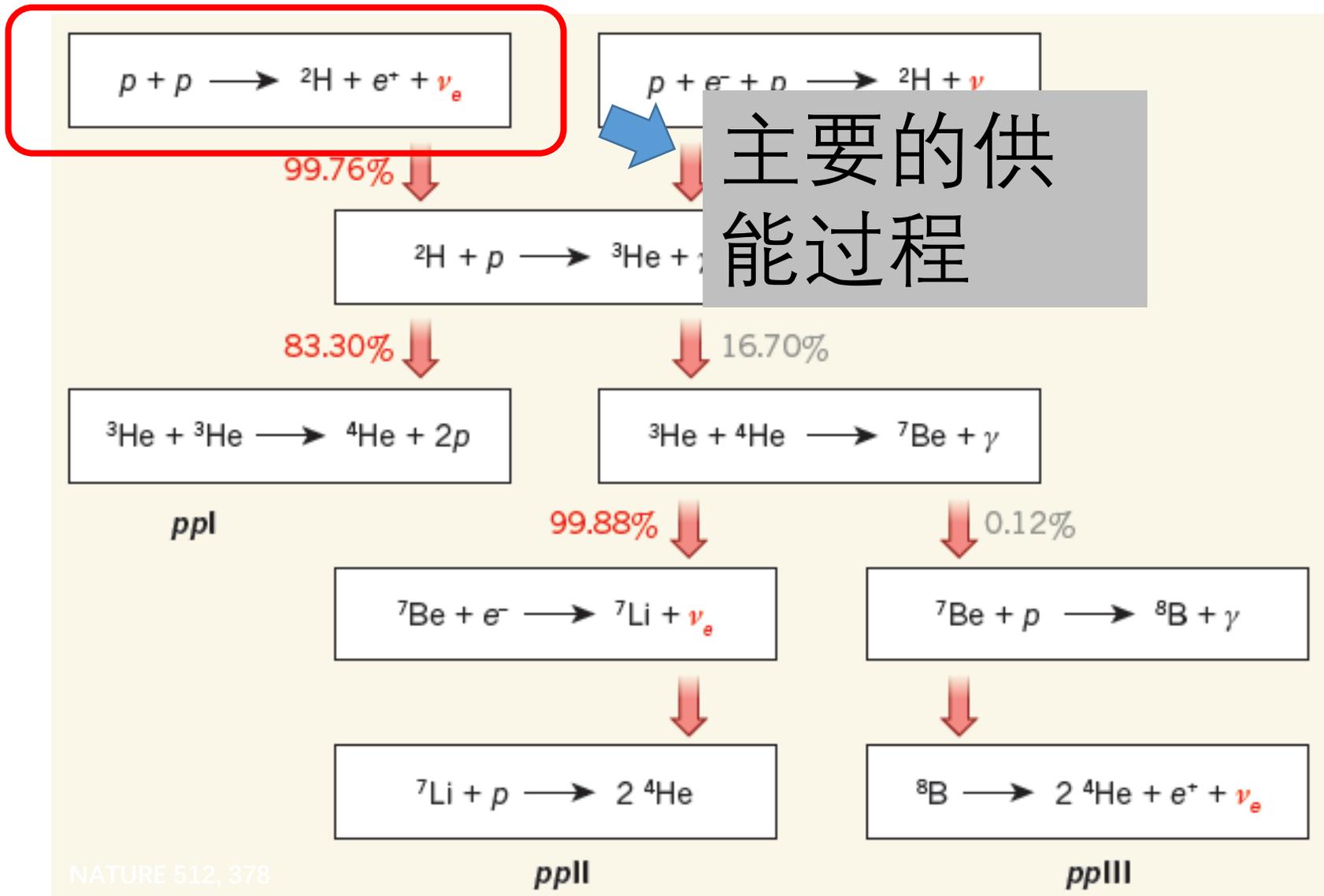
质子-质子聚变链 pp, 及中微子产生过程



中微子能谱



核反应截面输入：质子-质子聚变链 pp



pp聚变截面

1. pp聚变

只有通过量子力学的隧道效应才能发生

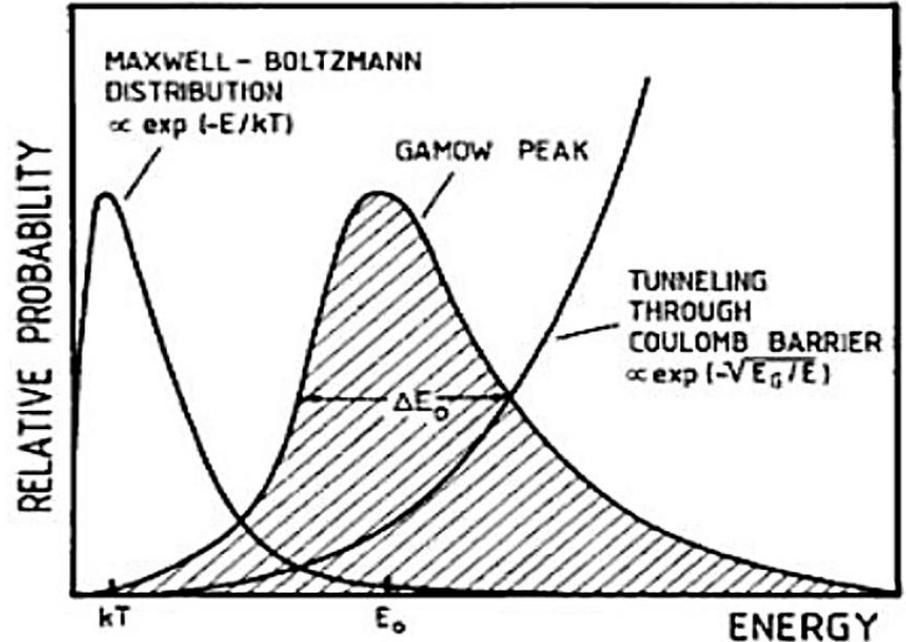
Gamow peak

2. pp聚变截面实验上不好测

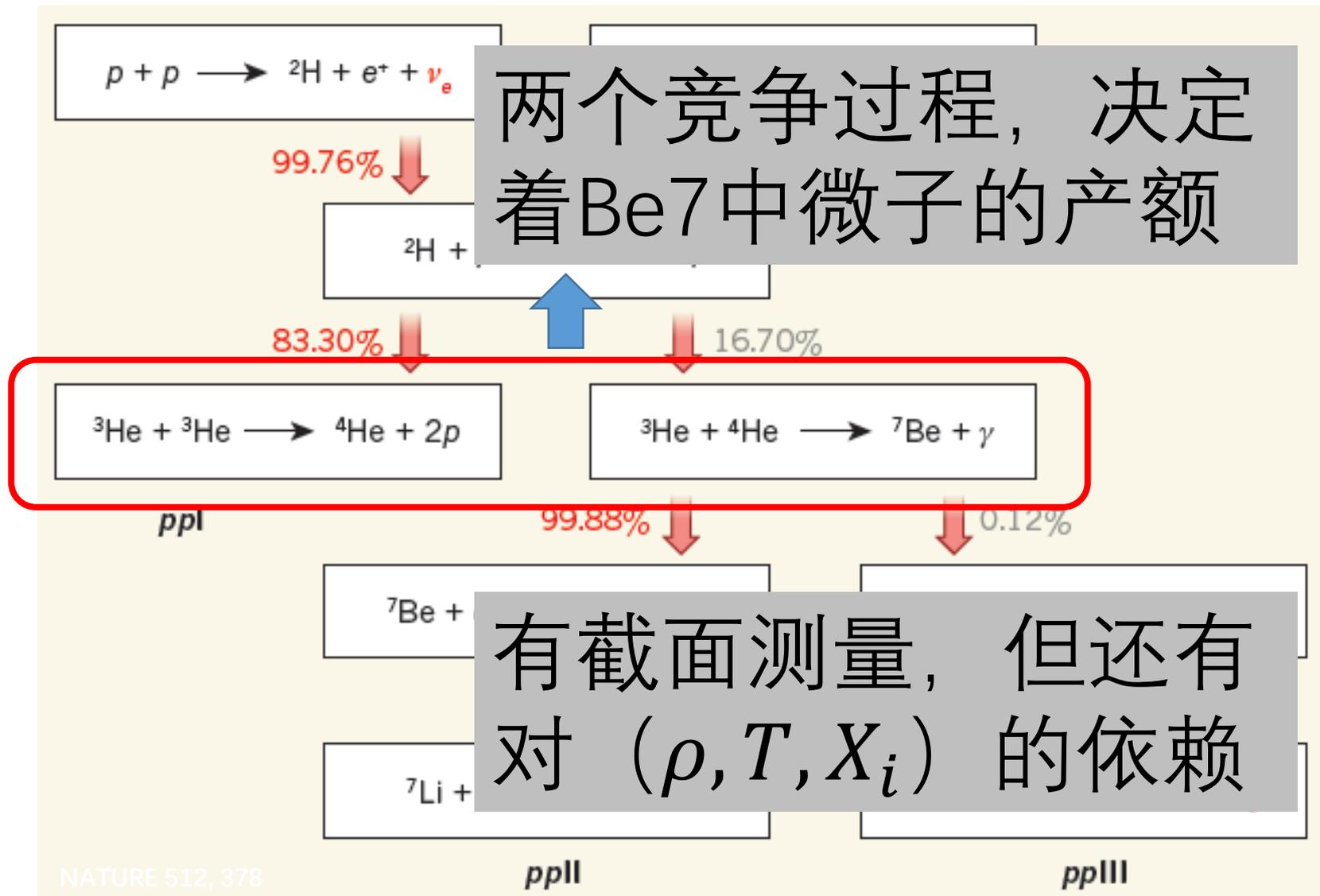
质子-质子在热质子范围内截面太低

3. pp聚变截面理论计算

但是，类比“辐射中子质子俘获”过程，
我们预期pp理论截面的误差可能在2%水平

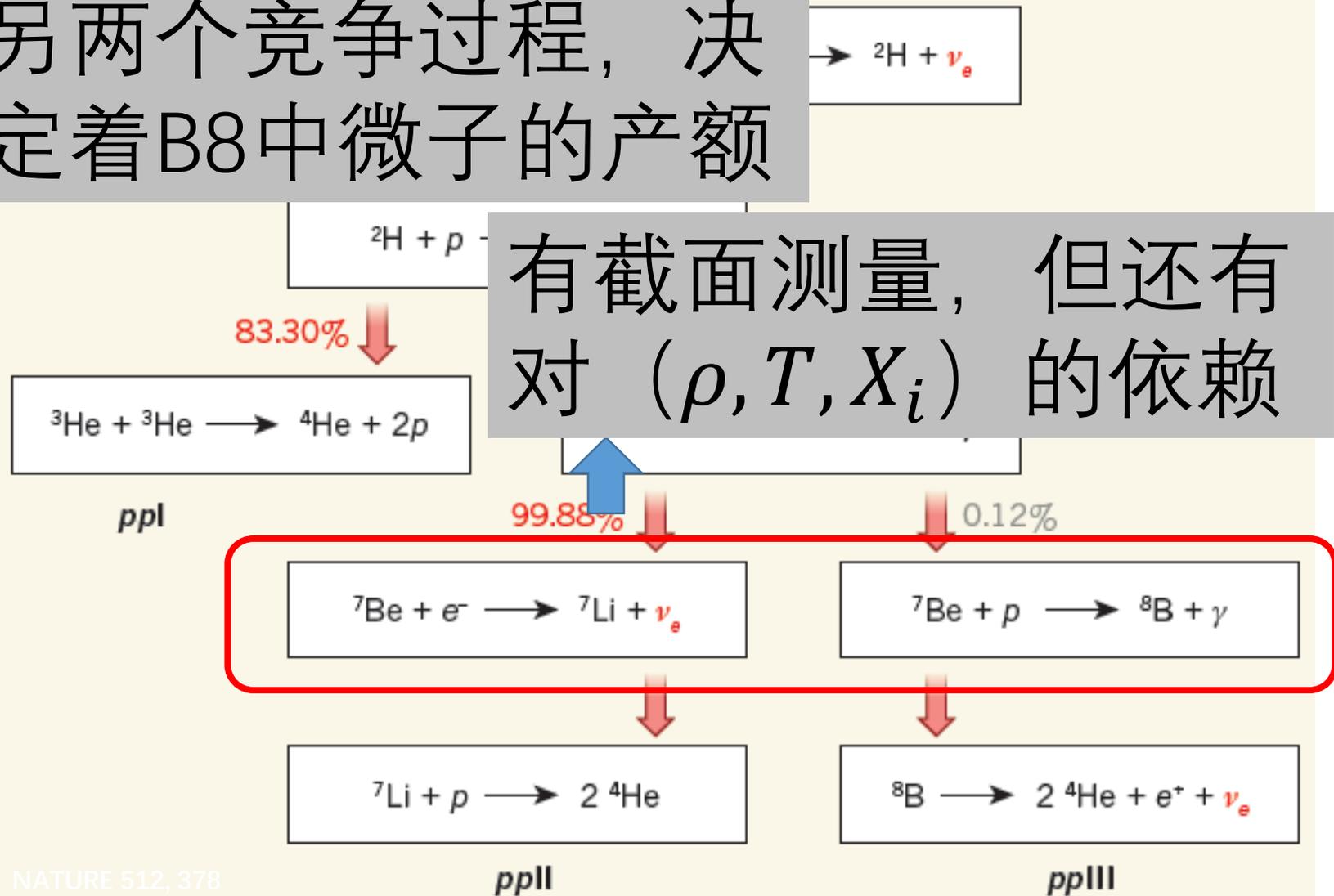


核反应截面输入：质子-质子聚变链 pp



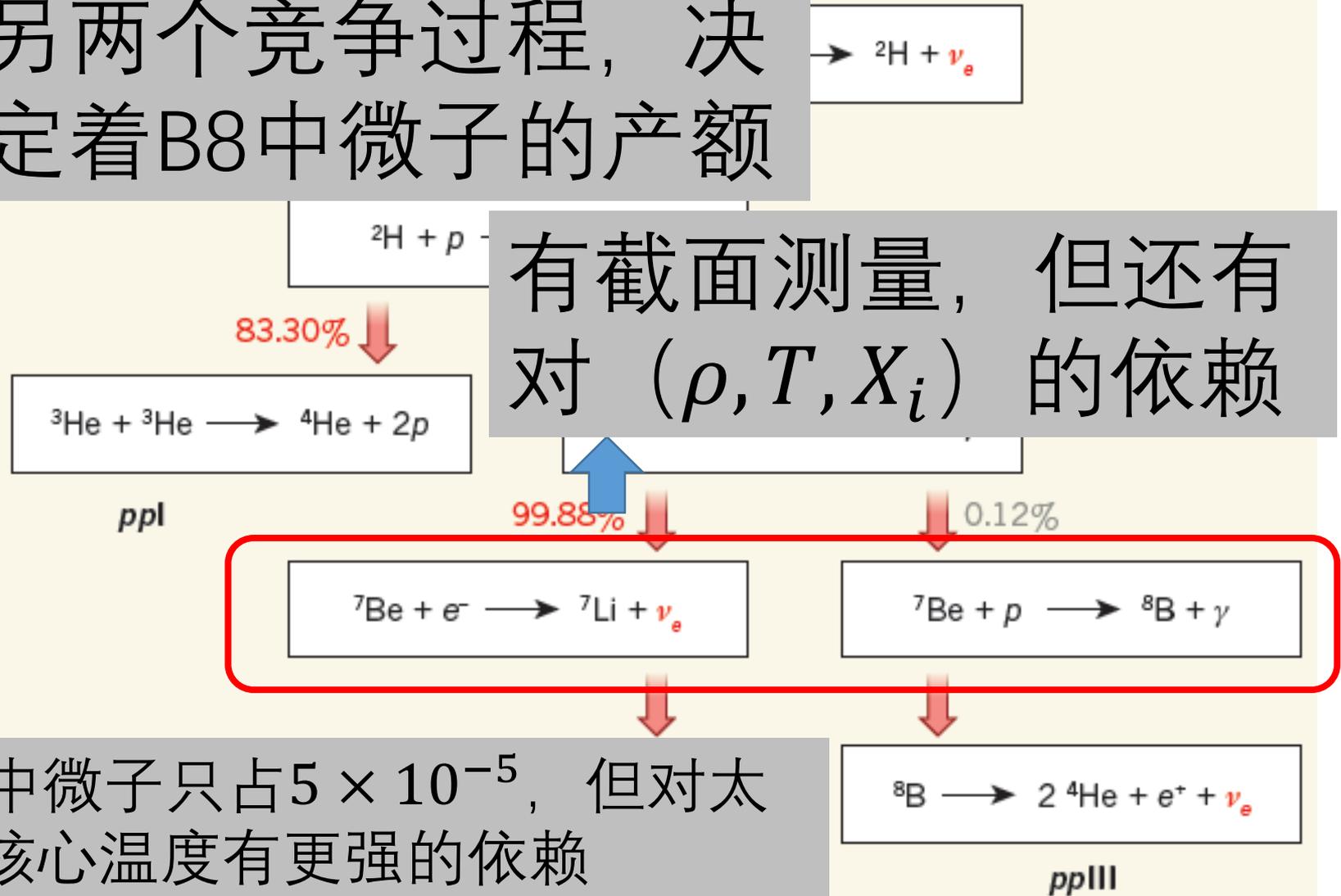
核反应截面输入：质子-质子聚变链 pp

另两个竞争过程，决定着B8中微子的产额



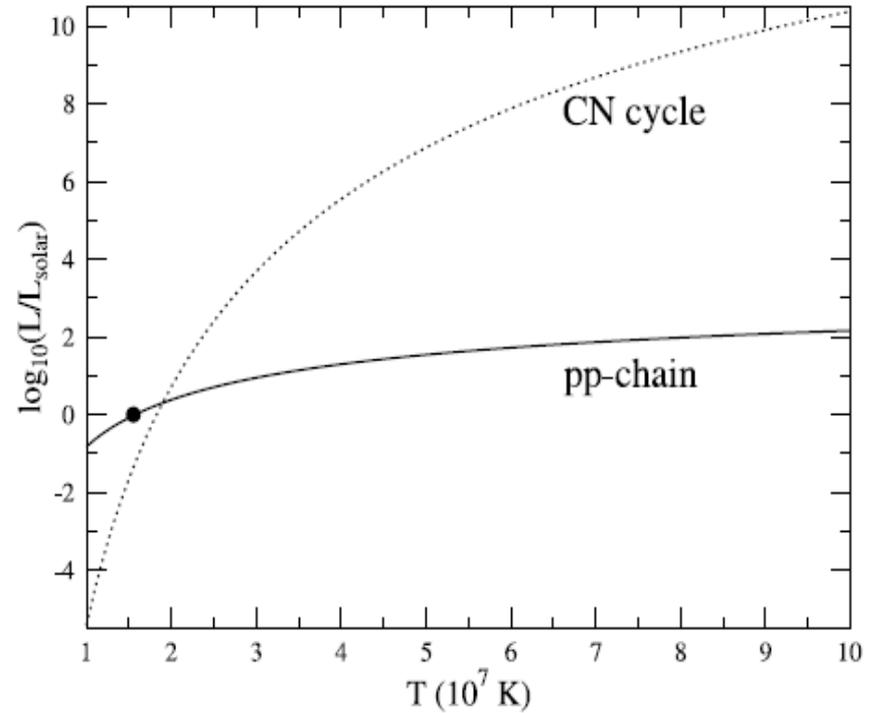
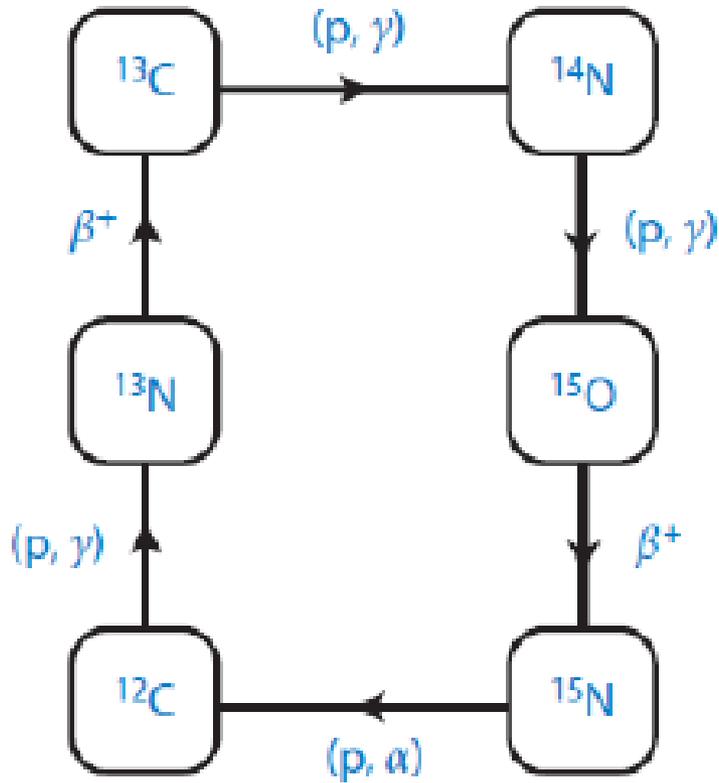
核反应截面输入：质子-质子聚变链 pp

另两个竞争过程，决定着B8中微子的产额



B8中微子只占 5×10^{-5} ，但对太阳核心温度有更强的依赖

中微子产生：碳氮循环 CNO



质子-质子聚变链：
(太阳温度下的主要过程)

碳氮循环：
(高温主序星的主要模式)

不透明度，对流问题

1. 辐射不透明度：

描述能量向外部扩散的能力，
影响温度梯度

2. 不断更新的数据和测量

Astrophysical Opacity Library

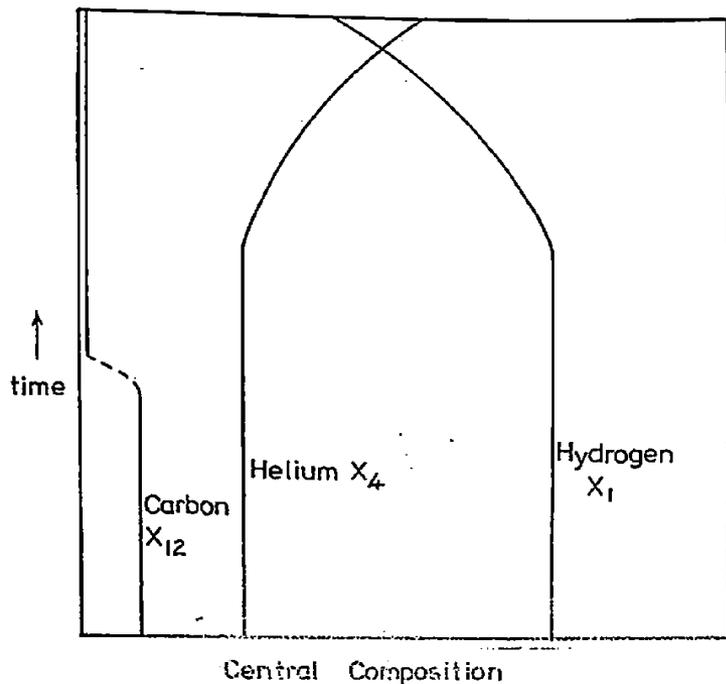
Nature 517, 56 (2015) 是关于新的铁的测量

3. 对流：

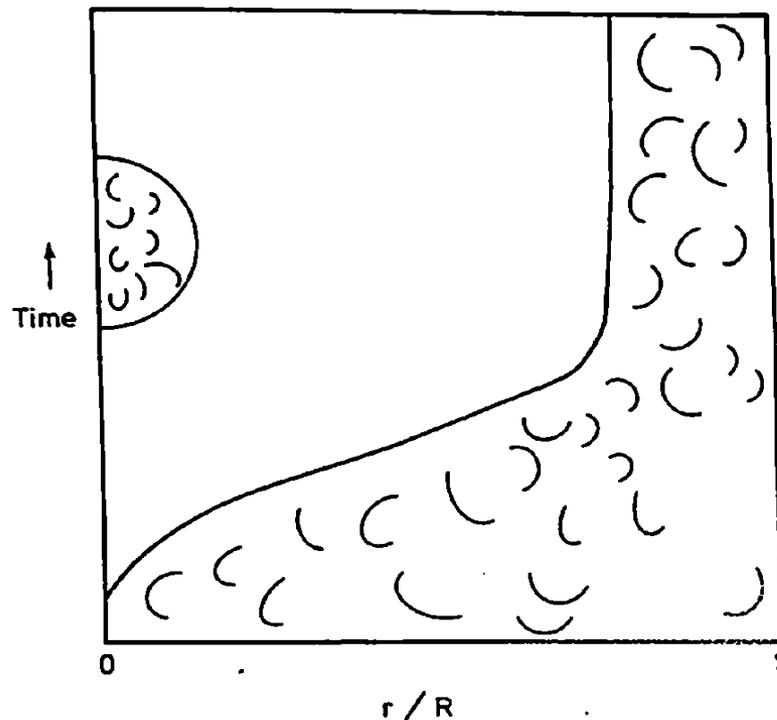
深刻的改变局域的物质均匀性，元素丰度

太阳演化的一些结果

太阳聚变燃烧一直是在表面
太阳温度一直在升高



太阳核心，H，He，C的丰度随时间的演化

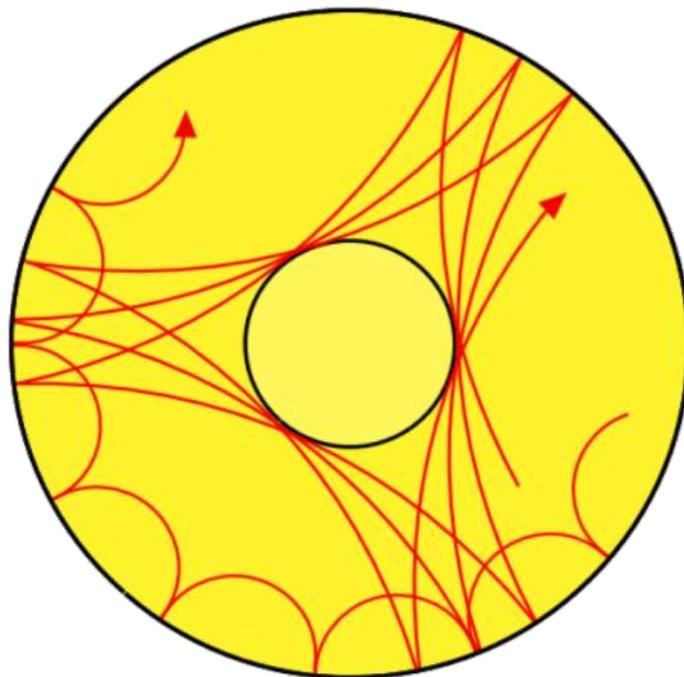


太阳内部，辐射区域，对流区域随时间的变化

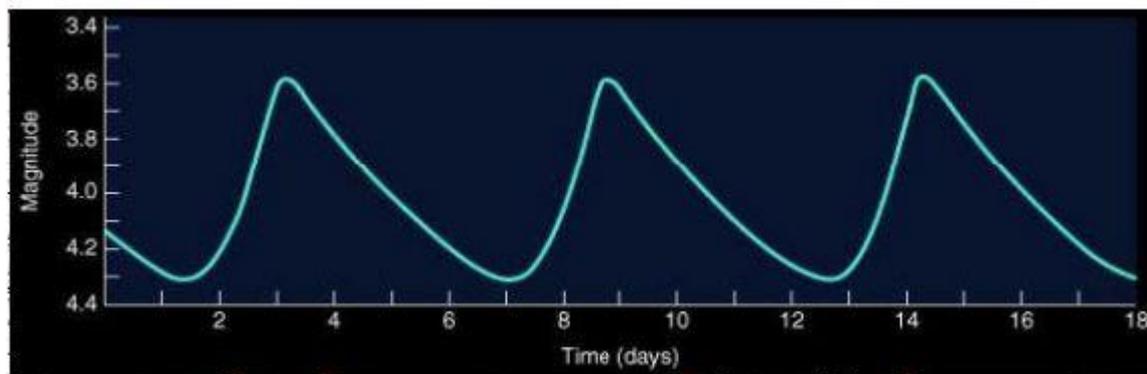
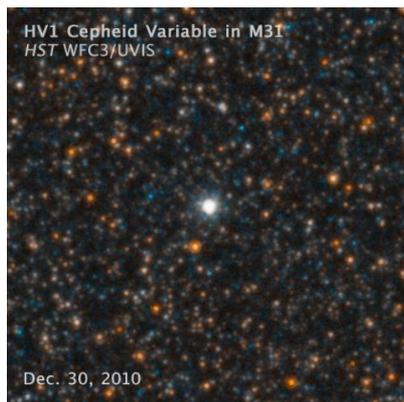
日震学

日震学，星震学：太阳光球表面的吸收谱线的多普勒测量发现太阳表面在振动：周期5 min，速度达到0.5 km/s，振幅达到数百公里（太阳共振腔）

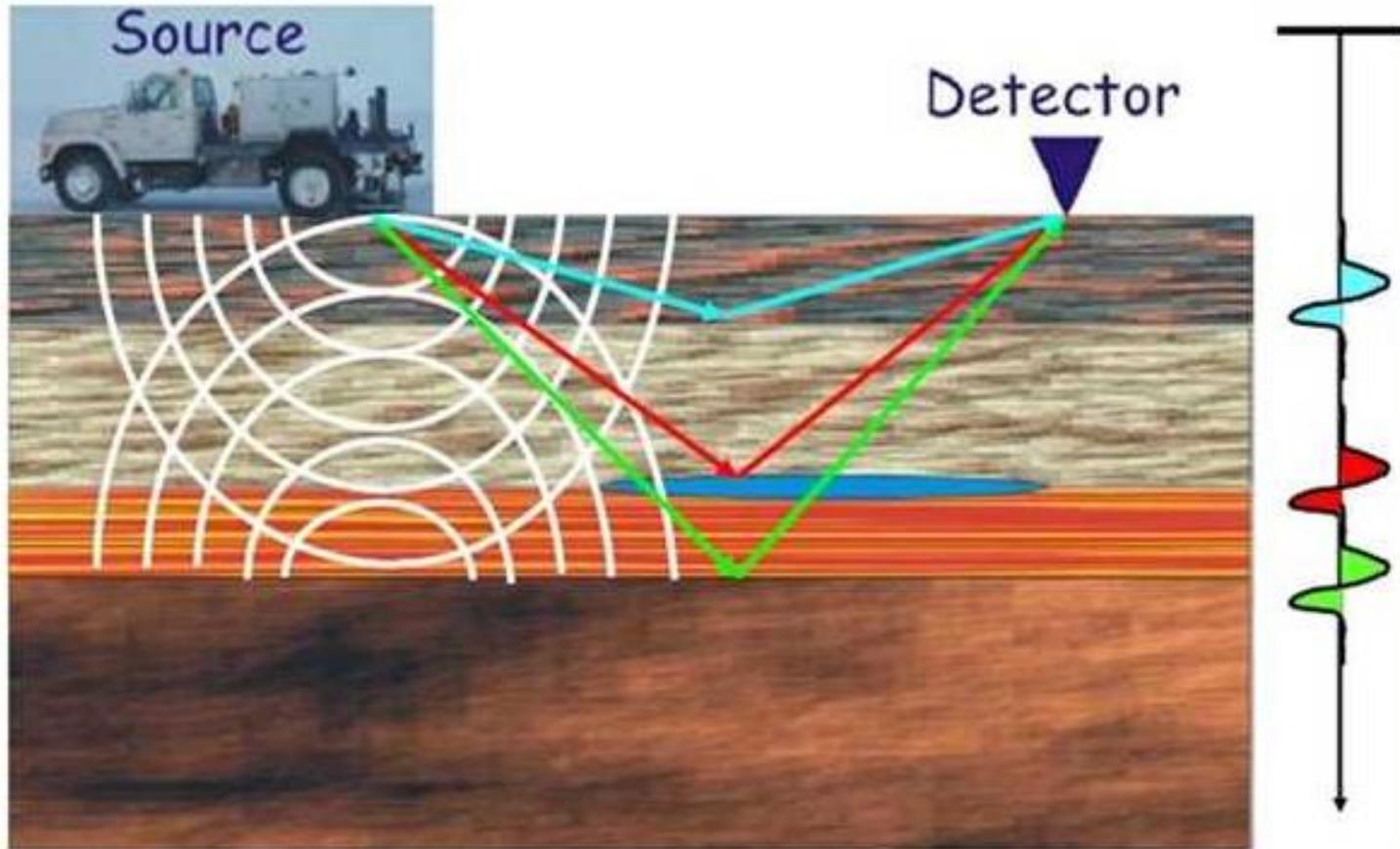
可推测太阳内部结构，密度，声速



造父变星

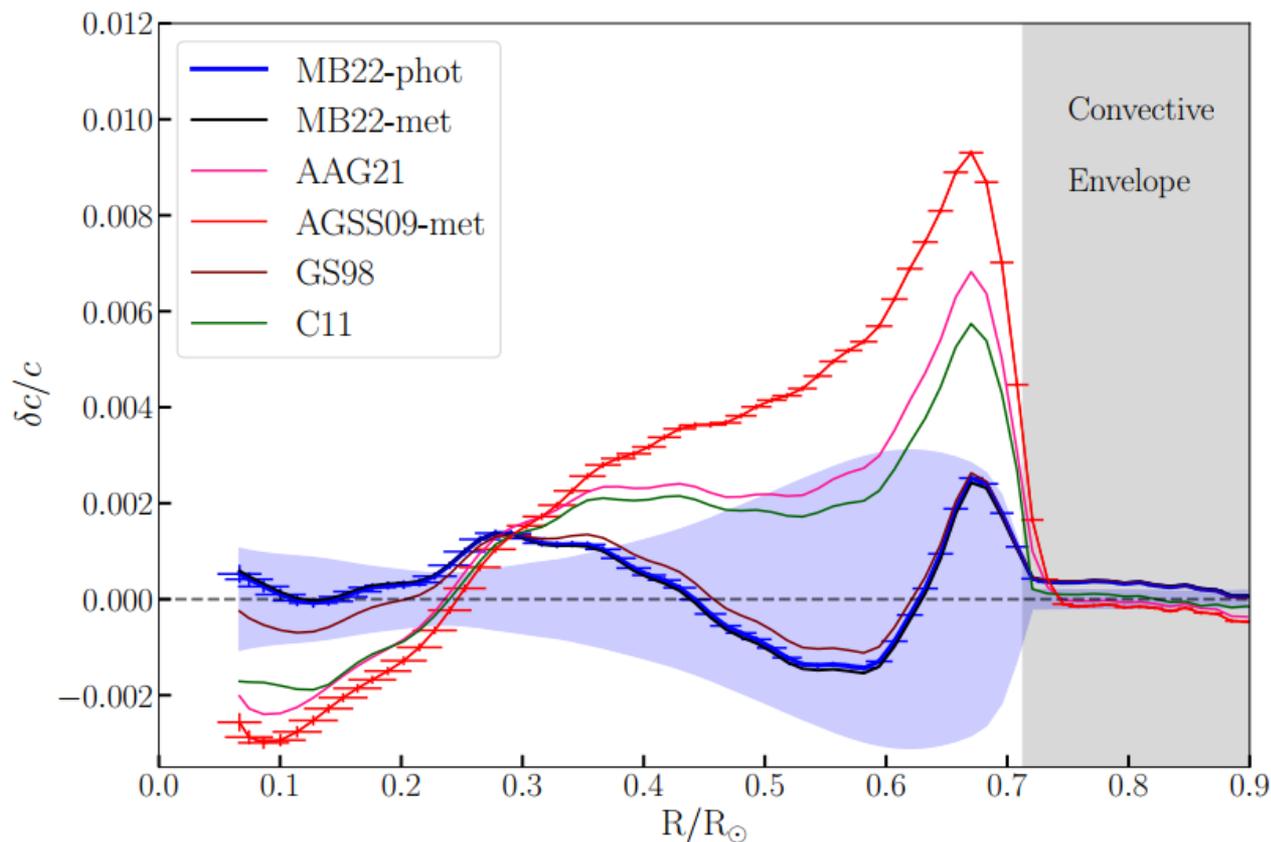


地震波与地球内部结构的研究



利用探测的结果，通过透射和反射的信息推知底层结构，例如江门周边的底层结构研究

日震学与太阳内部声速的预期

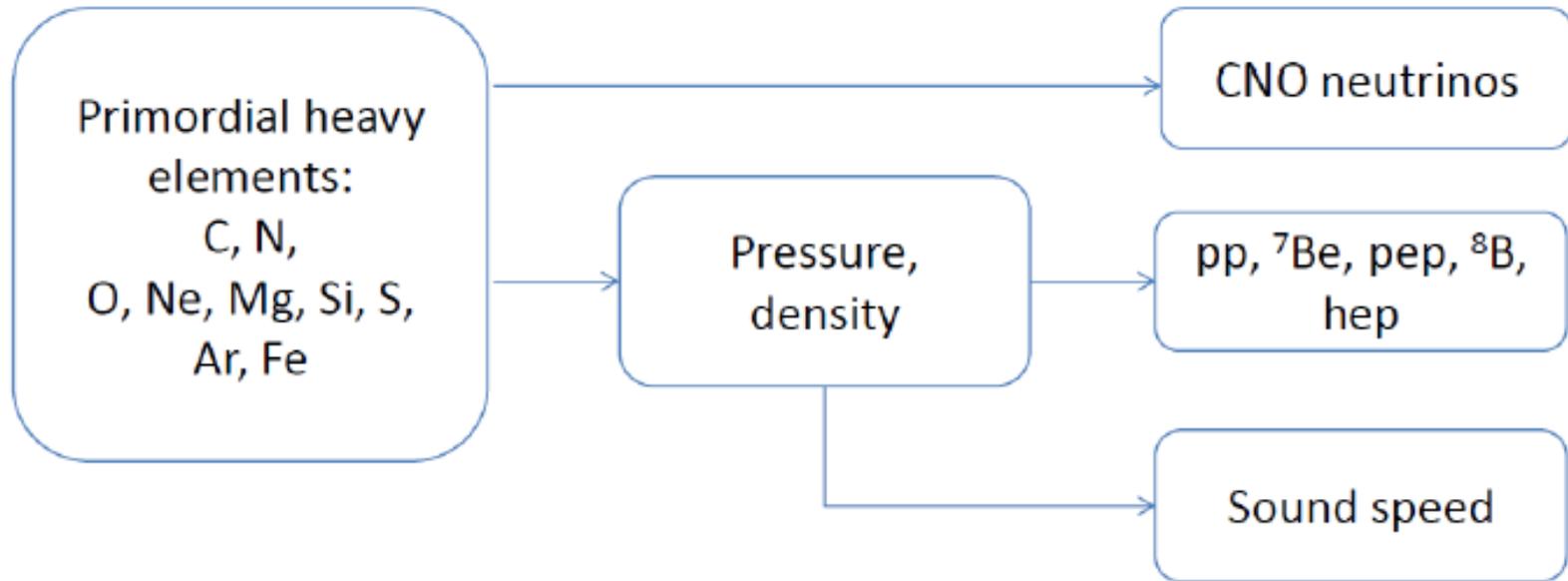


有低金属丰度的预期, AGSS09

高金属丰度的预期, GS98

MB22, 低丰度, 较好的和太阳模型声速比较结果

精确测量CNO中微子的意义



CNO neutrinos:

- besides testing CNO cycle
- provide clues for the solution of the metallicity puzzle.

太阳模型与中微子

1. pp中微子

pp聚变，供能过程99%，产生pp中微子。

对比太阳光亮度，是对太阳主要聚变模式的检验。pp截面是恒星寿命的重要输入，对恒星研究的重要刻度。

2. Be7中微子，B8中微子

对元素丰度，温度，截面都有依赖

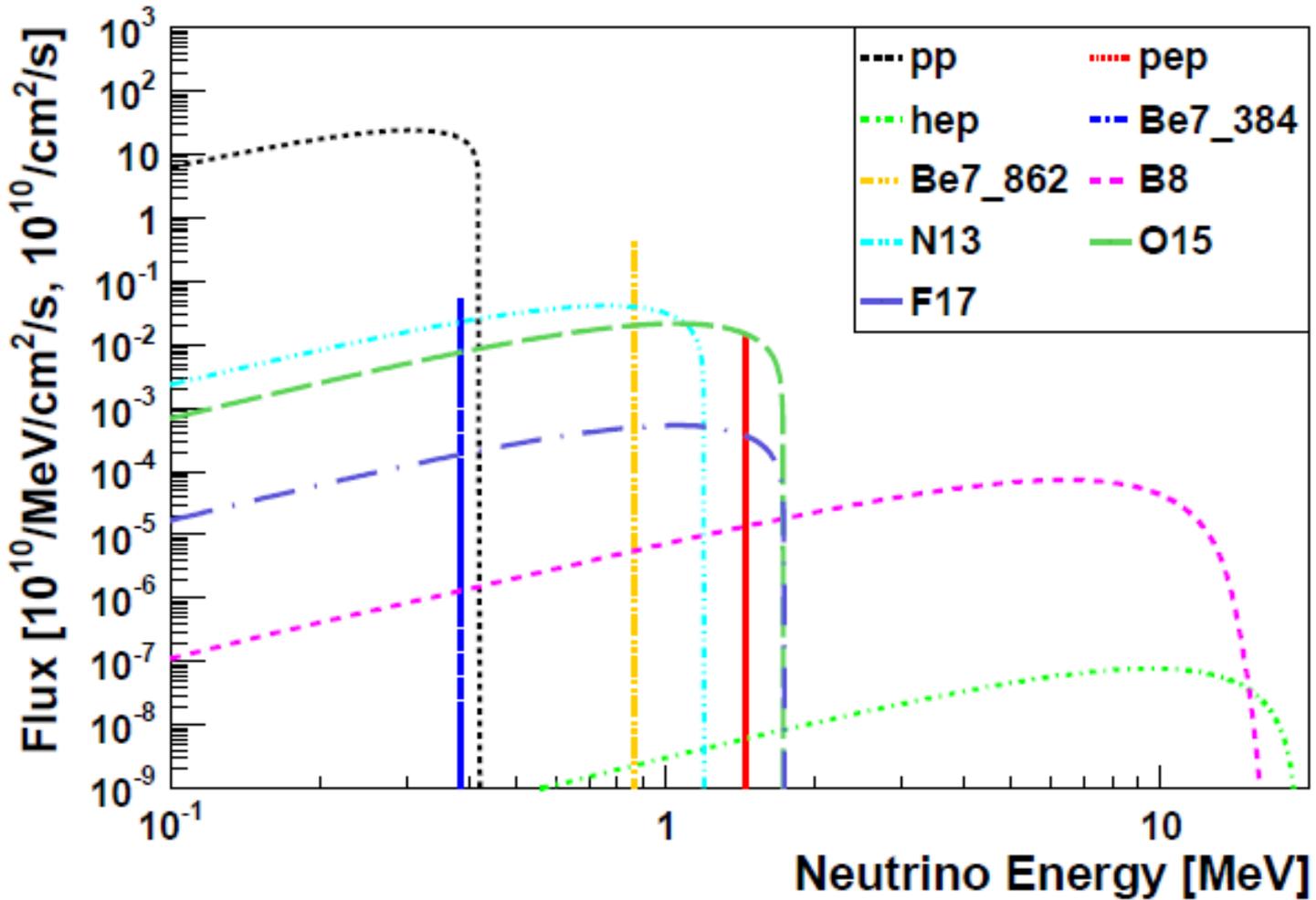
B8中微子需要更高温度，Be7和B8中微子在不同的角度刻度太阳的演化（不透明度等）。

3. 碳氮氧（CNO）中微子

高温主序星的主导供能方式

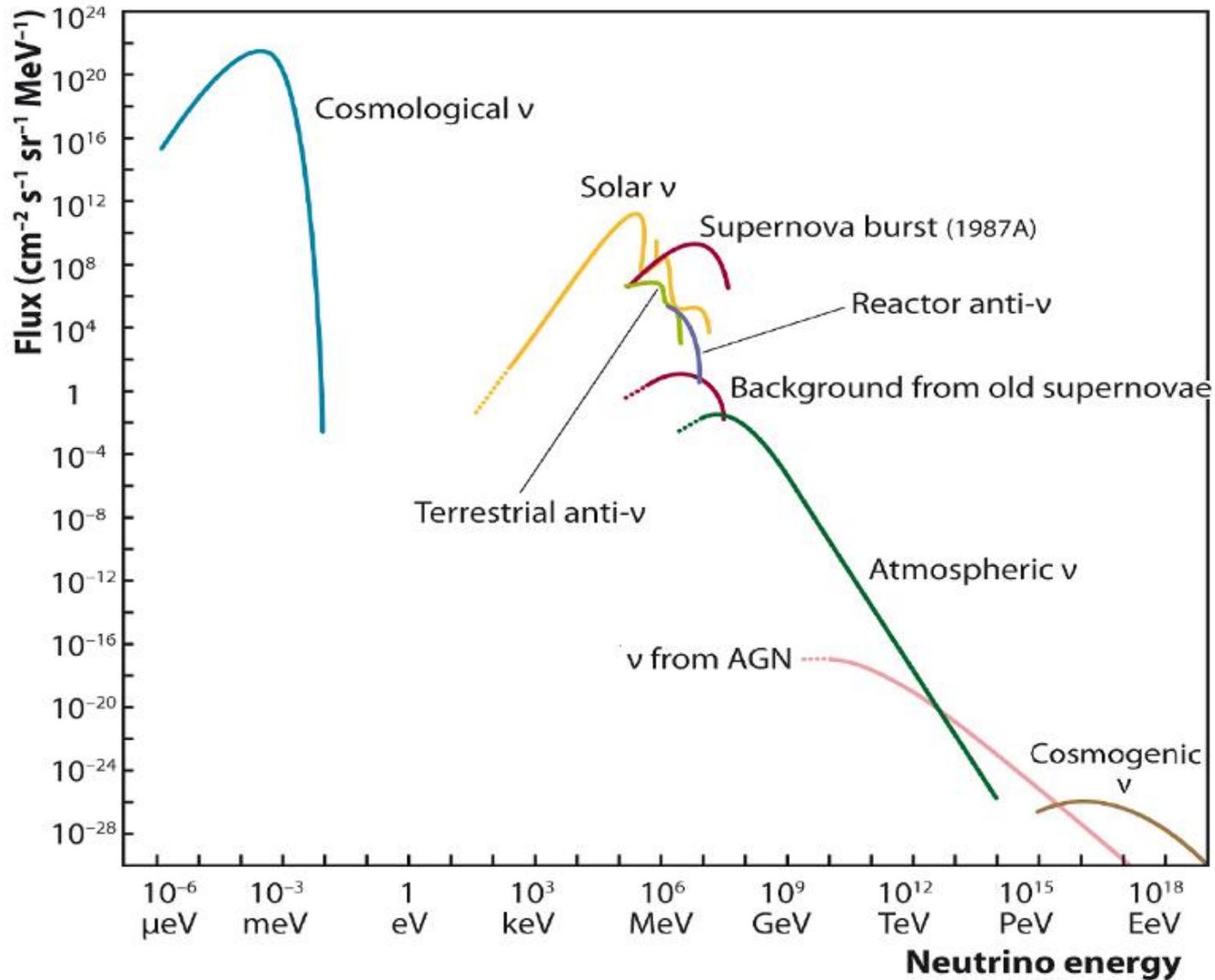
太阳金属丰度测量的重要依据，新聚变链的精确测量。

太阳中微子能谱





太阳中微子的位置



3. 太阳中微子传播

太阳中微子振荡与传播

太阳中心-高密度：受电子数密度和中微子能量影响的混合角 θ_{12}^M

外围：真空混合角 θ_{12}

$$P_{ee}^{\odot} = \cos^4 \theta_{13} \left(\frac{1}{2} + \frac{1}{2} \cos 2\theta_{12}^M \cos 2\theta_{12} \right)$$

*如果中微子穿过地球，其通量将继续受到调制，幅度变化~10%

中微子混合矩阵

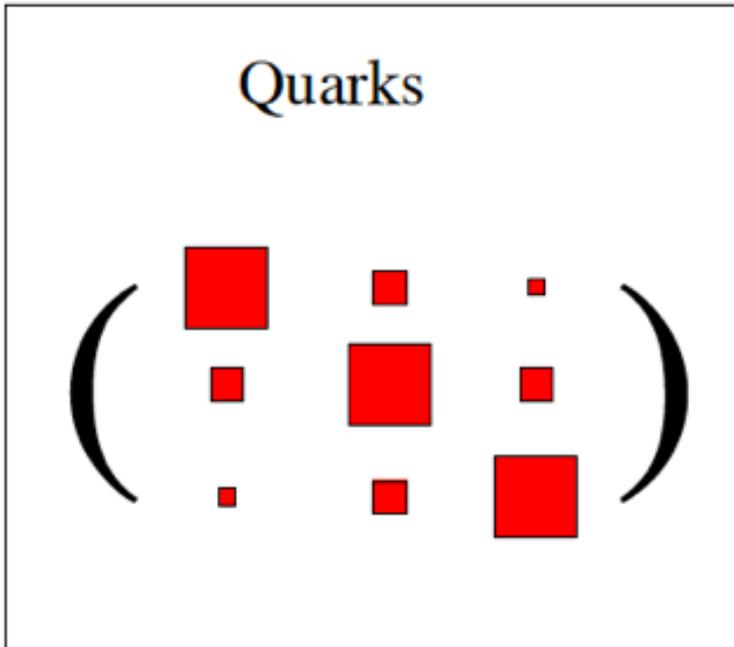
Neutrino mixing at the 3-neutrino framework

$$\begin{pmatrix} \nu_e \\ \nu_\mu \\ \nu_\tau \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} U_{e1} & U_{e2} & U_{e3} \\ U_{\mu1} & U_{\mu2} & U_{\mu3} \\ U_{\tau1} & U_{\tau2} & U_{\tau3} \end{pmatrix} \begin{pmatrix} \nu_1 \\ \nu_2 \\ \nu_3 \end{pmatrix}$$

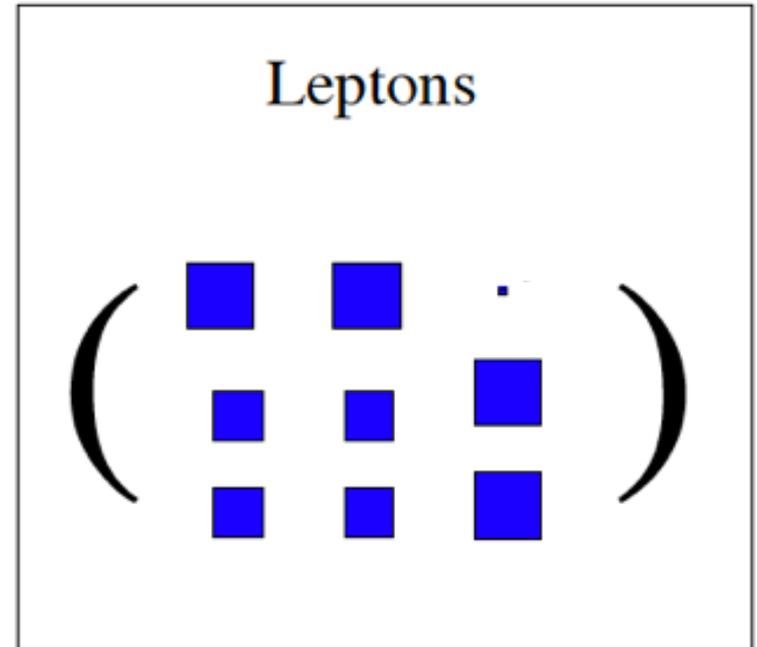
Pontecorvo-Maki-Nakagawa-Sakata matrix

$$\begin{pmatrix} \cos \theta_{12} & \sin \theta_{12} & 0 \\ -\sin \theta_{12} & \cos \theta_{12} & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} \cos \theta_{13} & 0 & \sin \theta_{13} e^{-i\delta} \\ 0 & 1 & 0 \\ -\sin \theta_{13} e^{i\delta} & 0 & \cos \theta_{13} \end{pmatrix} \begin{pmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & \cos \theta_{23} & \sin \theta_{23} \\ 0 & -\sin \theta_{23} & \cos \theta_{23} \end{pmatrix} \begin{pmatrix} e^{i\phi_1} & 0 & 0 \\ 0 & e^{i\phi_2} & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{pmatrix}$$

CKM Vs. PMNS



vs.



- ✓ Elements well known
- ✓ Diagonal
- ✓ CP phase known

- ✓ Elements known
- ✓ Non-Diagonal, why
- ✓ CP phase unknown

两味道中微子振荡

在 $t = 0$, 中微子味道态矢量 (波函数) 为

$$|\nu(0)\rangle = |\nu_\mu\rangle$$

在其他时刻, 中微子味道态矢量 (组合波函数) 为

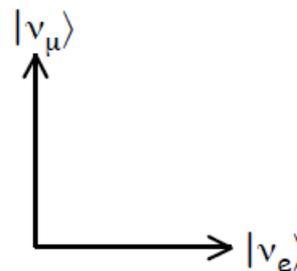
$$|\nu(t)\rangle = C_e(t)|\nu_e\rangle + C_\mu(t)|\nu_\mu\rangle \quad \text{s.t. } C_e(0)=0, C_\mu(0)=1$$

为缪子和电子型中微子的系数为

$$\langle\nu_\mu|\nu(t)\rangle = C_\mu(t) \quad \langle\nu_e|\nu(t)\rangle = C_e(t)$$

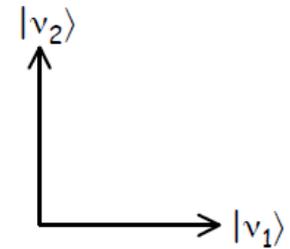
并且满足

$$C_\mu^2(t) + C_e^2(t) = 1$$



如果写成质量本征态的组合

$$|v(t)\rangle = C_1(t)|v_1\rangle + C_2(t)|v_2\rangle$$



假定两者的动量相同

$$E_1 = \sqrt{m_1^2 + p^2} \quad E_2 = \sqrt{m_2^2 + p^2}$$

质量本征态随时间的演化

$$C_1(t) = C_1(0)e^{-iE_1 t} \quad C_2(t) = C_2(0)e^{-iE_2 t}$$

在两种基氏空间的展开等价

$$|v(t)\rangle = C_1(t)|v_1\rangle + C_2(t)|v_2\rangle = C_e(t)|v_e\rangle + C_\mu(t)|v_\mu\rangle$$

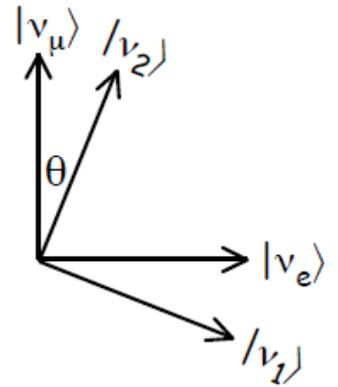
于是有

$$C_e(t) = C_1(t) \langle v_e | v_1 \rangle + C_2(t) \langle v_e | v_2 \rangle$$

$$C_\mu(t) = C_1(t) \langle v_\mu | v_1 \rangle + C_2(t) \langle v_\mu | v_2 \rangle$$

表达成矩阵形式，并引入中微子混合矩阵 U_θ

$$U_\theta = \begin{pmatrix} \cos\theta & \sin\theta \\ -\sin\theta & \cos\theta \end{pmatrix} \begin{pmatrix} |\nu_e\rangle \\ |\nu_\mu\rangle \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \cos\theta & \sin\theta \\ -\sin\theta & \cos\theta \end{pmatrix} \begin{pmatrix} |\nu_1\rangle \\ |\nu_2\rangle \end{pmatrix}$$



$$\begin{pmatrix} C_e(t) \\ C_\mu(t) \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \langle \nu_e | \nu_1 \rangle & \langle \nu_e | \nu_2 \rangle \\ \langle \nu_\mu | \nu_1 \rangle & \langle \nu_\mu | \nu_2 \rangle \end{pmatrix} \begin{pmatrix} C_1(t) \\ C_2(t) \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \cos\theta & \sin\theta \\ -\sin\theta & \cos\theta \end{pmatrix} \begin{pmatrix} C_1(t) \\ C_2(t) \end{pmatrix}$$

在 $t=0$ 时刻

$$|\nu(0)\rangle = |\nu_\mu\rangle \rightarrow C_1(0) = -\sin\theta \quad C_2(0) = \cos\theta$$

在其他时刻

$$C_e(t) = \sin\theta\cos\theta(e^{-iE_2t} - e^{-iE_1t})$$

$$C_\mu(t) = \sin^2\theta e^{-iE_1t} + \cos^2\theta e^{-iE_2t}$$

概率表达式

$$P(\nu_\mu \rightarrow \nu_e) = C_e^*(t)C_e(t) = \sin^2 2\theta \sin^2 \left[\frac{(E_2 - E_1)t}{2} \right]$$

$$P(\nu_\mu \rightarrow \nu_\mu) = C_\mu^*(t)C_\mu(t) = 1 - \sin^2 2\theta \sin^2 \left[\frac{(E_2 - E_1)t}{2} \right]$$

如果 m_1, m_2 远远小于 p , 中微子以光速飞行

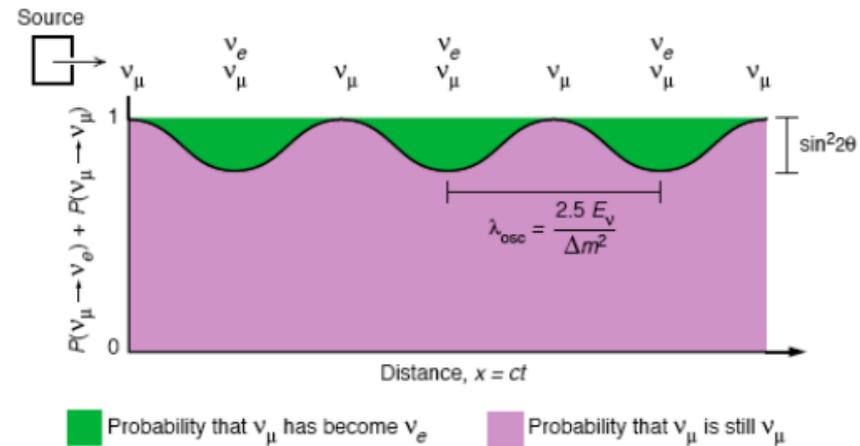
$$ct = L, \quad E_1 \approx p + m_1^2/2p, \quad E_2 \approx p + m_2^2/2p, \quad E_1 \approx E_2 \approx p = E$$

出现概率

$$P(\nu_\mu \rightarrow \nu_e) = \sin^2 2\theta \sin^2 \left[\frac{(m_2^2 - m_1^2)L}{4E} \right]$$

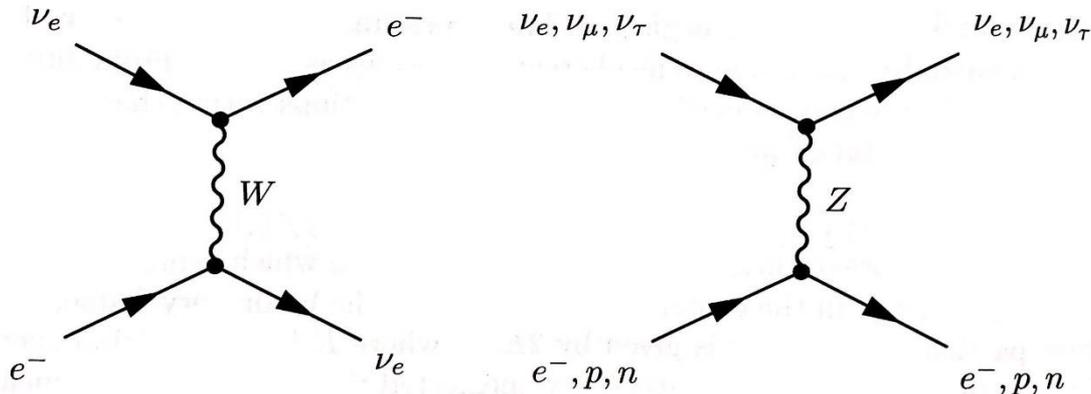
存活概率

$$P(\nu_\mu \rightarrow \nu_\mu) = 1 - \sin^2 2\theta \sin^2 \left[\frac{(m_2^2 - m_1^2)L}{4E} \right]$$



物质效应:

由于物质中充满电子, 所以各种中微子在物质中的传播受到影响并不对称



写下两代质量本征态的演化方程

$$i \frac{d}{dt} \begin{pmatrix} \nu_1 \\ \nu_2 \end{pmatrix} = \frac{1}{2p} \underbrace{\begin{pmatrix} m_1^2 & 0 \\ 0 & m_2^2 \end{pmatrix}}_M \begin{pmatrix} \nu_1 \\ \nu_2 \end{pmatrix}$$

$$E_1 \approx p + m_1^2/2p$$

仍然利用了如上方程, p构成的单位矩阵对振荡无贡献

利用两代中微子的转换矩阵, U_θ 质量本征态和味道本征态之间可以互相转化

$$U_\theta = \begin{pmatrix} \cos \theta & \sin \theta \\ -\sin \theta & \cos \theta \end{pmatrix}$$

写下两代味道本征态的演化方程

$$i \frac{d}{dt} \begin{pmatrix} \nu_e \\ \nu_\mu \end{pmatrix} = \frac{1}{2p} U M U^T \begin{pmatrix} \nu_e \\ \nu_\mu \end{pmatrix}$$
$$= \frac{M^2}{2p} \begin{pmatrix} \nu_e \\ \nu_\mu \end{pmatrix}$$
$$U M U^T = \frac{\Delta m^2}{2} \begin{pmatrix} -\cos 2\theta & \sin 2\theta \\ \sin 2\theta & \cos 2\theta \end{pmatrix}$$

对电子中微子引入额外的作用势

$$V_e = G_F \sqrt{2} N_e \quad N_e = \text{electron density}$$

哈密顿量 M^2 有了新的变化

$$M^2 \rightarrow M_M^2 = \frac{\Delta m^2}{2} \begin{pmatrix} -\cos 2\theta & \sin 2\theta \\ \sin 2\theta & \cos 2\theta \end{pmatrix} + \begin{pmatrix} \Delta m_M^2 & 0 \\ 0 & -\Delta m_M^2 \end{pmatrix}$$

我们必须重新把 M^2 对角化，才能解出该微分方程组

$$\begin{pmatrix} \nu_{1m} \\ \nu_{2m} \end{pmatrix} = U_{\theta_m}^T \begin{pmatrix} \nu_e \\ \nu_x \end{pmatrix}$$

$$U_{\theta_m}^T M^2 U_{\theta_m} = \frac{1}{2} (m_1^2 + m_2^2) \begin{pmatrix} -\Delta_m & 0 \\ 0 & \Delta_m \end{pmatrix}$$

$$\Delta_m = \Delta m^2 \sqrt{(a - \cos 2\theta)^2 + \sin^2 2\theta}$$

$$a = 2\sqrt{2} EG_F N_e / \Delta m^2$$

这时有物质中的新的质量本征态 ν_{1m} ， ν_{2m}

而且这组新的质量本征态的组合与物质中的电子数密度相关

检查混合角 θ_m 的情况，也是物质电子数密度依赖

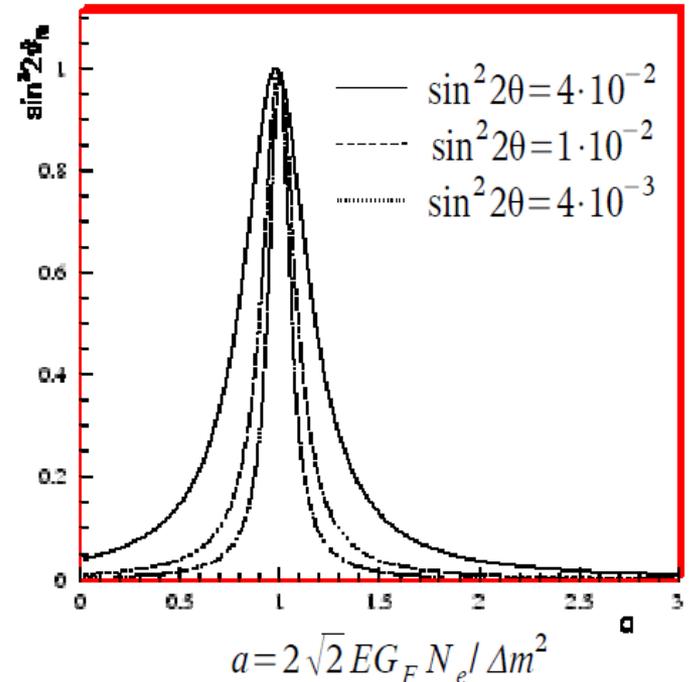
$$U_{\theta_m} = \begin{pmatrix} \cos \theta_m & \sin \theta_m \\ -\sin \theta_m & \cos \theta_m \end{pmatrix} \quad \text{with}$$

$$\sin^2 2\theta_m = \frac{\sin^2 2\theta}{(\cos 2\theta - a)^2 + \sin^2 2\theta}$$

混合角 θ_m 的达到共振极大

$$\cos 2\theta - a = 0 \quad i.e. \quad N_e = \Delta m^2 \frac{\cos 2\theta}{2\sqrt{2}EG_F}$$

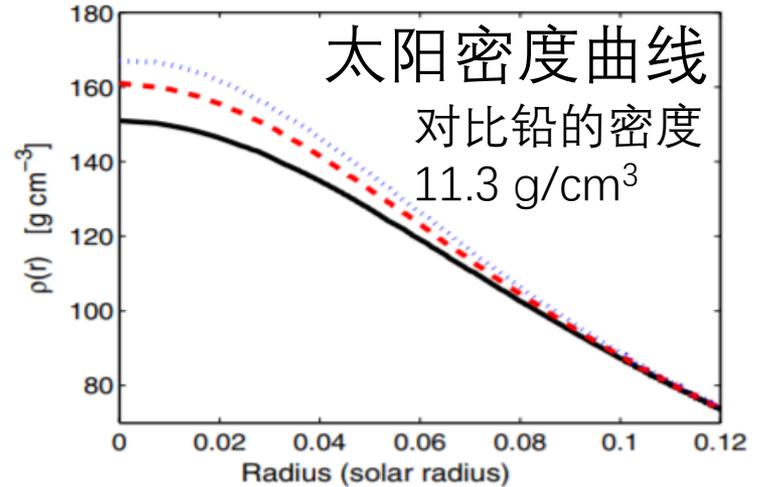
只要物质密度足够大，例如太阳，即使中微子在真空中没有混合，也会由于物质效应导致中微子味道发生转换
目前太阳中微子振荡的解释，需要非零的真空混合角以及物质效应



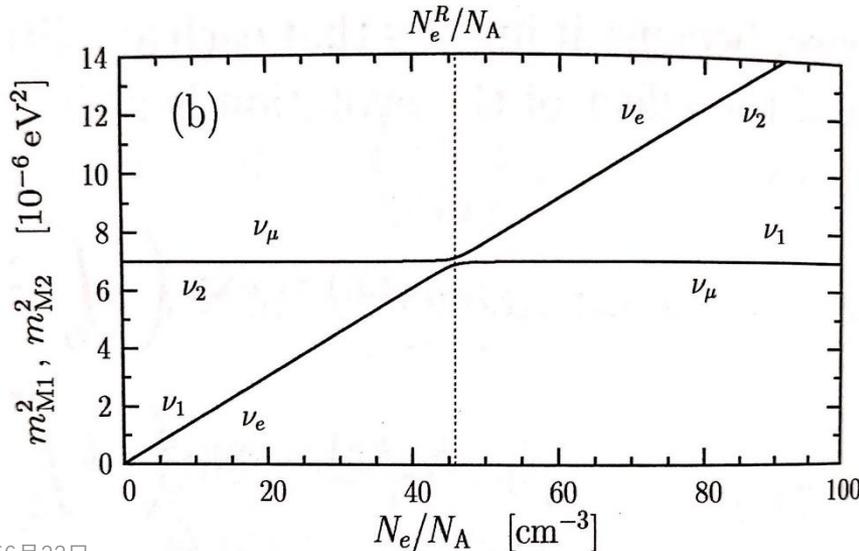
绝热近似

非常数物质电子数密度

M^2 的对角化随着位置不断变化
 在物质中的质量本征态也在
 随着位置在不断变化

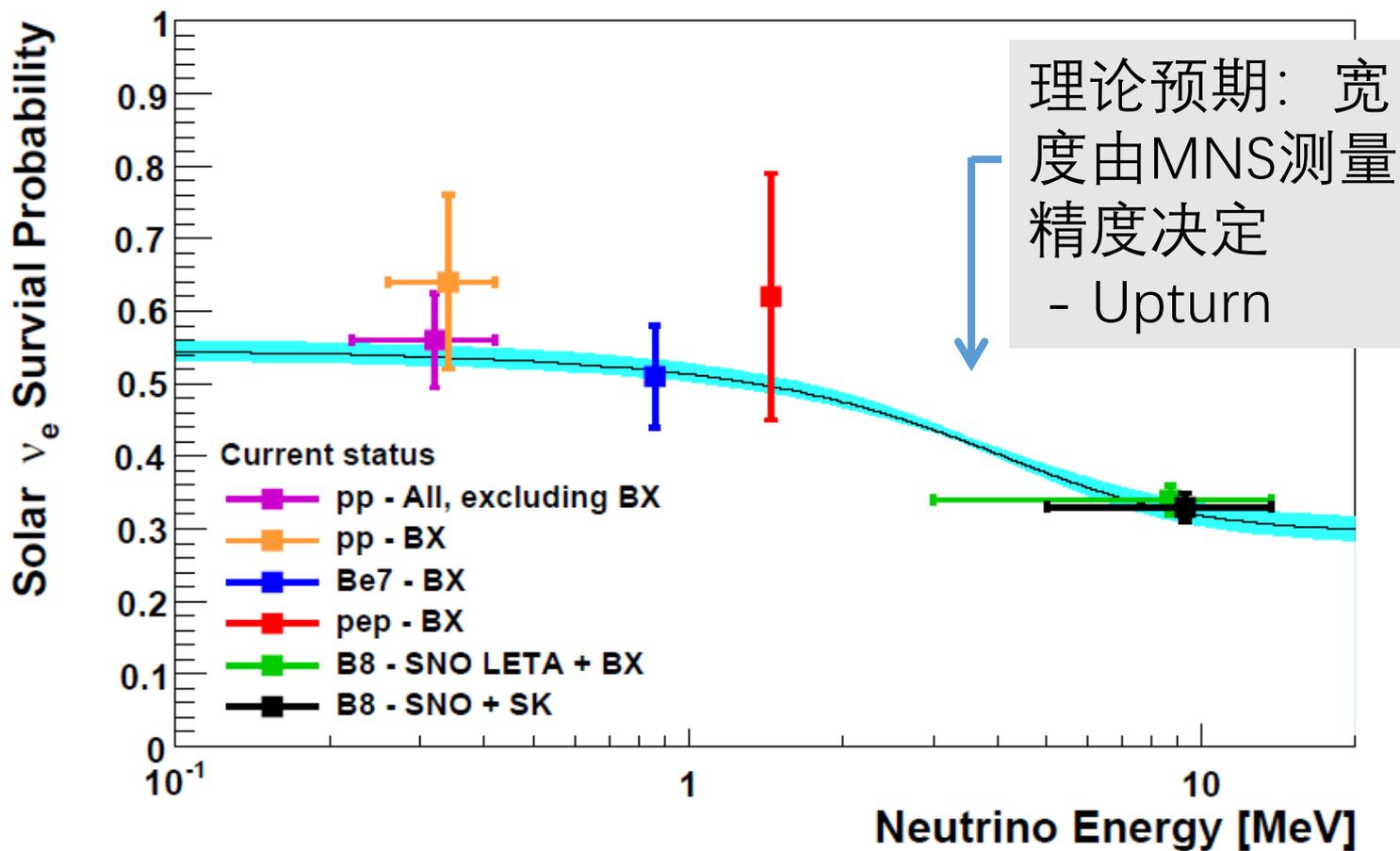


引入绝热近似：密度变化足够缓慢，以至于密度的改变量不足以引起质量本征态的显著变化（略去数学推导）



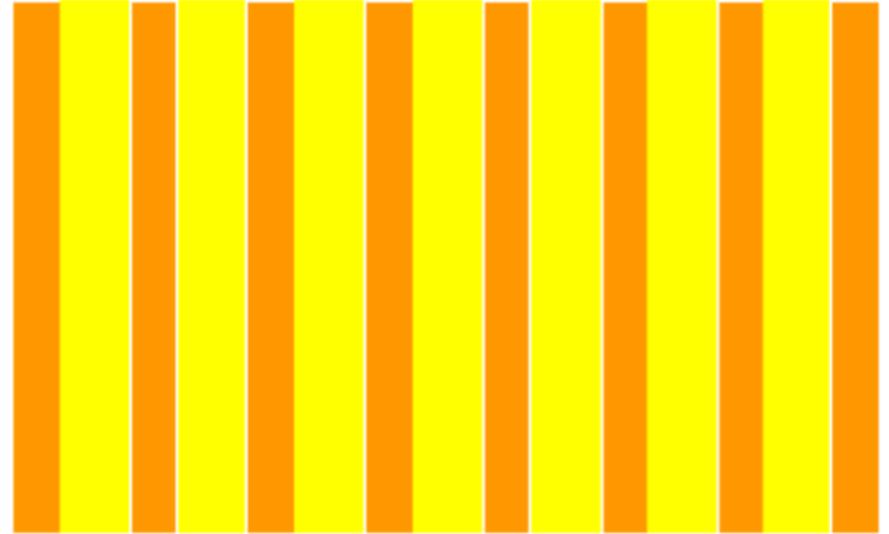
质量本征态的组分平滑的从高密度物质过度到真空状态

太阳电子中微子的存活概率曲线

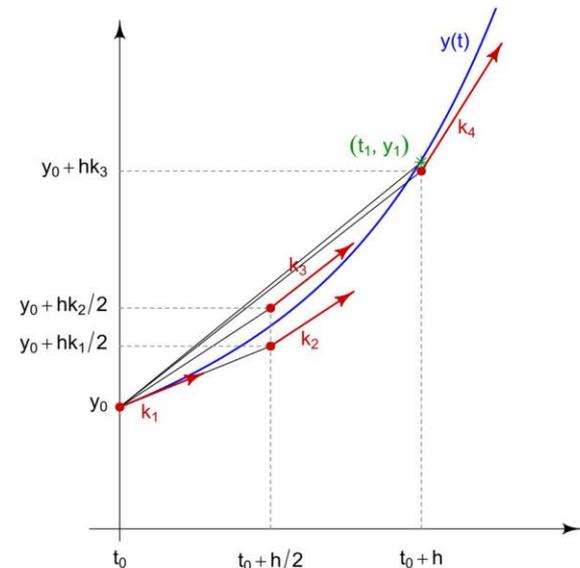


处理非绝热情况，物质中的数值计算方法

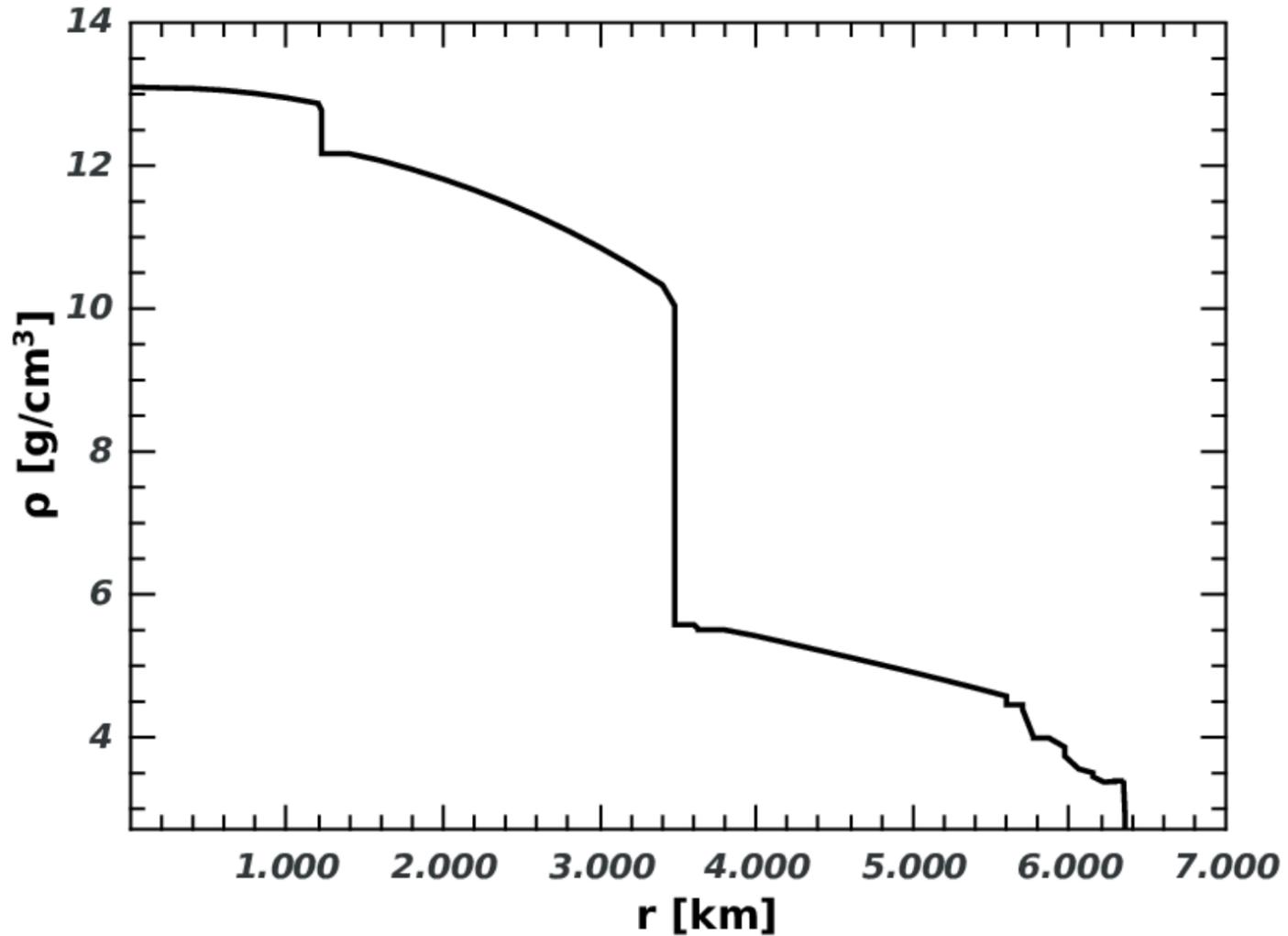
多层方法：将介质分割成多个匀质的薄层，每层中，分别计算各自的物质中的质量本征态



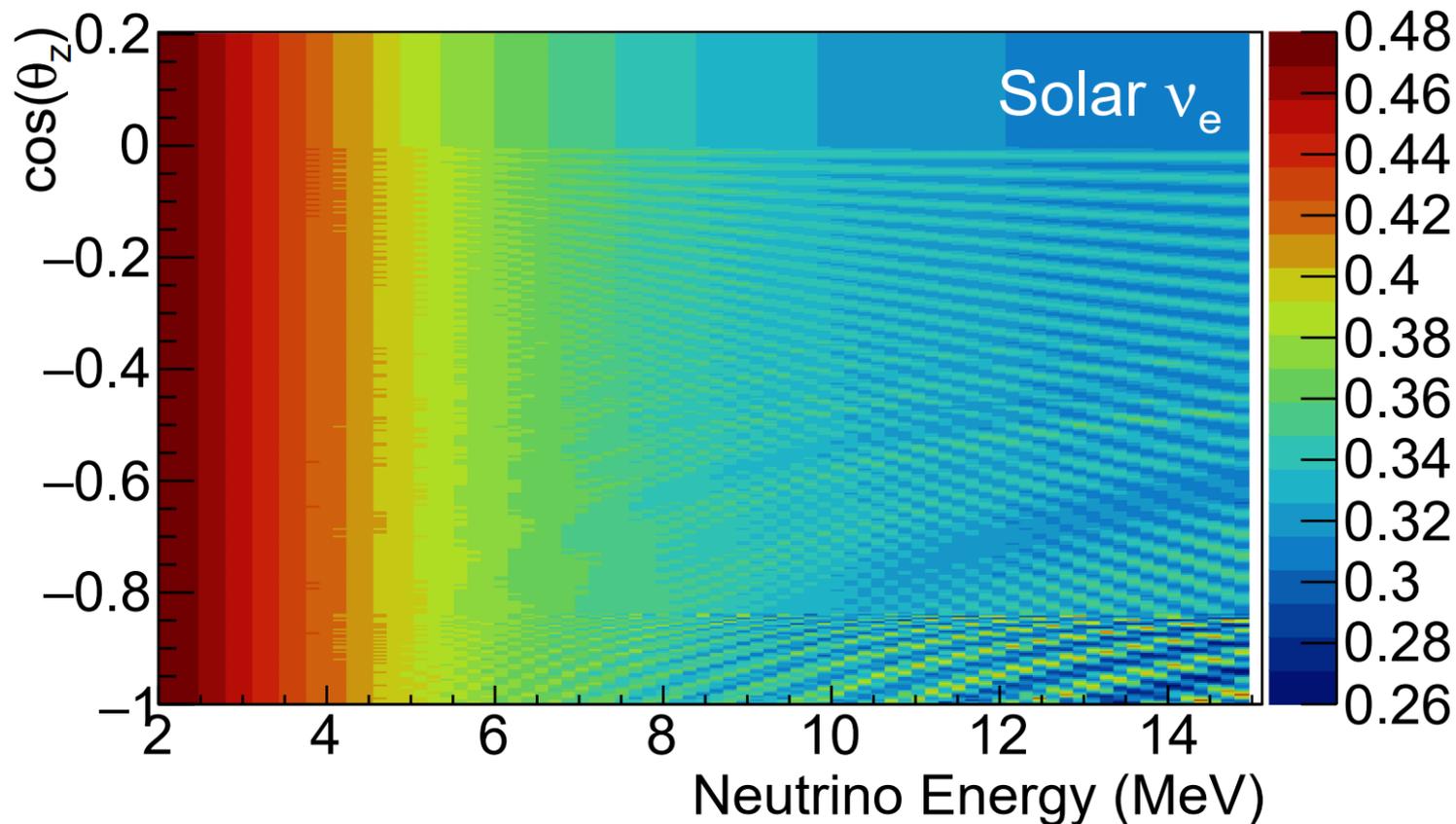
微分方程组的数值解法，例：龙格库塔法(Runge-Kutta)求解常微分方程



地球密度结果, PREM模型



地球效应，继续调制太阳中微子存活概率



中微子的振荡概率会被继续调制10%左右

4. 太阳中微子的探测方法

中微子的基本性质

质量 < 1 eV (electron 0.5 MeV)

电荷 = 0 (electron +/- 1)

自旋 1/2

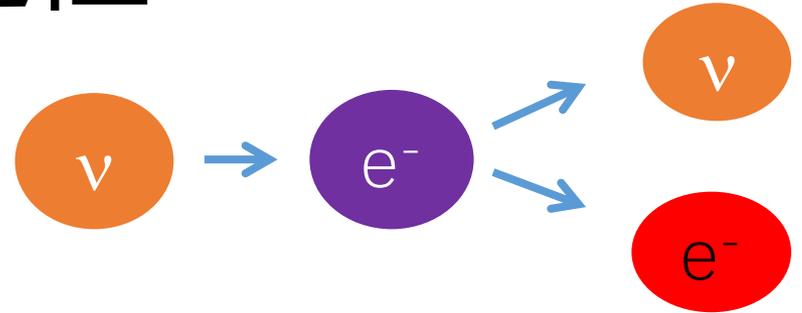
Dirac还是Majorana?

只参与弱相互作用

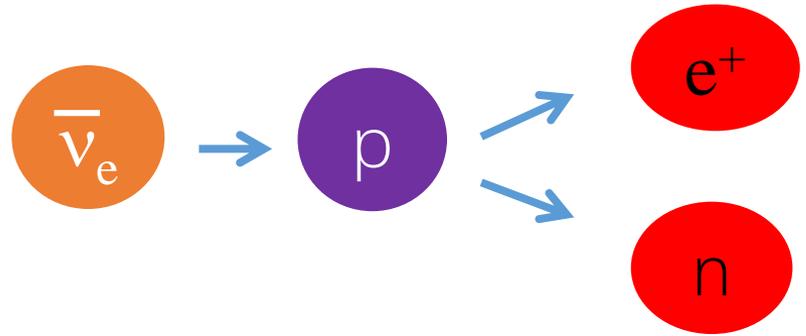
(截面在 10^{-38} - 10^{-42} cm²左右)

低能中微子探测过程

例1、中微子电子散射



例2、反β衰变



例3、中微子中性流散射 (NC) ， 例： $\nu + d \rightarrow p + n + \nu$

例4、中微子带电流散射 (CC) ， 例： $\nu_e + d \rightarrow p + p + e^-$

总结：探测正电子、电子、中子 $E_{e^\pm} \Rightarrow E_\nu$

中微子探测方案总的思想

1. 一个中微子可以延直径穿过 1×10^8 个地球而不发生任何相互作用
2. 提高中微子通量，例如太阳中微子
 $6 \times 10^{10}/\text{s}/\text{cm}^2$
3. 中微子探测器靶质量都在千吨左右

$$N_{\nu}(E) \sim \Phi_{\nu}(E) \times \sigma_{\nu}(E) \times \text{target}$$



低能，与原子核CC作用截面的通用公式

$$\sigma = \left(\pi c^3 \hbar^4\right)^{-1} \left[G_V^2 \langle 1 \rangle^2 + G_A^2 \langle \sigma \rangle^2 \right] P_e W_e F(eZ, W_e)$$

与核的弱相互作用强度

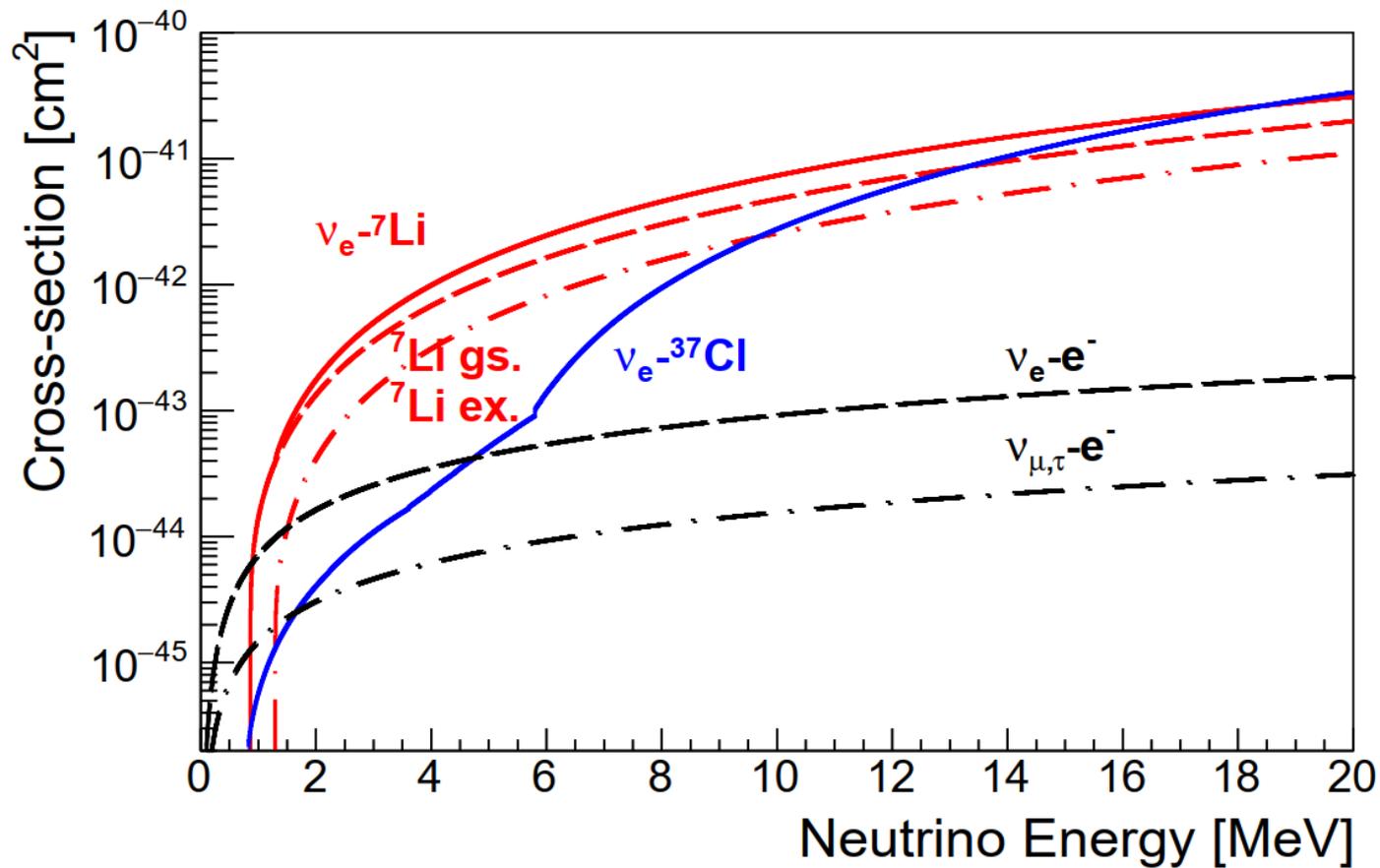
相空间

电荷修正

$$\frac{1}{\left(ft_{1/2}\right)_{I' \rightarrow I}} = \frac{\left[G_V^2 \langle 1 \rangle^2 + G_A^2 \langle \sigma \rangle^2 \right]_{I' \rightarrow I}}{\left[2\pi^3 \ln 2 \left(\hbar/m_e c\right)^7 m_e^2 c^3 \right]}$$

与核的弱相互作用强度与他的逆过程有关联

MeV 低能区间



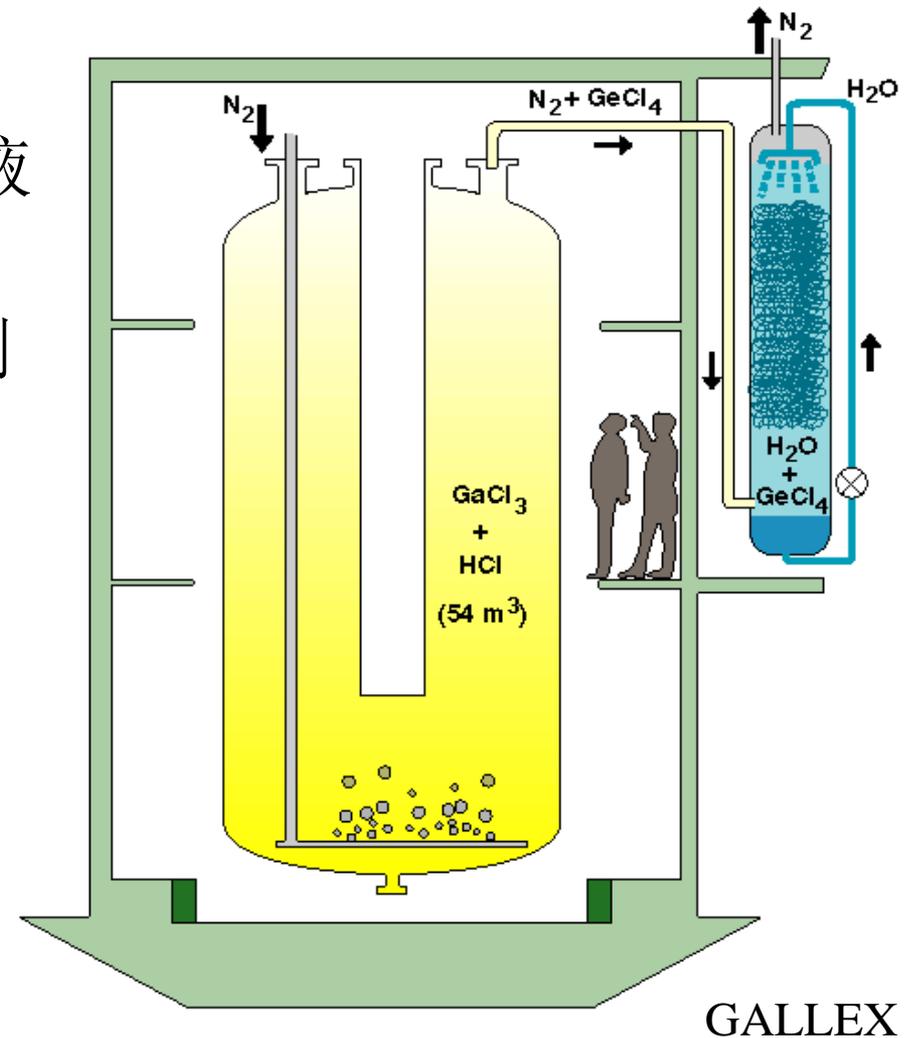
发现太阳中微子缺失，放射性化学方法

- 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 ${}^{37}\text{Ar}$ 的个数。



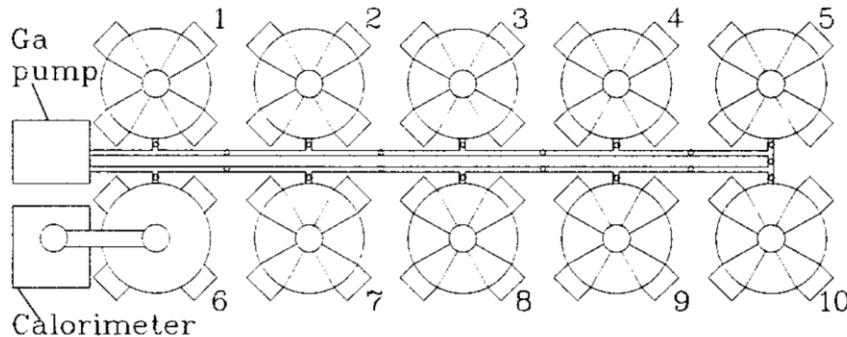
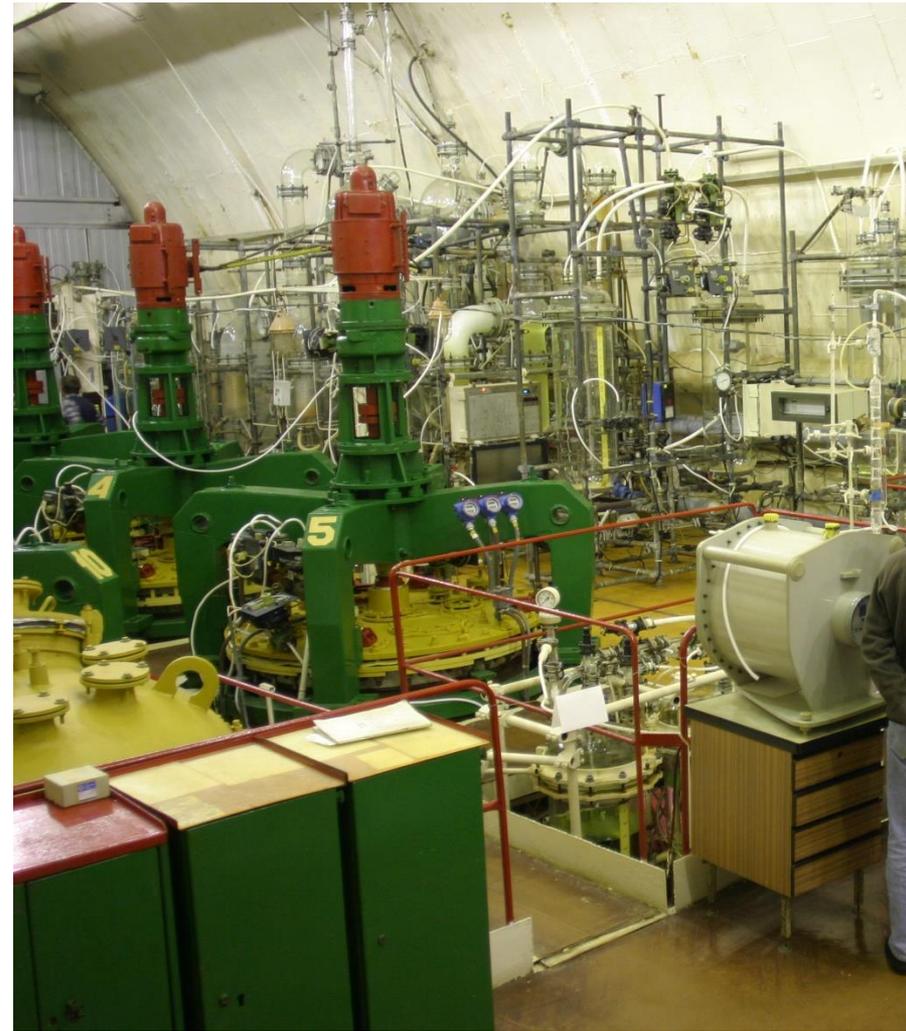
GALLEX/GNO实验

- ▶ $\nu_e + {}^{71}\text{Ga} \rightarrow {}^{71}\text{Ge} + e^-$
 $E_{\text{th}} = 0.233 \text{ MeV}$
- ▶ GALLEX: $\text{GaCl}_3\text{-HCl}$ 溶液形式的30.3 吨gallium
- ▶ Ge被导出，利用正比室测量放射性物质含量



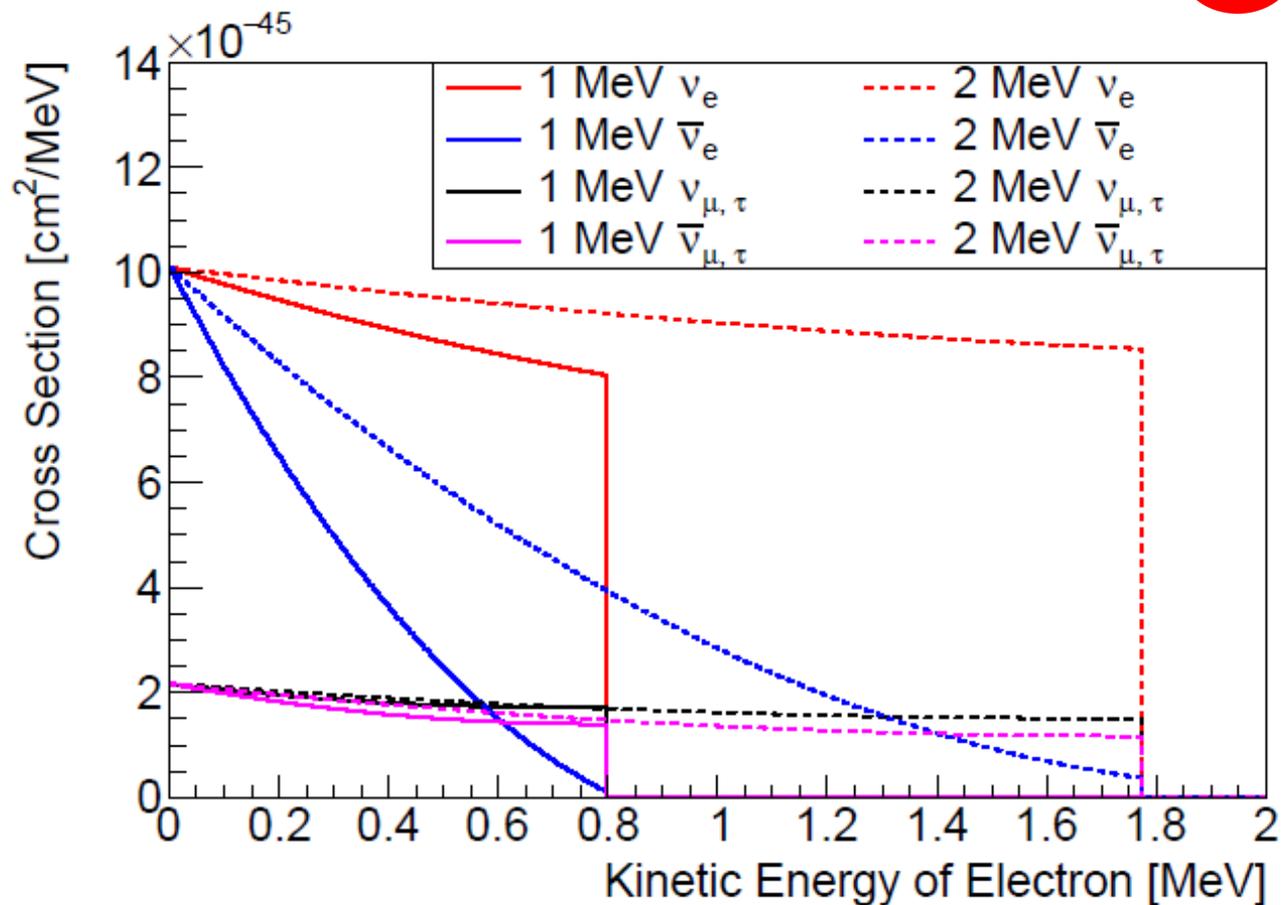
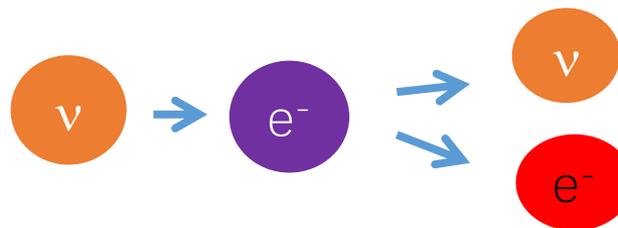
SAGE实验

- ▶ $\nu_e + {}^{71}\text{Ga} \rightarrow {}^{71}\text{Ge} + e^-$
 $E_{\text{th}} = 0.233 \text{ MeV}$
- ▶ SAGE: 50吨Ga金属(加热成液体状)
- ▶ Ge被导出, 利用正比室测量放射性物质含量



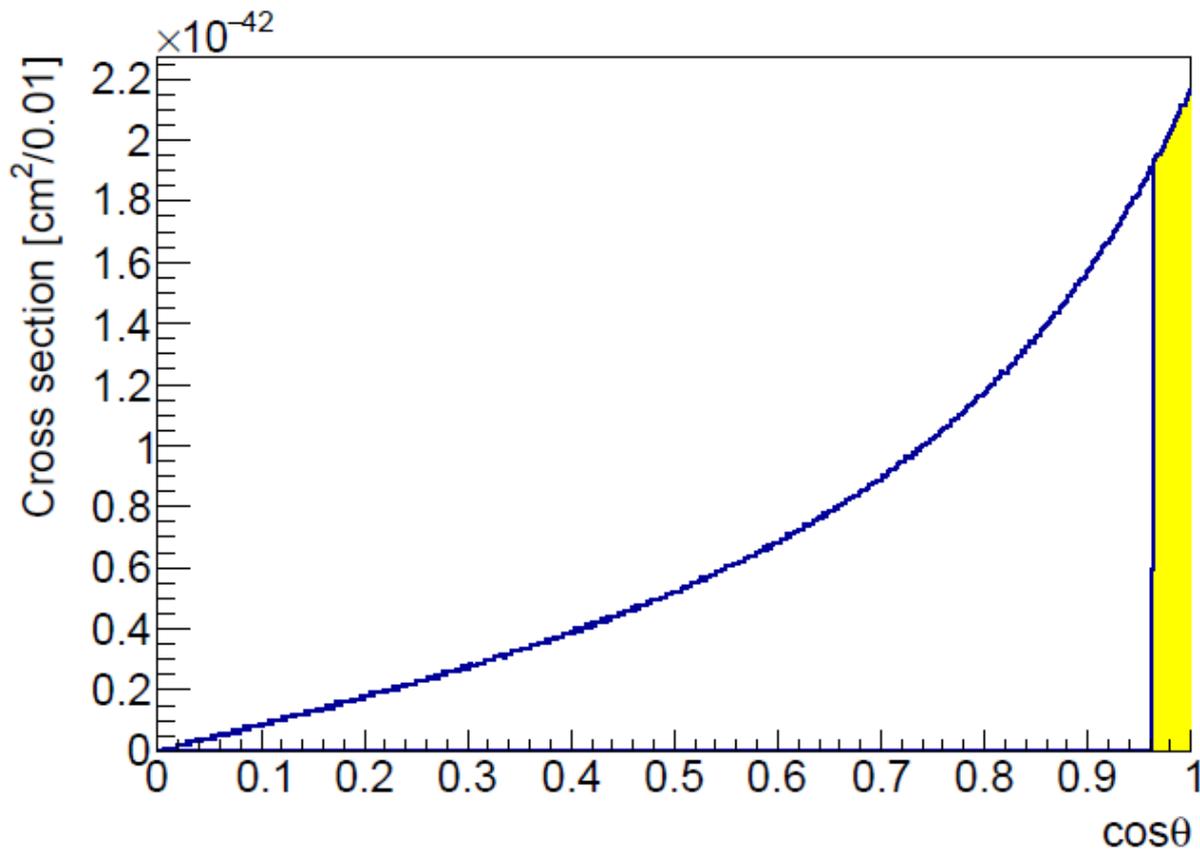
利用与电子的散射探测太阳中微子

中微子电子散射

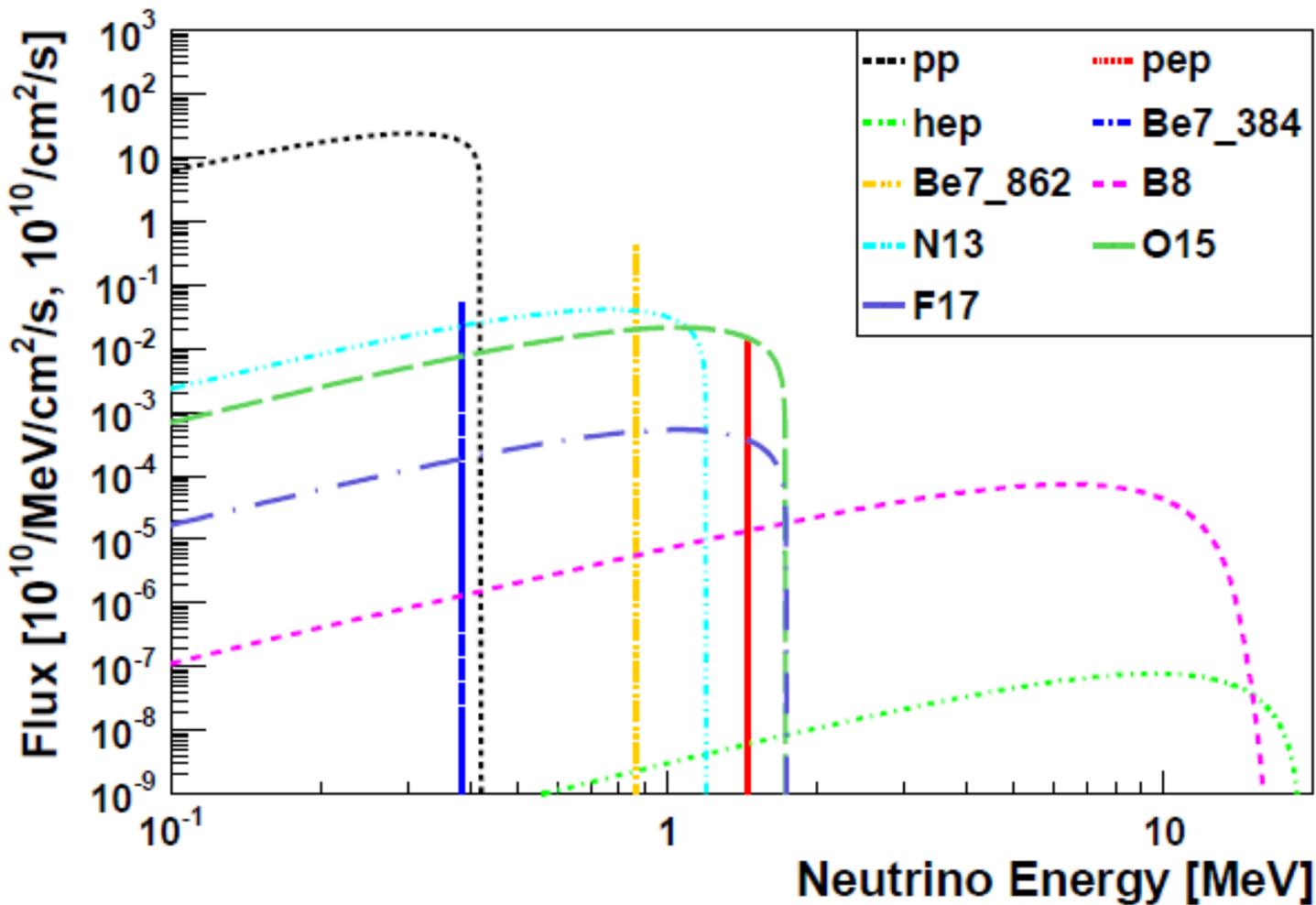


散射电子与太阳方向有强的角关联

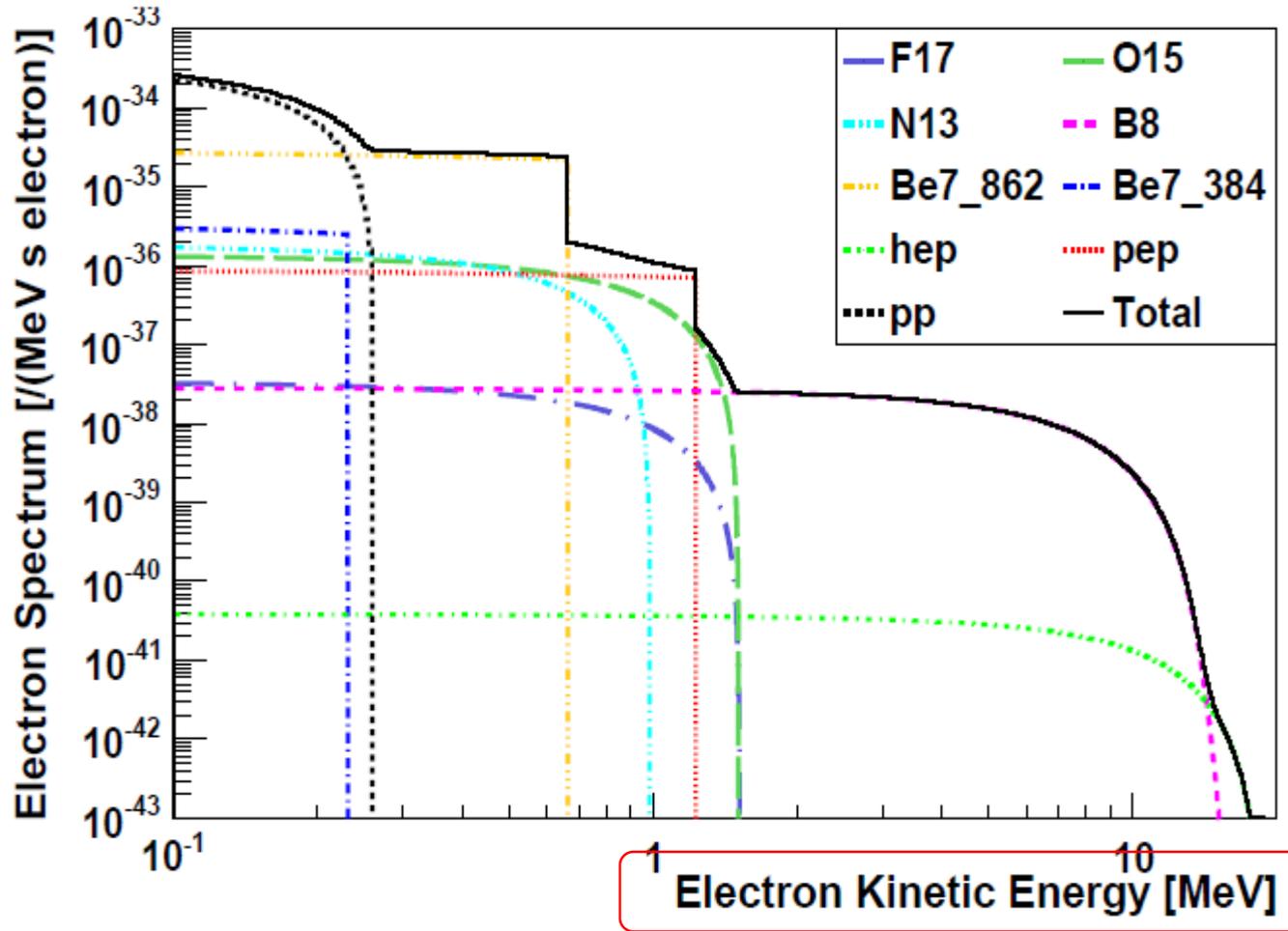
出射电子会倾向于沿着原初中微子方向



太阳中微子能谱

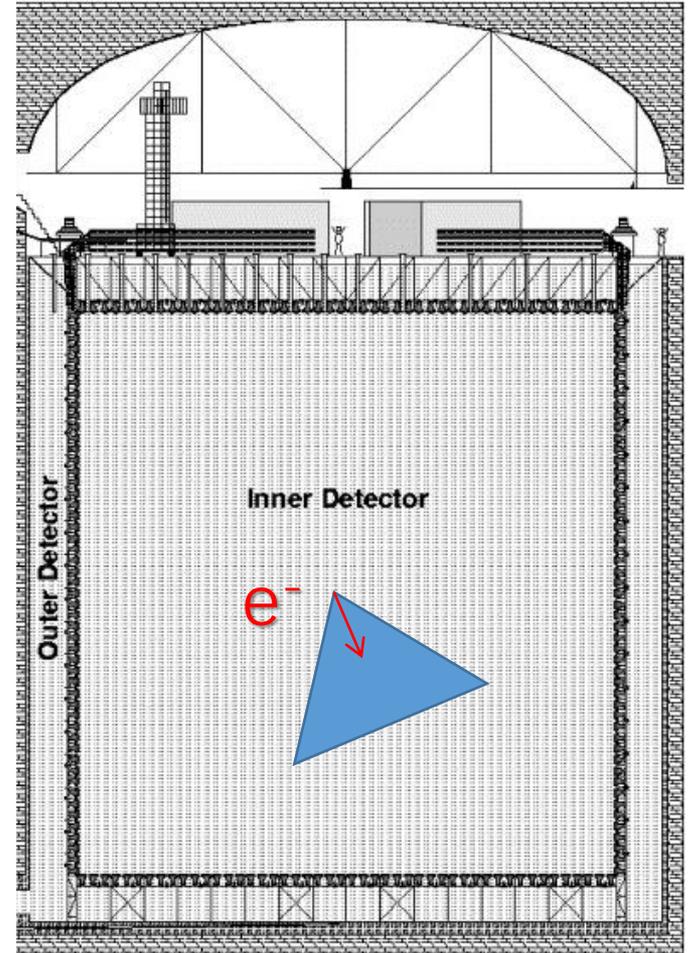


可探测的太阳中微子能谱

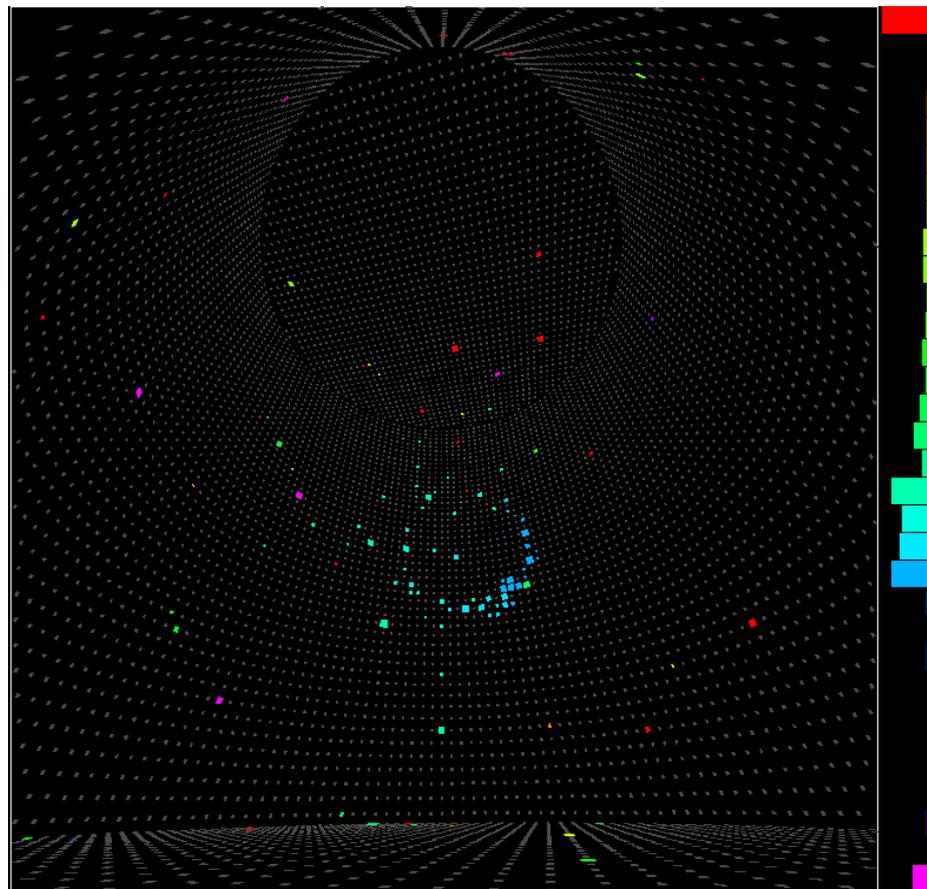
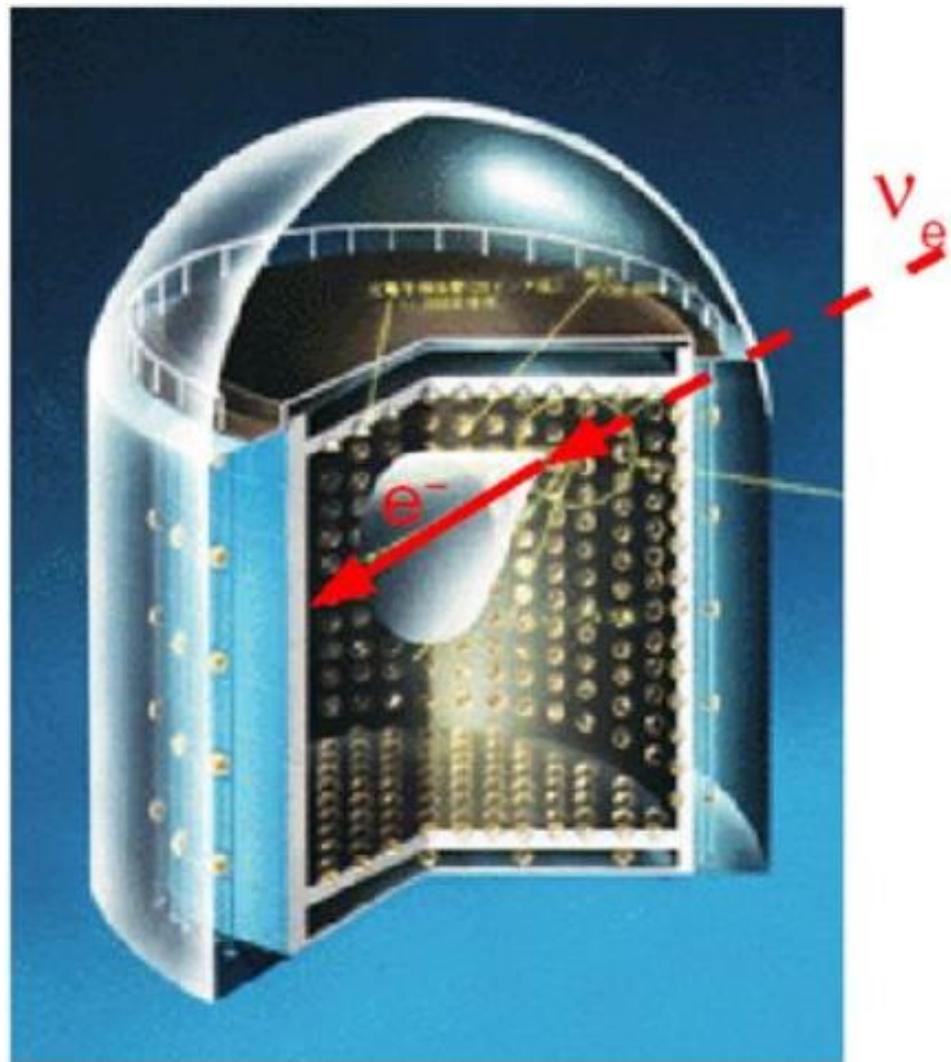


神冈探测太阳中微子

1. 事件 (e^+ , e^-) 的顶点必须在探测器内部
2. 外部必须没有任何反应, 例如环境中子, 宇宙线缪子
3. 探测器:
 1. 要在地下
 2. 要低放射性本底

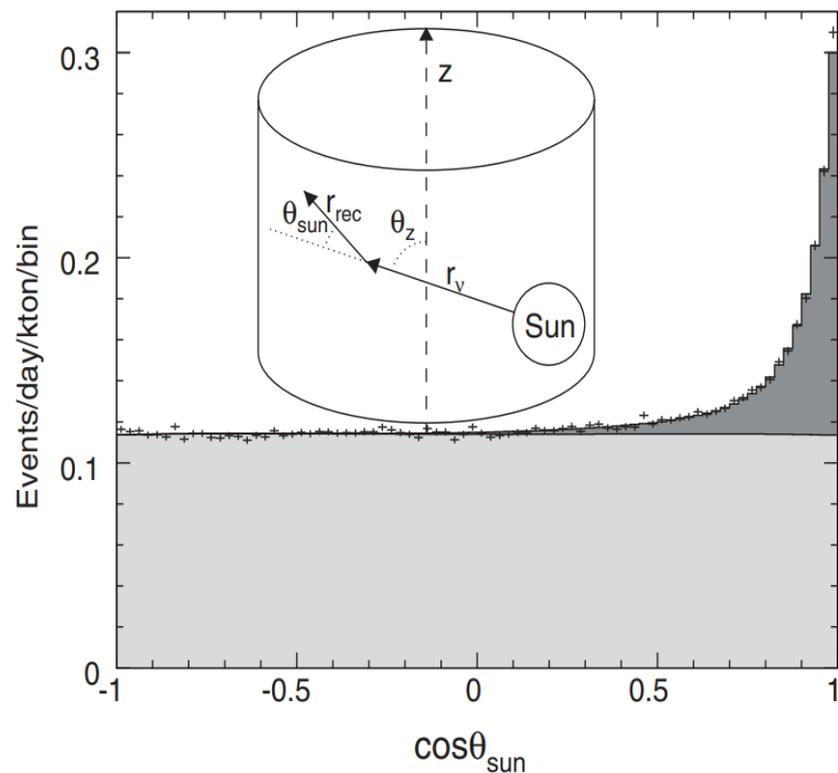
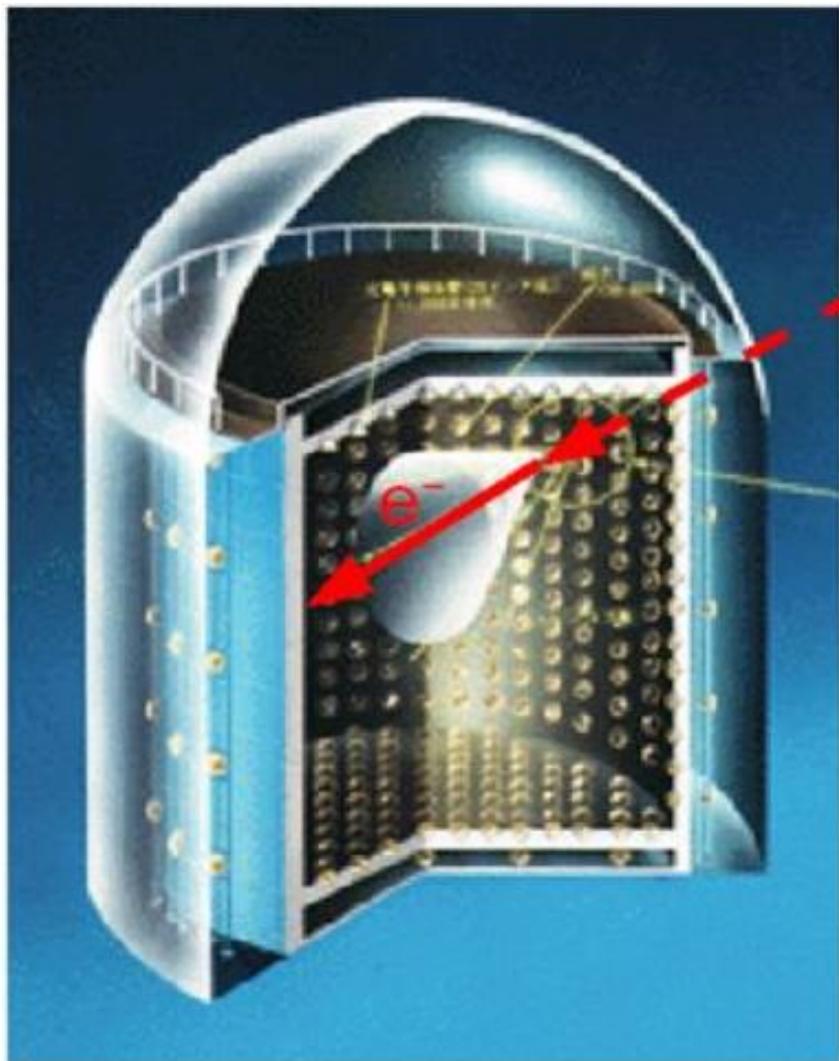


神冈的太阳中微子事件举例



一个太阳中微子事例，
微弱的小环

神冈的太阳中微子事件的鉴别



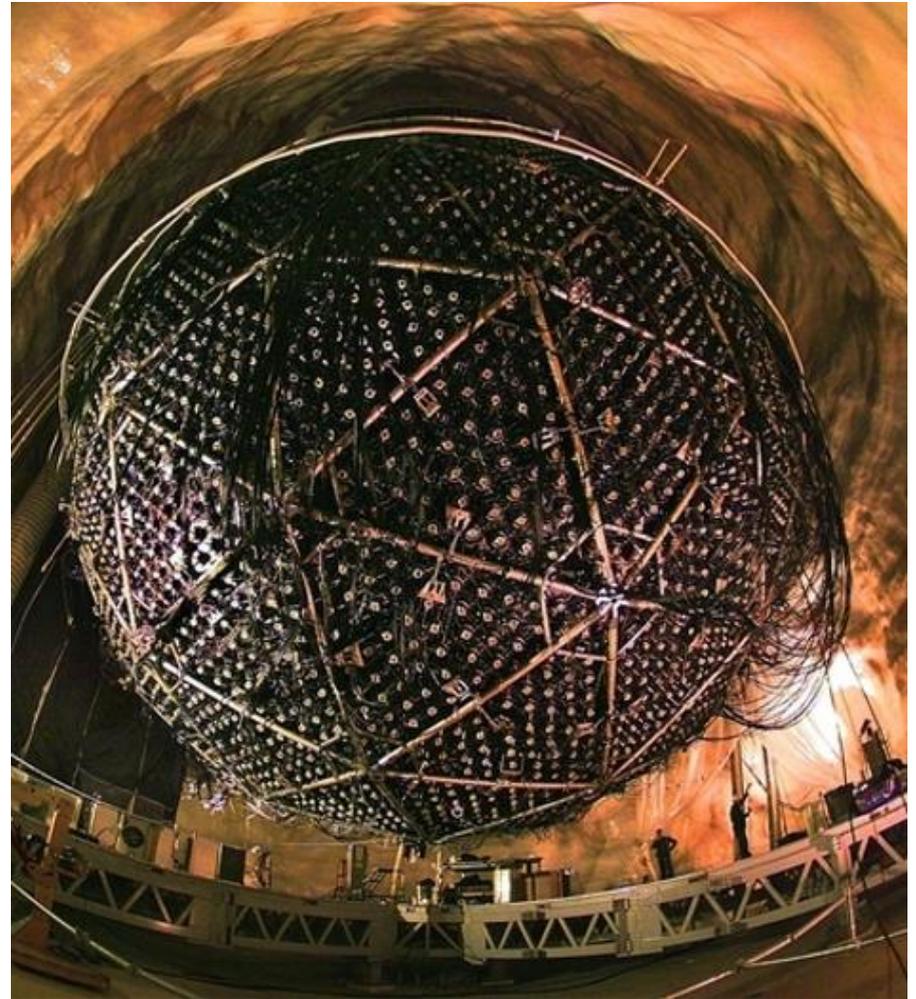
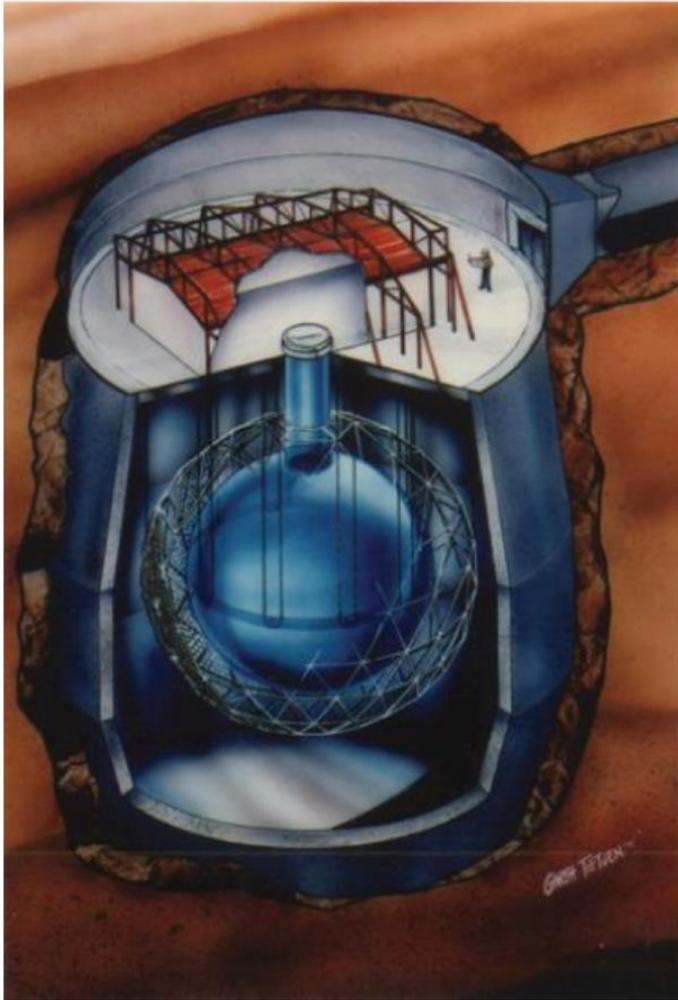
- ▶ 信号展现出了强烈的方向性



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

SNO探测器

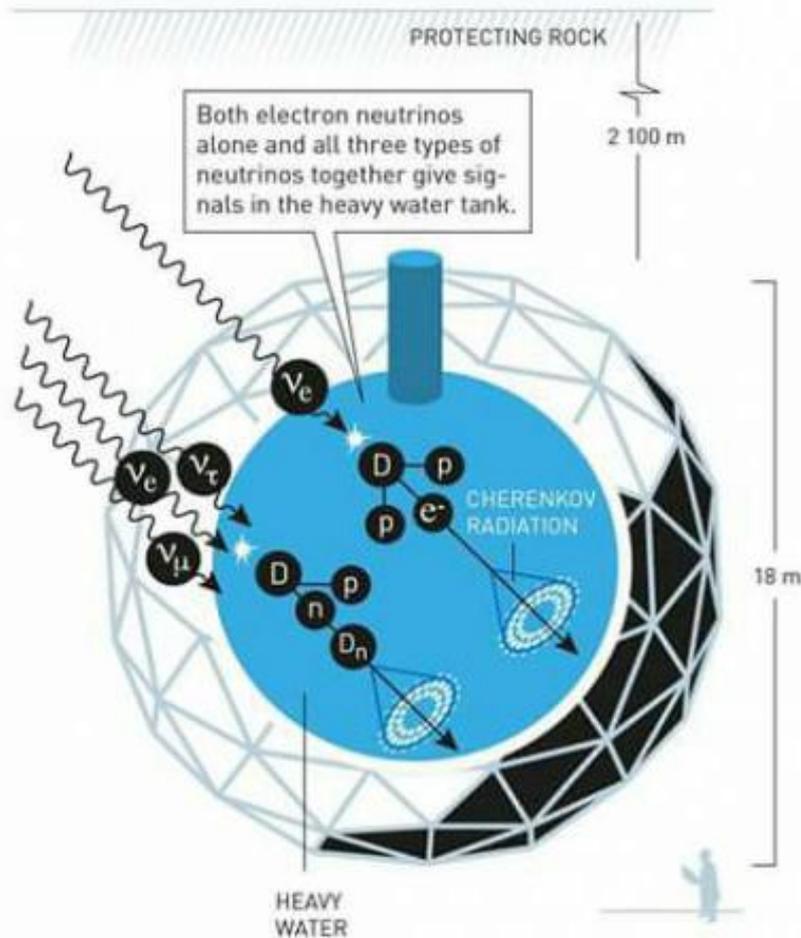


SNOLAB虚拟游览 <http://www.snolab.ca/facility/vr-tour>

太阳中微子实验 – 实时计数

SNO

SUDBURY NEUTRINO OBSERVATORY (SNO)
ONTARIO, CANADA



► 中性流 + 带电流相互作用

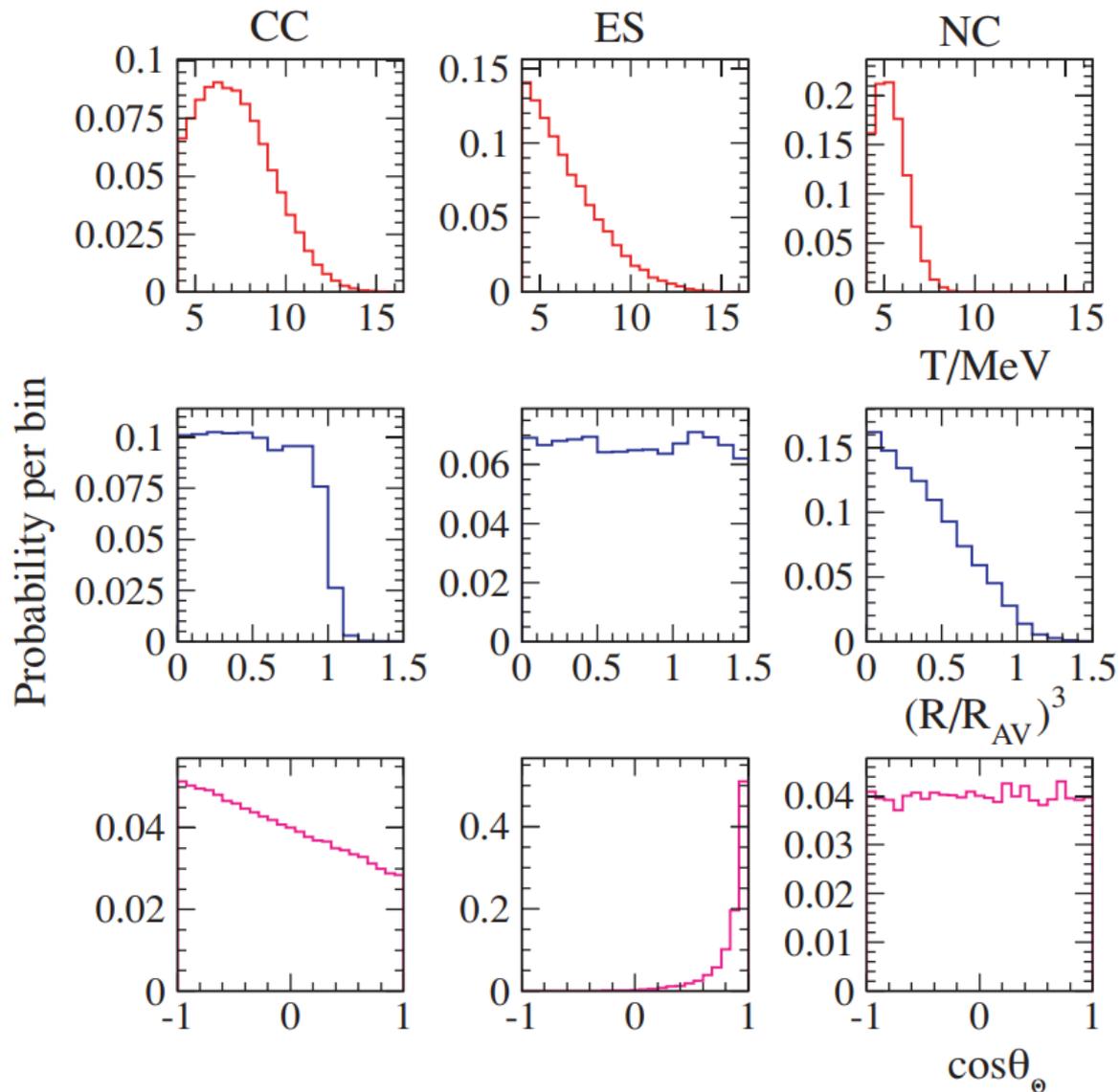
$$\nu_x + e^- \rightarrow \nu_x + e^- \quad (\text{ES}),$$

$$\nu_e + d \rightarrow p + p + e^- \quad (\text{CC}),$$

$$\nu_x + d \rightarrow p + n + \nu_x \quad (\text{NC}).$$



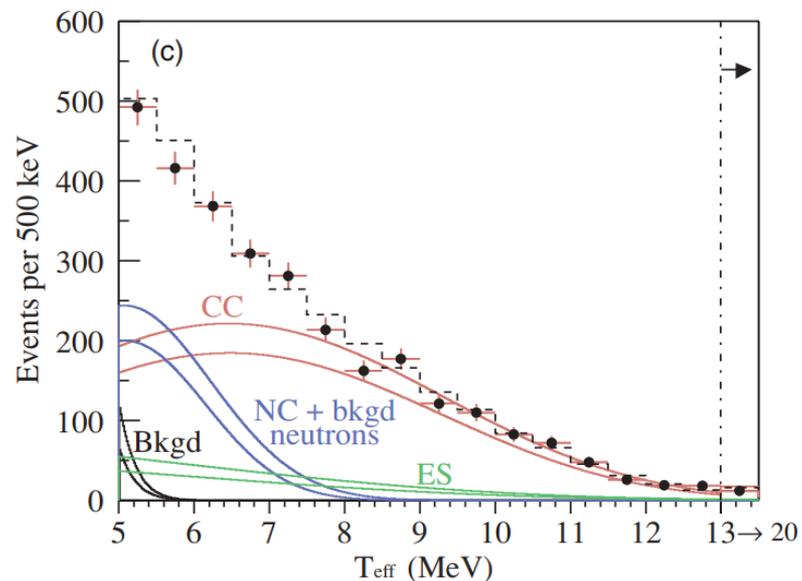
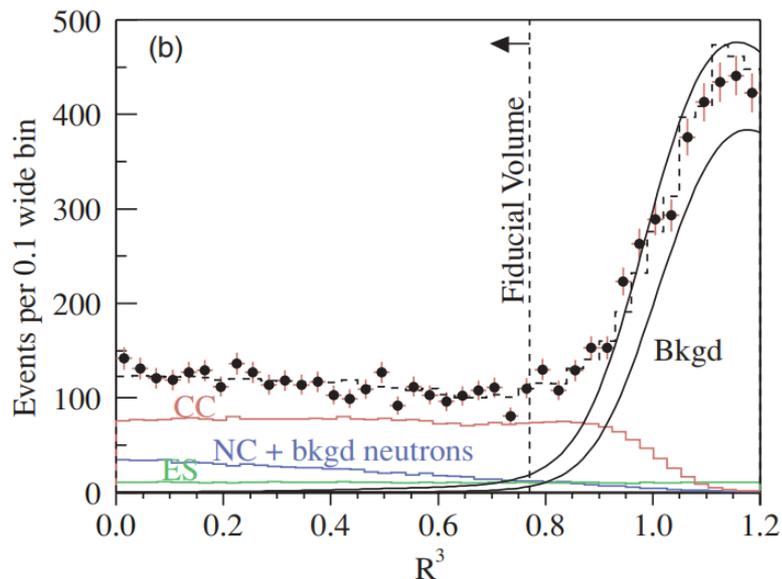
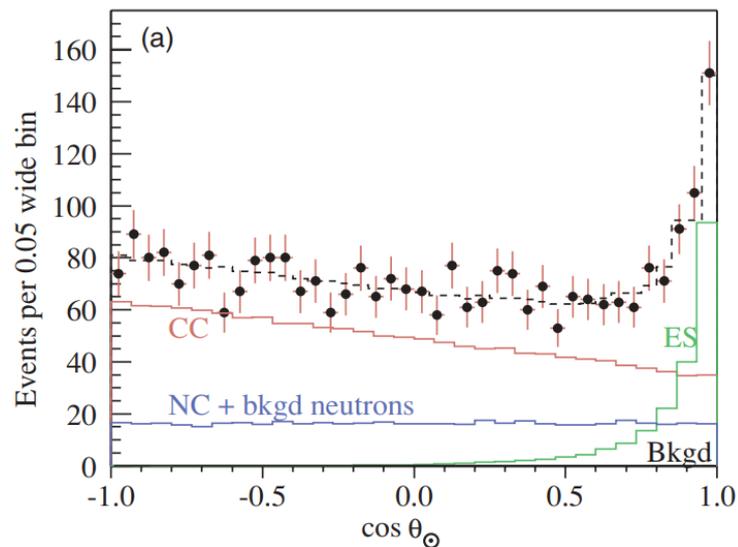
ES, CC和NC事件在SNO实验上的区分





SNO实验上各种事件的鉴别

- ▶ 角度，位置，能量的联合分析
- ▶ 后期不断改进对中子的探测



液体闪烁体, Borexino

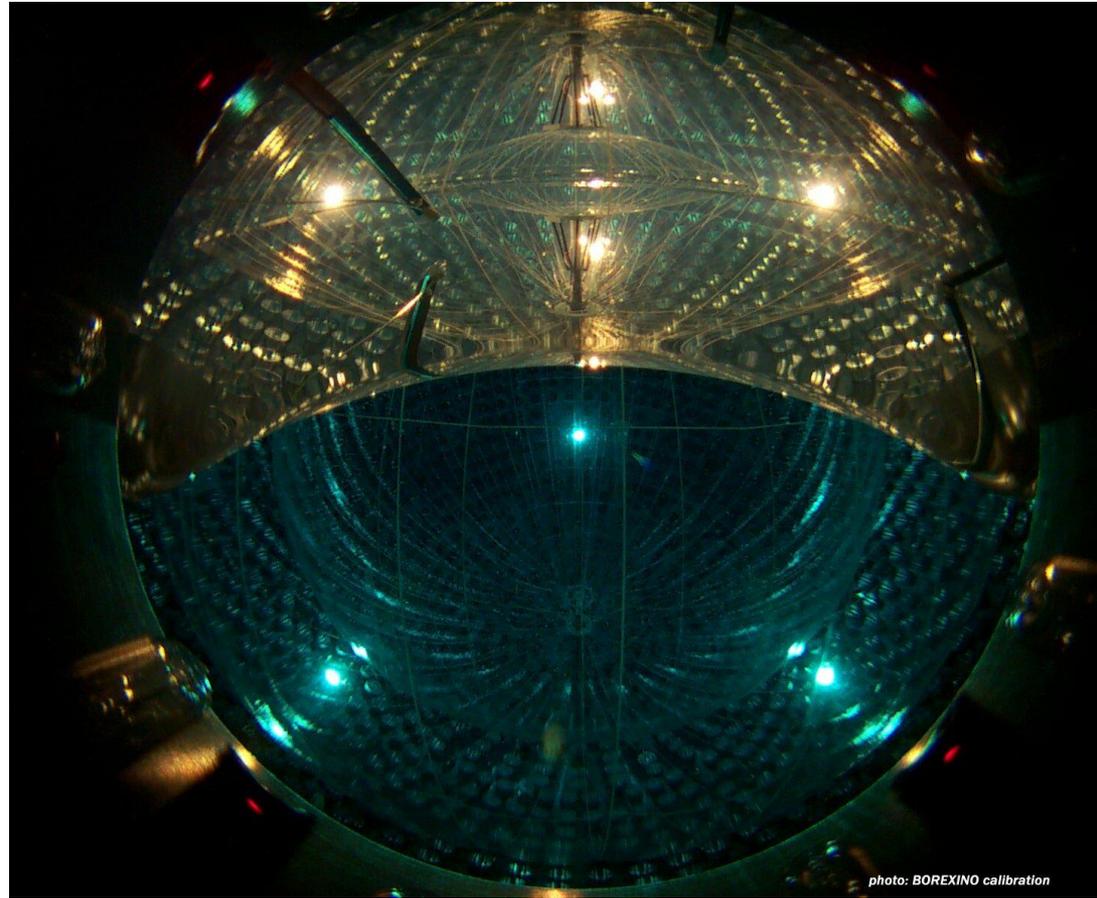
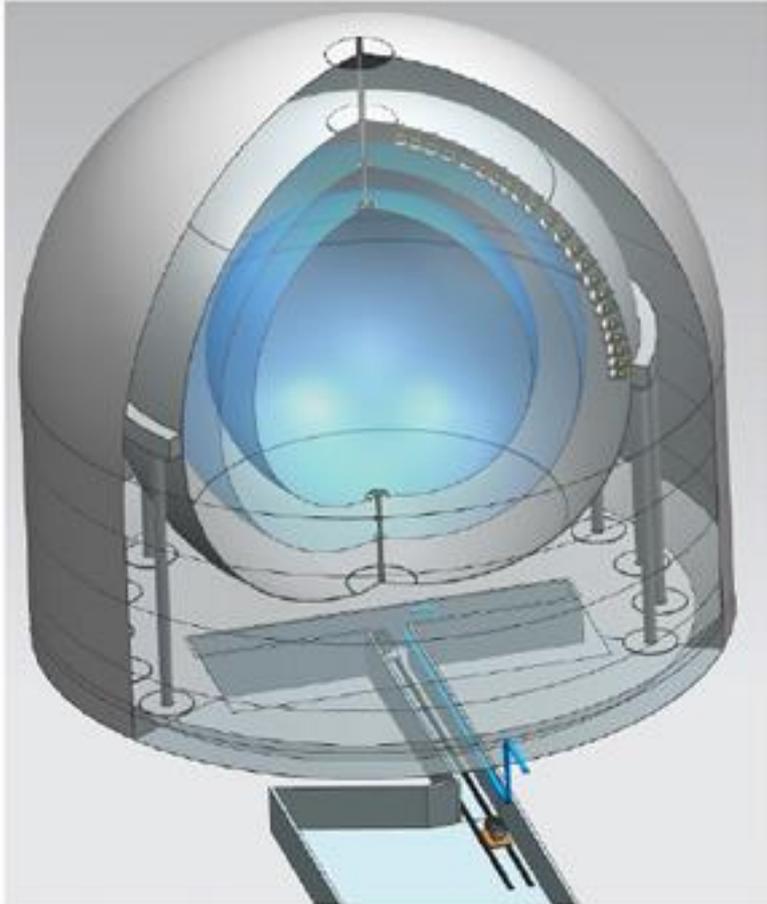


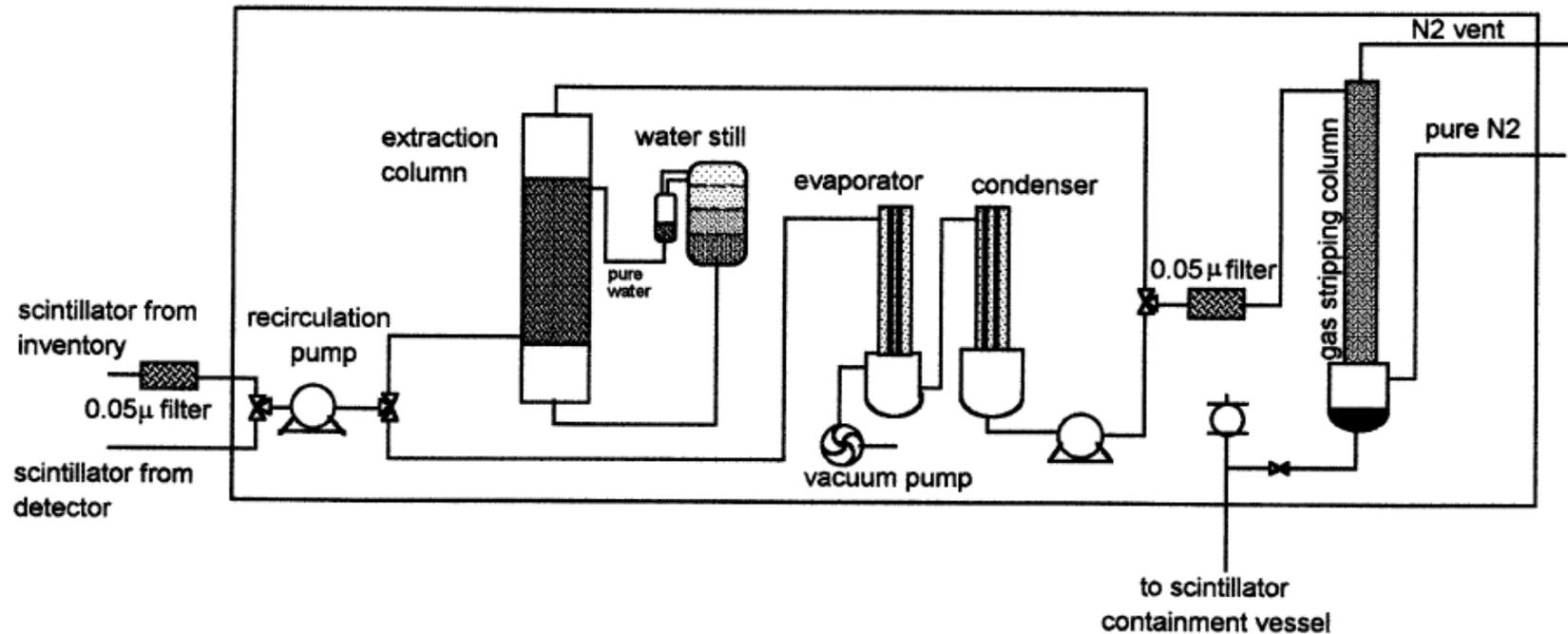
photo: BOREXINO calibration



闪烁光，没有方向性 => 低本底要求

Isotope	Decay Rate [cpd/100 ton]		
^{14}C	$(3.46 \pm 0.09) \times 10^6$	^{238}U	(0.57 ± 0.05)
^{85}Kr	$(30.4 \pm 5.3 \pm 1.5)^{(a)}$	^{222}Rn	(1.72 ± 0.06)
^{40}K	$(31.2 \pm 1.7 \pm 4.7)^{(b)}$	^{210}Bi	$(41.0 \pm 1.5 \pm 2.3)$
^{39}Ar	< 0.42 (95% C.L.)	^{210}Po	$5 \times 10^2 - 8 \times 10^3$
	~ 0.4	^{232}Th	(0.13 ± 0.03)

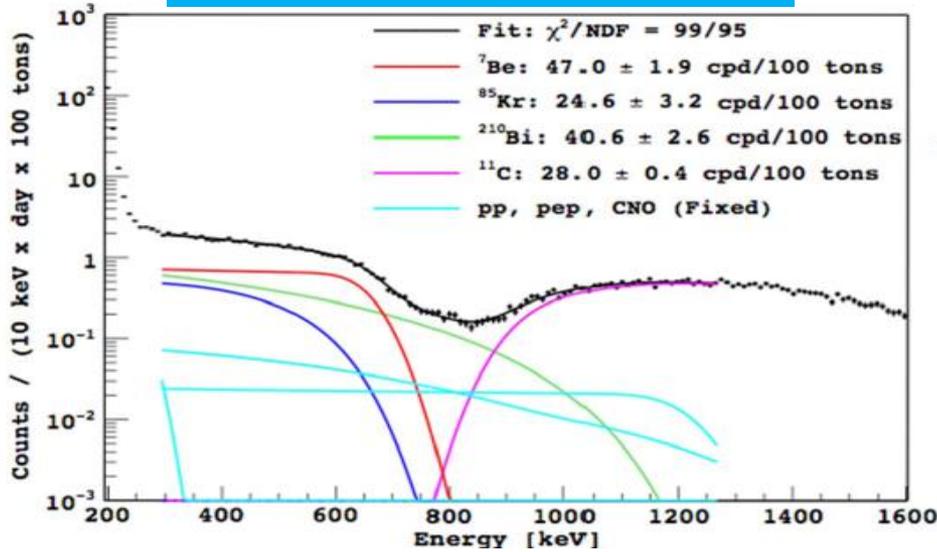
Purification System Clean Room





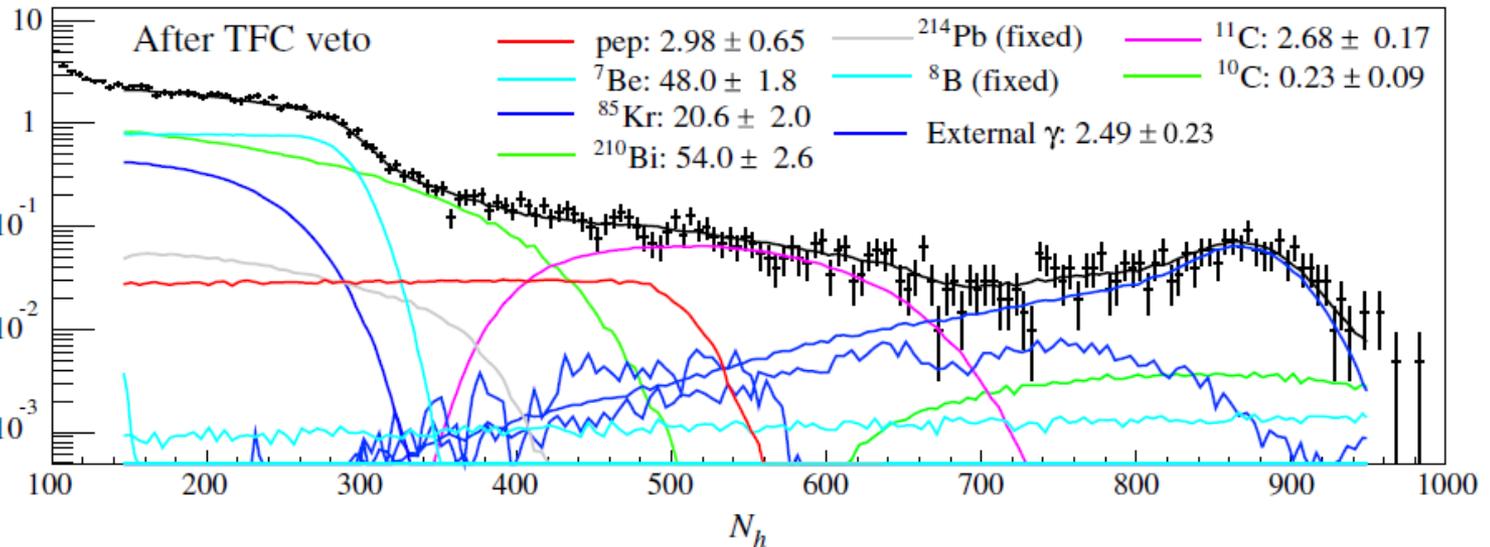
Borexino实验

Be7中微子通量测量



宇宙线导致的¹¹C,
¹⁰C正好是重要的
本底, 其次是外部
光子本底

pep中微子通量测量



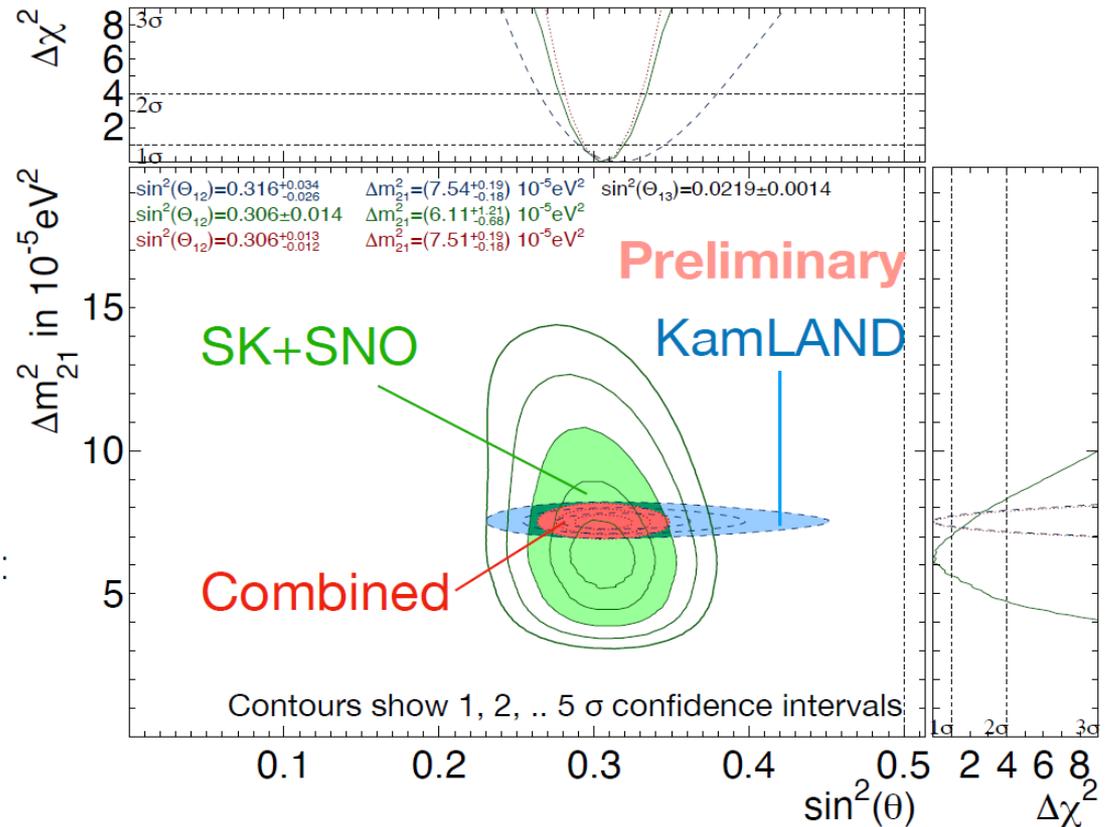
5. 实验进展



太阳混合角的结果

	$\sin^2(\theta_{12})$	Δm_{21}^2 [10^{-5} eV^2]
KamLAND	$0.316^{+0.034}_{-0.026}$	$7.54^{+0.19}_{-0.18}$
SK+SNO	0.306 ± 0.014	$6.11^{+1.21}_{-0.68}$
Combined	$0.306^{+0.013}_{-0.012}$	$7.51^{+0.19}_{-0.18}$

SK+SNO fit disfavors the KamLAND best fit value at $\sim 1.4\sigma$ (was $\sim 2\sigma$)

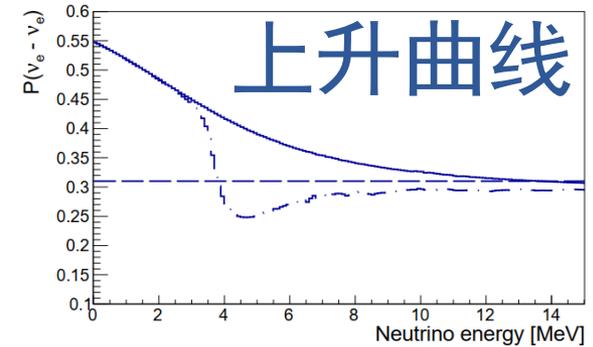
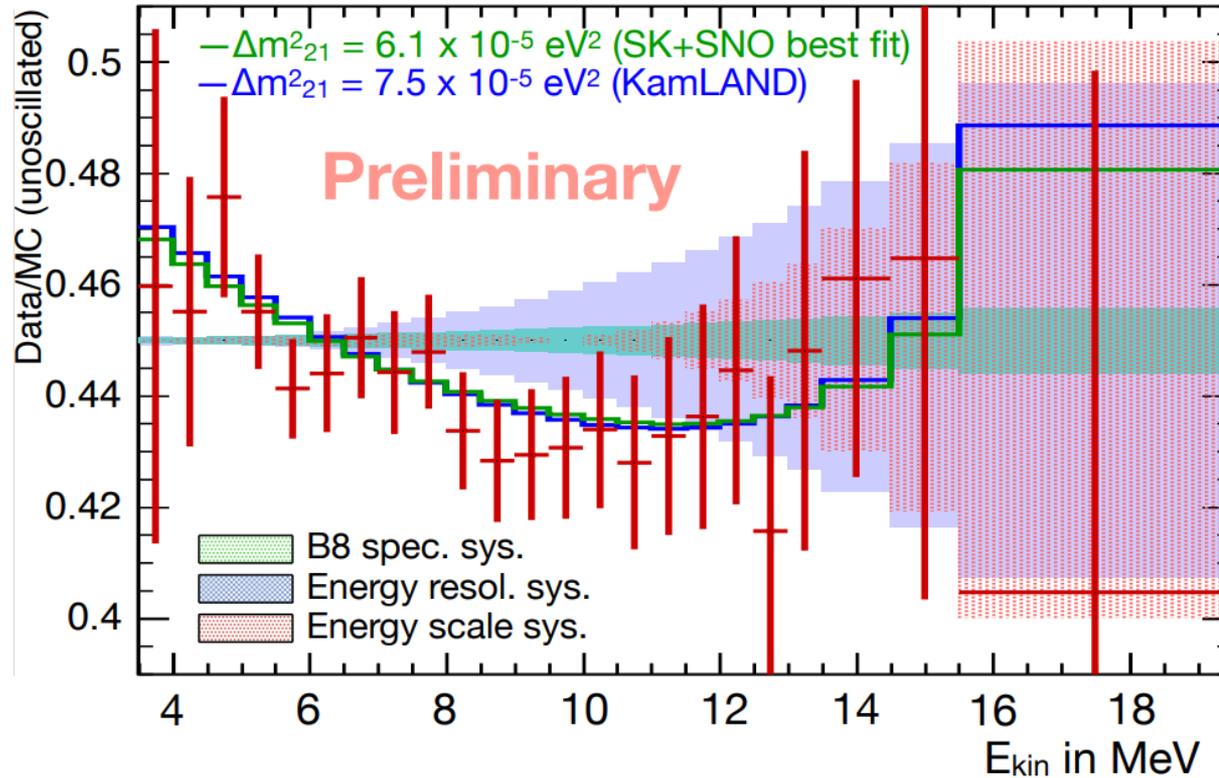


Nakajima@Neutrino2020



太阳中微子存活概率曲线的结果

Energy spectrum fit (SK-IV)

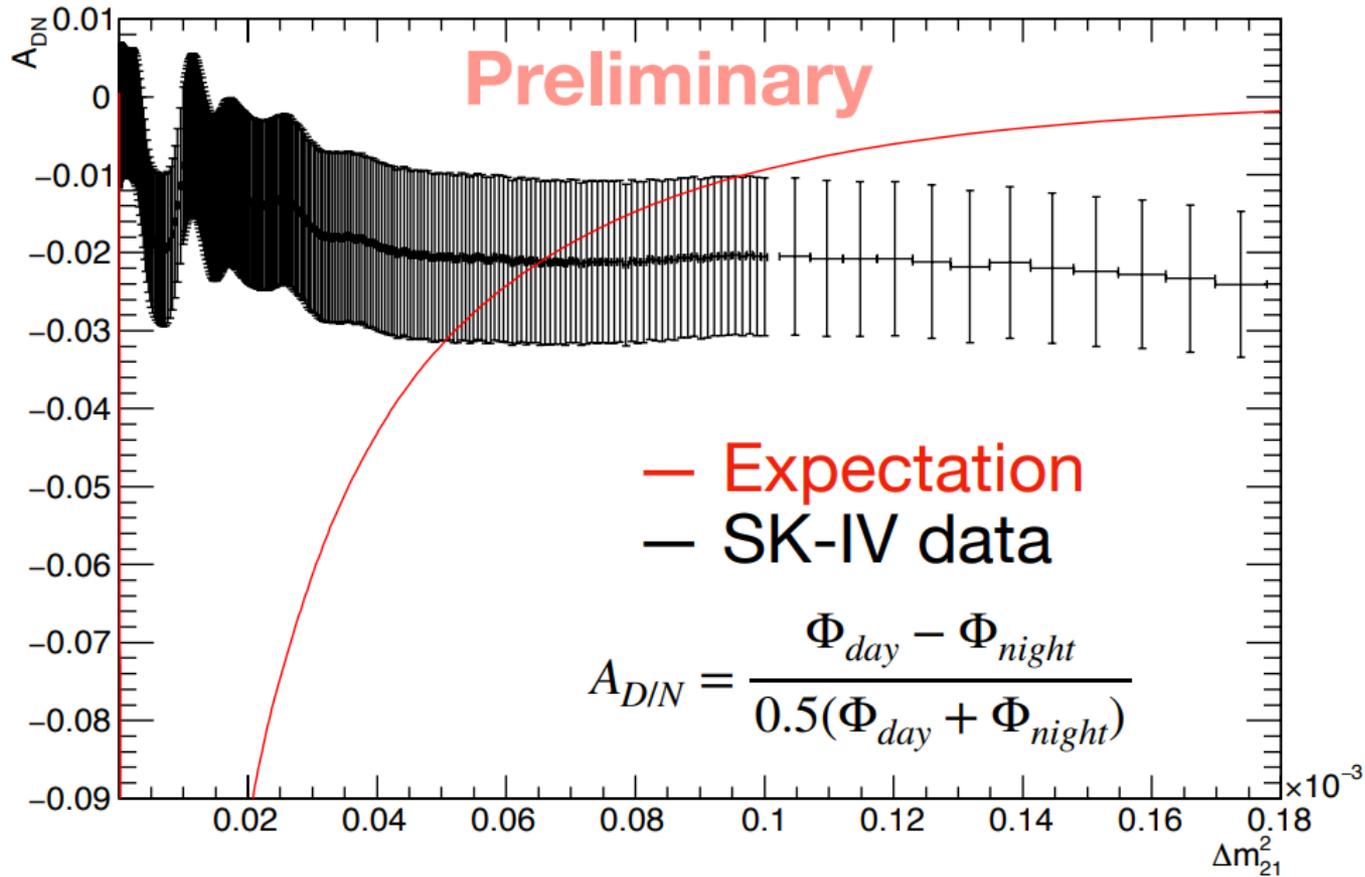


Disfavors flat oscillation probability by $\sim 1\sigma$



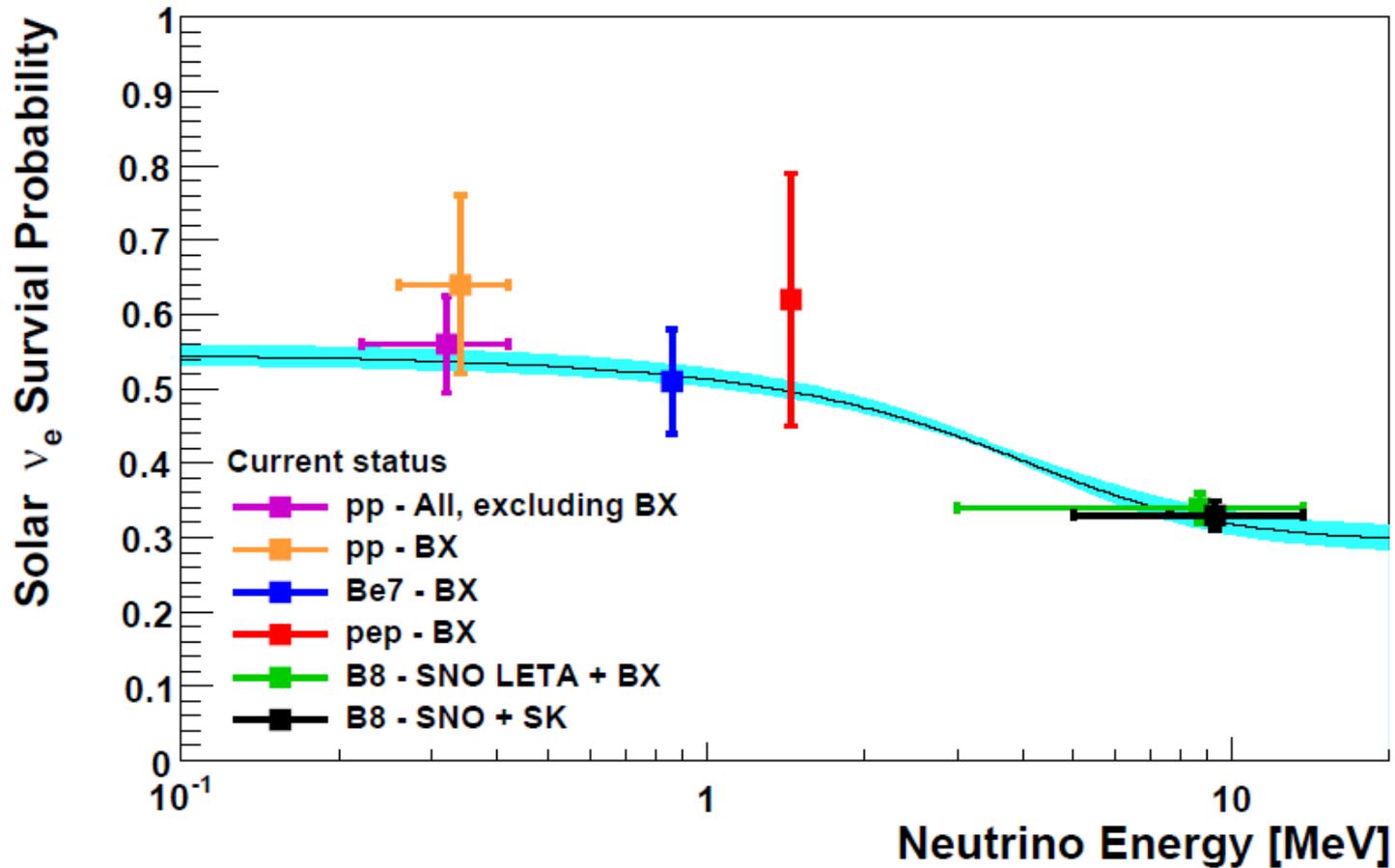
太阳中微子日夜不对称性的结果

Day/Night amplitude fit (SK-IV)



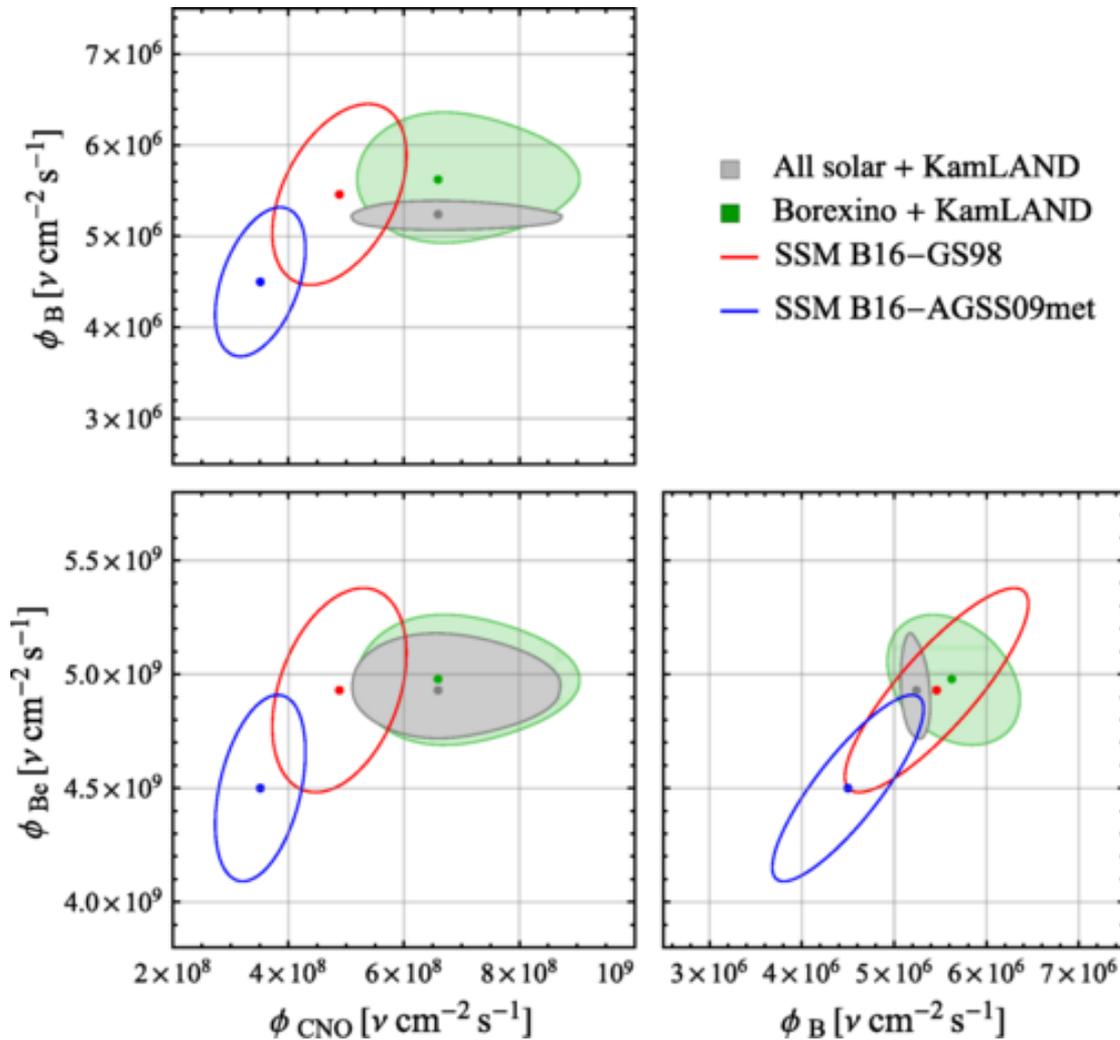
$$A_{DN}^{Fit} = (-2.1 \pm 1.1) \% [3.5 < E < 19.5 \text{ (MeV)}]$$

太阳中微子的通量测量



CNO neutrino flux is $6.6_{-0.9}^{+2.0} \times 10^8 \text{ cm}^{-2} \text{ s}^{-1}$

太阳模型的鉴别



Borexino disfavor at 3.1σ C.L. the “low-metallicity” standard solar model B16-AGSS09met as an alternative to the “high-metallicity” standard solar model B16-GS98

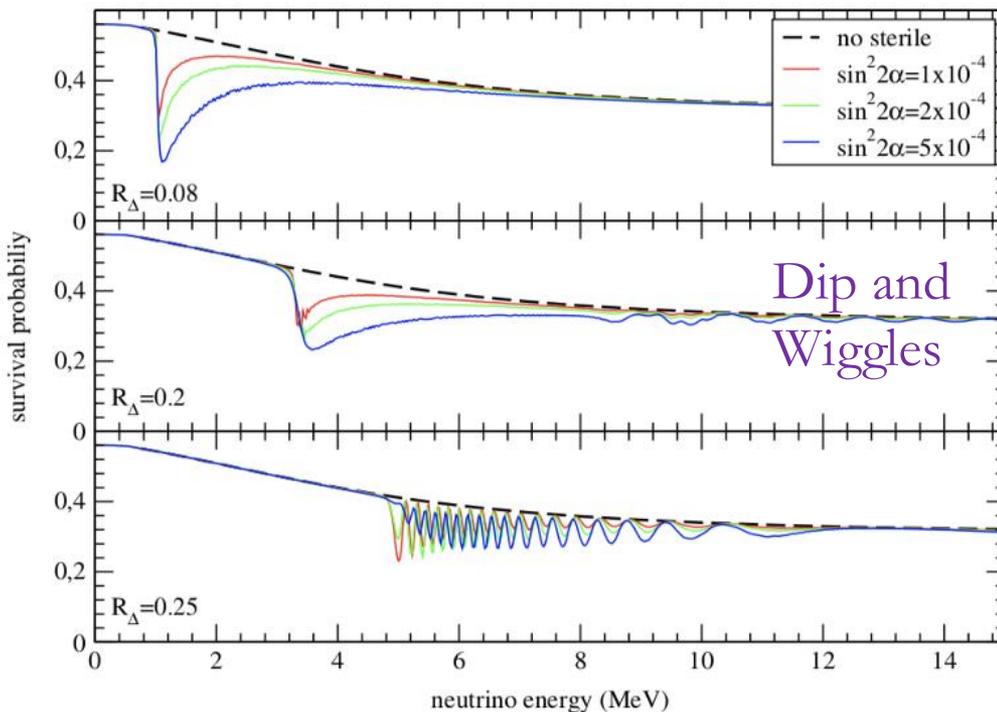
6. 新物理，新技术探索

太阳中微子可能的物理

新物理很有可能发生在这个过渡区。

Light Sterile Neutrino

Holanda & Smirnov 2004, 2011 [6-7]



该参数区间不同于目前已经观测到的反应堆反常，LSND反常等等这些 Δm^2 在 1 eV^2 附近的新物理。

$$R_\Delta \equiv \frac{\Delta m_{01}^2}{\Delta m_{21}^2}, \quad \Delta m_{01}^2 \sim (0.2 - 2) \times 10^{-5} \text{ eV}^2$$

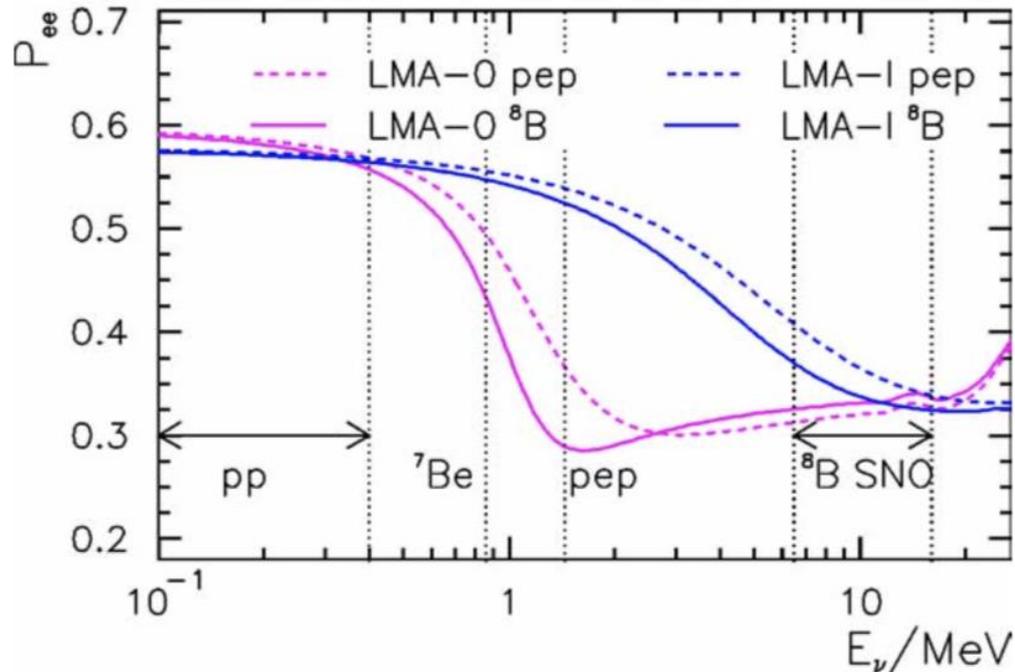
惰性中微子质量在 1-2 本征态之间，这样才能影响到太阳中微子的 1-2 振荡。

太阳中微子可能的物理

新物理很有可能发生在这个过渡区。

Non-standard interactions
(flavour changing NC)

$$H = \frac{1}{2E_\nu} U_{\text{PMNS}} \begin{pmatrix} m_1^2 & & \\ & m_2^2 & \\ & & m_3^2 \end{pmatrix} U_{\text{PMNS}}^\dagger + V_e \begin{pmatrix} 1 + \epsilon_{ee} & \epsilon_{e\mu} & \epsilon_{e\tau} \\ \epsilon_{e\mu}^* & \epsilon_{\mu\mu} & \epsilon_{\mu\tau} \\ \epsilon_{e\tau}^* & \epsilon_{\mu\tau}^* & \epsilon_{\tau\tau} \end{pmatrix}$$



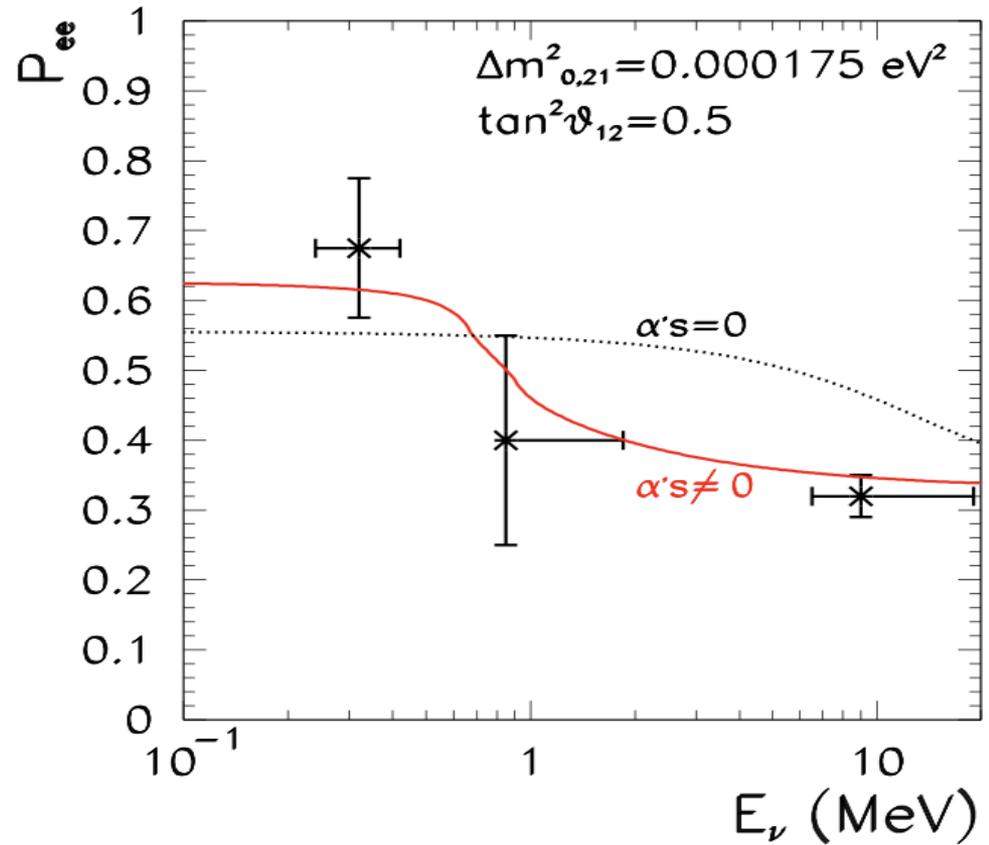
Friedland, Lunardini,
Pena-Garay 2004[8]

太阳中微子可能的物理

新物理很有可能发生在这个过渡区。

Mass Varying Neutrinos

Gonzalez-Garcia & Maltoni 2008[5]



太阳中微子的新探测技术

Xe

Ar

Li7, 水基液体闪烁体
江门上的CC相互作用
与核子的共振散射
等等, 略

感谢大家的关注
能力有限，错误纰漏之处还
请多原谅