

太阳中微子

陈少敏

清华大学高能物理研究中心

清华大学工程物理系

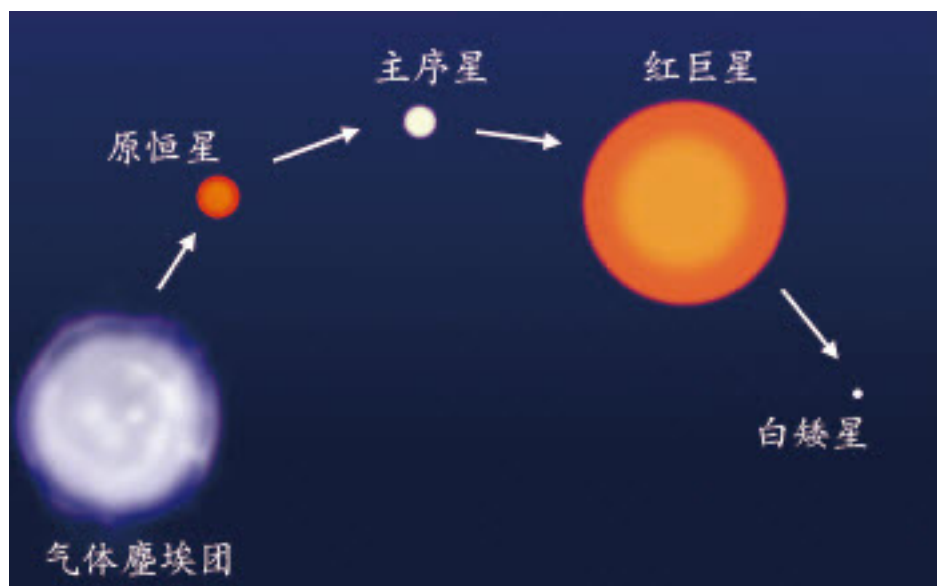
2021. 8. 22

提纲

- 一. 标准太阳模型
- 二. 太阳中微子的产生
- 三. 太阳中微子实验
- 四. 太阳中微子问题及其物理
- 五. 未来展望
- 六. 总结

一、标准太阳模型（SSM）

太阳从主序前阶段的原恒星开始演化，在缓慢收缩的过程中，发生热核聚变反应



气体受热膨胀形成向外的压力，若与向内的引力相抵消时，则恒星停止收缩。

Energy Production in Stars*

H. A. BETHE

Cornell University, Ithaca, New York

(Received September 7, 1938)

It is shown that the *most important source of energy in ordinary stars is the reactions of carbon and nitrogen with protons*. These reactions form a cycle in which the original nucleus is reproduced, *viz.* $C^{12} + H = N^{13}$, $N^{13} = C^{13} + e^+$, $C^{13} + H = N^{14}$, $N^{14} + H = O^{15}$, $O^{15} = N^{15} + e^+$, $N^{15} + H = C^{12} + He^4$. Thus carbon and nitrogen merely serve as catalysts for the combination of four protons (and two electrons) into an α -particle (§7).

The carbon-nitrogen reactions are unique in their cyclical character (§8). For all nuclei lighter than carbon, reaction with protons will lead to the emission of an α -particle so that the original nucleus is permanently destroyed. For all nuclei heavier than fluorine, only radiative capture of the protons occurs, also destroying the original nucleus. Oxygen and fluorine reactions mostly lead back to nitrogen. Besides, these heavier nuclei react much more slowly than C and N and are therefore unimportant for the energy production.

The agreement of the carbon-nitrogen reactions with observational data (§7, 9) is excellent. In order to give the correct energy evolution in the sun, the central temperature of the sun would have to be 18.5 million degrees while

integration of the Eddington equations gives 19. For the brilliant star Y Cygni the corresponding figures are 30 and 32. This good agreement holds for all bright stars of the main sequence, but, of course, not for giants.

For fainter stars, with lower central temperatures, the reaction $H + H = D + e^+$ and the reactions following it, are believed to be mainly responsible for the energy production. (§10)

It is shown further (§5-6) that *no elements heavier than He⁴ can be built up in ordinary stars*. This is due to the fact, mentioned above, that all elements up to boron are disintegrated by proton bombardment (α -emission!) rather than built up (by radiative capture). The instability of Be⁸ reduces the formation of heavier elements still further. The production of neutrons in stars is likewise negligible. The heavier elements found in stars must therefore have existed already when the star was formed.

Finally, the suggested mechanism of energy production is used to draw conclusions about astrophysical problems, such as the mass-luminosity relation (§10), the stability against temperature changes (§11), and stellar evolution (§12).

太阳质量

$$M_{\odot} = 1.99 \times 10^{33} \text{ g}$$

在 $t = 0$ 时，具有均匀的成分，演化要求在

$$\tau_{\odot} = 4.57 \times 10^9 \text{ 年}$$

匹配一些参数，例如，光度

$$L_{\odot} = 3.8418 \times 10^{33} \text{ erg/s}$$

半径

$$R_{\odot} = 6.9598 \times 10^{10} \text{ cm}$$

太阳表面的金属与氢的质量比

$$Z/X \sim 0.02$$

引力时间尺度：引力能与亮度的比值

$$t_{\text{gravity}} \approx \frac{GM_{\odot}^2}{R_{\odot}L_{\odot}} \approx 10^7 \text{年}$$

原子时间尺度：光子随机走出太阳核心

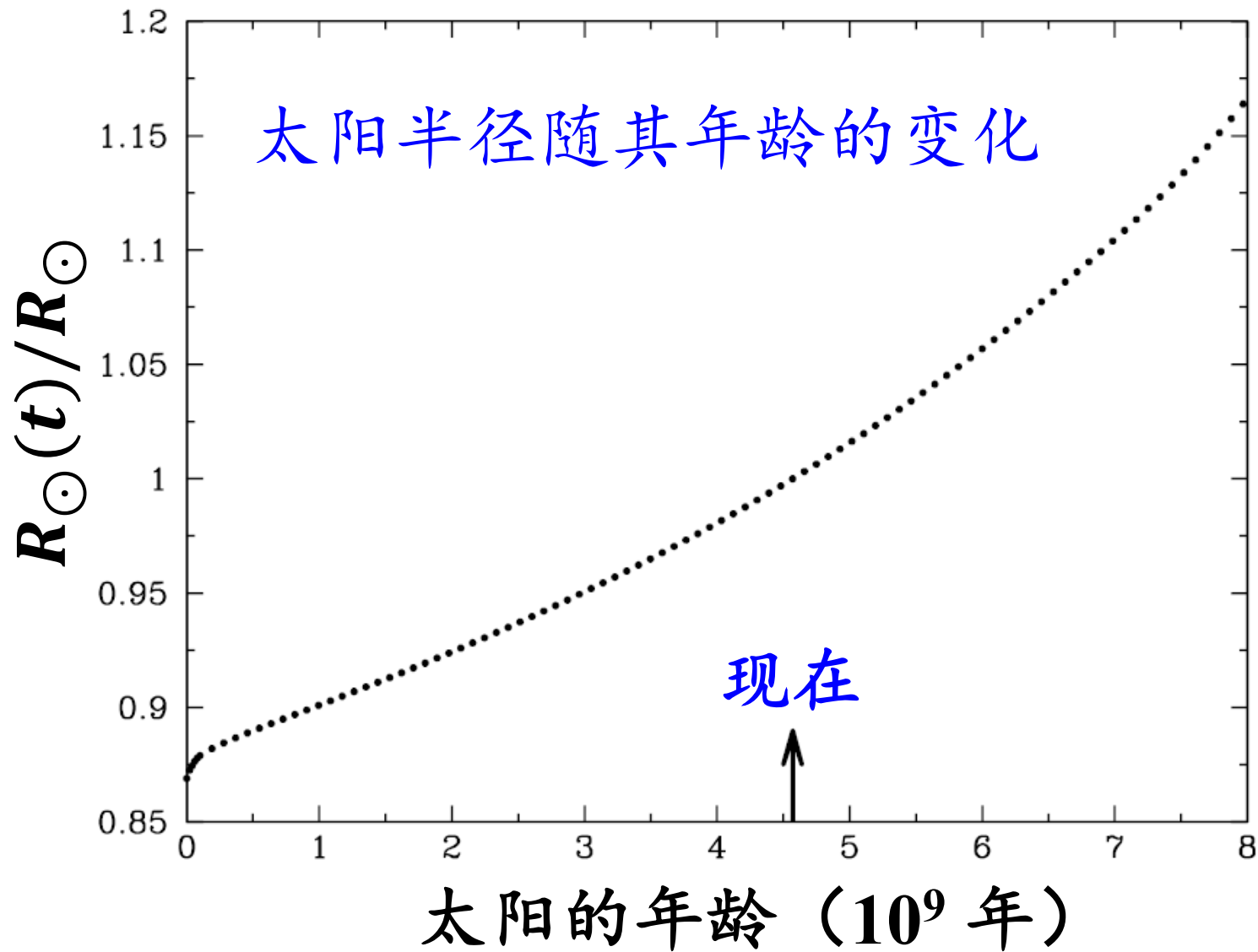
$$\lambda \sim 0.01 \text{ cm} \rightarrow t_{\text{atmoic}} \sim \left(\frac{R_{\odot}}{\lambda}\right)^2 \frac{\lambda}{c} \sim 10^5 \text{年}$$

核时间尺度：

$$t_{\text{nuclear}} \approx 0.7\% \times 10\% \times \frac{M_{\odot}c^2}{L_{\odot}} \sim 10^{10} \text{年}$$

质子质能转化率

变为红巨星的质量变化



从太阳内部向外输出的能流

$$L(r) = -4\pi r^2 \frac{ac}{3\kappa\rho} \frac{dT^4}{dr}$$

其中， a 是常数， T 是温度， κ 为不透明度，
是光子平均自由程 λ 的倒数

$$\kappa = \frac{1}{\lambda\rho}$$

可以近似估计为黑体辐射

$$R_T = \sigma T^4 \quad (\text{W/cm}^2)$$

斯特潘-玻尔兹曼定律。

太阳可看成是一个气态球体，在引力压缩和压力梯度产生的力之间处于静平衡状态。

薄层受到的引力

$$dF(r) = -\frac{Gm(r)\rho(r)dV}{r^2}$$

薄层体积元

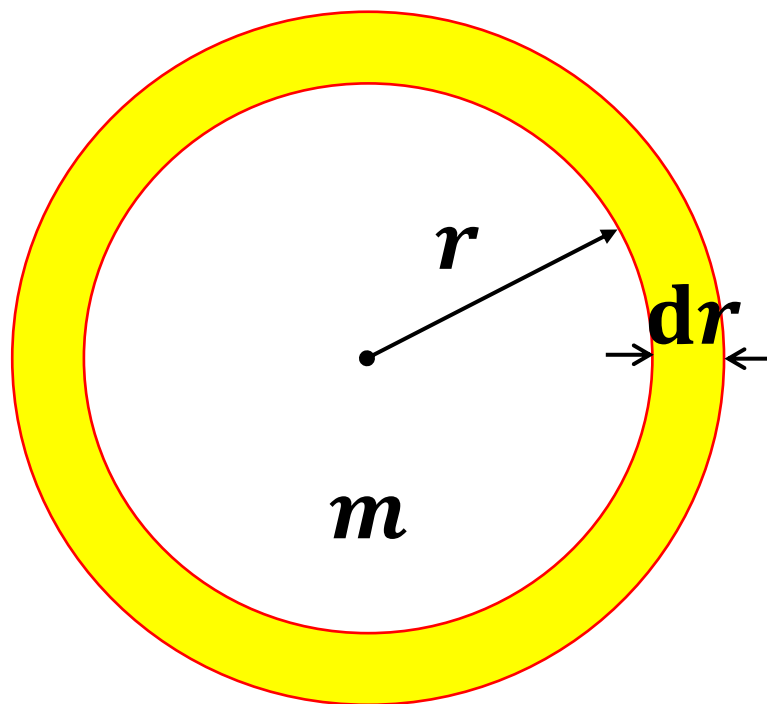
$$dV = 4\pi r^2 dr$$

薄层受到的压强

$$dP(r) = \frac{dF(r)}{4\pi r^2}$$



流体静力方程



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

若只考虑辐射与热的压强的影响

$$P(r) = \frac{a}{3} T^4 + \frac{1}{\bar{m}} \frac{k \rho T}{m_H} (1 + D)$$

其中， a 是常数， T 是温度， k 为玻尔兹曼常量， D 为对电子去简并的修正。平均分子质量满足

$$\frac{1}{\bar{m}} = 2X + \frac{3}{4}Y + \frac{1}{2}Z$$

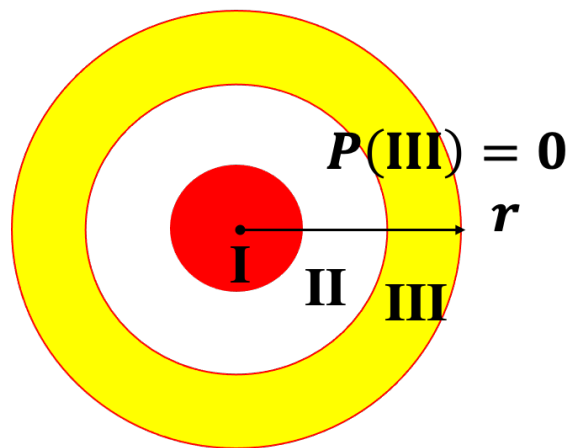
X : 氢质量占比

Y : 氦质量占比

Z : 比氦重的所有元素质量占比

令太阳可沿均匀分为三层，外层压强为零，平均密度为 1g/cm^3 ，则中心压强粗略估计为

$$P(\text{I}) \sim \frac{2\rho G M_{\odot}}{R_{\odot}} \\ \sim 6 \times 10^{14} \text{Pa}$$



根据理想气体状态方程，还可以估计中心的温度为

$$T(\text{I}) \sim \frac{m_H P(\text{I})}{2k\rho(\text{I})} \sim 10^7 \text{K}$$

两个质子相互接触需要克服的库仑势垒

$$E_i = 2E_K, E_f = U = \frac{e^2}{4\pi\epsilon_0 2R}$$

每个质子所需的动能为

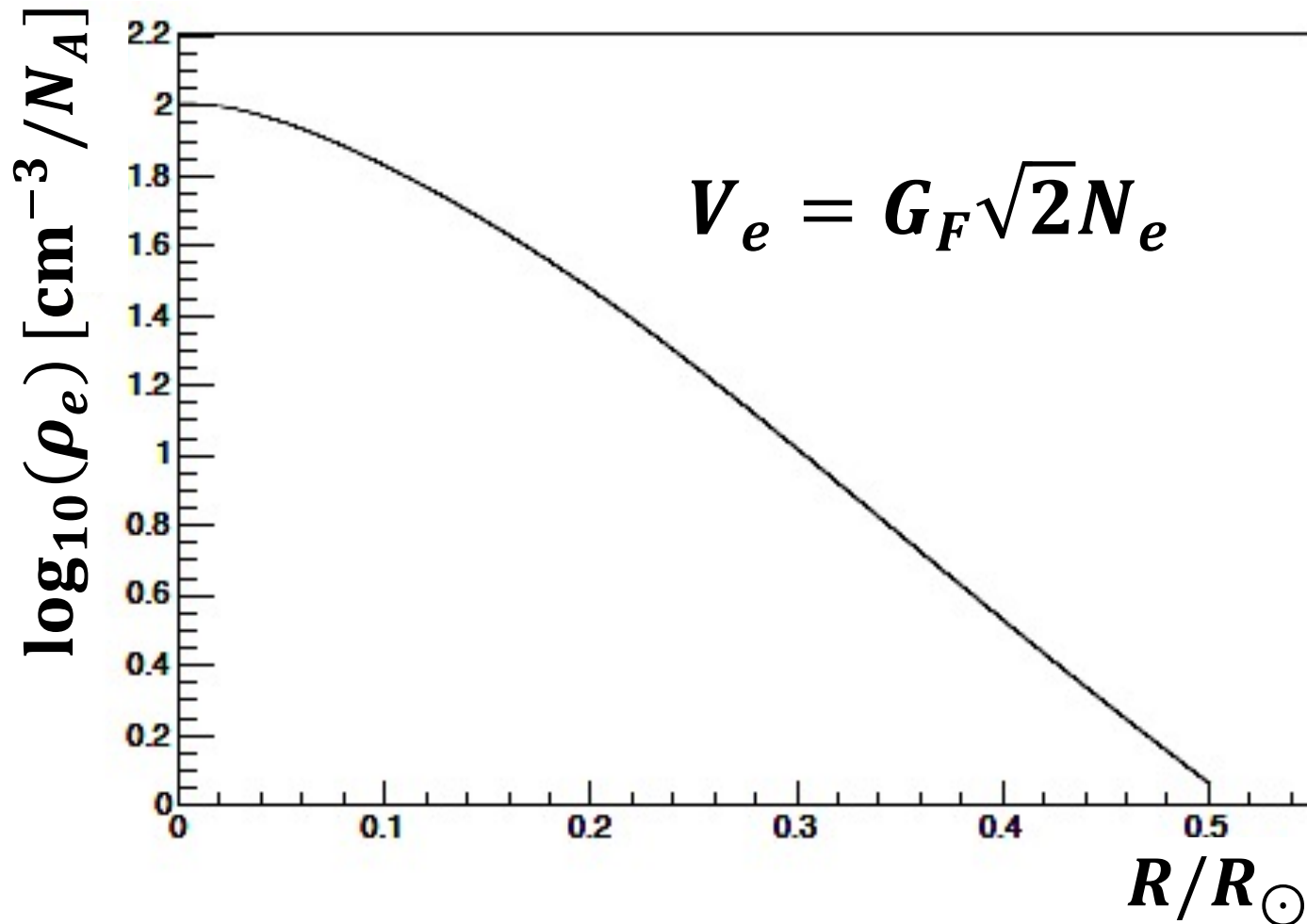
$$E_K = \frac{e^2}{4\pi\epsilon_0 R} \sim 360 \text{ keV}$$

由理想气体状态方程，可得所需温度

$$T = \frac{2E_K}{3k} \sim 3 \times 10^9 \text{ K} \gg 10^7 \text{ K}$$

要使太阳中心发生热核聚变，还需要满足高密度条件。

标准太阳模型中的太阳密度剖面图



标准太阳模型输入参数

1. 核参数

- 核反应、核截面 (?)

2. 太阳亮度 (✓)

3. 太阳年龄 (✓)

4. 状态方程

- 压强、密度

5. 元素丰度

- 光球总金属与氢的质量比 (Z/X)

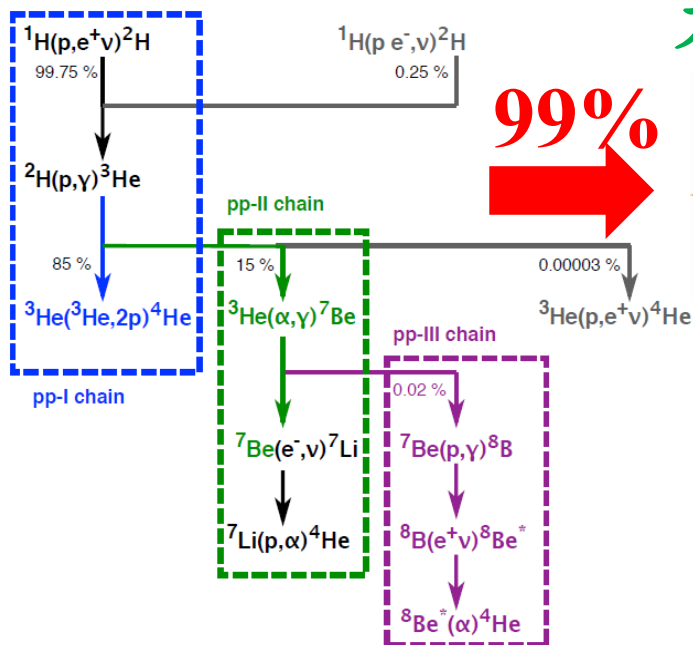
6. 辐射透明度

- 化学组分、原子过程

二、太阳中微子的产生

太阳在原恒星阶段，引力收缩导致其核心温度与物质密度达到热核聚变反应条件。

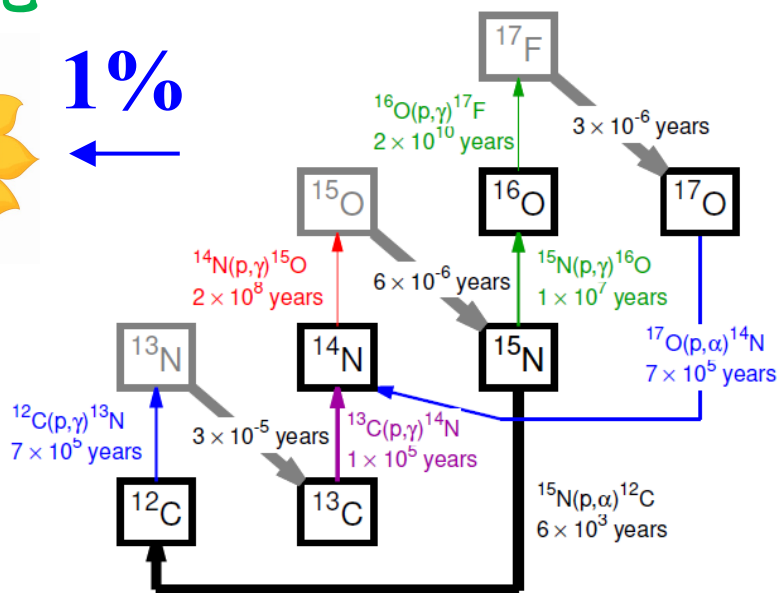
质子-质子链



太阳能



碳氮氧循环



太阳中微子的产生经历了两个不同的核反应过程和电弱过程，即pp链和CNO循环，总的太阳中微子通量

$$\phi_{\nu_{\odot}} = \frac{2L_{\odot}}{4\pi d_{\odot}^2 (Q - 0.53\text{MeV})}$$
$$\sim 6.47 \times 10^{10} \text{cm}^{-2} \text{s}^{-1}$$

$$d_{\odot} = 1.5 \times 10^{13} \text{cm} \quad (\text{日地距离})$$

与一个 40 GW 的反应堆（或约 7 座商业核电站）在 1 km 距离处产生的 $\bar{\nu}_e$ 通量相当。

从太阳中微子的核反应过程中，太阳标准模型提供了精确的太阳中微子通量和能量谱的详细信息。模型依赖的输入包括原子核序数为 Z_1 和 Z_2 的热核反应截面

$$\sigma(E) = \frac{S(E)}{E} \exp \left(- \frac{2\pi Z_1 Z_2 \alpha}{\hbar} \sqrt{\frac{\mu}{2E(\text{keV})}} \right)$$

其中 $S(E)$ 是天体物理 S -因子， α 和 $\hbar$ 分别是精细结构常数和普朗克常数， μ 为约化质量。

在太阳条件下, $S(E) \approx S(0)$, $S(0)$ 是零阶项, 完全来自实验测定, 例如

$$S_{12}: \quad {}^2\text{H} (p, \gamma) {}^3\text{He}$$

$$S_{33}: \quad {}^3\text{He} ({}^3\text{He}, 2p) {}^4\text{He}$$

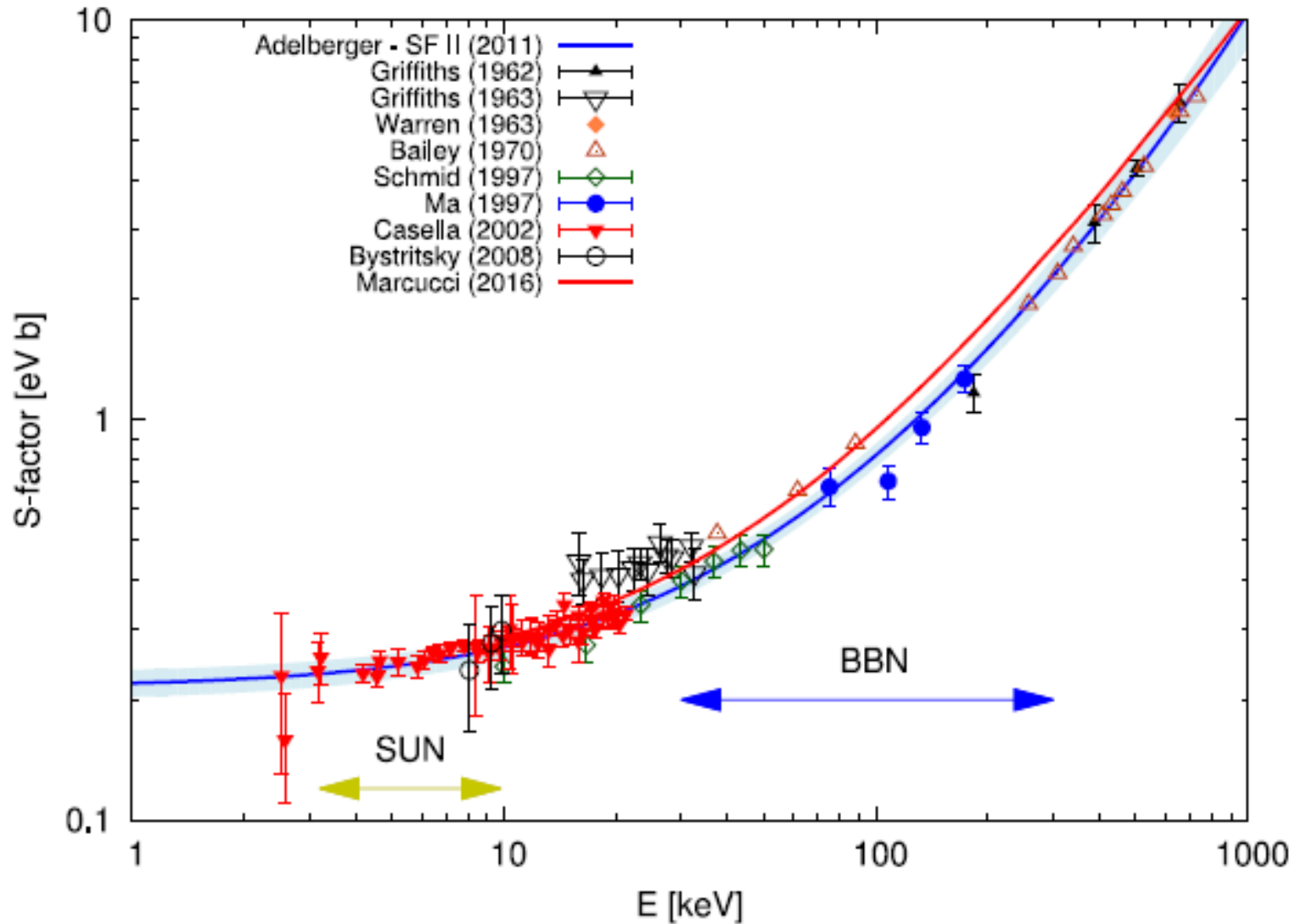
$$S_{34}: \quad {}^3\text{He} ({}^4\text{He}, \gamma) {}^7\text{Be}$$

$$S_{17}: \quad p ({}^7\text{Li}, {}^4\text{He}) {}^4\text{He}$$

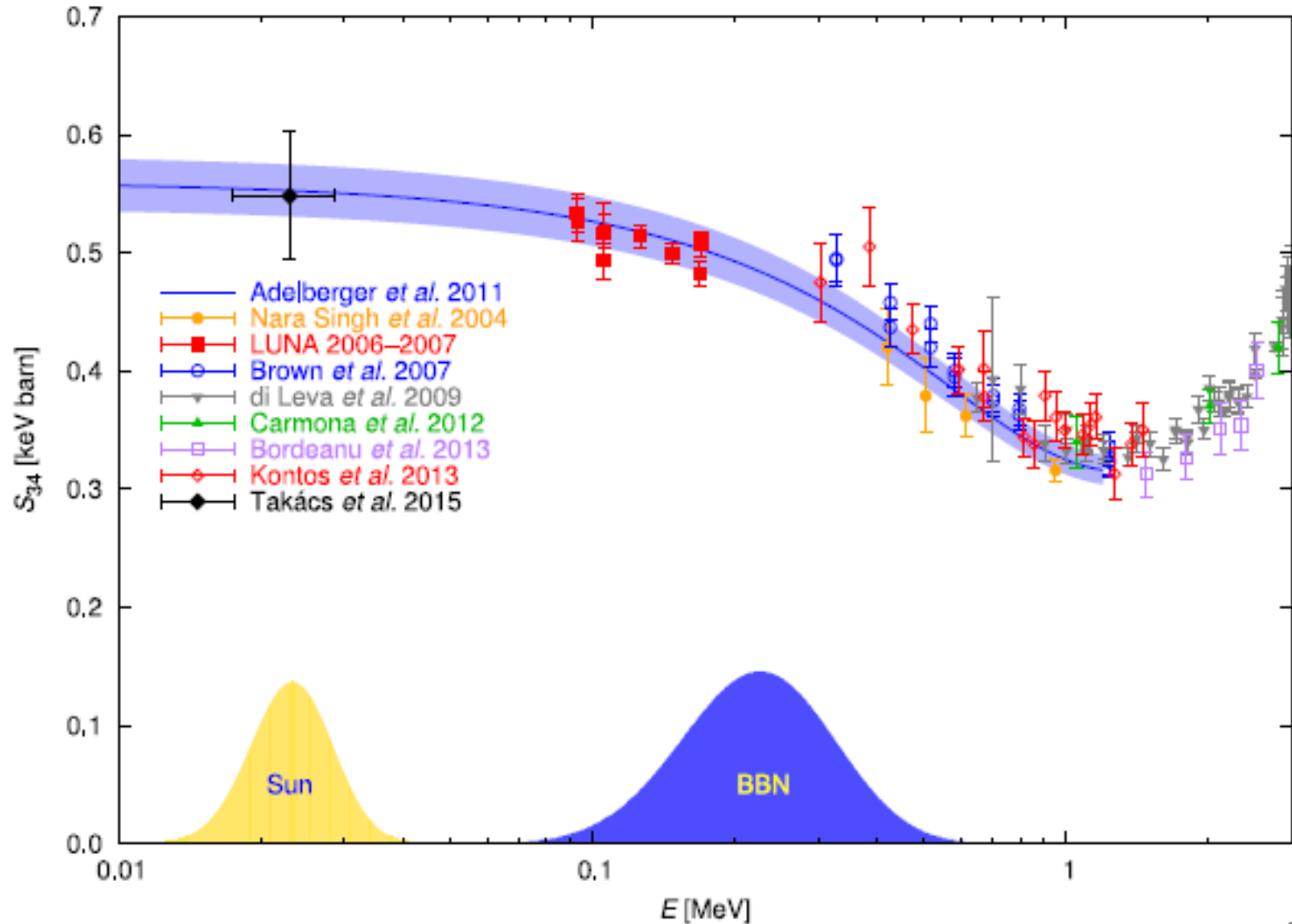
$$S_{1,14}: \quad {}^{14}\text{N} (p, \gamma) {}^{15}\text{O}$$

2005年LUNA对 ${}^{14}\text{N} (p, \gamma) {}^{15}\text{O}$ 横截面的测量值比之前认为的要小两倍。这一发现对CN循环的太阳中微子通量计算产生了重要影响。

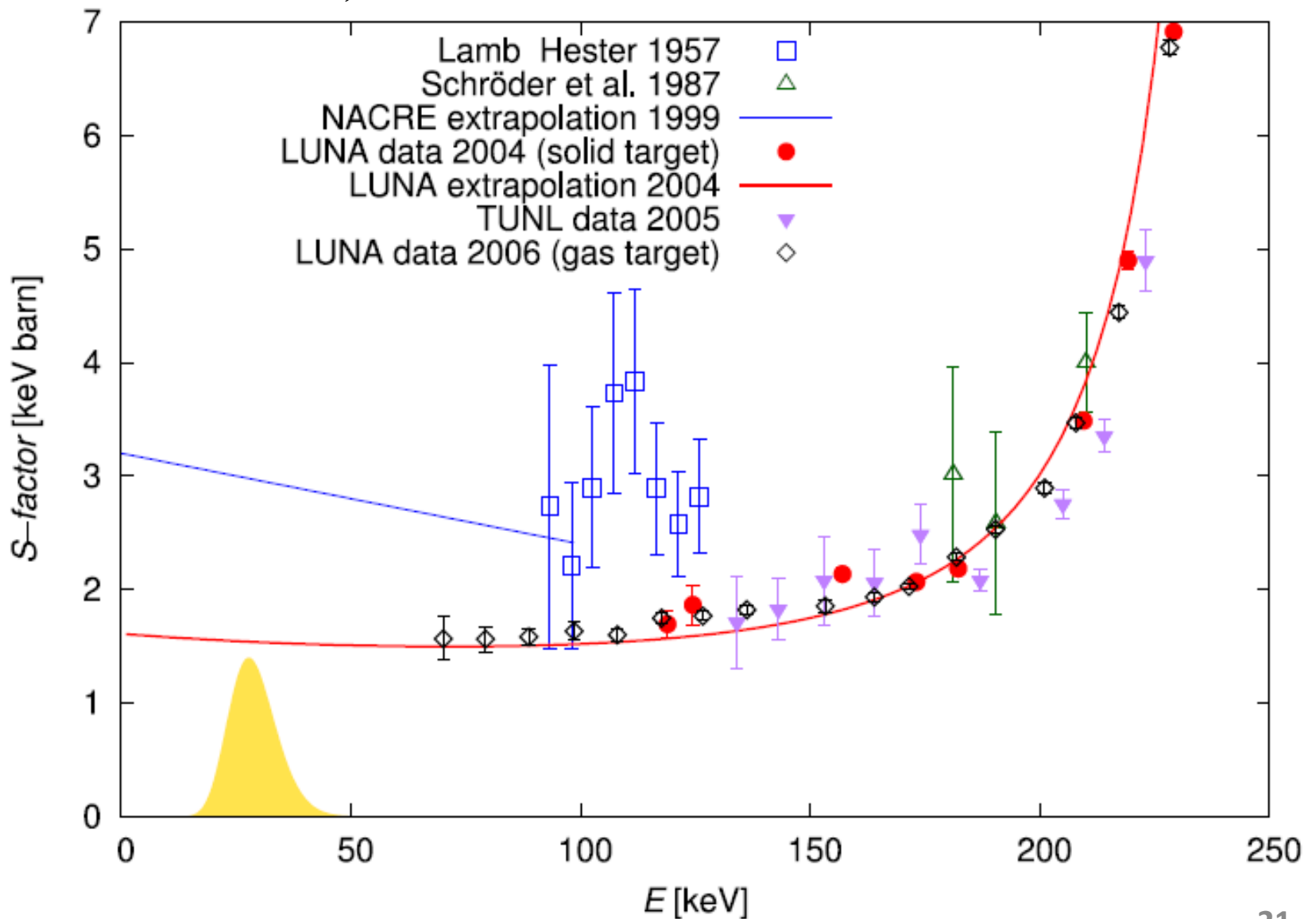
S_{12} : $^2\text{H} (p, \gamma) ^3\text{He}$



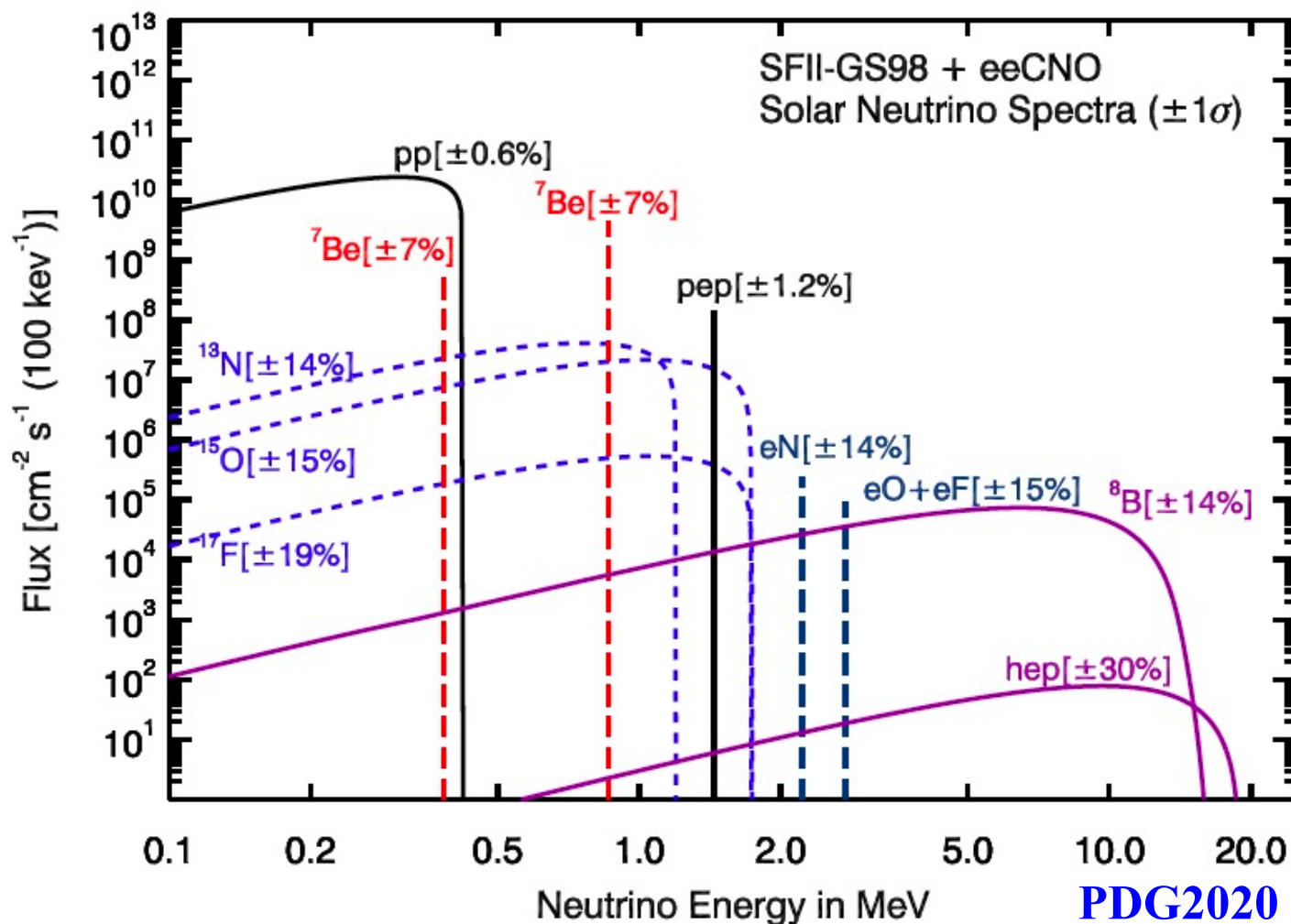
S_{34} : ${}^3\text{He} ({}^4\text{He}, \gamma) {}^7\text{Be}$



$S_{1,14}: {}^{14}\text{N} (p, \gamma) {}^{15}\text{O}$



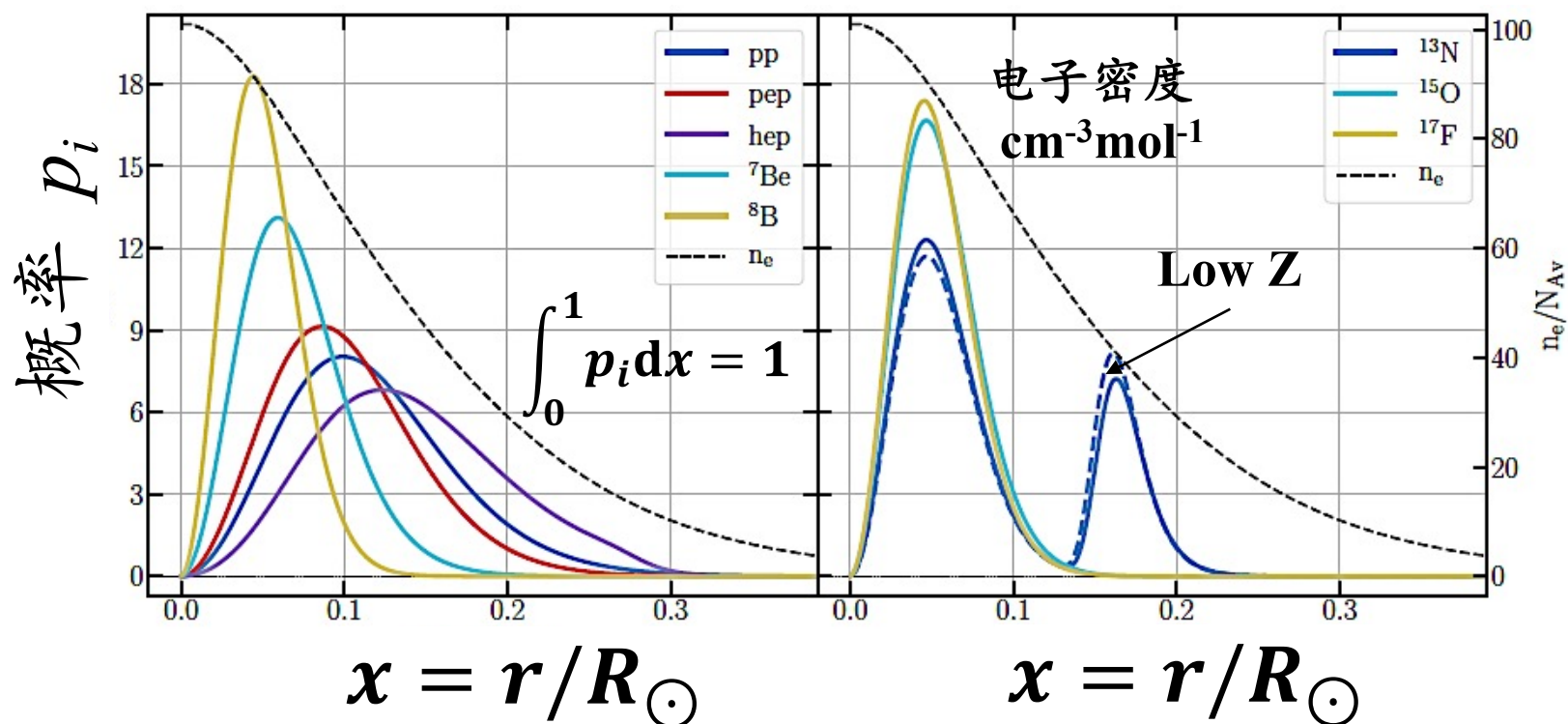
高精度的 S -因子的测量可减小 SSM 计算的太阳中微子通量误差，反之亦然。



太阳中微子作为信使，携带了发生在太阳内部热核反应的信息。

质子-质子链

碳氮氧循环



太阳热核反应产生的能量

$$\frac{L_{\text{nucl}}}{(1 \text{ A. U.})^2} = \sum_{i=1,8} \alpha_i \Phi(X_i)$$

其中， $\Phi(X_i)$ 为地球上测量的中微子流强。
目前的实验结果为

$$L_{\text{nucl}} = 1.04_{-0.08}^{+0.07} L_{\odot}$$

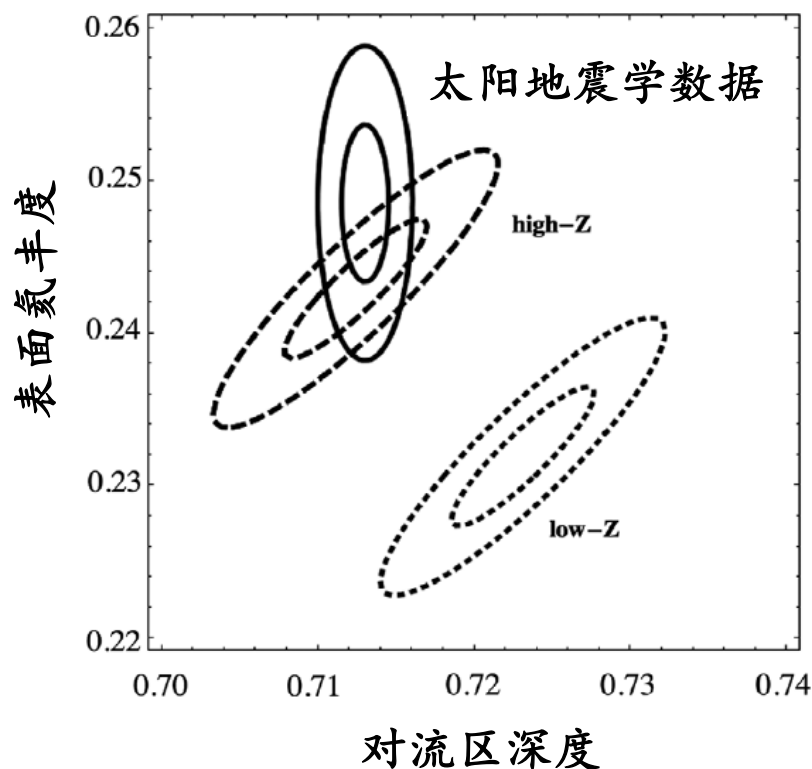
误差主要来自 $\Phi(\text{pp})$ 的测量误差。如果加上亮度的约束

$$L_{\text{nucl}} = \left(\underset{\text{pp-链}}{0.991_{-0.005}^{+0.005}} + \underset{\text{CNO-循环}}{0.009_{-0.005}^{+0.004}} \right) L_{\odot}$$

太阳地震学研究对标准太阳模型的检验

- ① 基于高金属丰度的值 $Z/X=0.023$ 的SSM
- ② 基于低金属丰度的值 $Z/X=0.018$ 的SSM

低金属丰度是基于较好描述太阳光球层的模型，它与数据的差异表明可能存在一些错误的假设或物理过程的缺失。



SOLAR NEUTRINOS. I. THEORETICAL*

John N. Bahcall

California Institute of Technology, Pasadena, California

(Received 6 January 1964)

The principal energy source for main-sequence stars like the sun is believed to be the fusion, in the deep interior of the star, of four protons to form an alpha particle.¹ The fusion reactions are thought to be initiated by the sequence ${}^1\text{H}(p, e^+\nu){}^2\text{H}(p, \gamma){}^3\text{He}$ and terminated by the following sequences: (i) ${}^3\text{He}({}^3\text{He}, 2p){}^4\text{He}$; (ii) ${}^3\text{He}(\alpha, \gamma){}^7\text{Be}(e^-\nu){}^7\text{Li}(p, \alpha){}^4\text{He}$; and (iii) ${}^3\text{He}(\alpha, \gamma){}^7\text{Be}(p, \gamma){}^8\text{B}(e^+\nu){}^8\text{Be}^*(\alpha){}^4\text{He}$. No direct evidence for the existence of nuclear reactions in the interiors of stars has yet been obtained because the mean free path for photons emitted in the center of a

star is typically less than 10^{-10} of the radius of the star. Only neutrinos, with their extremely small interaction cross sections, can enable us to see into the interior of a star and thus verify directly the hypothesis of nuclear energy generation in stars.

The most promising method² for detecting solar neutrinos is based upon the endothermic reaction ($Q = -0.81$ MeV) ${}^{37}\text{Cl}(\nu_{\text{solar}}, e^-){}^{37}\text{Ar}$, which was first discussed as a possible means of detecting neutrinos by Pontecorvo³ and Alvarez.⁴ In this note, we predict the number of absorptions of

三、太阳中微子实验

✓ 放射化学法

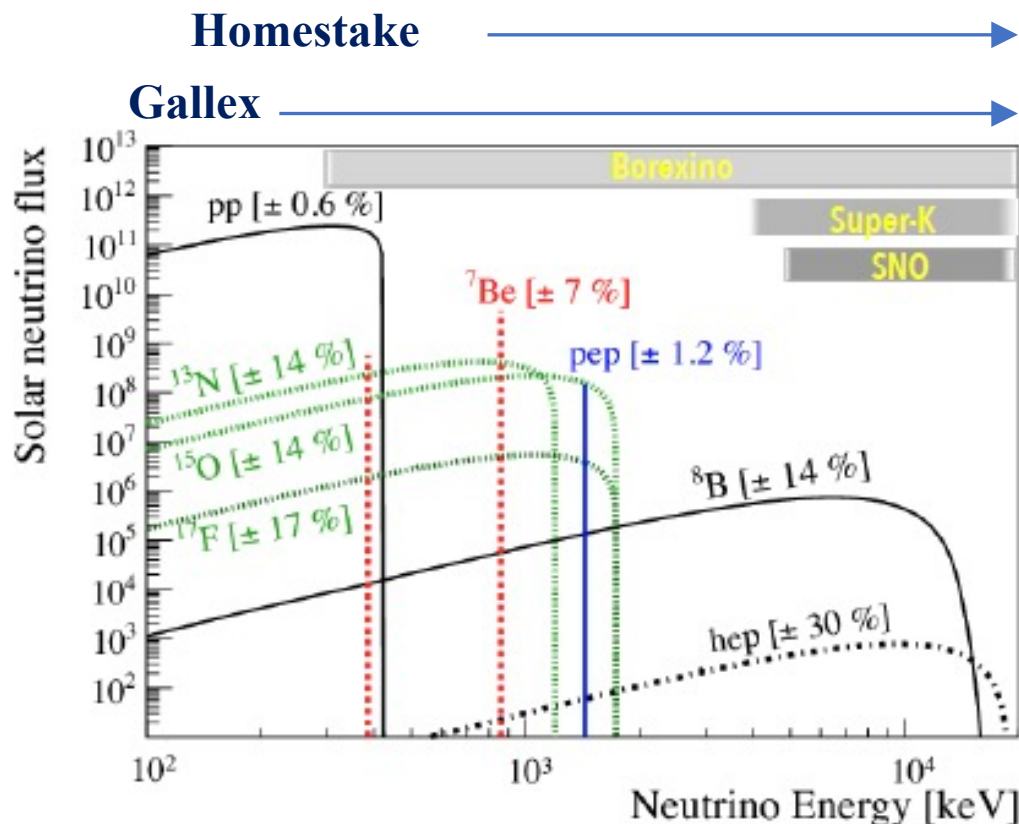
- Homestake (Cl)
- Gallex/GNO (Ga)
- Sage (Ga)

✓ 切伦科夫法

- Kamiokande (H_2O)
- Super-K (H_2O)
- SNO (D_2O , H_2O)

✓ 液体闪烁体法

- Borexino
- KamLAND
- SNO+

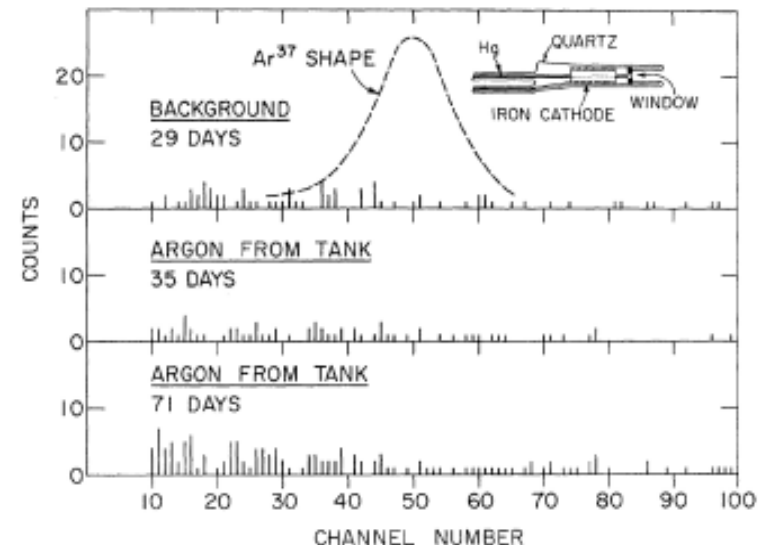
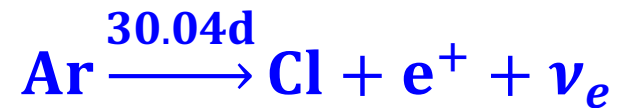
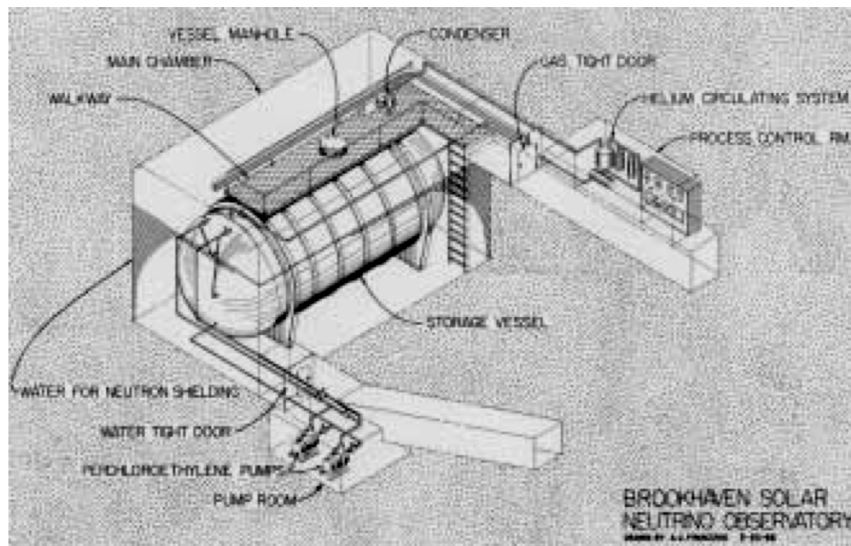


1. 放射化学法 (Pontecorvo 1946 提出)

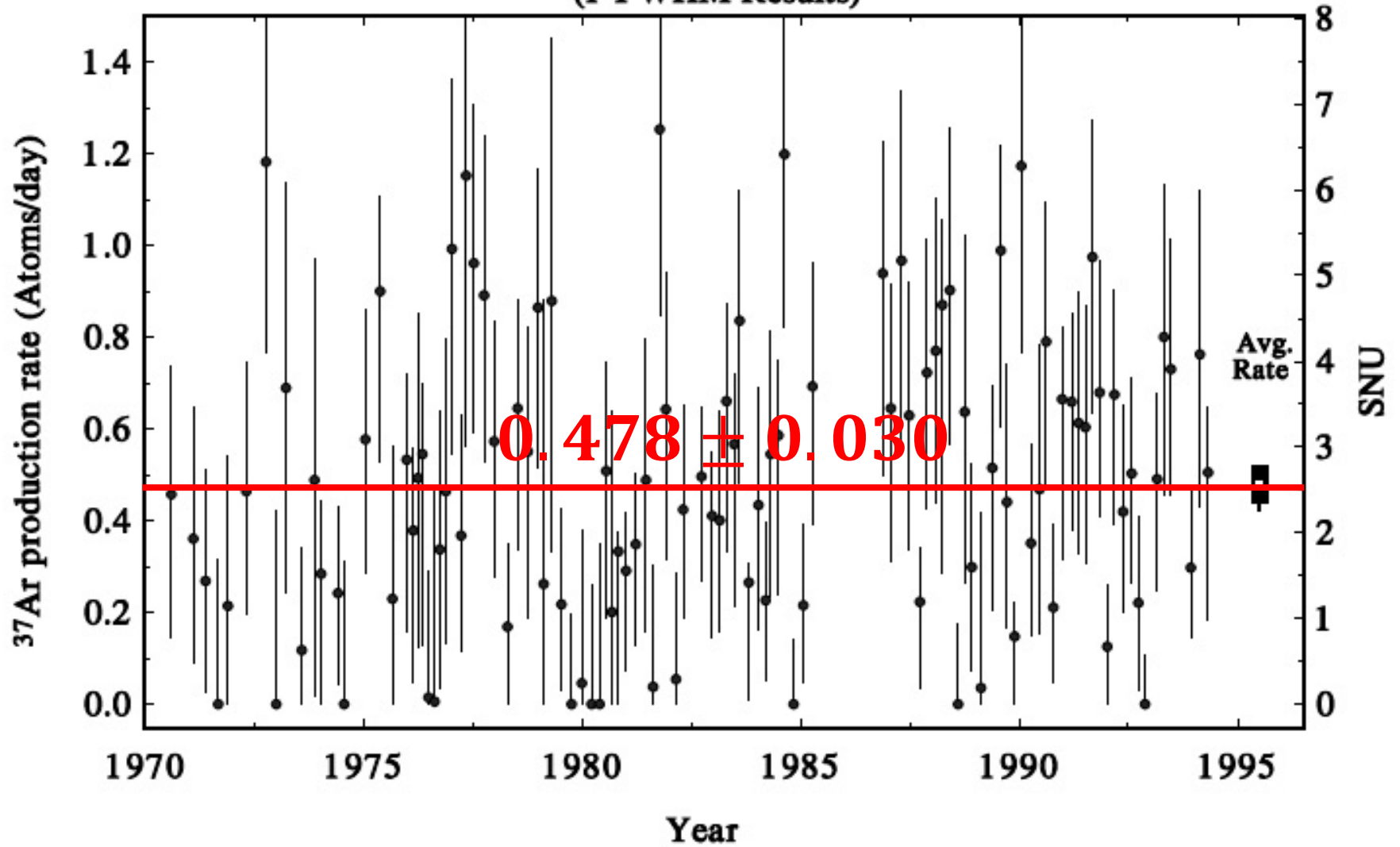
中微子反贝塔反应 (能量阈 0.814 MeV)



Homestake (1967-1994)



(1 FWHM Results)



Homestate 用了 615 吨 C_2Cl_4

$$N(^{37}\text{Cl}) \sum_i \int_{0.814 \text{ MeV}}^{15 \text{ MeV}} \phi_i(E_\nu) \sigma(E_\nu) dE_\nu \quad \text{预期}$$

$$= \frac{\lambda_{\text{Ar}} N(^{37}\text{Ar}; t_{\text{exposure}})}{\varepsilon [1 - \exp(-\lambda_{\text{Ar}} t_{\text{exposure}})]} - b \quad \text{观测}$$

$$N(^{37}\text{Cl}) = 2.16 \times 10^{30}, \lambda_{\text{Ar}} = 0.0198 \text{ d}^{-1}$$

1 SNU (太阳单位) = 10^{-36} 俘获/靶核/秒

测量值

SSM (Bahcall 2001)

$2.56 \pm 0.23 \text{ SNU}$

$7.6^{+1.3}_{-1.1} \text{ SNU}$

偏差: $\frac{7.6 - 2.56}{\sqrt{1.1^2 + 0.23^2}} = 4.5\sigma$ 太阳中微子问题!

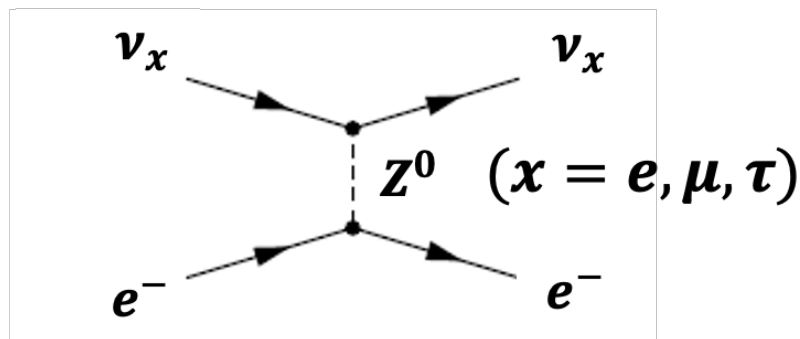
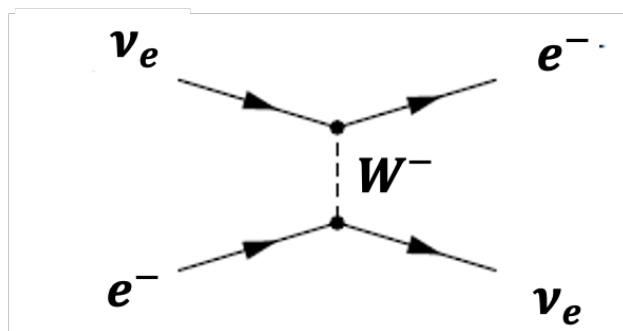
A HALF-CENTURY WITH SOLAR NEUTRINOS

--2002 诺贝尔获奖演讲, Ray Davis

我给出第一个上限结果时, 论文评审人认为: “这样一个没有所需灵敏度的实验, 不能回答中微子是否存在的问题。就像大家不会写一篇论文来描述这样一个实验, 让实验者站在一座山上, 伸手去抓月球, 没有抓着就得出月球离山顶超过八英尺的结论。”

2. 神冈实验 (Kamiokande-II/III)

在水中中微子弹性散射过程 ($E_{\nu_e} \gg m_e$)



$$\sigma_E(\nu_e e) \approx 0.9 \times 10^{-43} \frac{E_{\nu_e}}{10 \text{ MeV}} \text{ cm}^2$$

$$\sigma_E(\nu_{\mu, \tau} e) \approx 0.15 \times 10^{-43} \frac{E_{\nu_e}}{10 \text{ MeV}} \text{ cm}^2$$

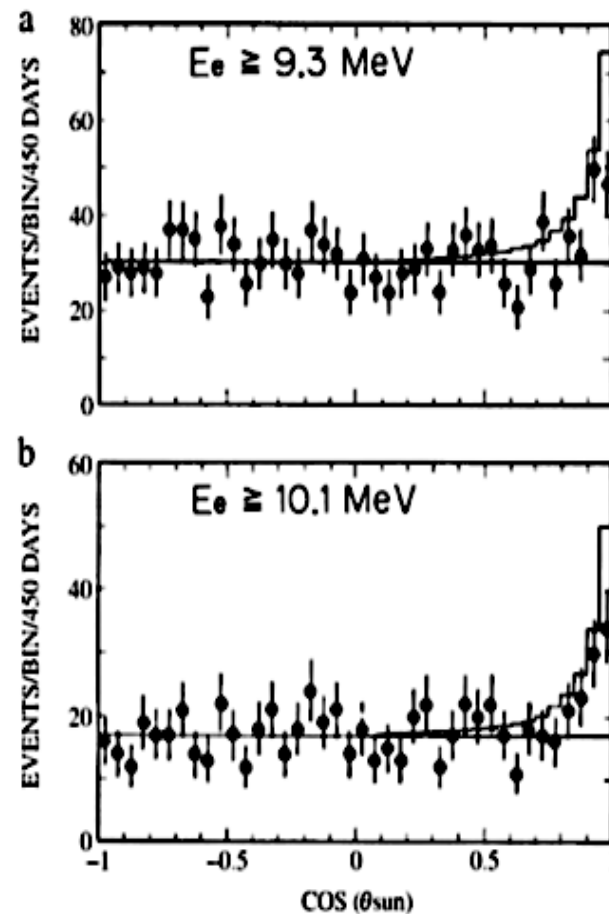
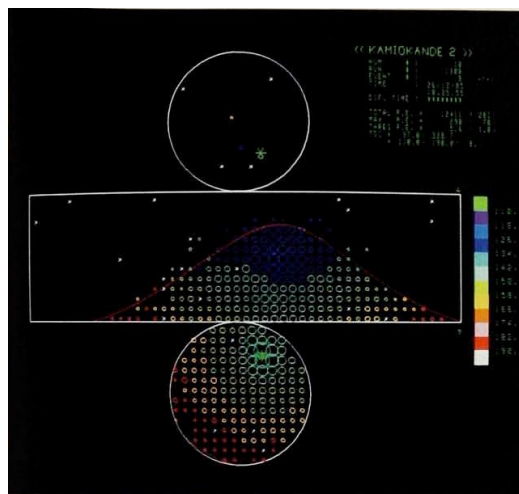
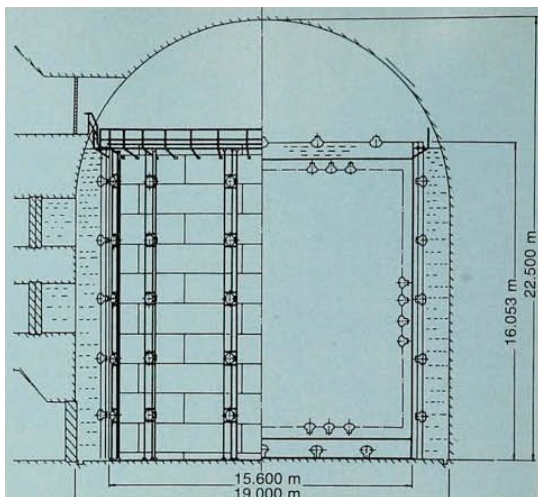
主要是电子味道外，但有其它味道的贡献。

神冈-II首次对太阳中微子进行了实时、定向和能谱观测。

数据

无振荡理论

$$= 0.44 \pm 0.13_{\text{stat}} \pm 0.08_{\text{syst}}$$



Davis和IMB及Kamiokande小组的实验结果可能预示着观测中微子天体物理学的诞生，但该领域仍处于初级阶段。我们对太阳内部还没有任何直接的了解，国际上正在准备或计划进行各种实验，目的是通过观察中微子来观察太阳核心，这是非常令人鼓舞的。

--小柴昌俊 《Physics Today》 1987

3. ^{71}Ga 实验 (Kuzmin 1966年提出)

中微子反贝塔反应 (能量阈 0.233 MeV)



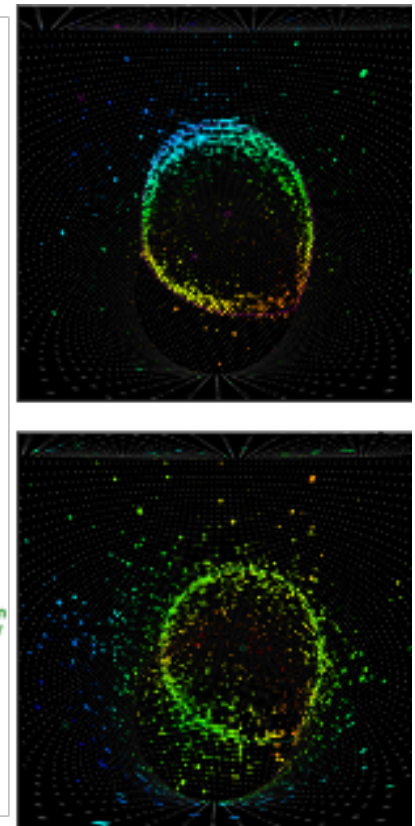
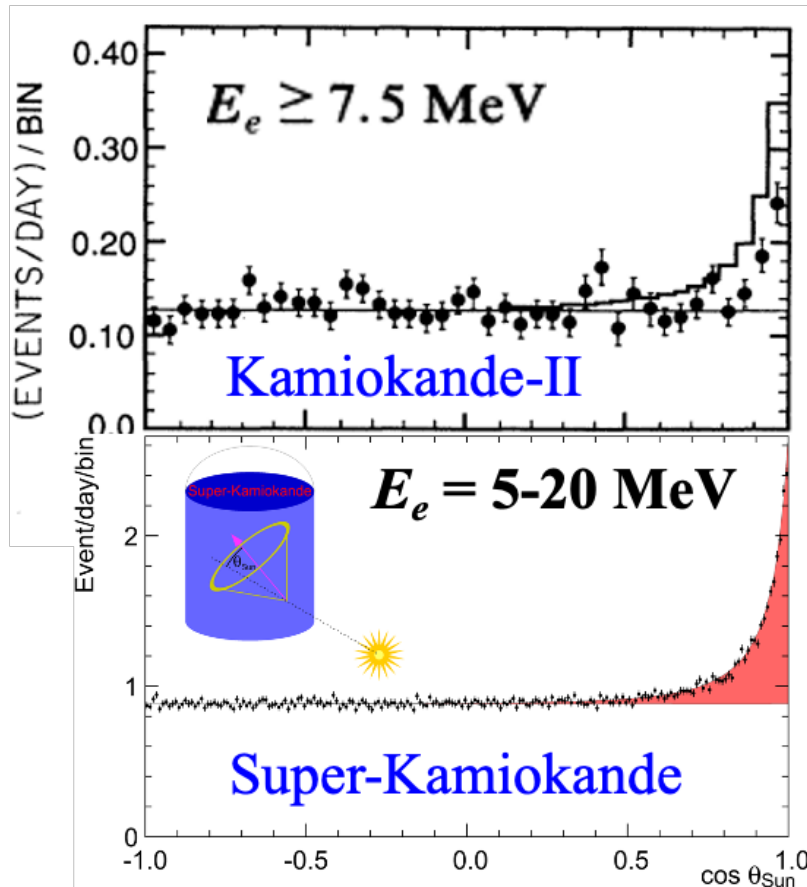
低于 pp 太阳中微子的最大能量。探测方法与 Homestake 实验非常类似



由于 pp 中微子通量与太阳光度有关，因此对这些中微子的测量将是理解太阳核过程起源的关键检验。

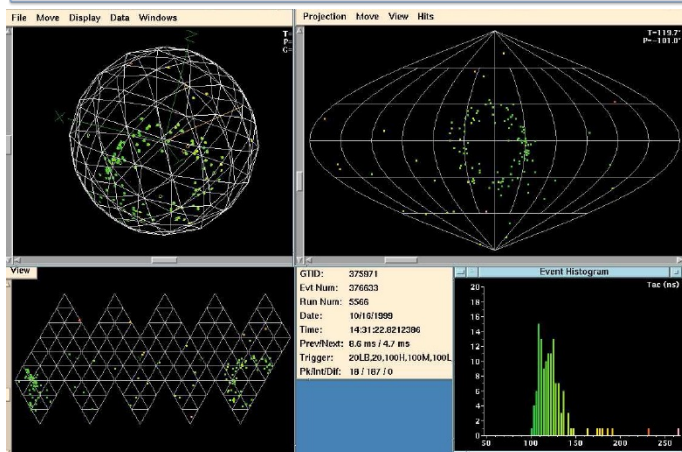
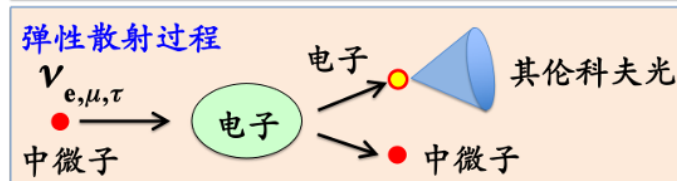
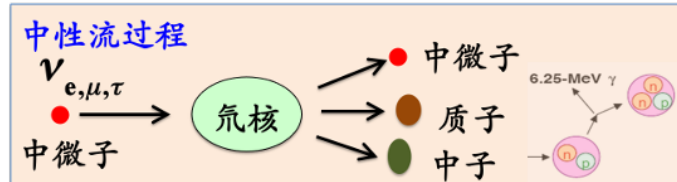
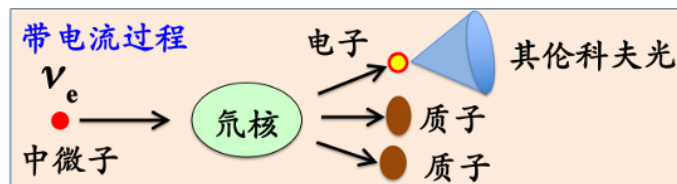
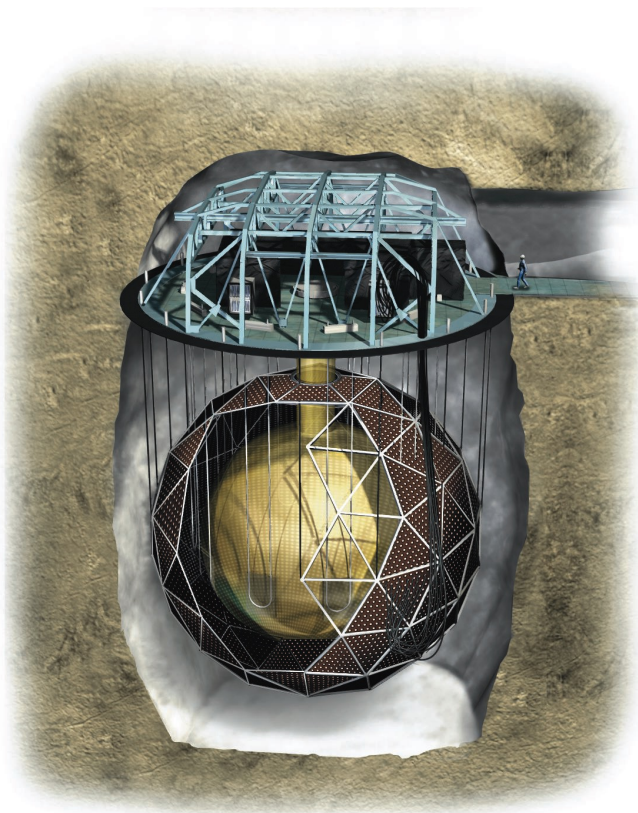
4. 超级神冈实验（1996年至今）

神冈实验的升级版（从千吨到万吨！）

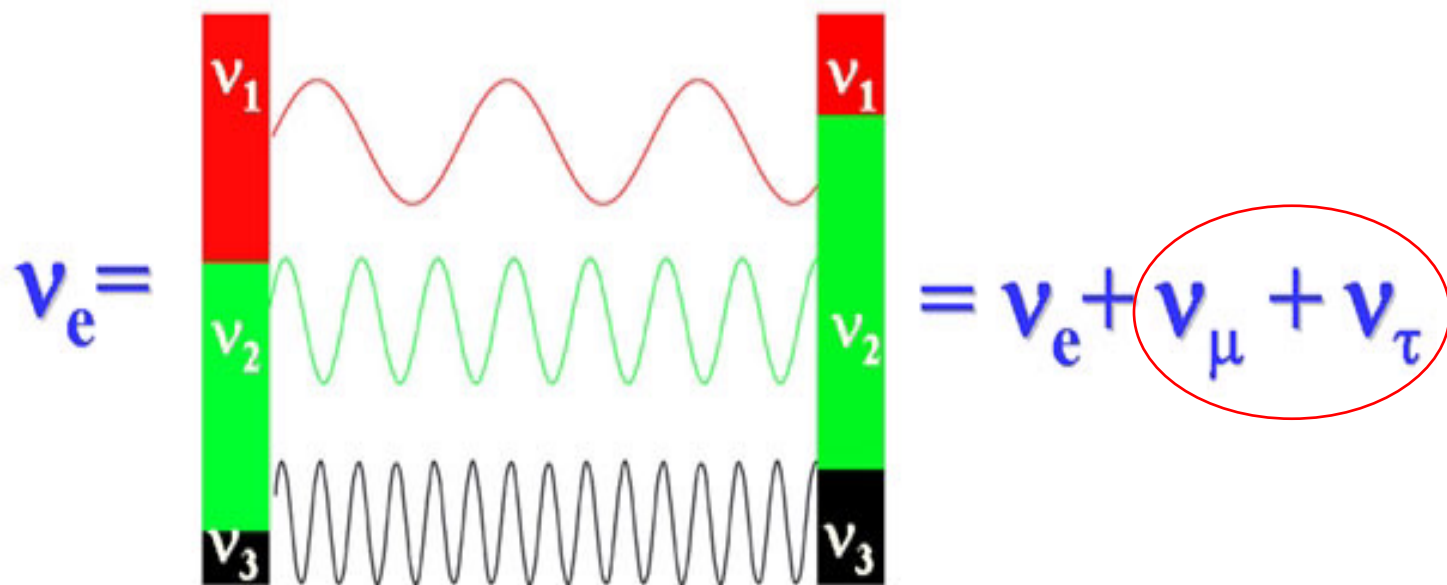


5. 萨德伯里实验 (Herb Chen 1985年提出)

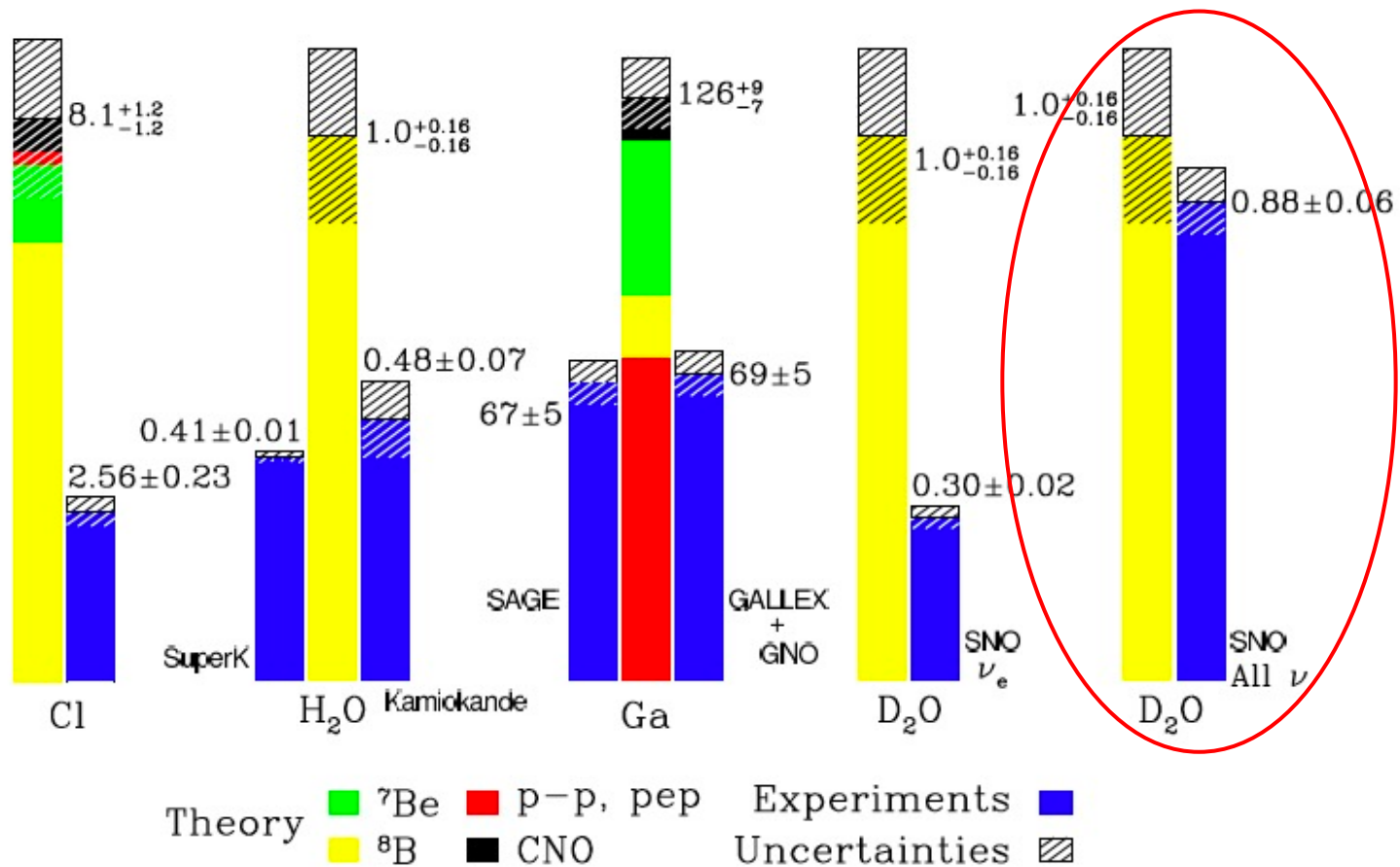
对三种味道太阳中微子都敏感的实验!

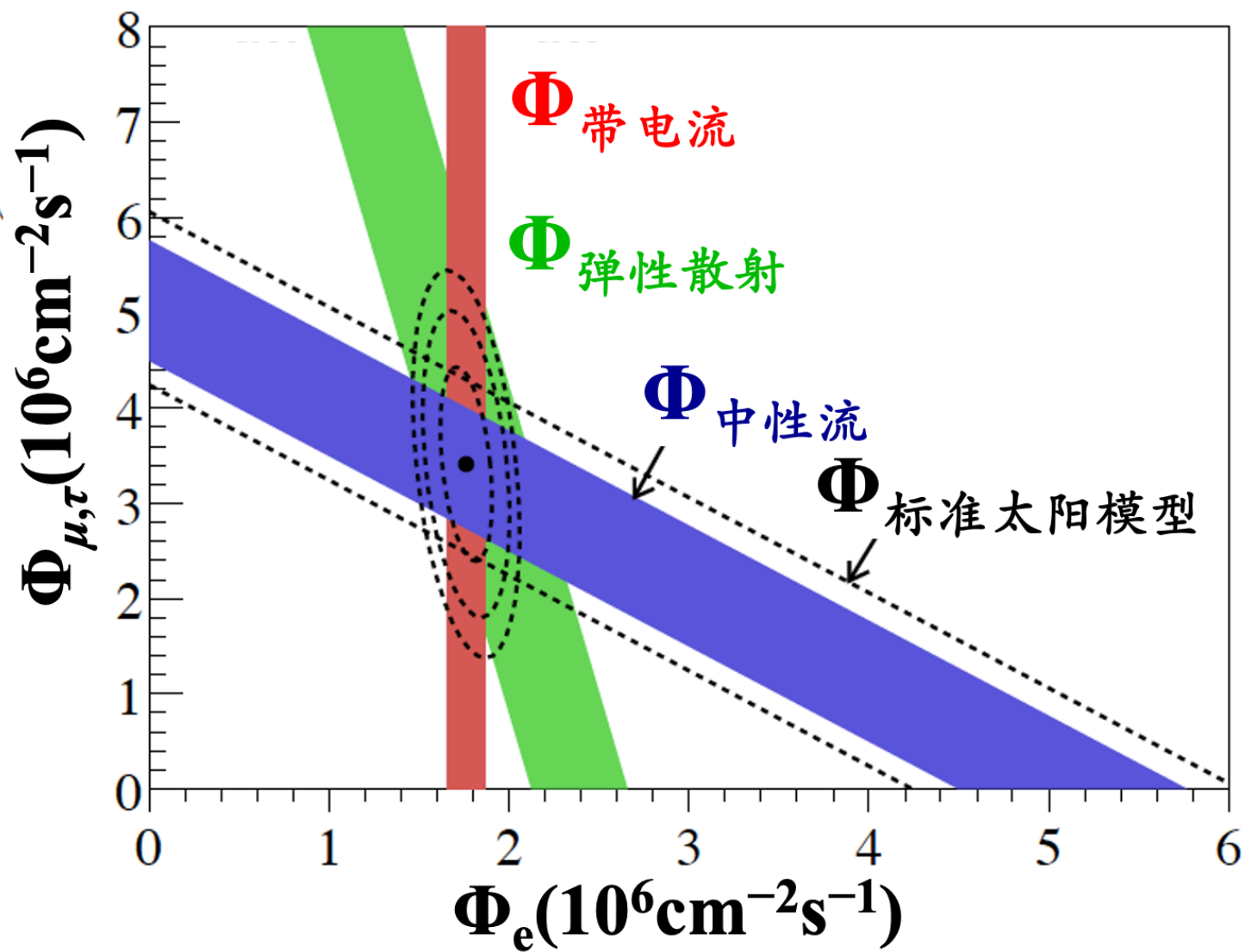


SNO 实验把电子味道改变的太阳中微子由常规实验“看不见”或“不敏感”变为“看得见”！



SNO 从实验上验证了从 ν_e 到 ν_μ 与 ν_τ 的转换。但在 $E_\nu > 7 \text{ MeV}$ 处没有观察到 L/E 的依赖性，还不能证明中微子有质量。



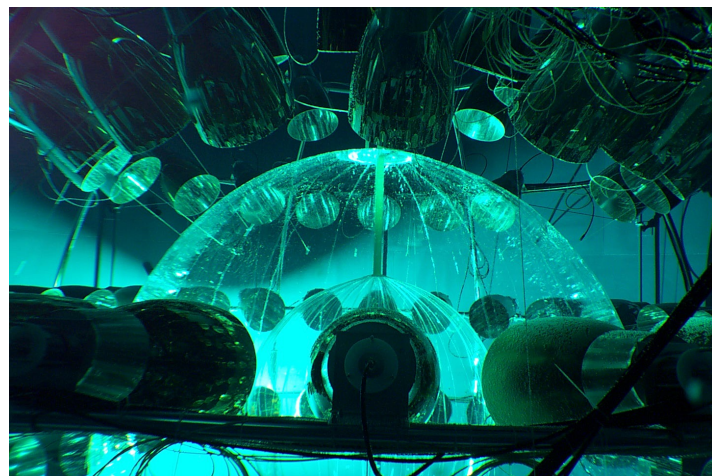
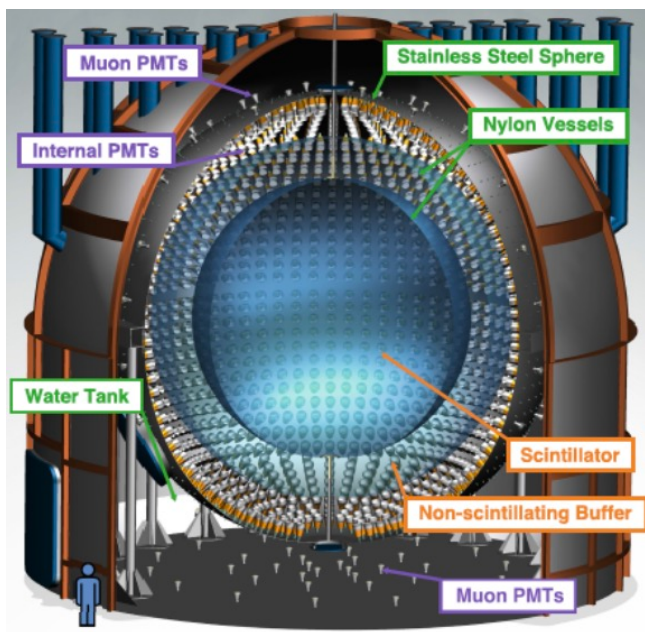


6. Borexino 实验（源自载 ^{11}B 实验BOREX）

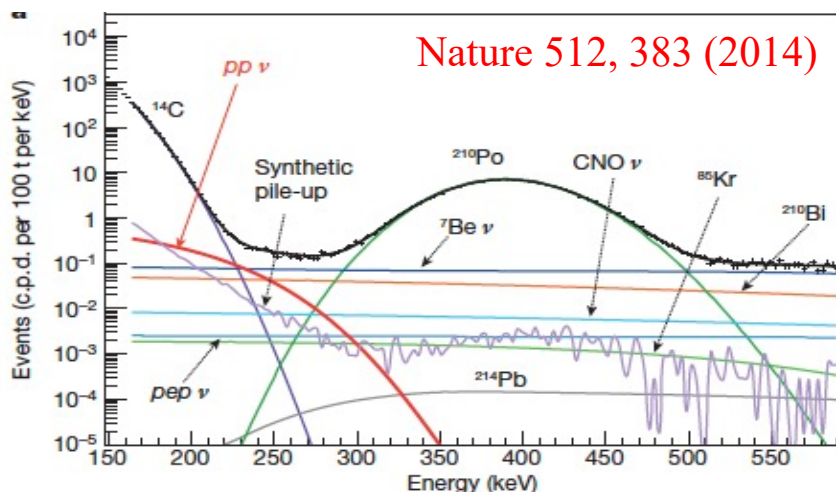
中微子过程

$$\nu_x + e^- \rightarrow \nu_x + e^-, \quad (x = e, \mu, \tau)$$

本底最低的中微子实验，能阈 0.2 MeV。

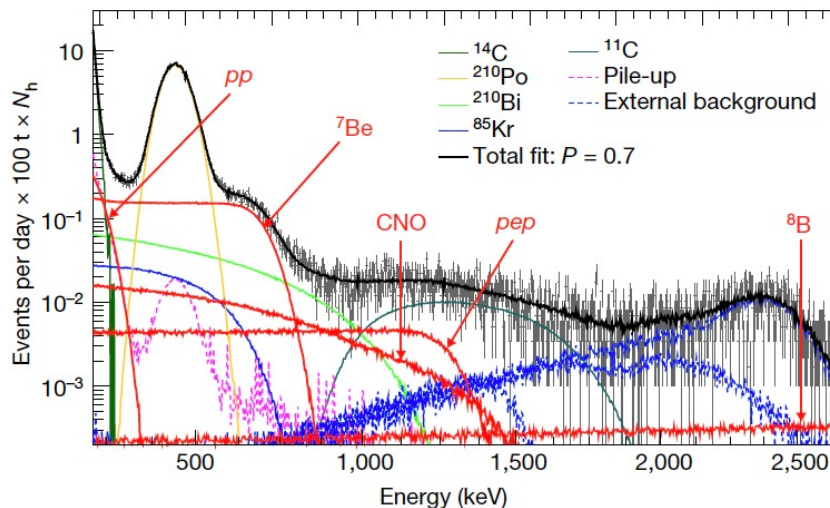


从仅对pp中微子的实时测量，

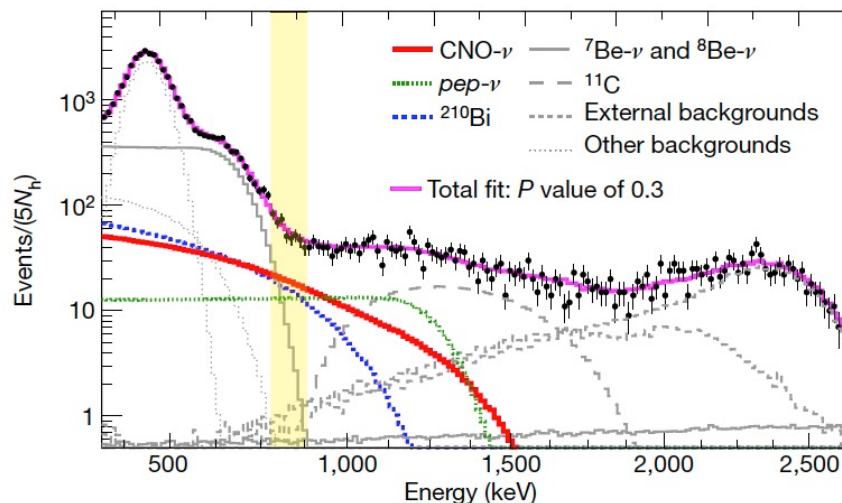


到在一个探测器中观察
所有 pp-链的中微子。

Nature 562, 505 (2018)



Nature 587, 582 (2020)



Borexino 在2020年宣布看到了CNO的迹象。

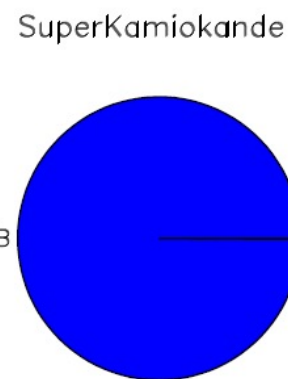
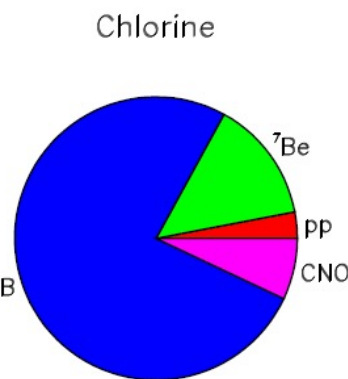
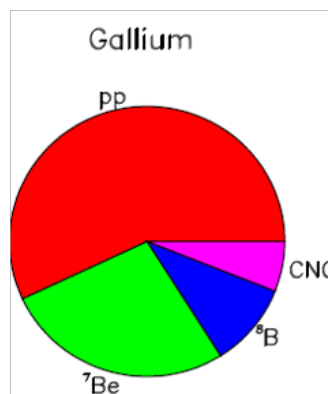
$$7.0^{+3.0}_{-2.0} \times 10^8 \text{ cm}^{-2} \text{ s}^{-1}$$

数据中存在CNO中微子的统计显著性为 3.5σ 。

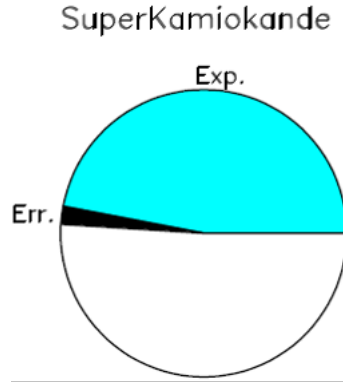
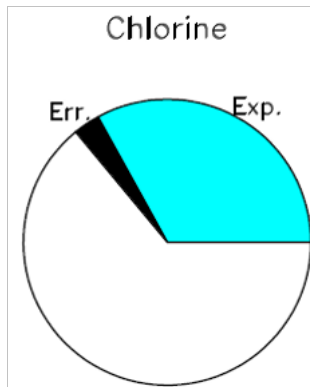
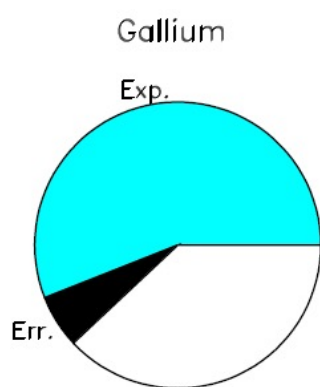
四、太阳中微子问题及其物理

2001年以前

标准太阳
模型预言

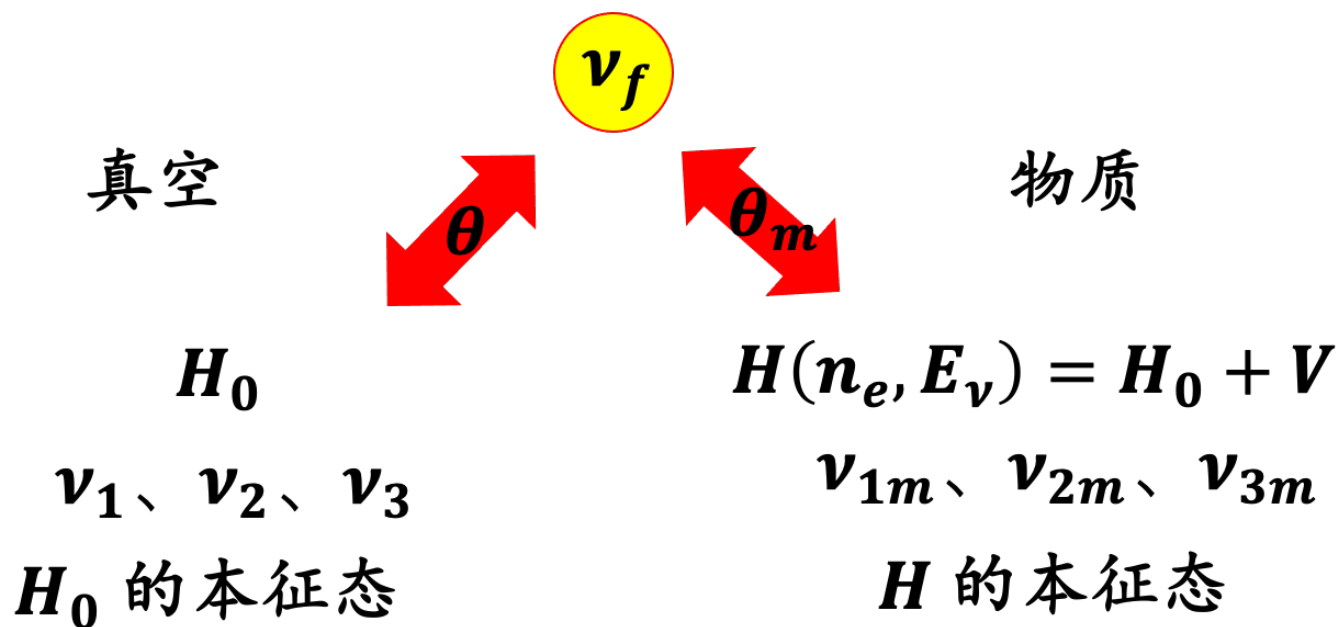


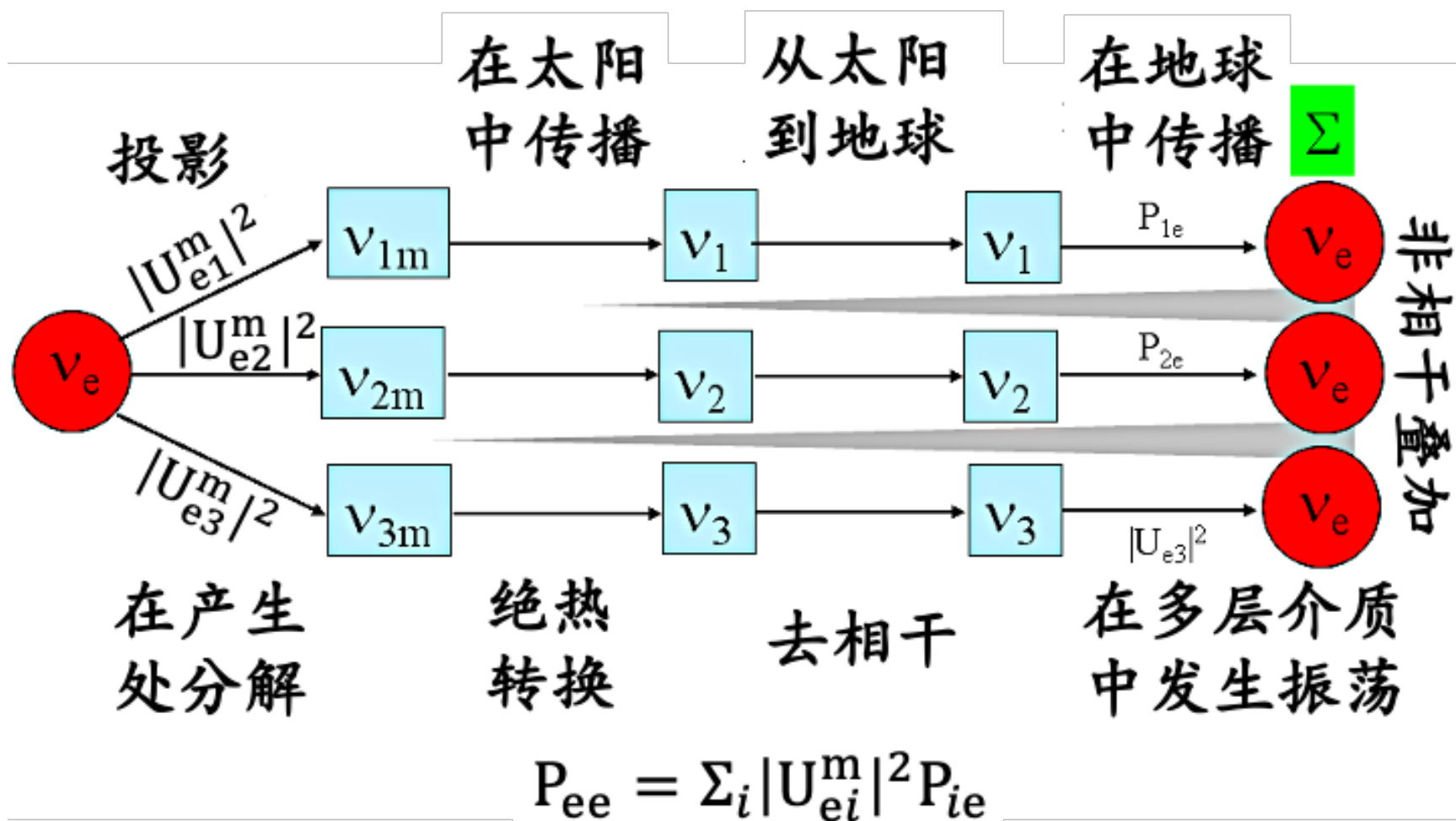
实验观测



太阳中微子问题：质疑模型和实验！

Mikheyev和Smirnov 认为中微子在从太阳内部向外飞行时，通过密度变化介质时的绝热转变，会产生共振转换到中微子的第二质量本征态，即Mikheyev-Smirnov-Wolfenstein (MSW) 共振。



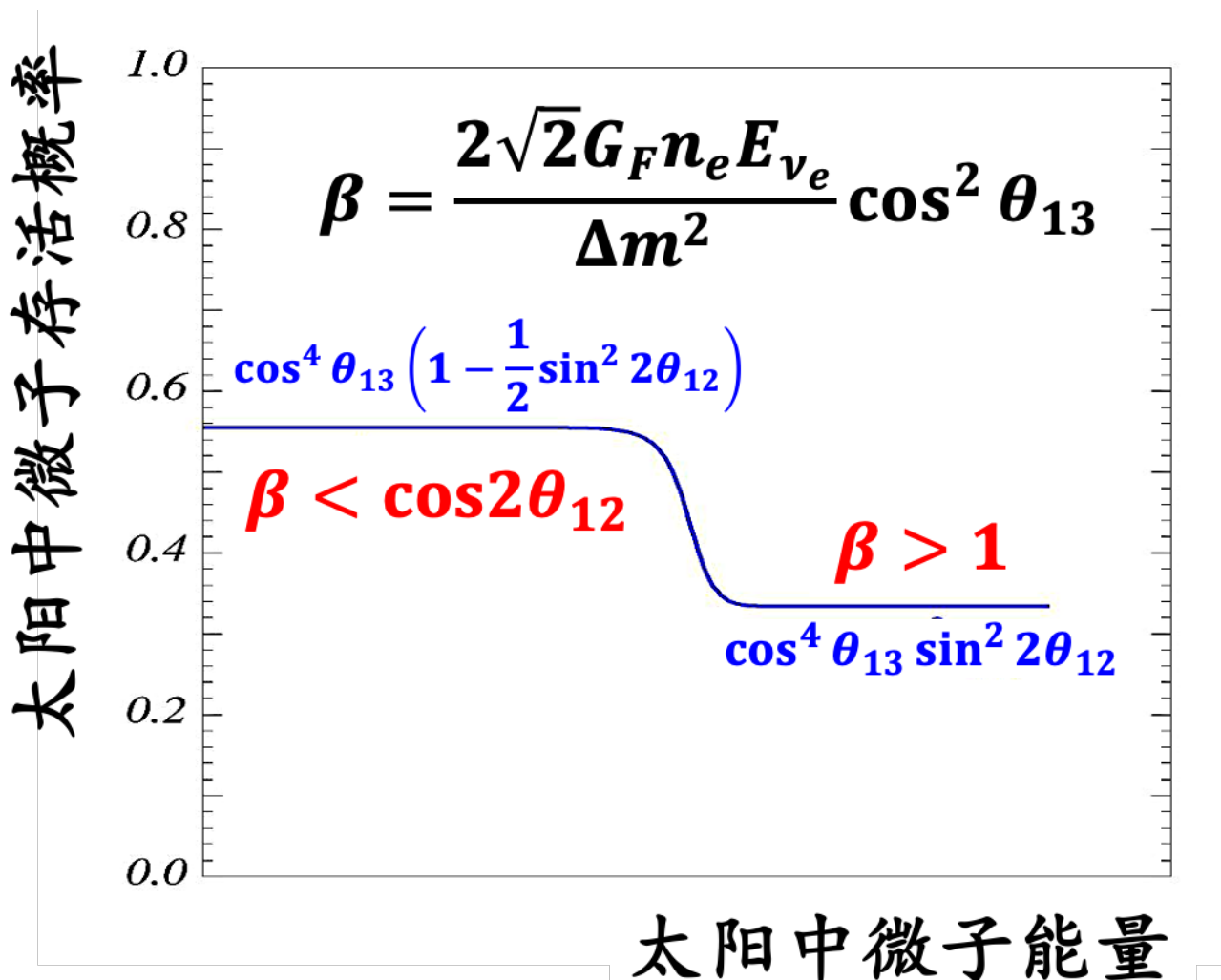


MSW机制 (Mikheyev, Smirnov 和 Wolfenstein) : ν_e 与物质中的电子 e 的弱作用, 使其感受到一个正比于电子密度 n_e 的有效势

$$E = \sqrt{p^2 + m^2} + V \approx p + \frac{m^2}{2p} + V$$

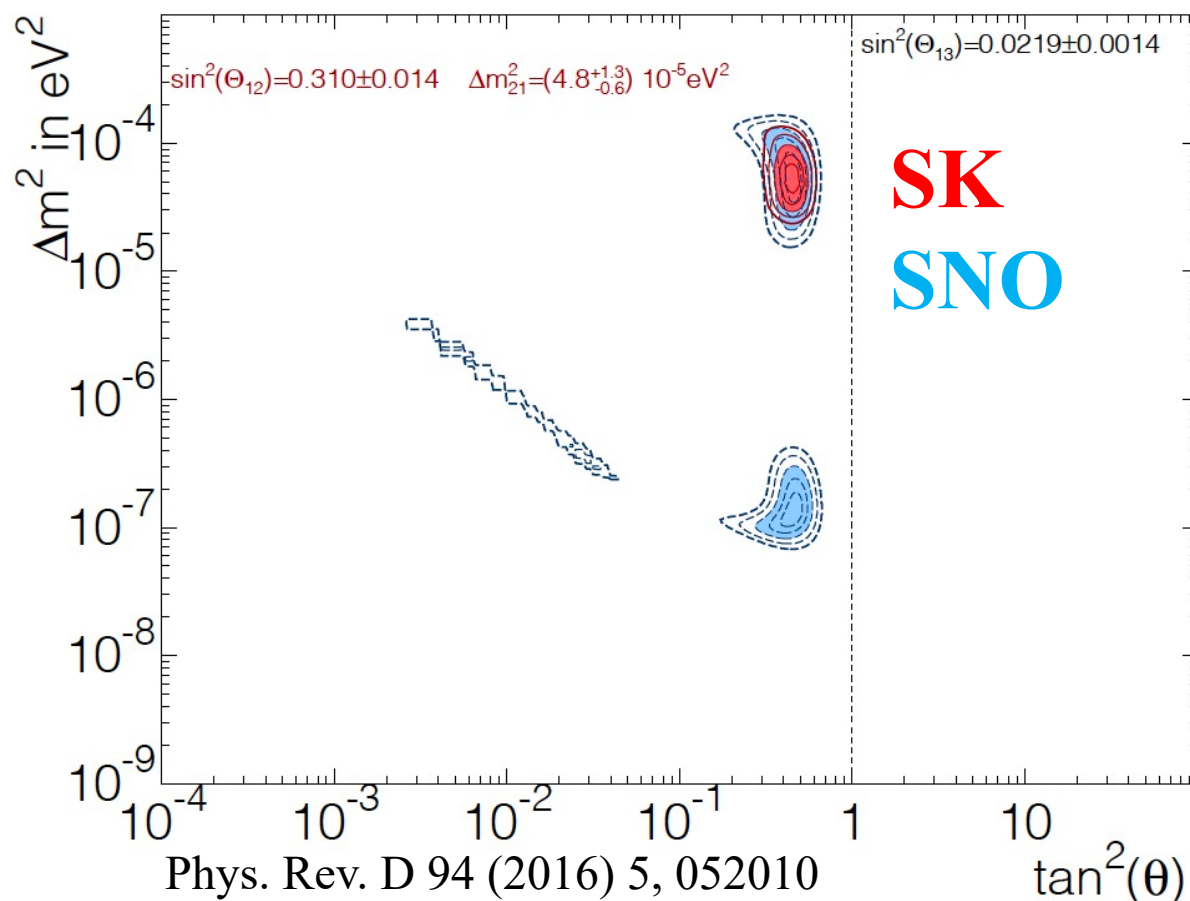
$$m = 0 \rightarrow E = \sqrt{p^2 + m_{\text{eff}}^2} \quad m_{\text{eff}}^2 = 2pV$$

即使中微子质量为零, 物质效应也会产生“中微子振荡”, 发生味道转变。

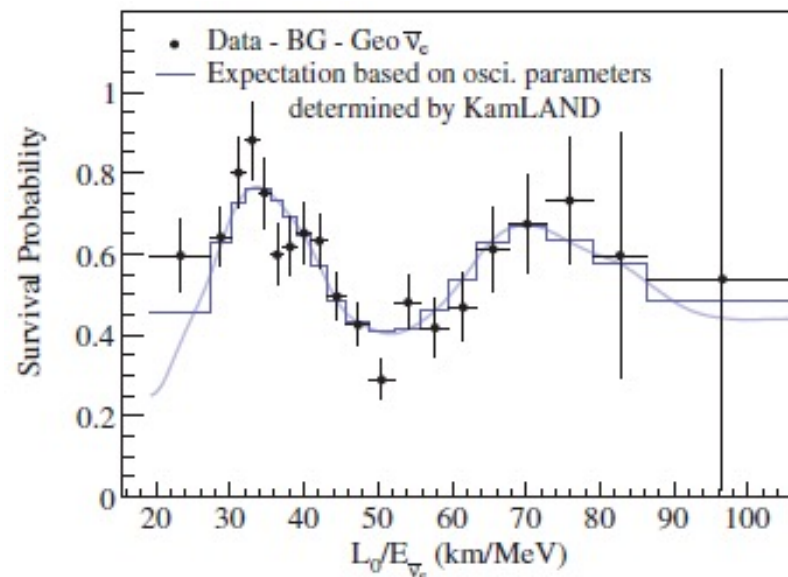
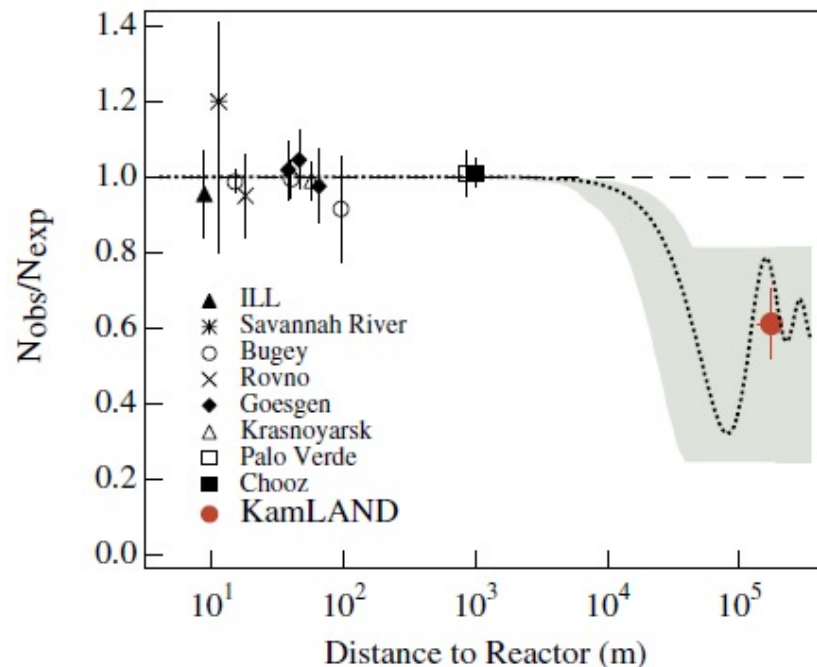


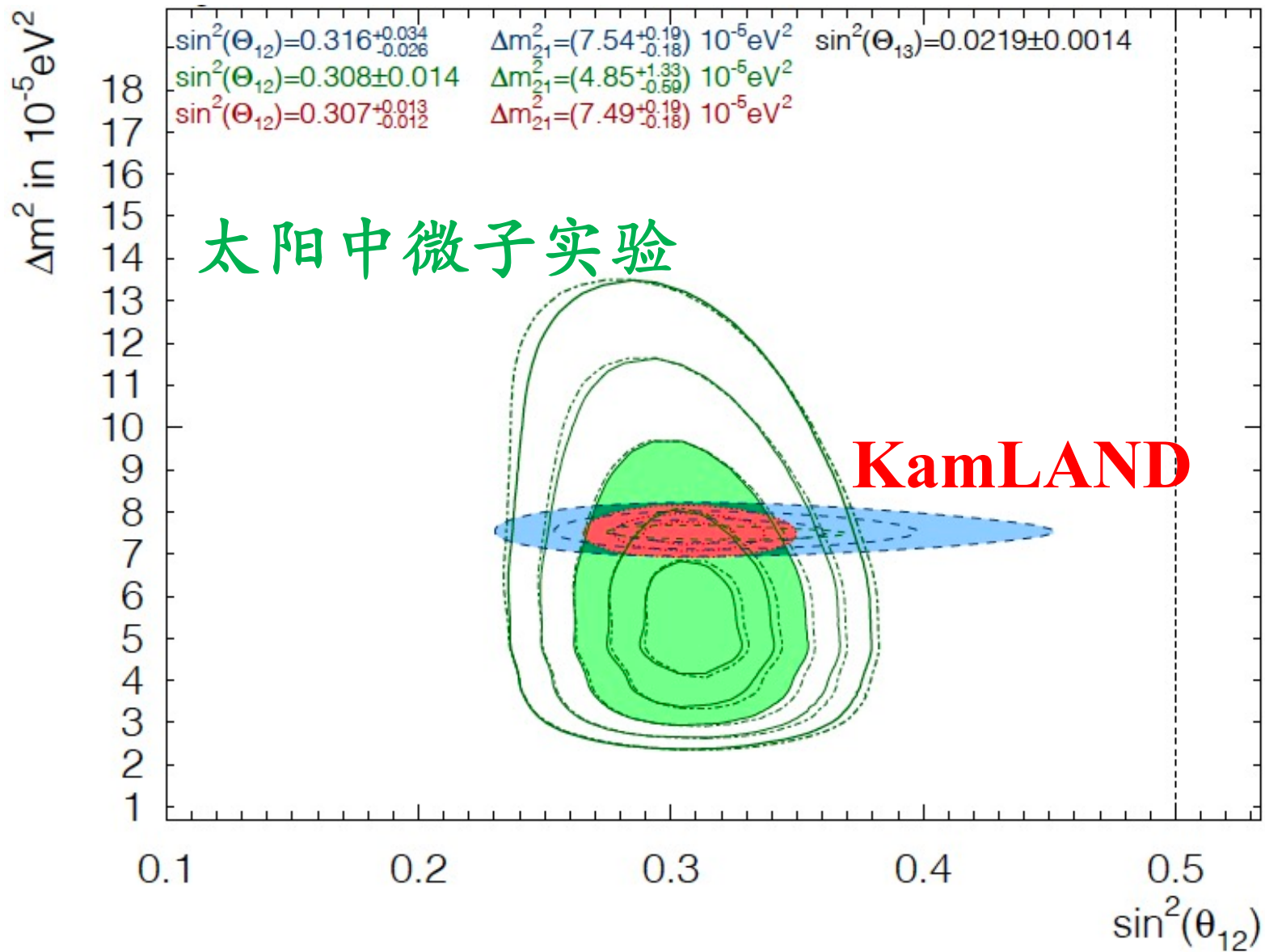
真空振荡为主 ← → 物质效应为主

单纯的太阳中微子实验结果，存在小混合角（SMA）、大混合角（LMA）和低概率与大质量（LOW）解释的可能性。



KamLAND 实验
 把太阳带到地面，
 同样的振荡参数
 Δm_{21}^2 和 θ_{12} 测量结果
 表明大混合角
 (Large Mixing Angle) MSW 是太阳中微子问题的唯一解决方案，并表明非零中微子质量是 SNO 结果的基础。

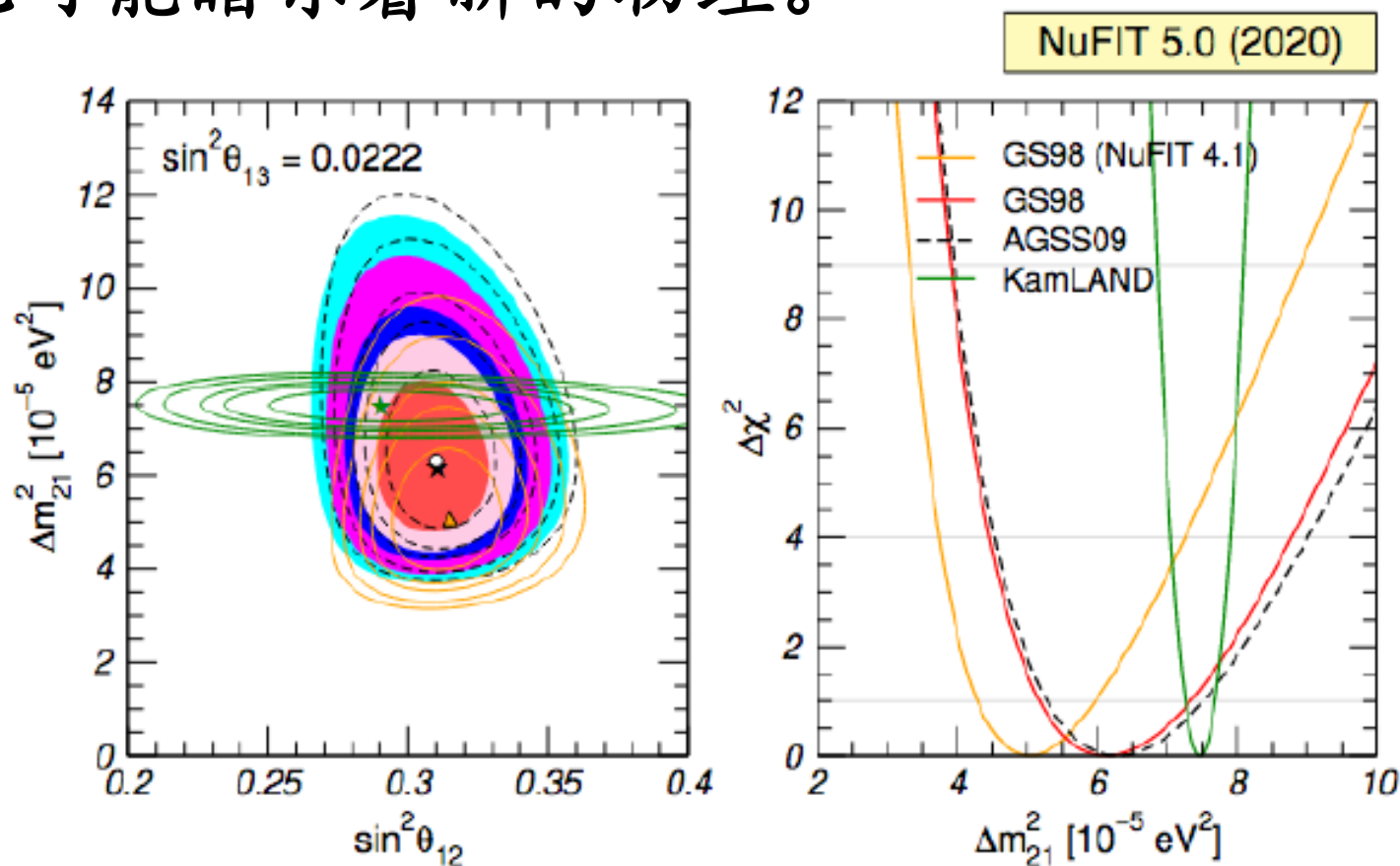




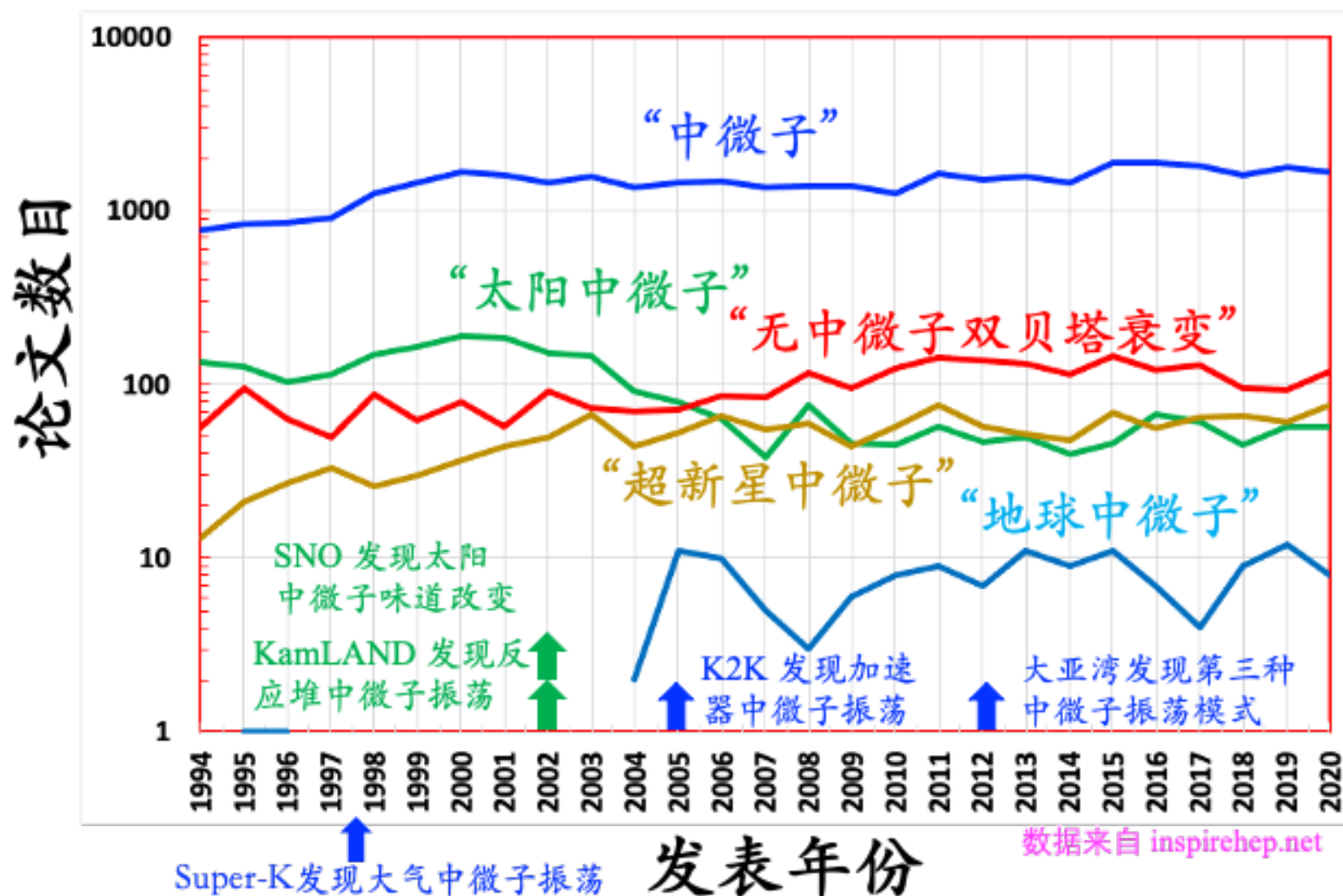
太阳中微子实验与反应堆中微子实验在 Δm_{21}^2 和 θ_{12} 测量值的一致性表明

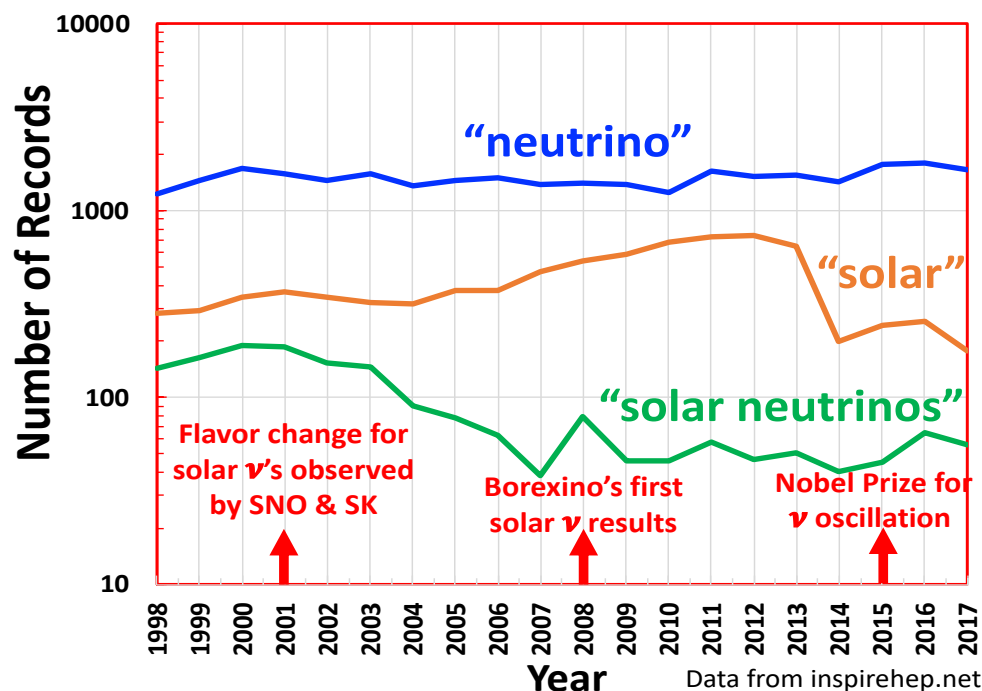
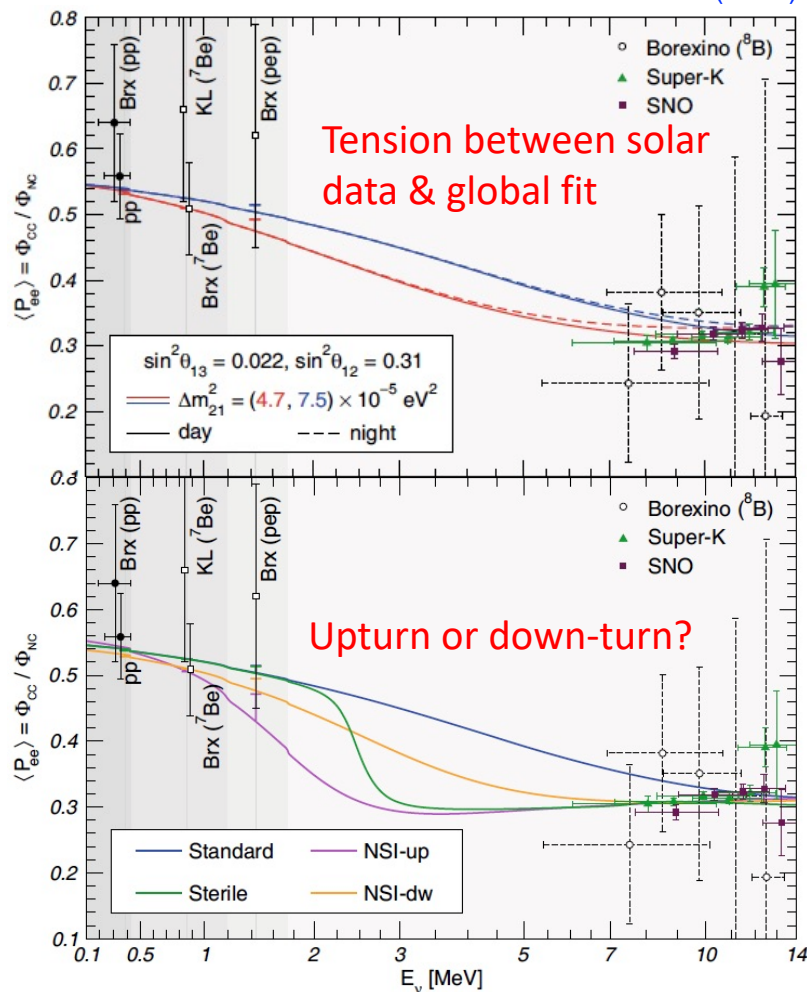
- ✓ CPT 的不变性；
- ✓ 真空和物质中微子振荡理论以及绝热转换理论的正确性；
- ✓ LMA-MSW 是太阳中微子问题的唯一解；
- ✓ 中微子质量是振荡和绝热转换的背后决定因素。

目前KamLAND 实验与太阳中微子实验在振荡参数的差异，虽然都在误差范围内，但也可能暗示着新的物理。



五、未来展望

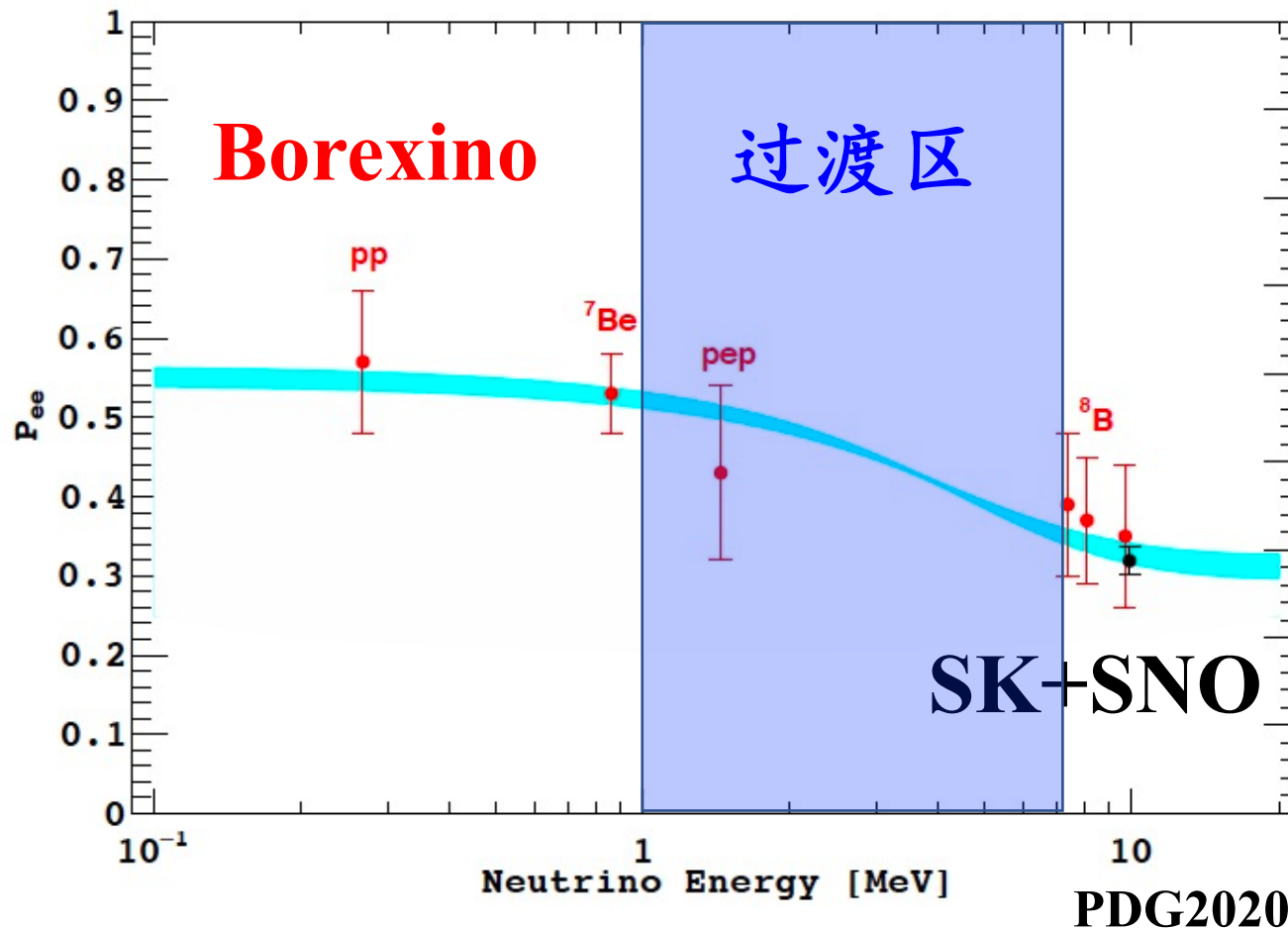




粒子物理: 1) 真空-物质
过渡区发生了什么? 2) ν_e
在地球的再生?

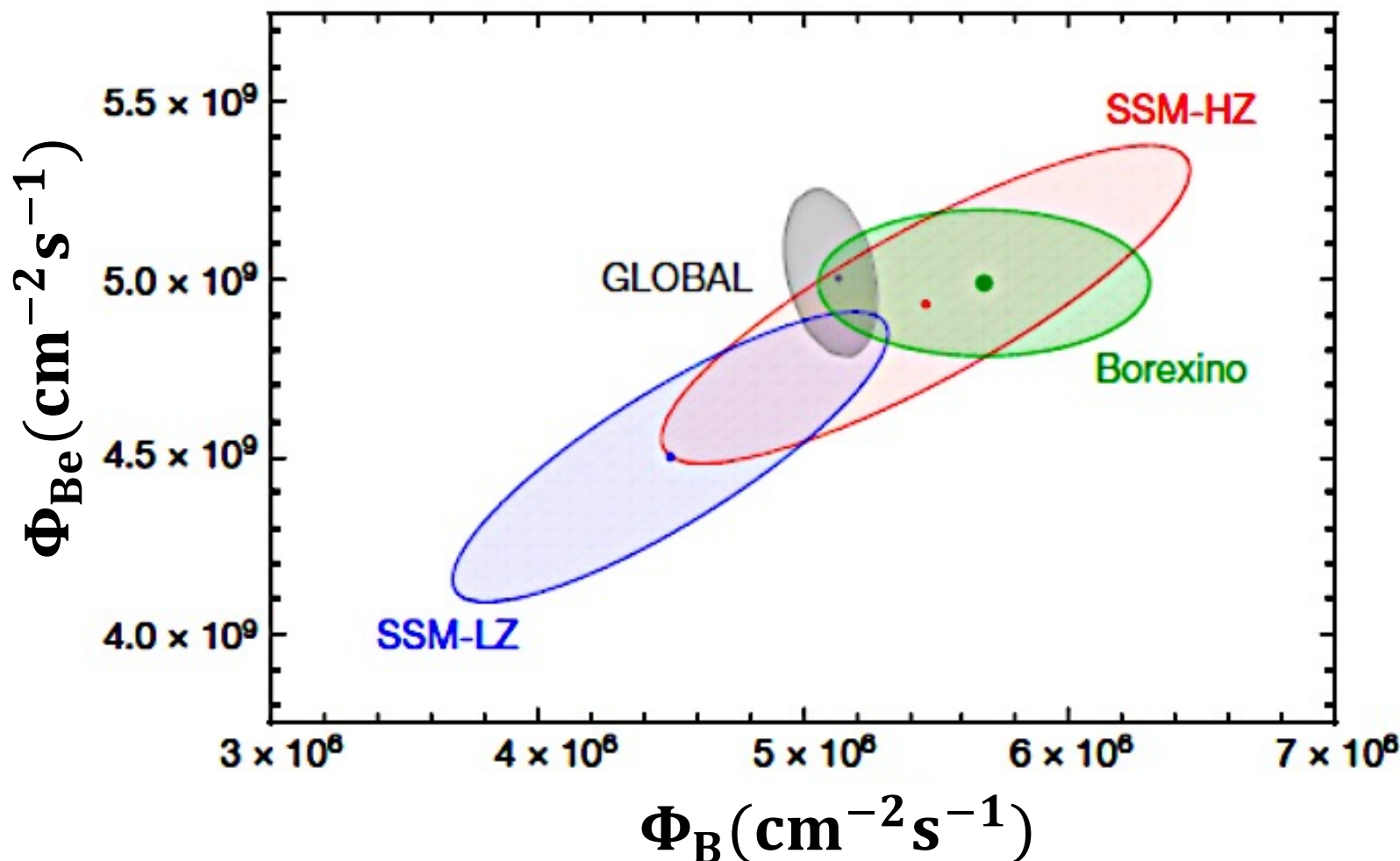
天体物理: 测量所有太阳中微子流强, 尤其是
CNO 和 hep 流强, 检验标准太阳模型。

需要太阳中微子从真空振荡到物质效应**过渡区**的实验数据与精确测量。

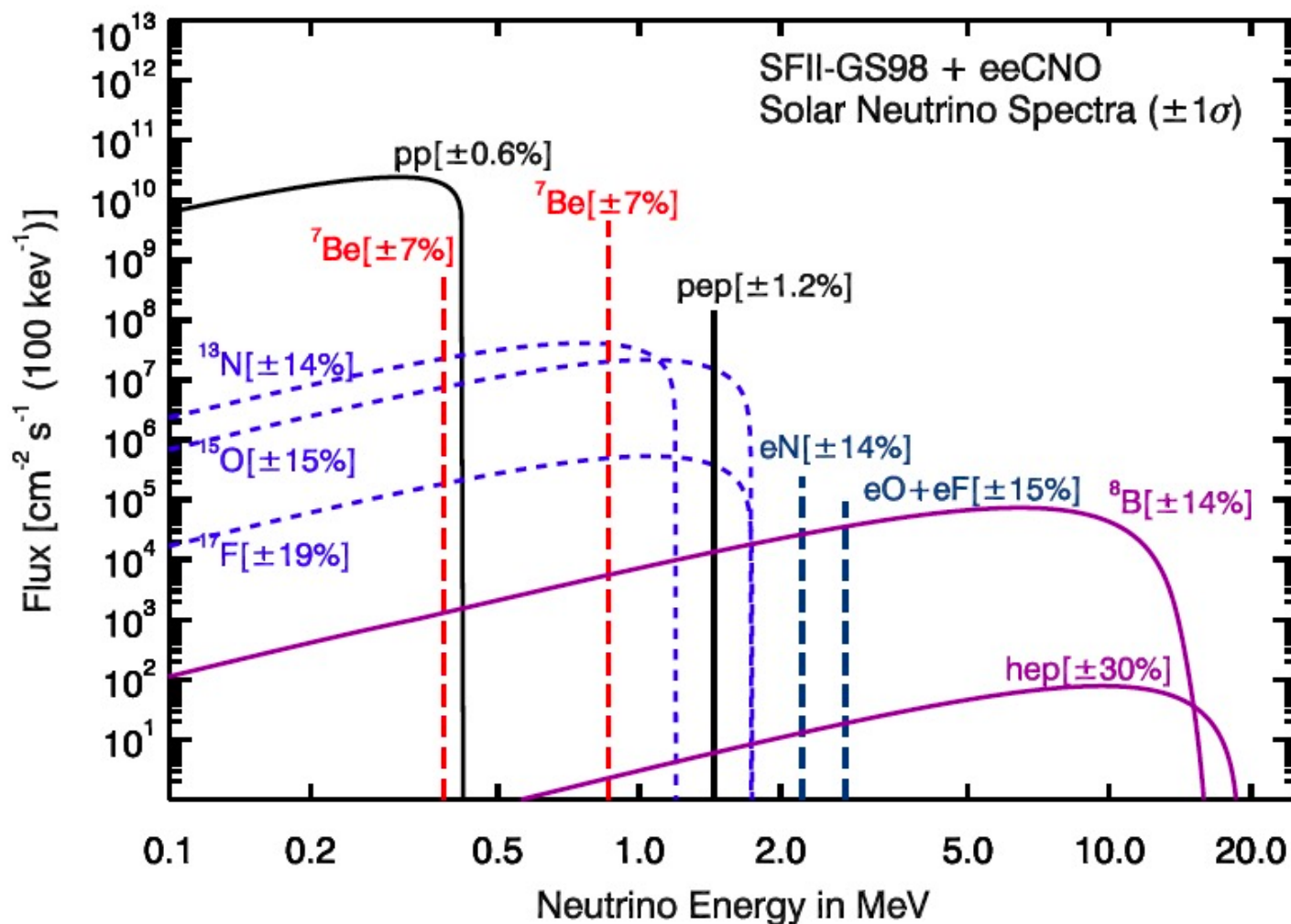


更加精确的Be-7和B-8中微子测量，以
检验标准太阳模型。

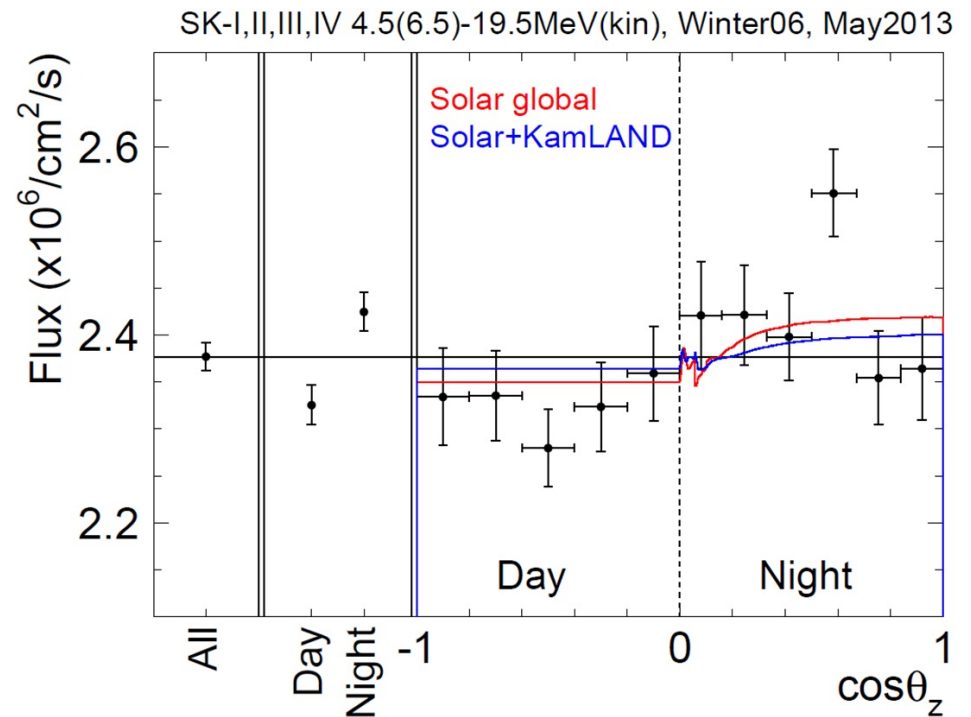
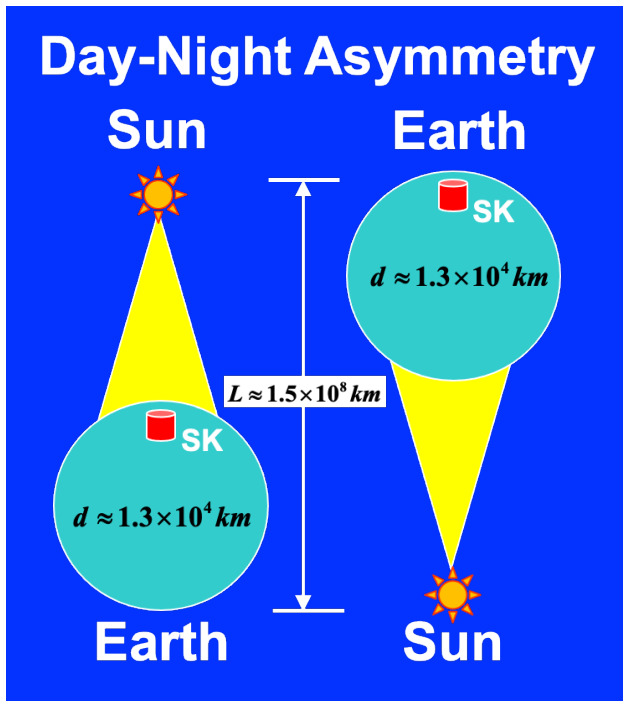
Kai Zuber, TAUP2019



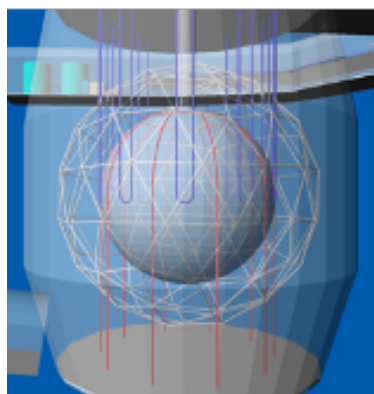
虽然 Borexino 看到了 CNO 迹象，仍需进一步确定， hep 中微子还没有发现。



太阳中微子是不是在晚上更亮？



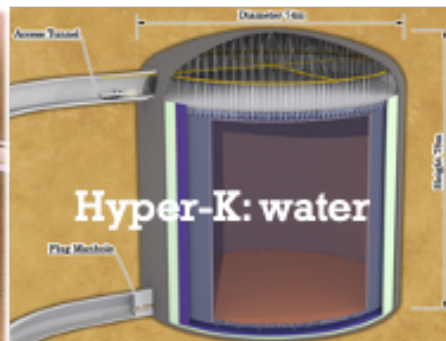
目前及未来可研究太阳中微子的实验



SNO+: LS



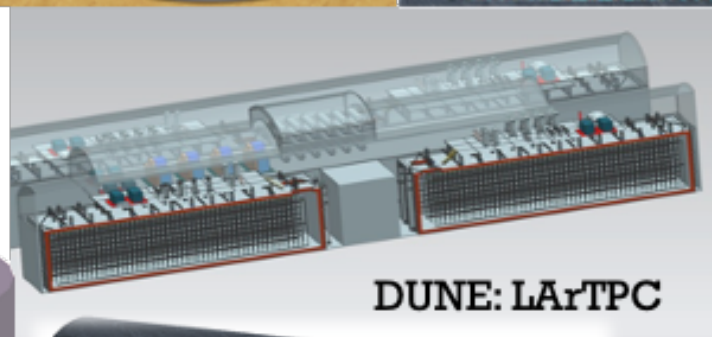
SK: water



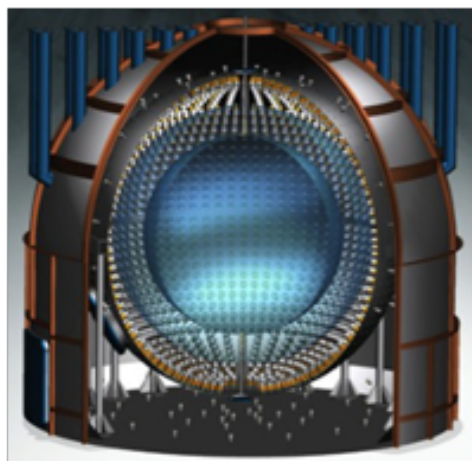
Hyper-K: water



JUNO: LS



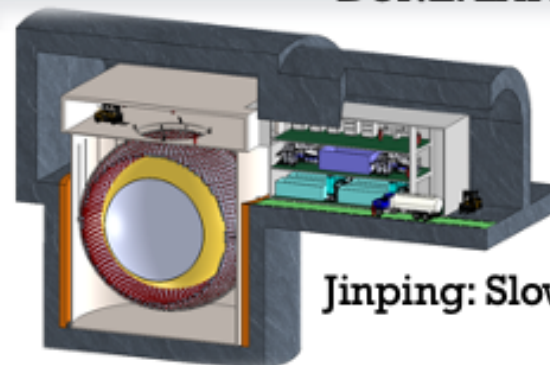
DUNE: LArTPC



Borexino: LS



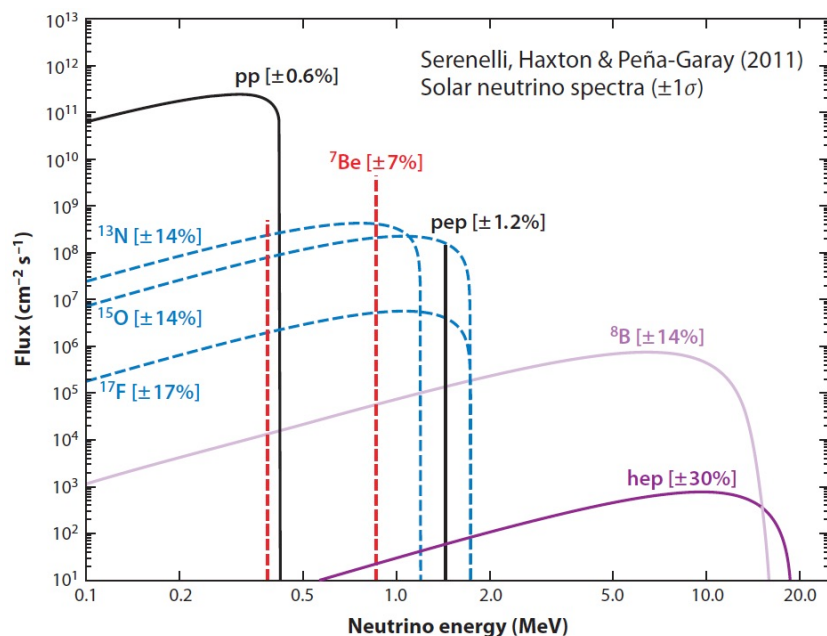
Theia: WbLS



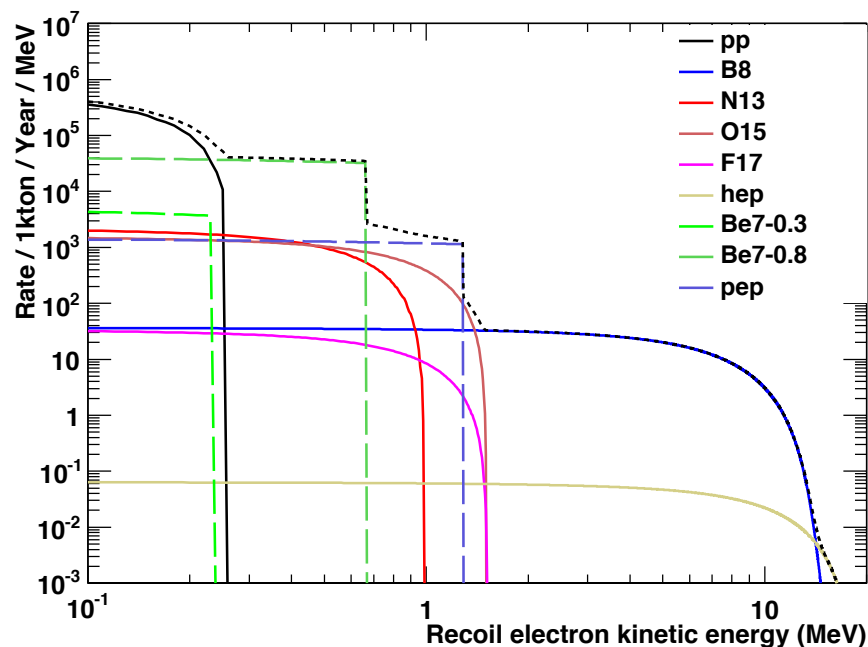
Jinping: Slow LS

实验挑战：太阳中微子能谱解谱

理论



实验

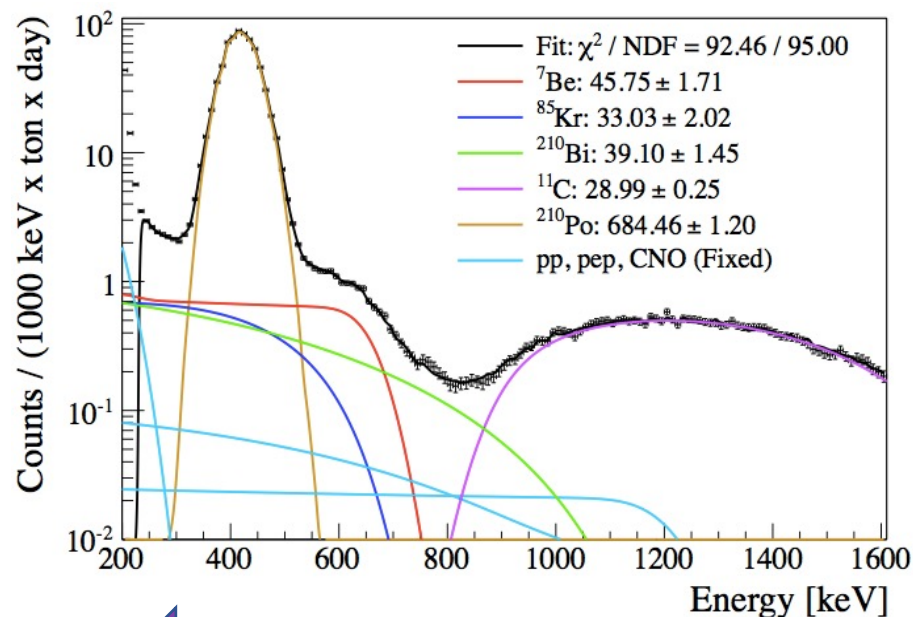


$$T_{\max} = \frac{E_{\nu}}{1 + m_e / 2E_{\nu}}$$

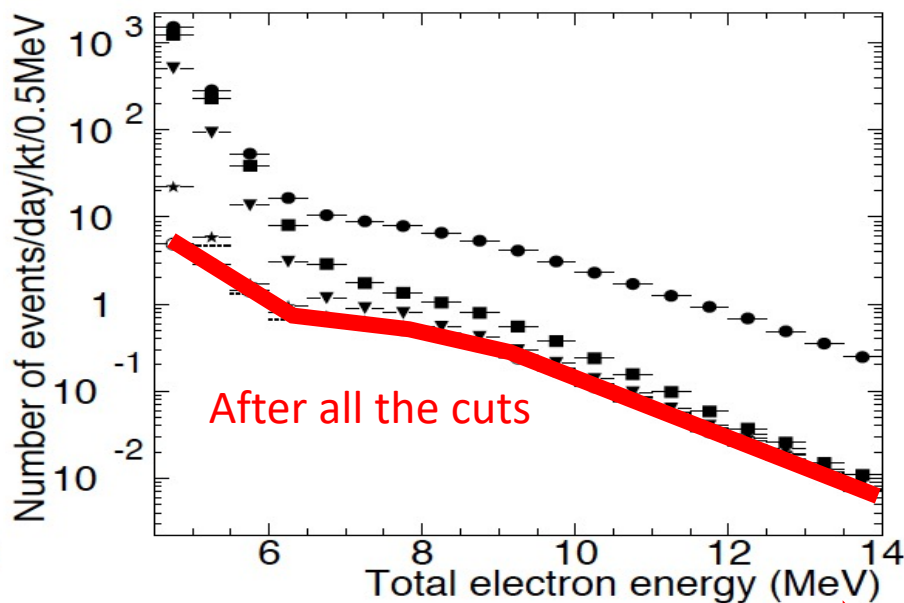
$$F(T_e) = \int_0^{E_{\nu, \max}} \phi(E_{\nu}) \frac{d\sigma}{dT_e} dE_{\nu}$$

实验挑战：宇生及放射性本底

Borexino



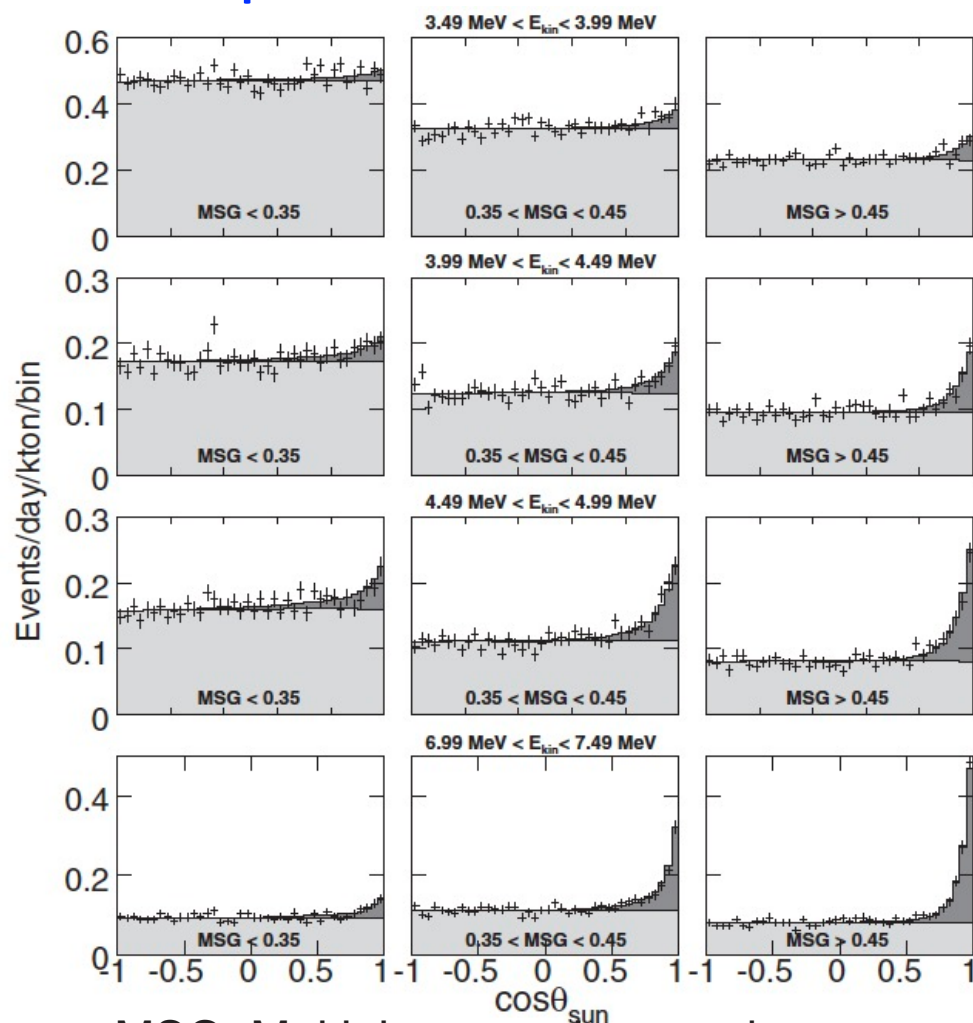
Super-Kamiokande



- ① 外部本底 (PMT, 岩石...)
- ② 内部本底 (^{222}Rn ...)
- ③ 宇生本底

Super Kamiokande

PRD 94, 052010 (2016)



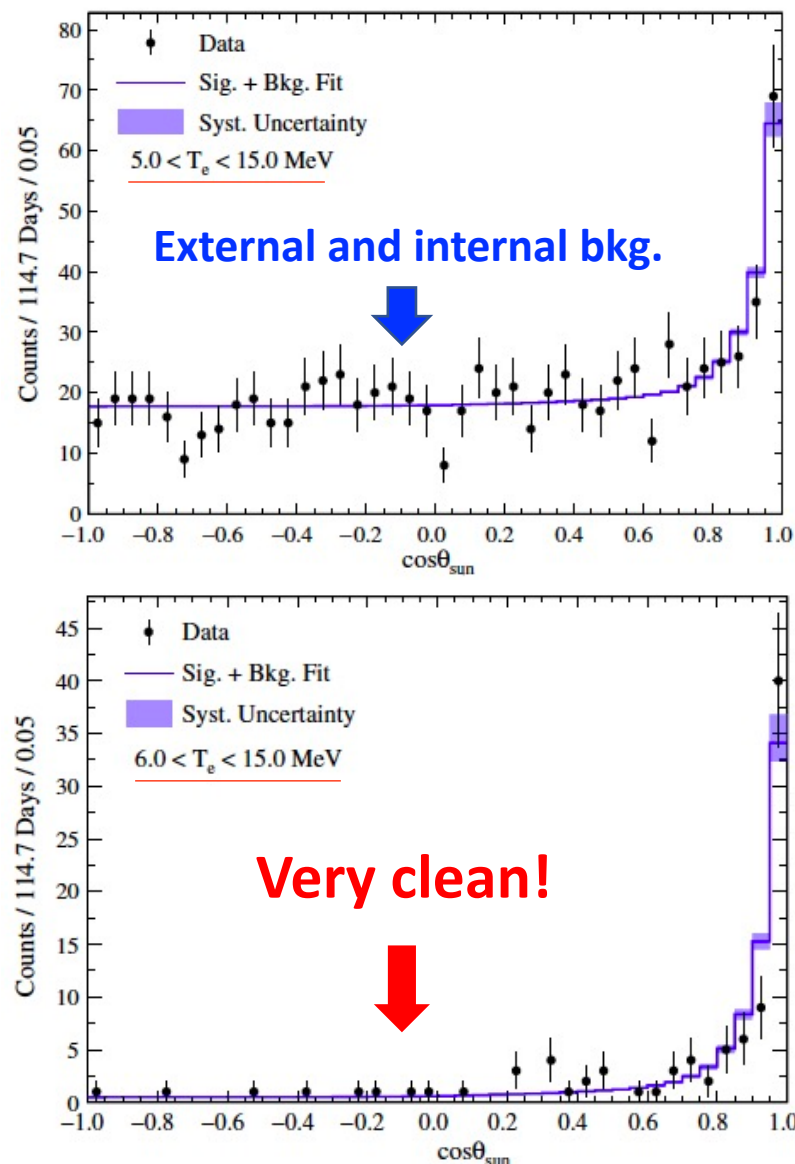
MSG: Multiple scattering goodness

Super Kamiokande: 1000 m

SNO+: 2000 m

SNO+

PRD 99, 012012 (2019)



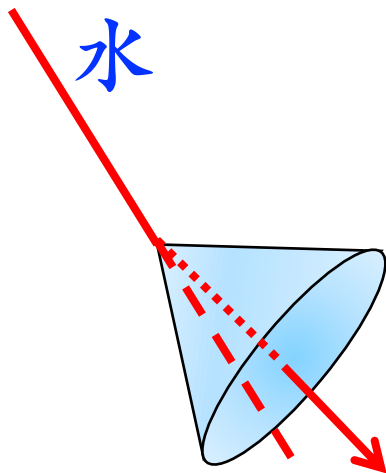
开发慢（发光）液闪技术

SNO

SK

HK

水



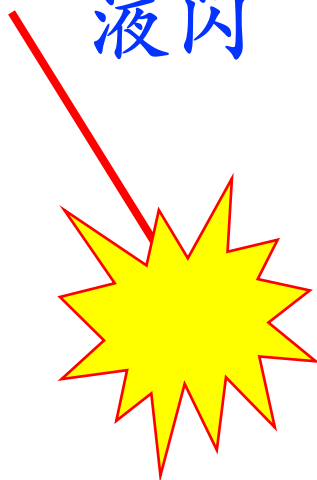
好的方向测量

Borexino

SNO+, JUNO

DUNE

液闪

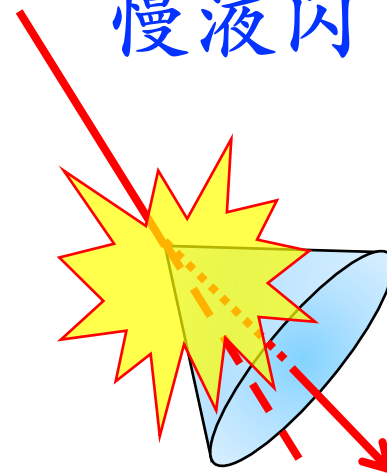


好的能量测量

Theia

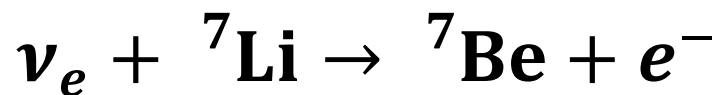
Jinping

慢液闪



好的方向与能量测量

开发太阳中微子微分能谱测量技术

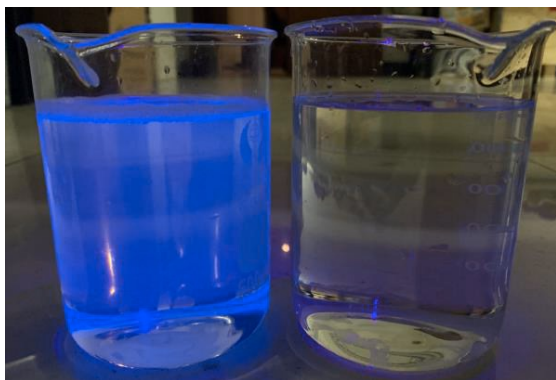


$$E_{\nu_e} = E_{e^-} + 0.862 \text{ MeV}$$

对比



$$E_{\bar{\nu}_e} = E_{e^+} + 1.3 \text{ MeV}$$



掺锂慢液体
闪烁体技术

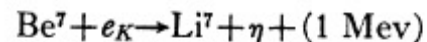
A Suggestion on the Detection of the Neutrino

KAN CHANG WANG

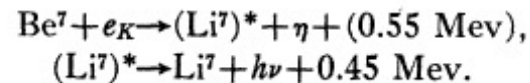
Department of Physics, National University of Chekiang Tsunyi,
Kweichow, China

October 13, 1941

with K capture in two different processes:²



and



是王淦昌先生提出寻找中微子方案的逆过程。

六、总结

- 从天体物理的角度看太阳中微子
 - ✓ 作为内部热核反应的实时信使；
 - ✓ 用于检验标准太阳模型的正确性；
 - ✓ 可窥视比太阳重的恒星内部动力学机制。
- 从粒子物理的角度看
 - ✓ 对电子存活概率曲线变化的研究为寻找标准模型之外的新物理提供了空间；
 - ✓ 太阳中微子地球再生把太阳的物质效应研究带到了地球。
- 在建大型中微子实验为未来提供了机遇

太阳中微子实验总是费时费力，但是“懂得等待的人总是心想事成！”

Frederick REINES and Clyde COWAN
Box 1663, LOS ALAMOS, New Mexico

Thanks for message. Everything comes to
him who knows how to wait.

Pauli

The message of Pauli to Reines and Cowan on 15 June 1956. CERN Pauli Archives.

谢谢！