



清华大学

Tsinghua University

# 中微子探测

---

第一讲

王喆

清华大学

# 中微子在短短不到90年间

## 从“概念”到“现实”到“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 大气中微子反常，超新星中微子

2003 Nobel

2001年 确定太阳中微子振荡与物质效应

2015 Nobel

2012年 大亚湾非0混合角 $\theta_{13}$

2012 Science 十大突破

2013年 甚高能宇宙中微子

2013 Phys. World 十大突破



# 本讲内容

---

1. 中微子
2. 中微子反应
3. 中微子源

# 中微子

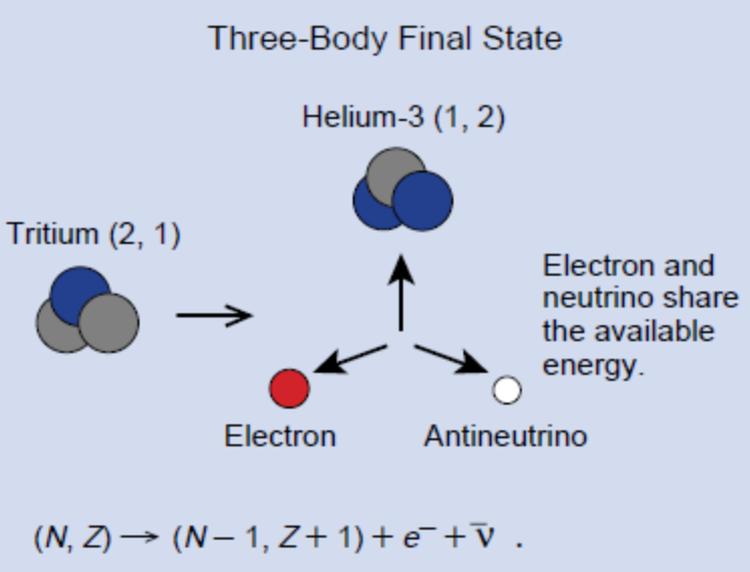
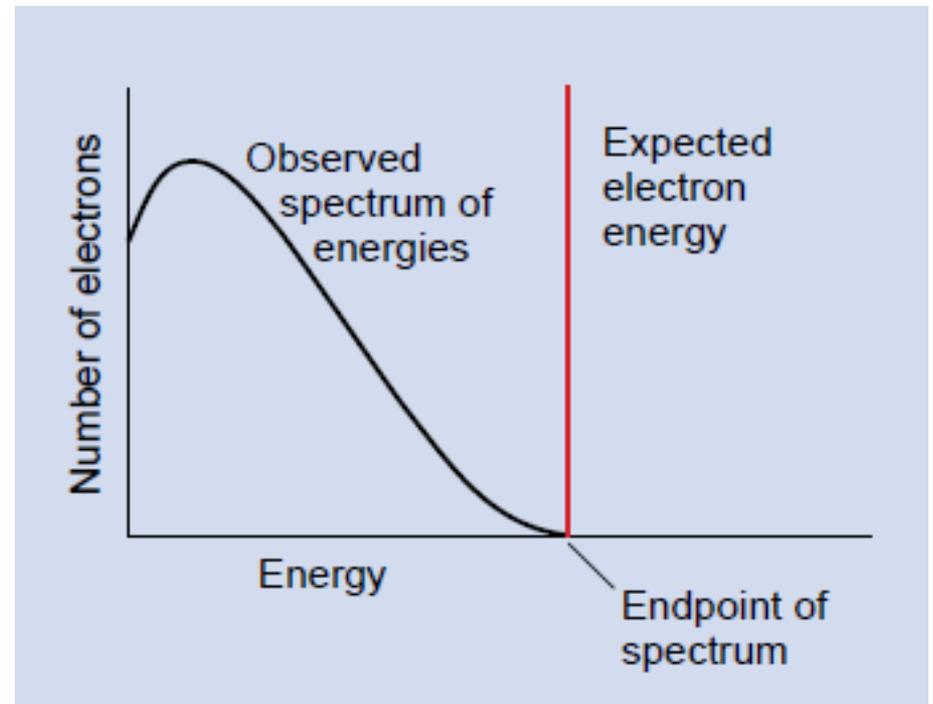
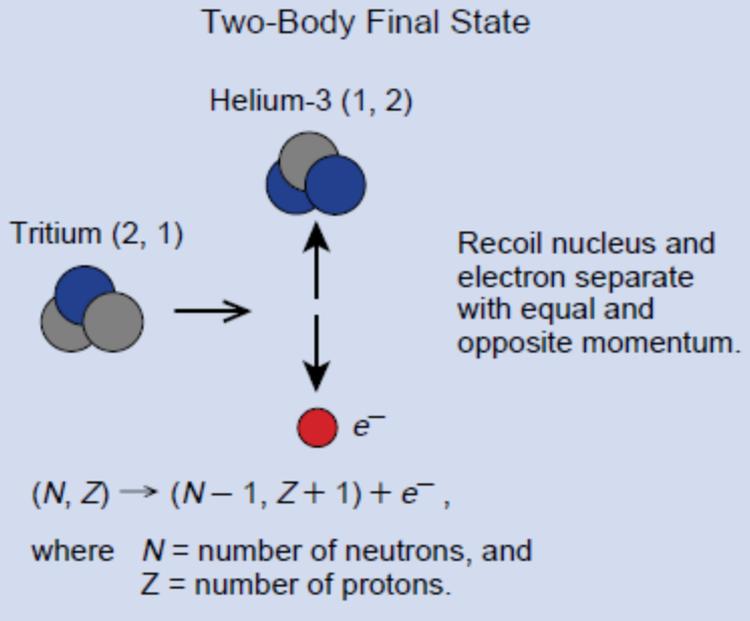


# 中微子的提出

---

- ▶ 1931年 Pauli提出中微子的概念，来解释 $\beta$ 衰变电子能谱
- ▶ 轻子及中微子不再可分
- ▶ 其中中微子“无质量”或极小 ( $\sim eV$ )
- ▶ 中微子不带电

# 1931年 Pauli提出中微子的概念



# 中微子反应



# 物质的基本组成：轻子和夸克

自然界中的基本粒子（现在的认识）：

- ▶ 六种夸克（分数电荷）：  
u, d, c, s, t, d

- ▶ 六种轻子：

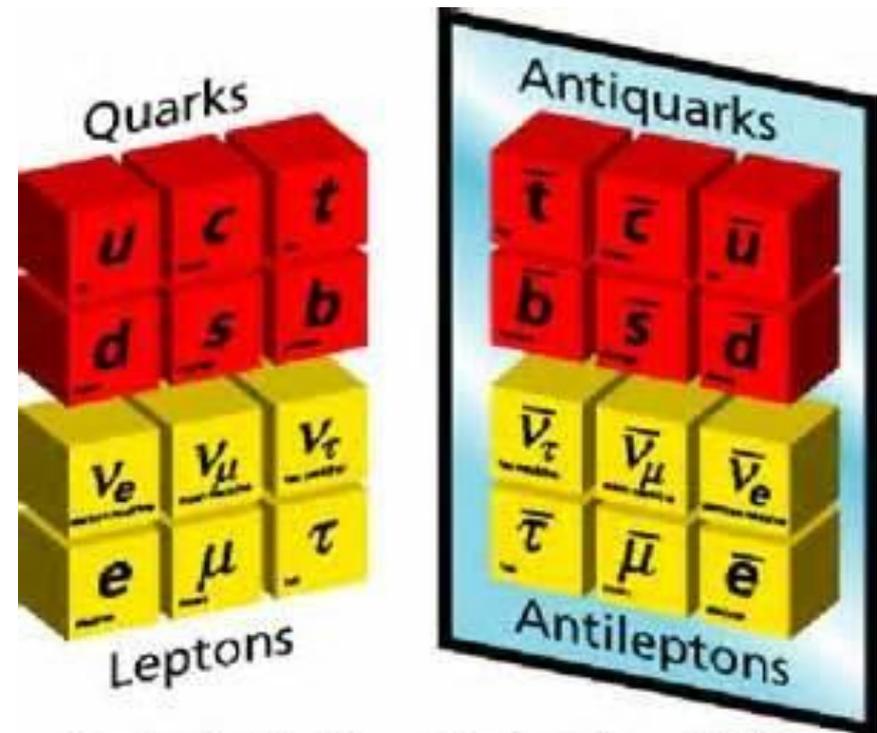
e,  $\nu_e$ ,  $\mu$ ,  $\nu_\mu$ ,  $\tau$ ,  $\nu_\tau$

- ▶ 夸克轻子各分成3代

- ▶ 相互作用是通过交换：  
 $\gamma$ , g, Z,  $W^\pm$

mass→	2.4 MeV	1.27 GeV	171.2 GeV	0
charge→	$2/3$	$2/3$	$2/3$	0
spin→	$1/2$	$1/2$	$1/2$	1
name→	u up	c charm	t top	$\gamma$ photon
Quarks	4.8 MeV	104 MeV	4.2 GeV	0
	$-1/3$	$-1/3$	$-1/3$	0
	$1/2$	$1/2$	$1/2$	1
	d down	s strange	b bottom	g gluon
Leptons	<2.2 eV	<0.17 MeV	<15.5 MeV	91.2 GeV
	0	0	0	0
	$1/2$	$1/2$	$1/2$	1
	$\nu_e$ electron neutrino	$\nu_\mu$ muon neutrino	$\nu_\tau$ tau neutrino	$Z^0$ weak force
	0.511 MeV	105.7 MeV	1.777 GeV	80.4 GeV
	-1	-1	-1	$\pm 1$
	$1/2$	$1/2$	$1/2$	1
	e electron	$\mu$ muon	$\tau$ tau	$W^\pm$ weak force

- ▶ 夸克和轻子都有自己的反粒子
- ▶ 带相反电荷
- ▶ 相互作用也是通过交换： $\gamma$ ,  $g$ ,  $Z$ ,  $W^\pm$



The Standard Model contains 3 neutrinos of definite flavor, and a set of corresponding anti-particles.



# 夸克组分模型

## ▶ 质子 p

质子带一个正电，所以  $p = (uud)$   
 $(\frac{2}{3} + \frac{2}{3} + \frac{-1}{3})$

## ▶ 中子 n

中子不带电，所以  $n = (udd)$   
 $(\frac{2}{3} + \frac{-1}{3} + \frac{-1}{3})$

## ▶ 介子 $\pi^+$

$\pi^+$ 带一个正电，  $\pi^+ = (u\bar{d})$   
 $(\frac{2}{3} + \frac{1}{3})$

## ▶ 介子 $K^+$

$K^+$ 带一个正电，  $K^+ = (u\bar{s})$   
 $(\frac{2}{3} + \frac{1}{3})$

质子和中子是重子，由三个正夸克组成的。

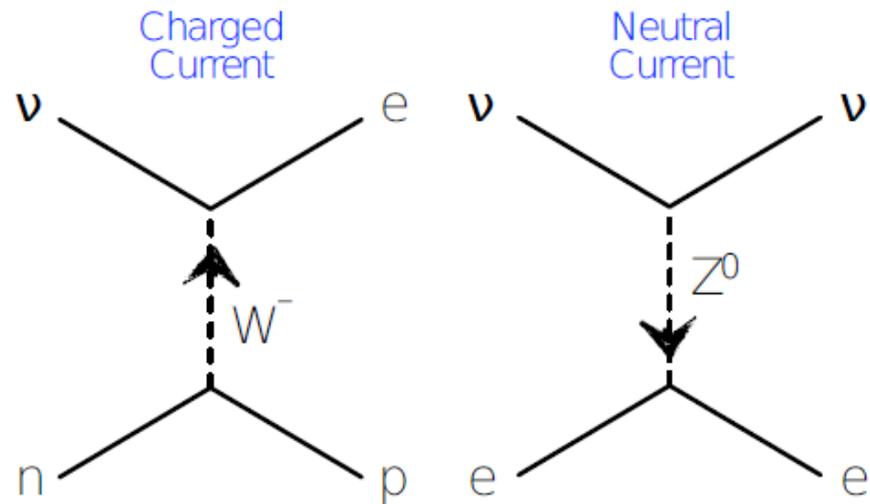
介子是由一个正夸克和一反夸克组成的。



# 中微子参与的作用

- ▶ 中微子不带电，不参与电磁相互作用
- ▶ 中微子也不参与强相互作用
- ▶ 中微子质量可以忽略，引力很小
  
- ▶ 中微子可以参与弱相互作用，作用概率极小  
弱相互作用是通过交换 $Z$ ， $W^\pm$ 完成的

1. 交换  $W^\pm$ :  
带电流过程
2. 交换  $Z$ :  
中性流过程





## 带电流过程：交换 $W^\pm$ 的过程

- ▶ 能够凑成+1或-1电荷的一对正反夸克可以形成一个 $W^+$ 或 $W^-$

$$u + \bar{d} \rightarrow W^+$$

$$\bar{u} + s \rightarrow W^-$$

- ▶ 一个对正反轻子，电荷也是+1或-1，也可以形成一个 $W^+$ 或 $W^-$

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

$$e^+ + \nu_e \rightarrow W^+$$

- ▶ 上述过程中参与的粒子可以在反应式左右移动，移动后变成反粒子

$$u + W^- \rightarrow d$$

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



## 带电流过程：不同代之间粒子的混合

- ▶ 在凑成 $W^\pm$ 的过程中，不同代之间的夸克是可以混合的，一般来讲，跨代混合较难，即可以反映，但概率会降低
- ▶ 在凑成 $W^\pm$ 的过程中，不同代之间的轻子之间原则上也可以，但概率极低，实际上，在考虑中微子导致的相互作用的时候，从不考虑不同代之间的轻子混合

# 带电流过程：夸克和轻子之间的转化

▶ 利用夸克来理解 $\beta$ 衰变

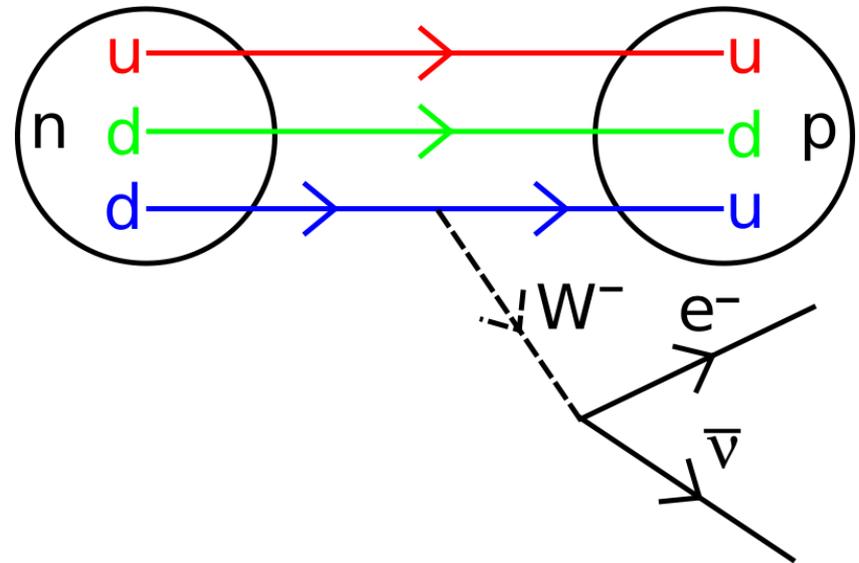
$$d \rightarrow u + W^- \rightarrow u + e^- + \bar{\nu}_e$$

$$\frac{-1}{3} \rightarrow \frac{2}{3} - 1 \rightarrow \frac{2}{3} - 1 + 0$$

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

$$0 \rightarrow 1 - 1 \rightarrow 1 - 1 + 0$$

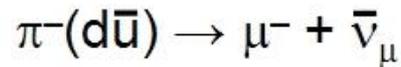
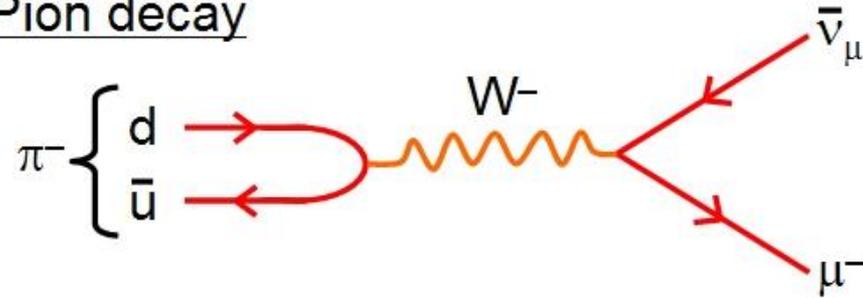
$${}^{16}_7\text{N} \rightarrow {}^{16}_8\text{O} + e^- + \bar{\nu}_e$$



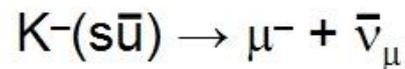
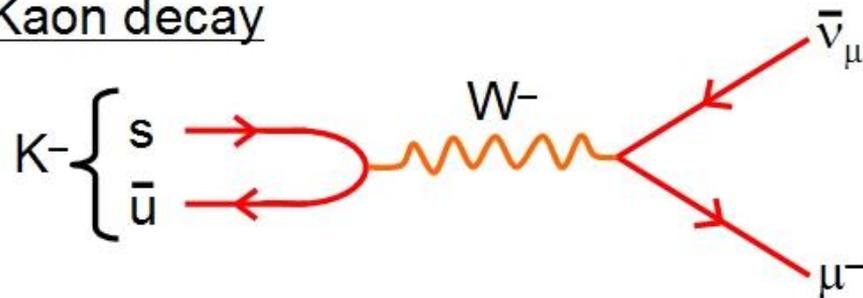
# 带电流过程：夸克和轻子之间的转化

## ▶ 介子到中微子的过程

### Pion decay



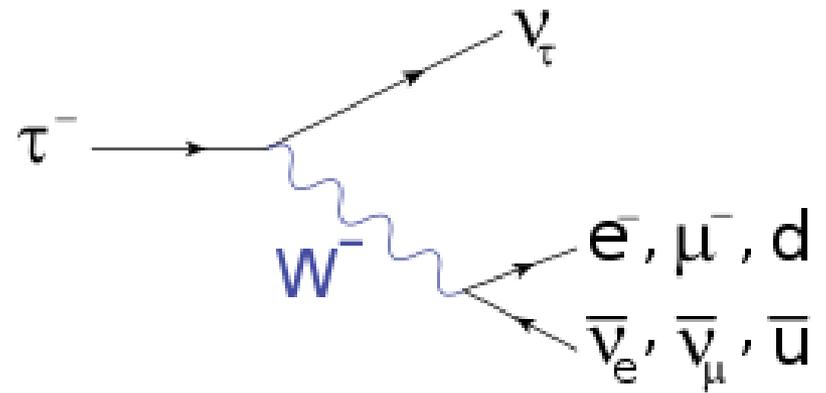
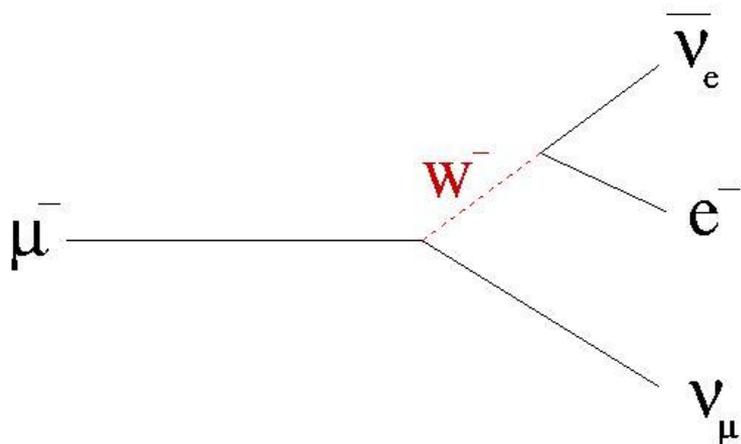
### Kaon decay



# 带电流过程：轻子之间的转化

## ► 轻子的衰变

$$\mu^- \rightarrow W^- + \nu_\mu \rightarrow e^- + \bar{\nu}_e + \nu_\mu$$

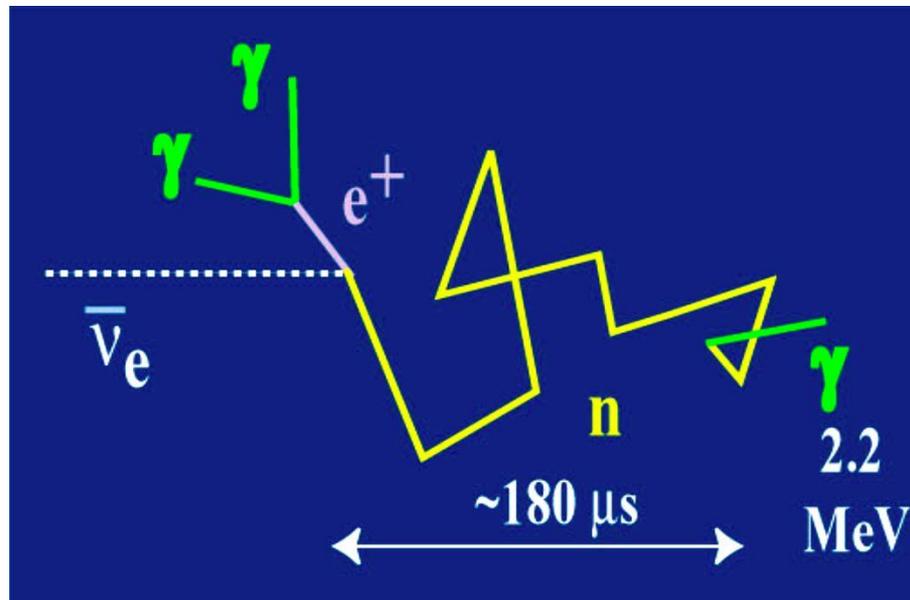


# 带电流过程：中微子“导致”的反应

## ▶ 反β衰变

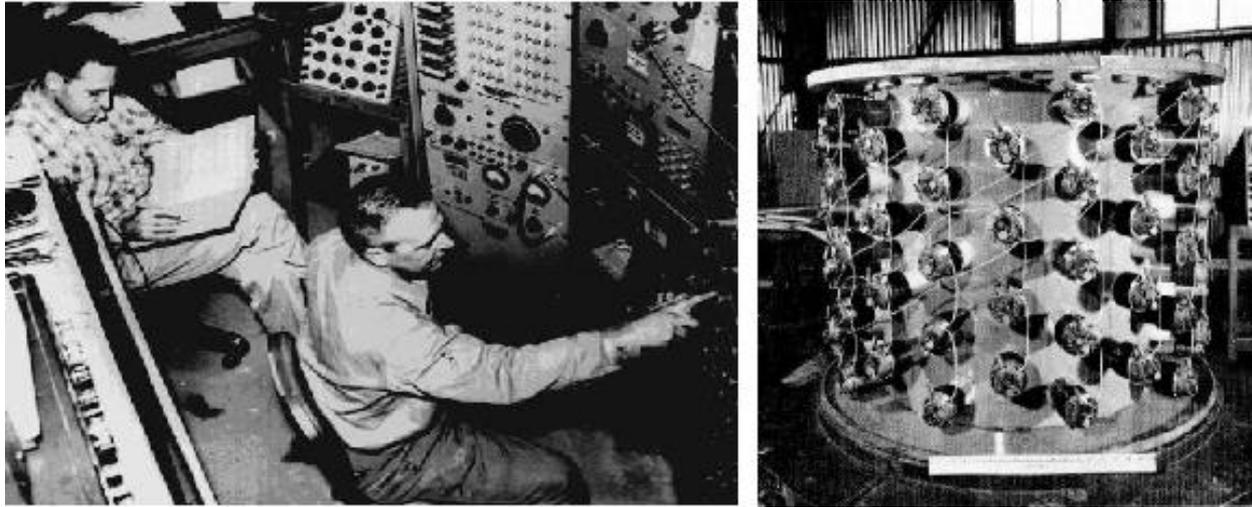
▶  $\bar{\nu}_e + u \rightarrow \bar{\nu}_e + d + W^+ \rightarrow d + e^+$  从夸克角度看

▶  $\bar{\nu}_e + p \rightarrow \nu_e + n + W^+ \rightarrow n + e^+$  从核子角度看

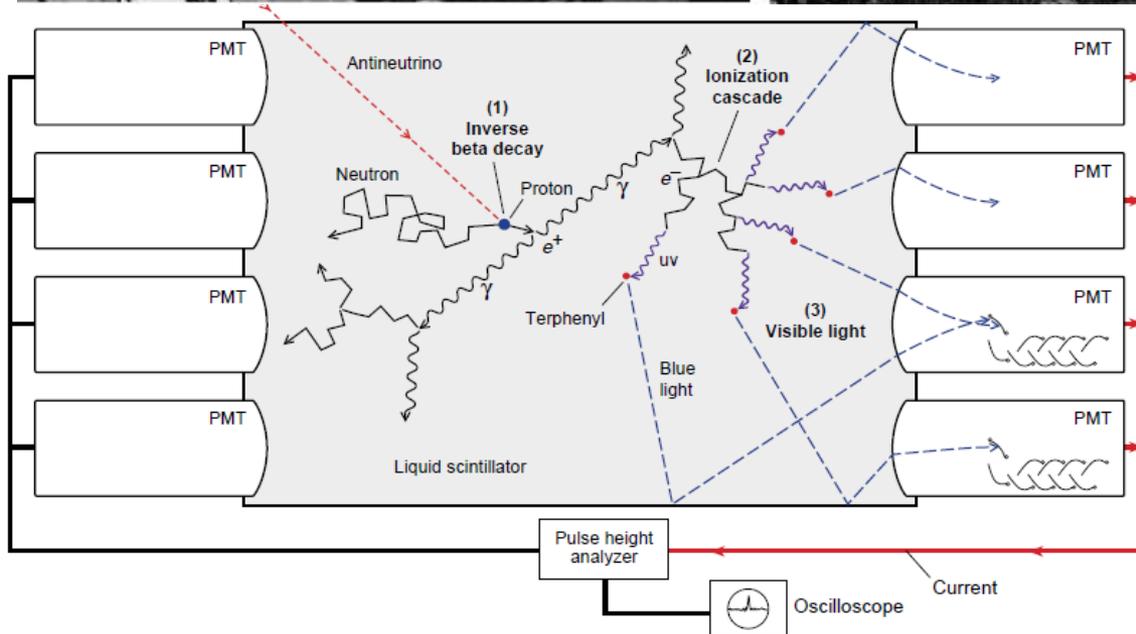


▶  $\nu_e + {}^{37}\text{Cl} \rightarrow {}^{37}\text{Ar} + e^-$  从原子核角度看

# 中微子的发现过程



1956年  
Cowan和  
Reines探  
测到中微  
子





# 带电流导致的核子碎裂

- ▶ 当中微子能量很小时（例如  $< 200\text{MeV}$ ），由于中微子的散射而新产生的夸克动量很小，它还能维持在原子核内部，这时新的原子核还是一个整体，作为整体参与和中微子的散射
- ▶ 相反，如果新的夸克能量太高，它将挣脱原子核，离开。
- ▶ 但在普通环境下，单独的夸克是不能存在的，它要与真空中产生的一对正反夸克对中的一个结合，余下的一个与原来的核子结合。
- ▶ 如果新的夸克能量更高，核子会碎裂，从真空中抓中的夸克也更多。



▶ 低动量

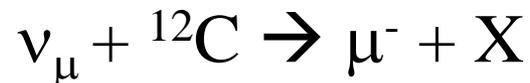


▶ 中等动量



Y是指一个和 ${}^{12}\text{N}$ 接近的核子

▶ 高动量



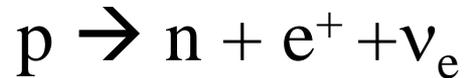
X是指各种粒子,  $\pi$ , K, p, n, 或者是多个粒子



# 质量约束

- ▶  $W^\pm$ 和 $Z$ 为中间态粒子，我们不考虑他们的质量问题

- ▶ 但初末态之间，必须考虑质量约束



NO

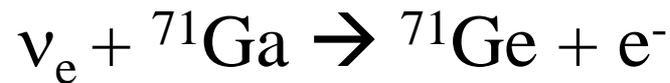


YES

- ▶ 或者考虑反应阈值



$$E_{\nu\text{阈值}} = 1.8 \text{ MeV}$$



$$E_{\nu\text{阈值}} = 0.233 \text{ MeV}$$



# 中性流过程：交换Z的过程

- ▶ 任何一对夸克和反夸克即可形成一个Z
- ▶ 任何一对正反轻子也可以形成一个Z

$$Z \rightarrow e^+ + e^-$$

$$Z \rightarrow u + \bar{u}$$

$$Z \rightarrow \nu + \bar{\nu}$$



# 中性流过程的散射

- ▶ 中微子在电子上的散射

$$\nu + e \rightarrow \nu + e$$

- ▶ 中微子在夸克上的散射

$$\nu + u \rightarrow \nu + u$$

- ▶ 中微子在核子上的散射

$$\nu + p \rightarrow \nu + p$$

$$\nu + d \rightarrow \nu + p + n \quad (\text{d是氘核})$$

- ▶ 中微子在原子核上的散射

$$\nu + {}^{16}\text{O} \rightarrow \nu + {}^{16}\text{O}$$



# 中性流导致的核子碎裂

- ▶ 当中微子动量小时（例如 $<200 \text{ MeV}$ ），与中微子散射的夸克动量也小，夸克和核子作为一个整体参与散射。
- ▶ 当反冲夸克动量很高时，它将挣脱核子和原子核的束缚。
- ▶ 但由于普通环境下，不允许自由夸克的存在，它将结合真空中产生的正反夸克对中的一个，形成一个介子，飞出去。



▶ 低动量



▶ 中等动量



Y是指一个和 ${}^{16}\text{O}$ 接近的核子

▶ 高动量



X是指各种粒子,  $\pi$ , K, p, n, 或者是多个粒子



# 中性流

---

- ▶ 因为没有新粒子产生，所以质量约束对中性流散射过程没有影响。



# 中微子的性质的重要几点

- ▶ 中微子质量极小
- ▶ 夸克的分数电荷
- ▶ 夸克和轻子分三代
- ▶ W和Z的参与
- ▶ 只参与弱作用
  1. 带电流过程
  2. 中性流过程
  3. 小动量，核子整体散射，有对应味道轻子产生
  4. 大动量，打散核子
  5. 质量约束，反应阈值

# 中微子源



# 中微子源

## 按照粒子物理的概念分类

- ▶ 衰变产生
- ▶ 裂变产生
- ▶ 聚变产生

## 按照来源分类

- ▶ 放射源
- ▶ 反应堆
- ▶ 太阳中微子，恒星
- ▶ 大气中微子
- ▶ 加速器
- ▶ 地球中微子
- ▶ 超新星中微子
- ▶ 天体甚高能中微子（探测到，但未知来源）
- ▶ 大爆炸中微子（理论上存在，但未探测到）



## 按照粒子物理的概念分类

- ▶ 衰变产生

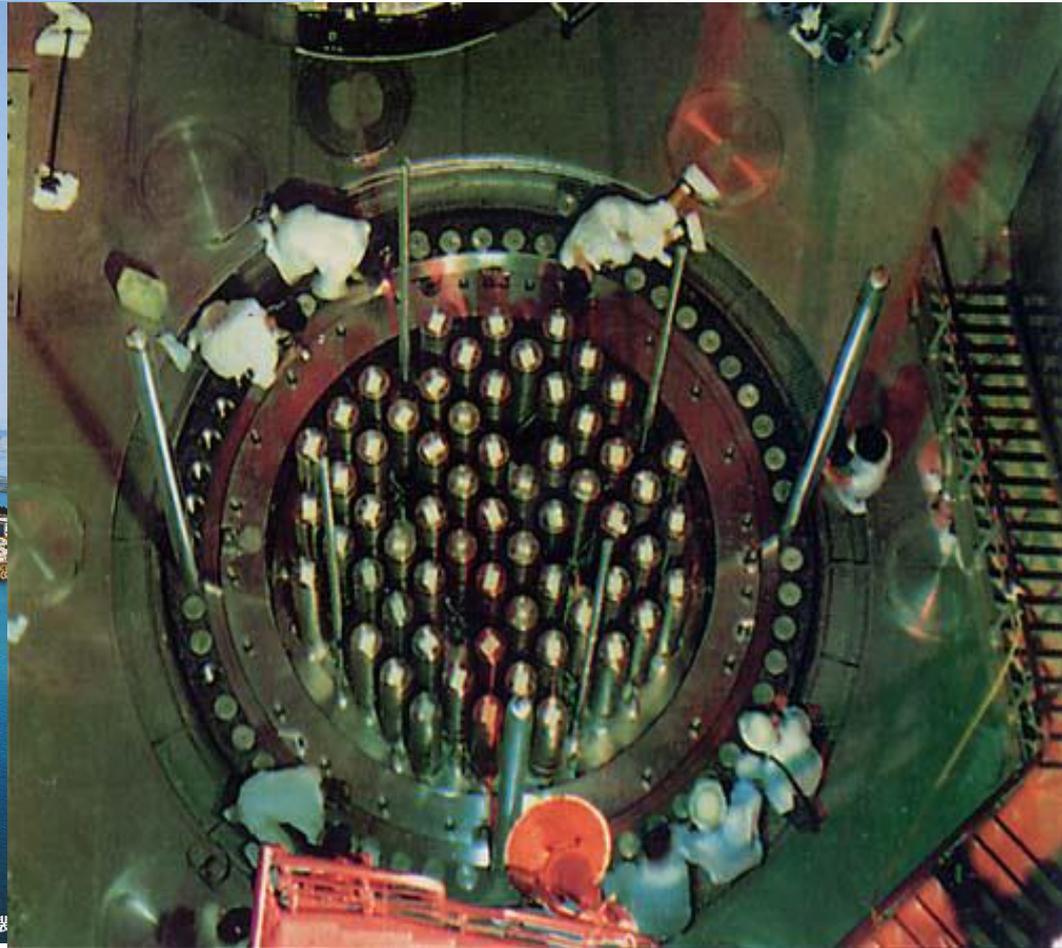
$\beta$ 衰变,  $\beta^+$ 衰变

- ▶ 裂变产生

U, Th, Pu, ...

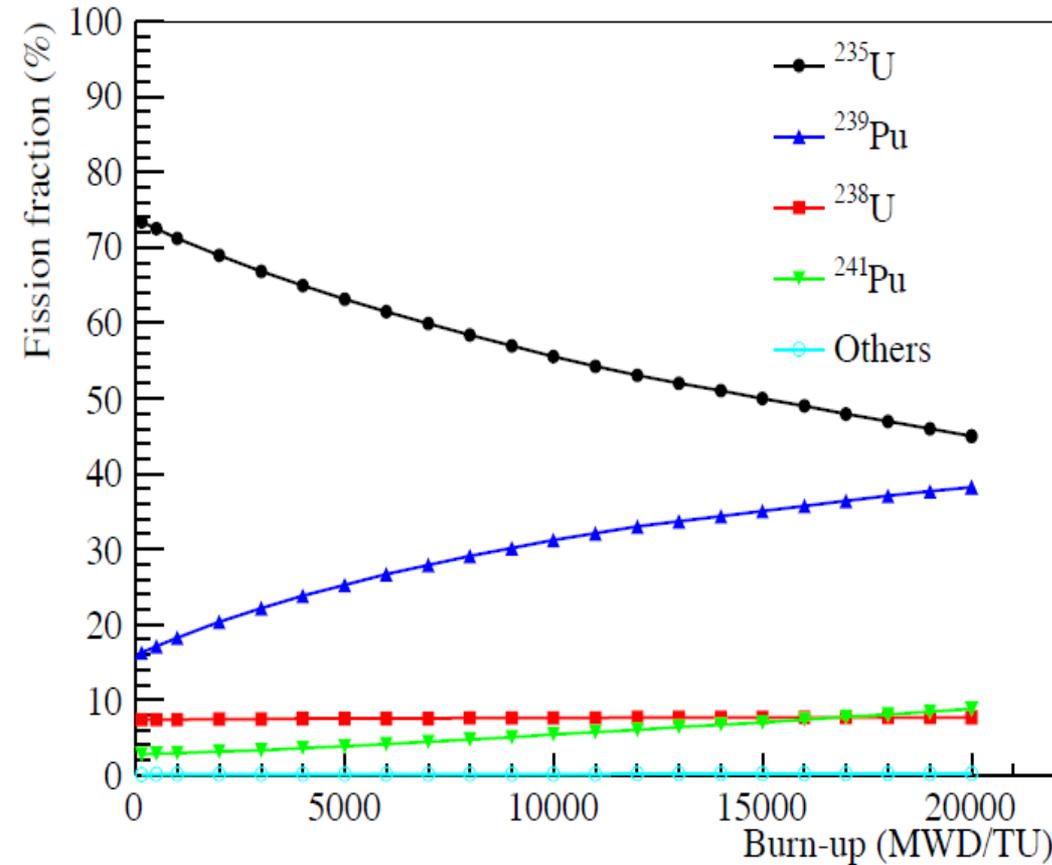
- ▶ 聚变产生



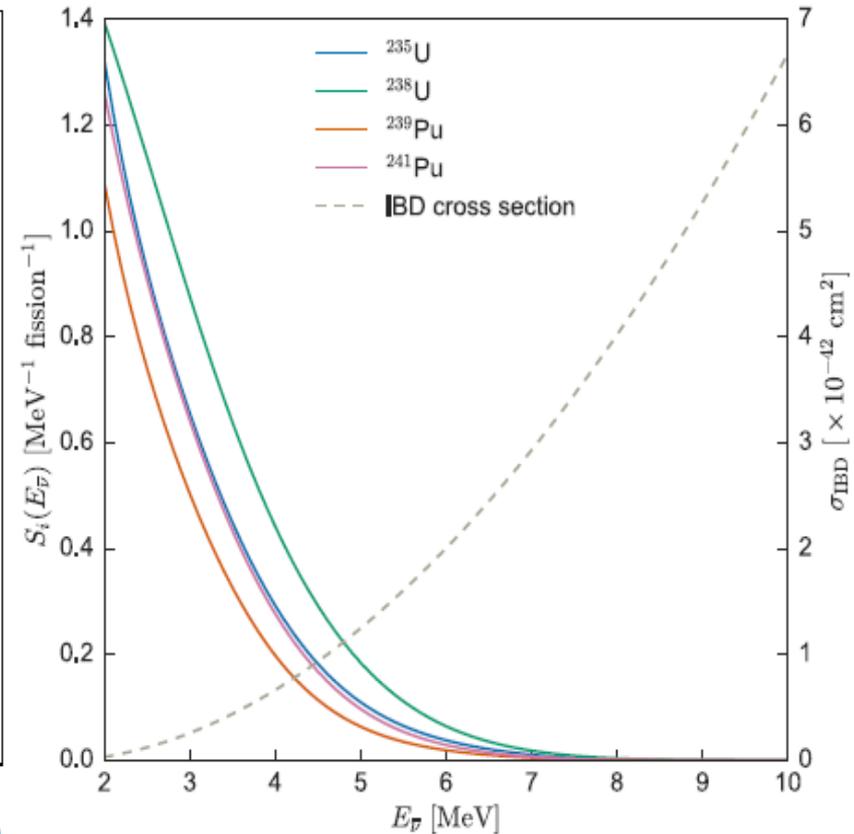


中国的大亚湾核电站

# 反应堆中微子



裂变核燃料随着反应过程发展的含量演化

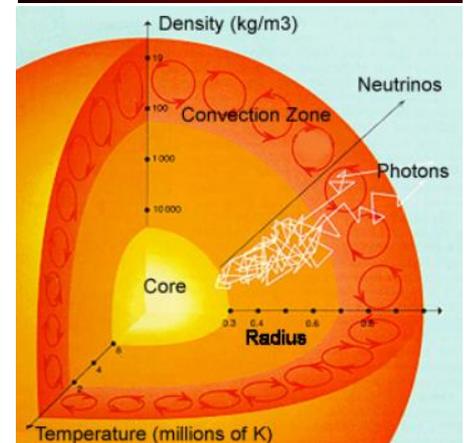
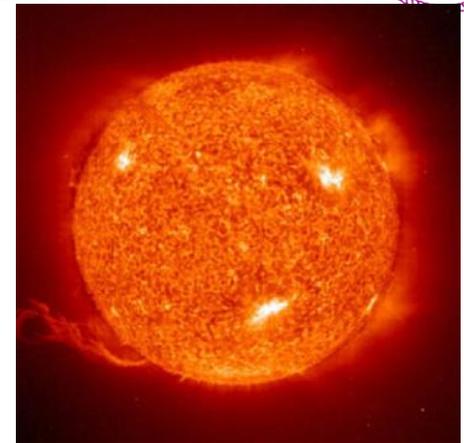


几种裂变元素的中微子谱

# 太阳--距离我们最近的"主序星"

## 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  
碳氮循环
2. 太阳内能量的传输机制:  
辐射 (内部), 依赖于辐射透明度  
对流 (外部)
3. 太阳各处处于一个液态局域平衡状态:  
引力与压强梯度平衡
4. 边界条件:  
该模型是从匀质的原初星开始, 考虑起始的**氢、氦、金属含量**, 加入目前太阳半径, 质量, 亮度约束, 演化到目前的太阳的年龄。

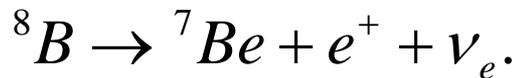
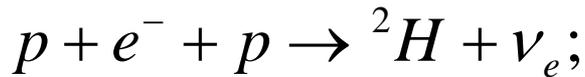




# 太阳标准模型预言的聚变过程

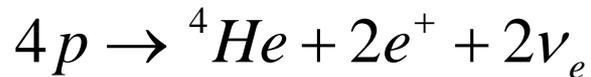
## 质子-质子聚变链:

(太阳温度下的主要过程)

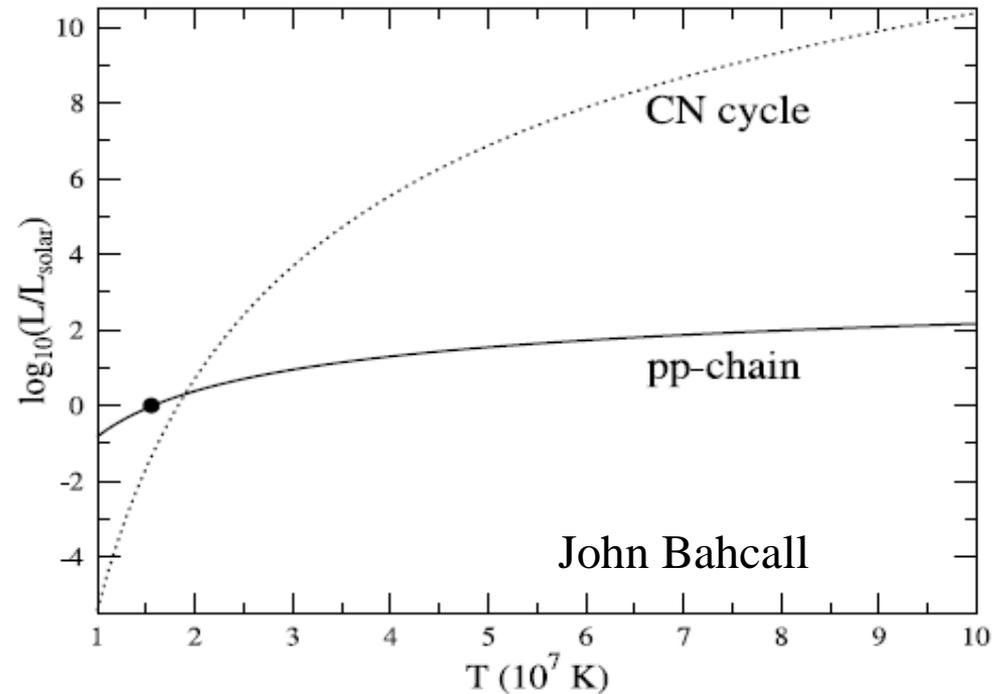


## 碳氮循环: (尚未发现)

(高温主序星的主要模式)

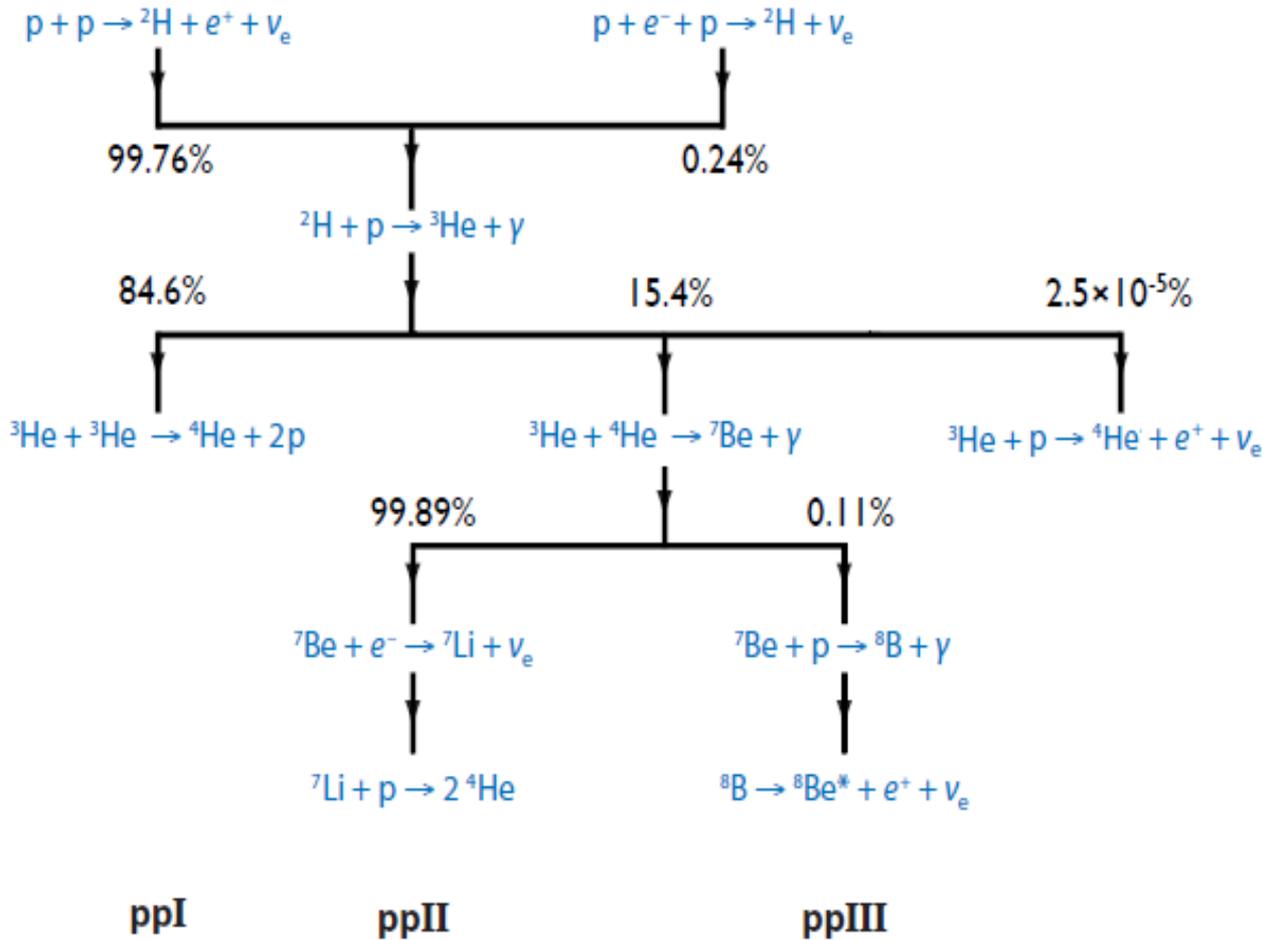


(C,N起到类似催化剂的作用)

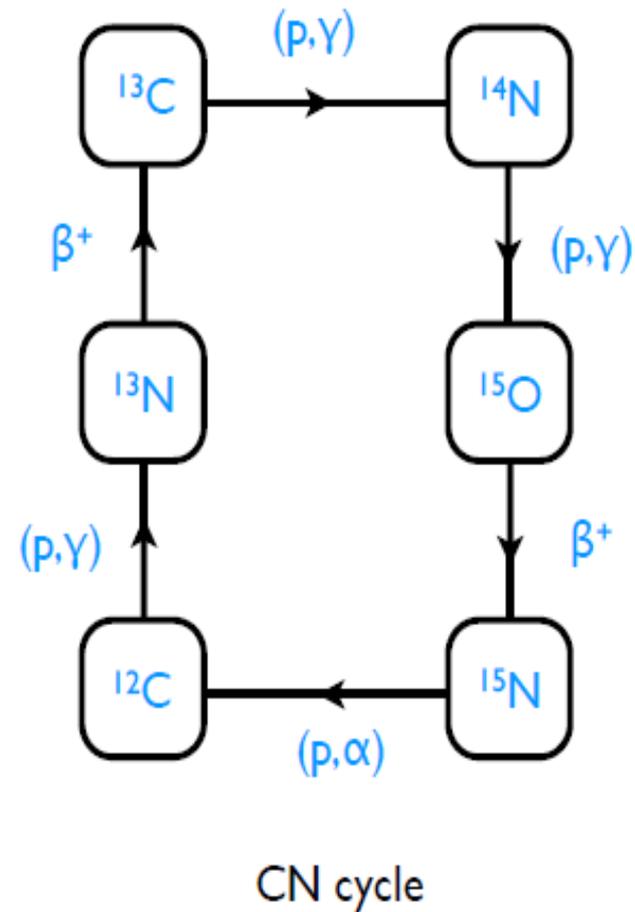




# 太阳释放的中微子，恒星演化过程的中微子

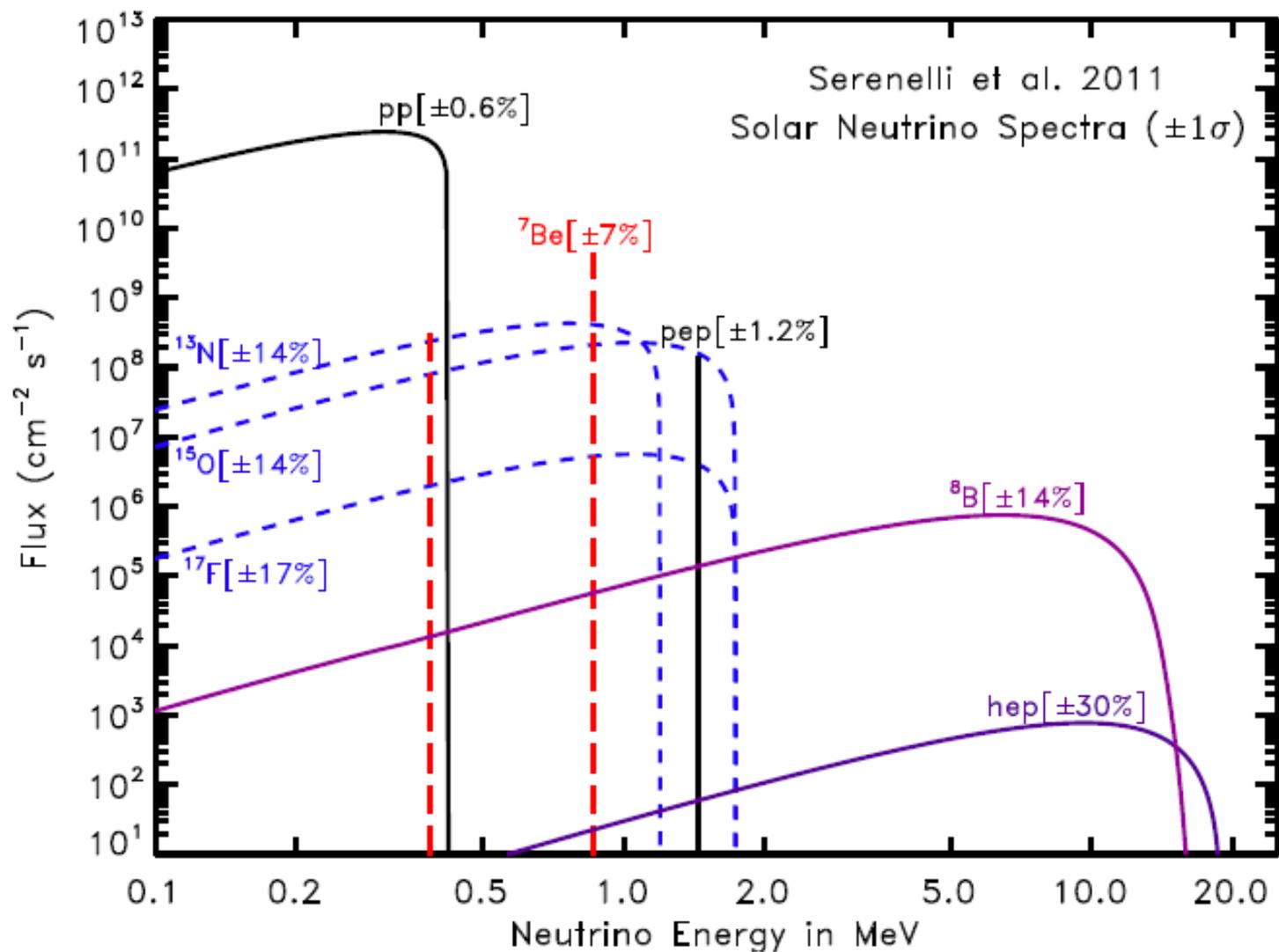


pp 聚变链

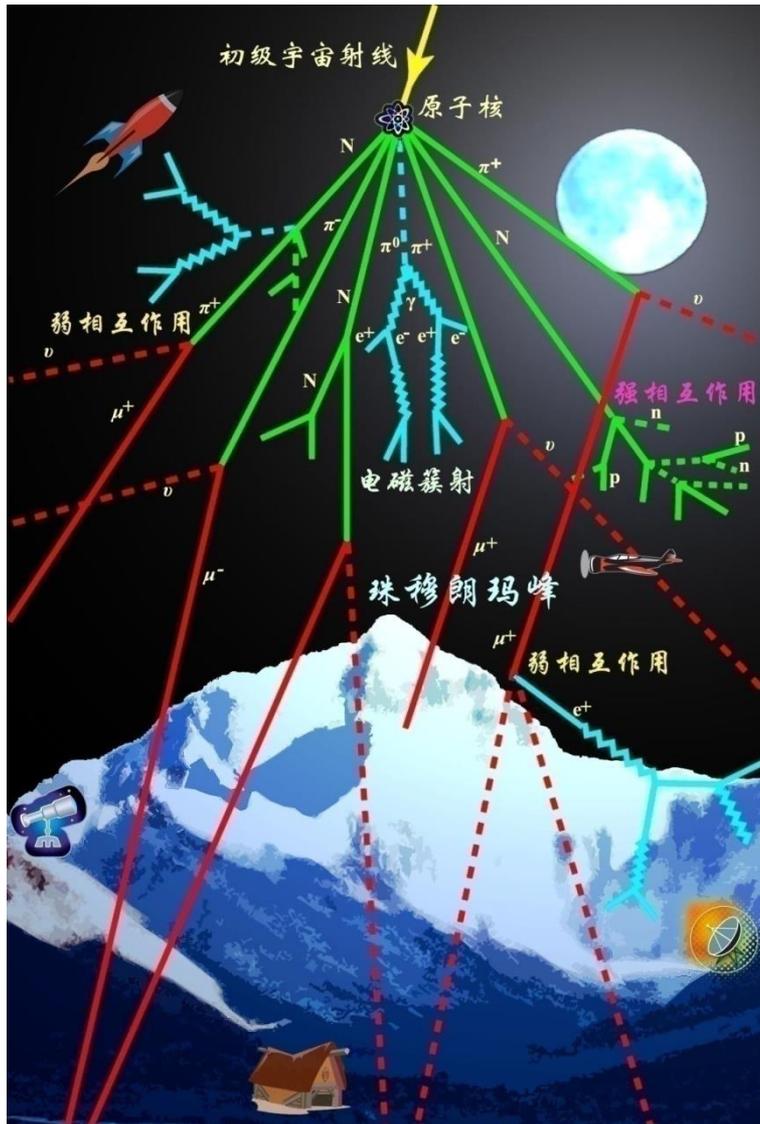


CNO 循环过程

# 太阳中微子能谱



# 大气中微子

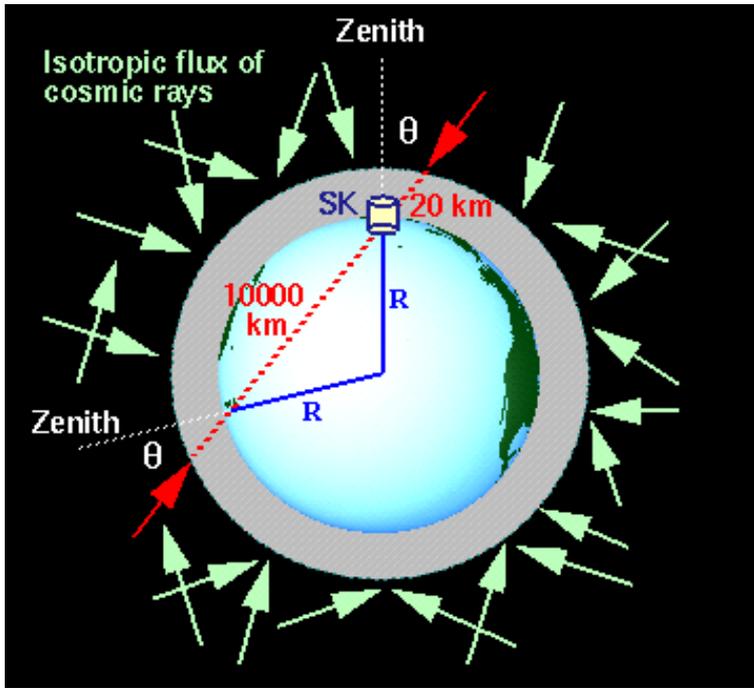


大量的宇宙线粒子和大气分子相互作用，末态粒子多为K,  $\pi$ ,  $\mu$ , e

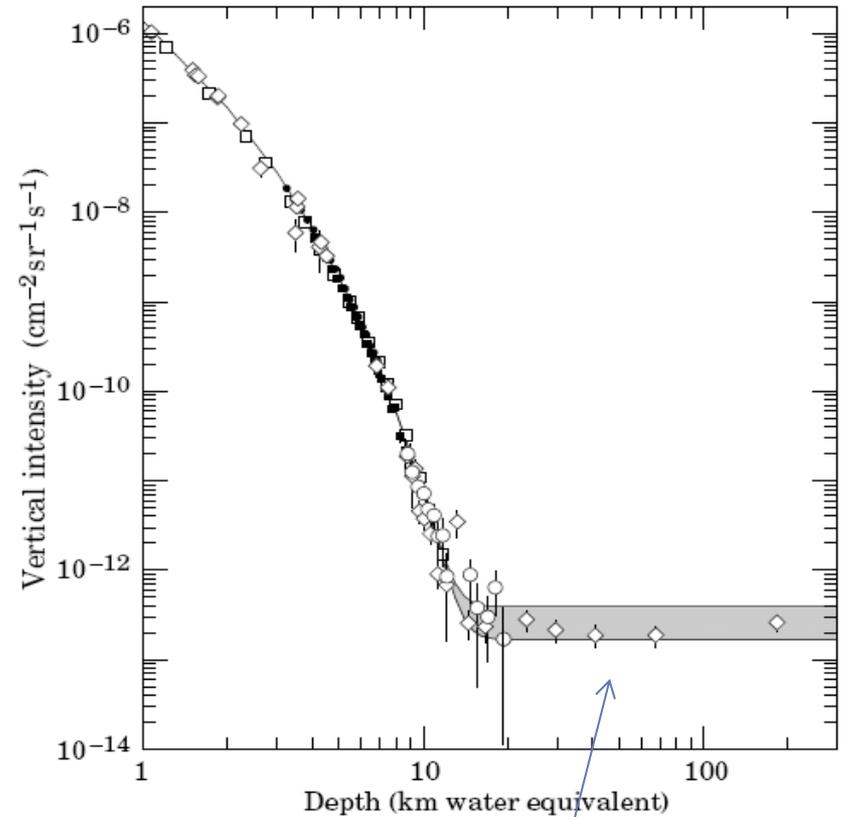
$$\pi^- \rightarrow \mu^- + \bar{\nu}_\mu$$

$$\mu^- \rightarrow e^- + \nu_e + \nu_\mu$$

# 大气中微子特征



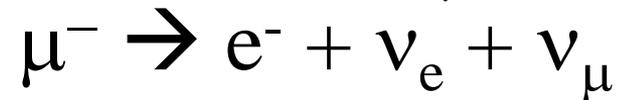
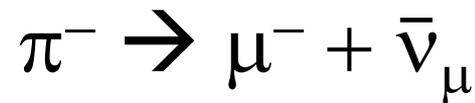
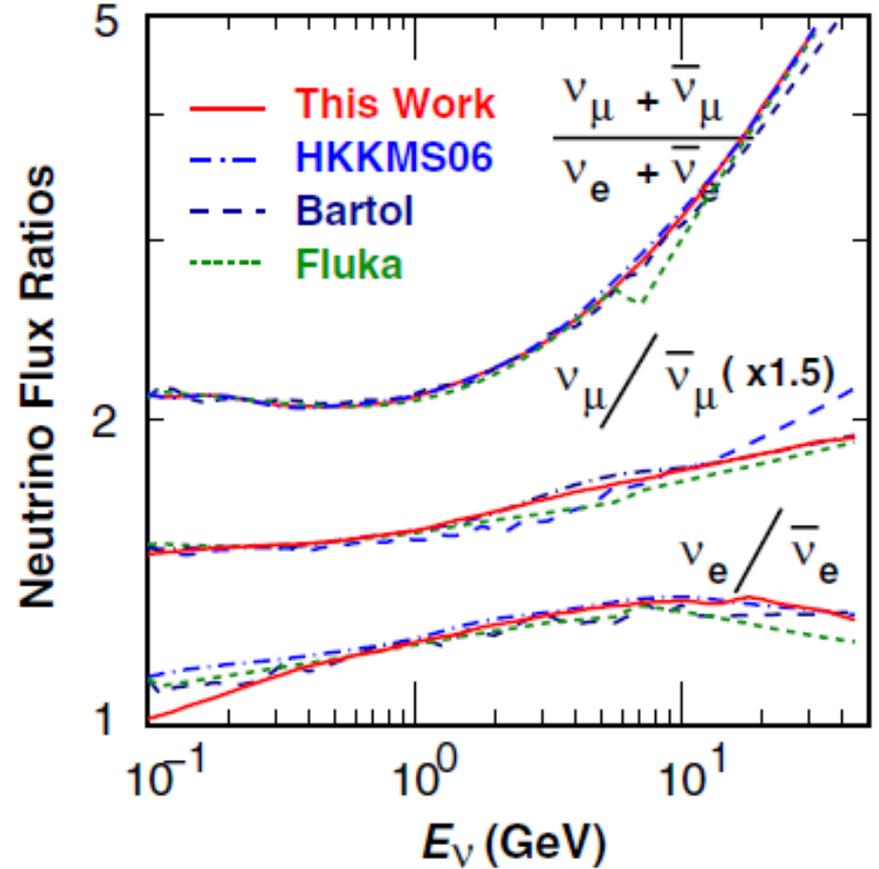
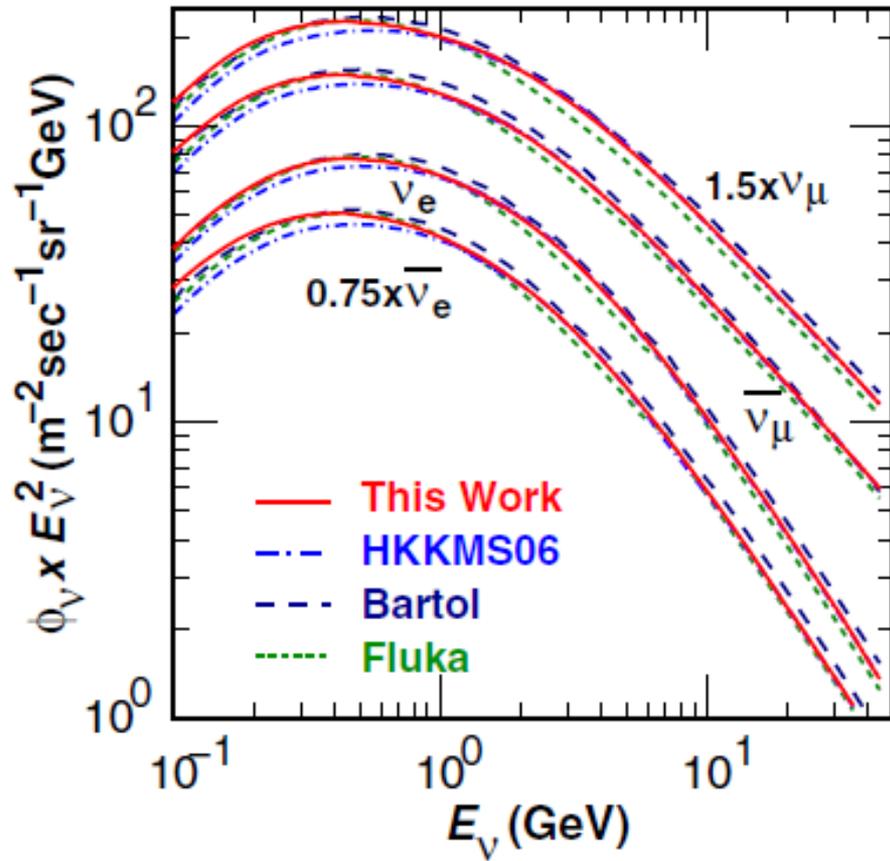
中微子可以穿透地球，在各地都能探测到



在地球深部，可以见到由于中微子而再产生的缪子

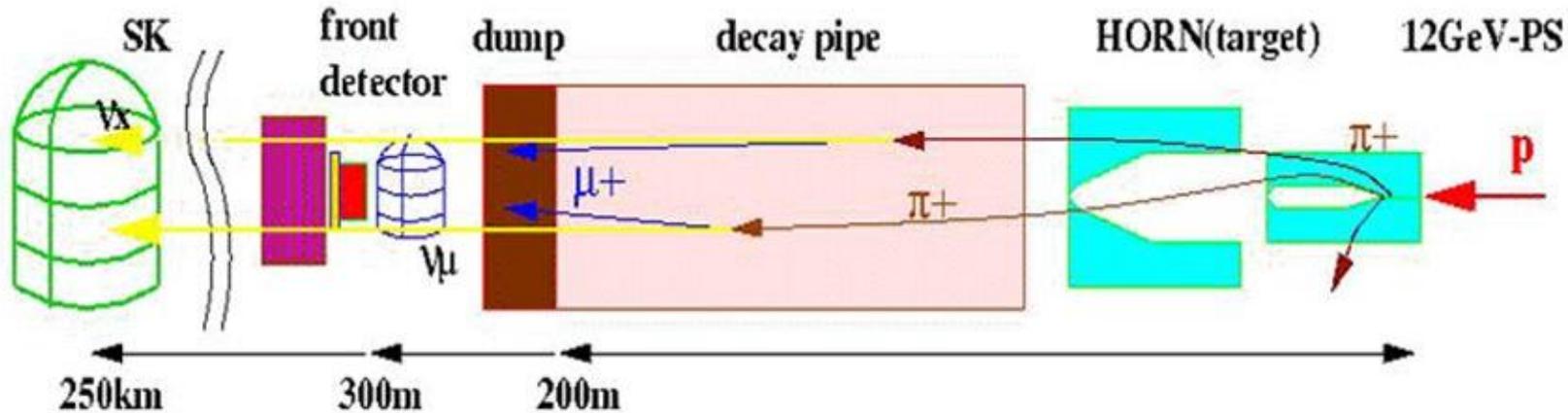


# 大气中微子能谱





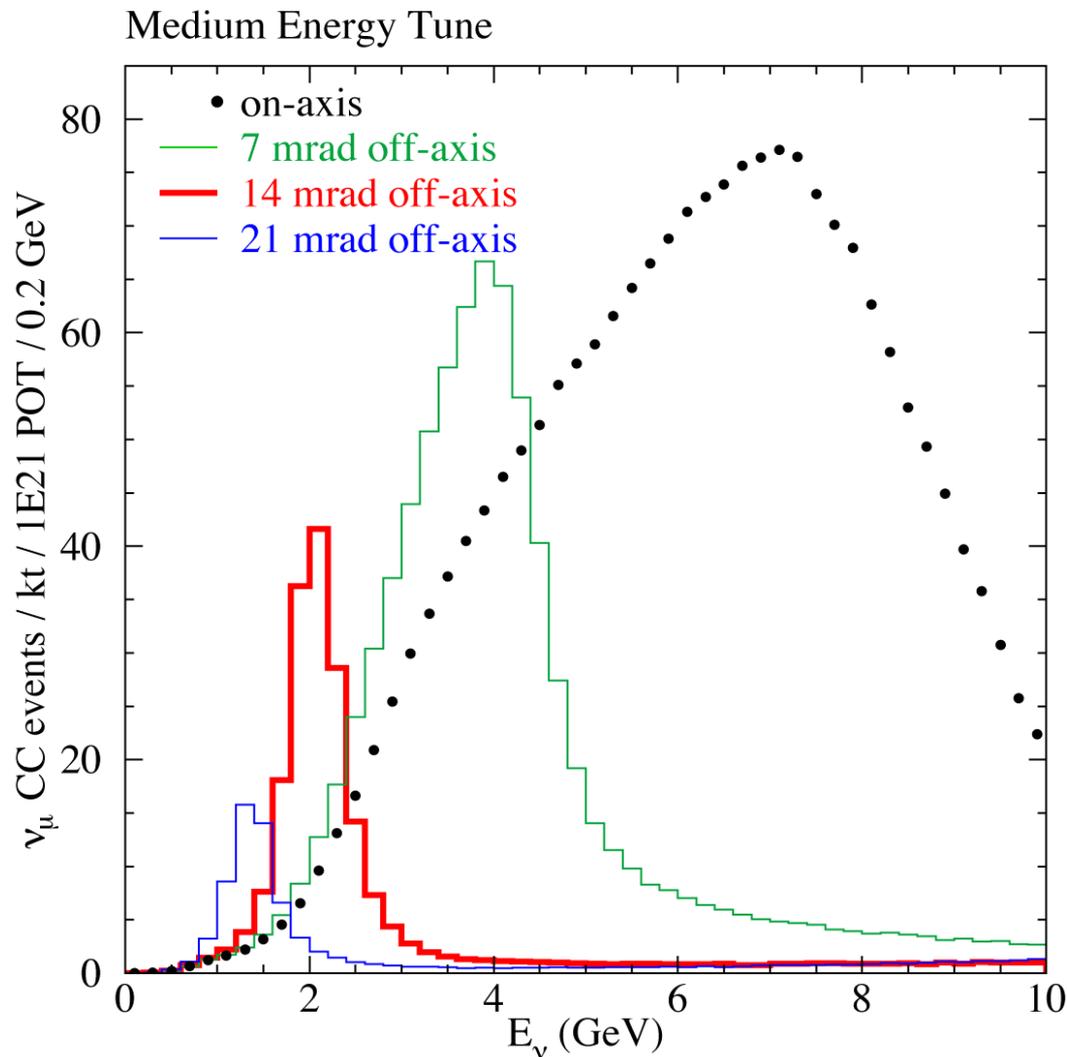
# 加速器中微子产生



- ▶ 高能质子打靶，产生大量的 $\pi$
- ▶ 高能的 $\pi$ 利用电磁场聚焦，成为平行束流
- ▶ 因为 $\pi$ 的能量高，所以衰变出的 $\nu$ 仍保持了很好的平行特性



# 加速器中微子能谱



- ▶ 利用正反电荷的选择，可以选择 $\pi^+$ 或者 $\pi^-$
- ▶ 继而可以选择 $\nu_\mu$ 或 $\bar{\nu}_\mu$ ，同时伴生 $\bar{\nu}_e$ 或 $\nu_e$
- ▶ 当选择一个与束流方向有一个夹角的位置，可以选择一个单能性较好的束流

# 地球中微子

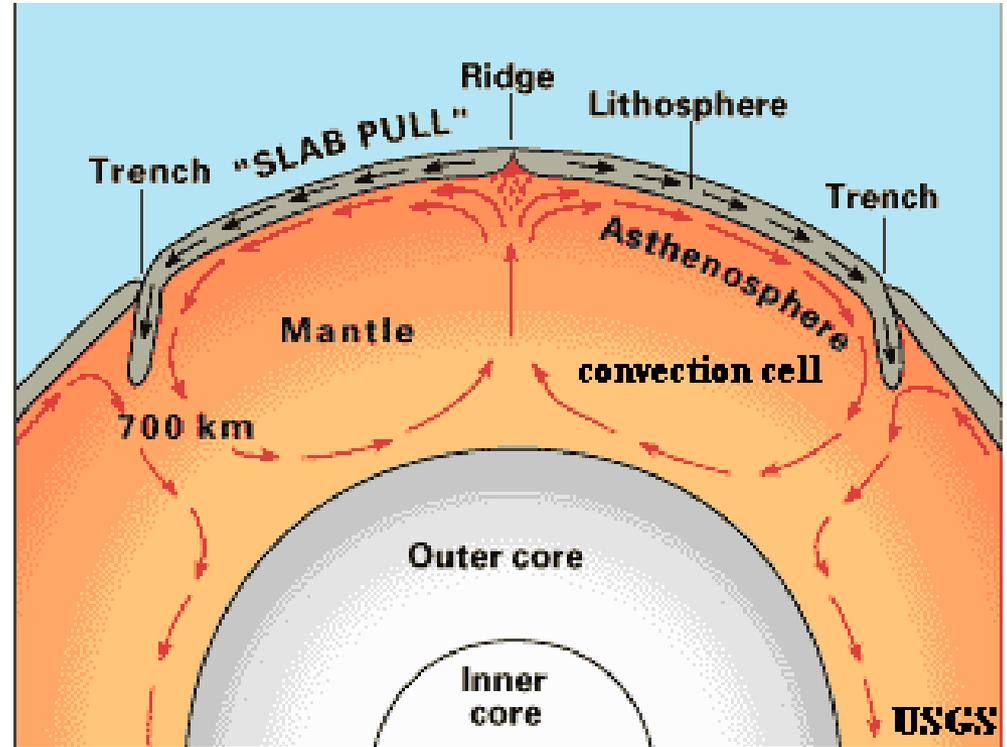
## 板块运动的原动力？

- 地球引力塌缩势能？
- 地球内部的核衰变，核裂变？



## 目前的知识：

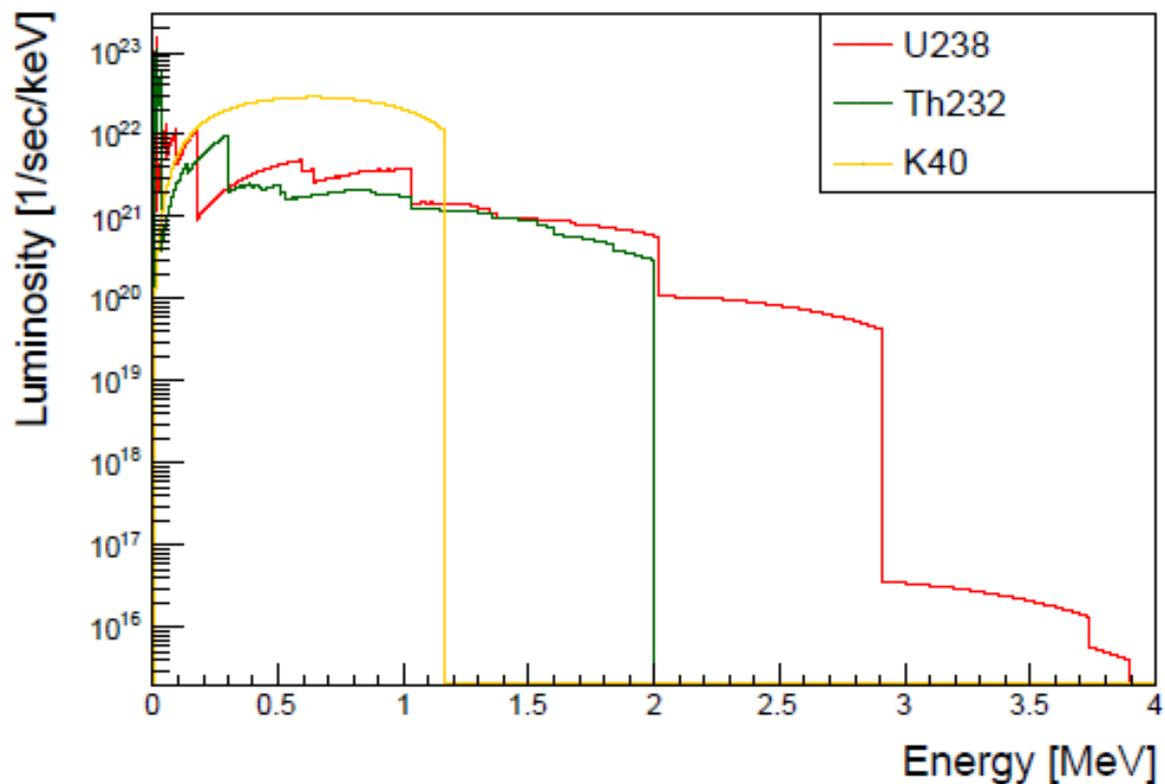
- 全球地热测量  $47 \pm 3$  TW
- 对核衰变热的预期：
  - Cosmochemical模型：10 TW
  - Geodynamical模型：15-30 TW
  - Geochemical模型：20 TW
- 地球中微子实验测量10-30 TW之间



## 答案：

- 我们还在消耗地球形成之初的引力势能
- 核衰变情形基本未知
- 需要测量地球中微子



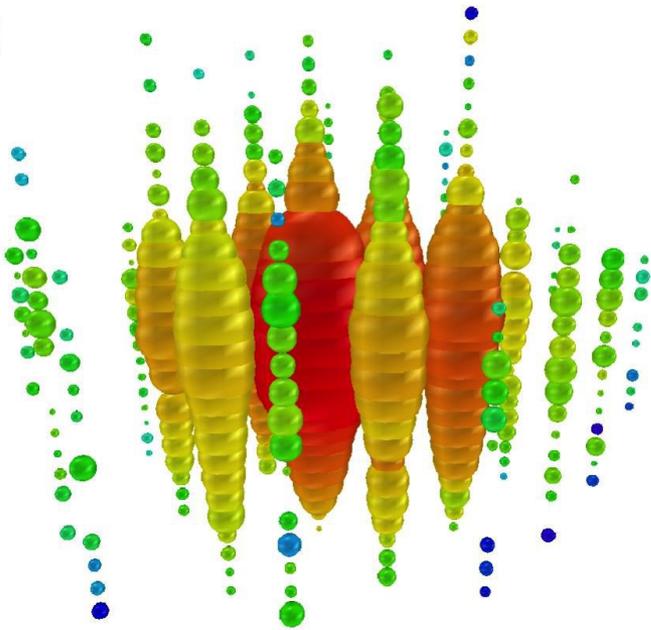


地球中微子主要来自天然放射性核素U，Th，K等的衰变过程



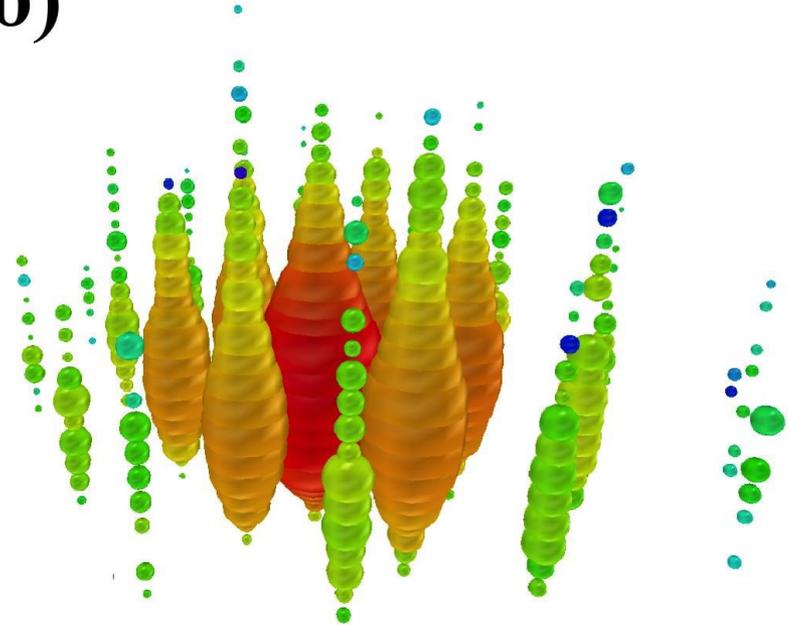
# 宇宙中的甚高能中微子

(a)



2011:  $\sim 1$  PeV cascade

(b)

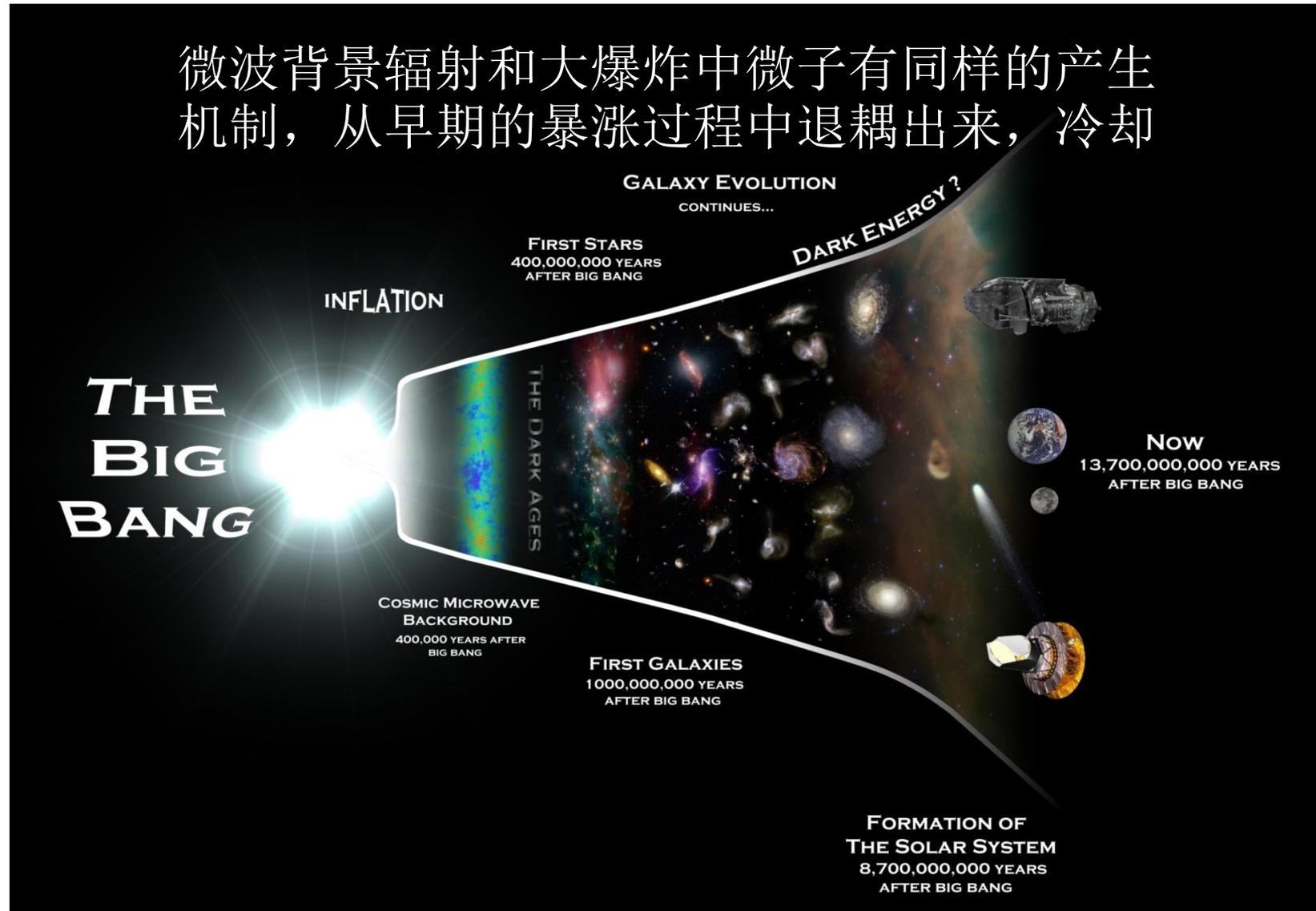


2012:  $\sim 1$  PeV cascade

IceCube实验发现了甚高能宇宙中微子，但还没有明确的理论理解

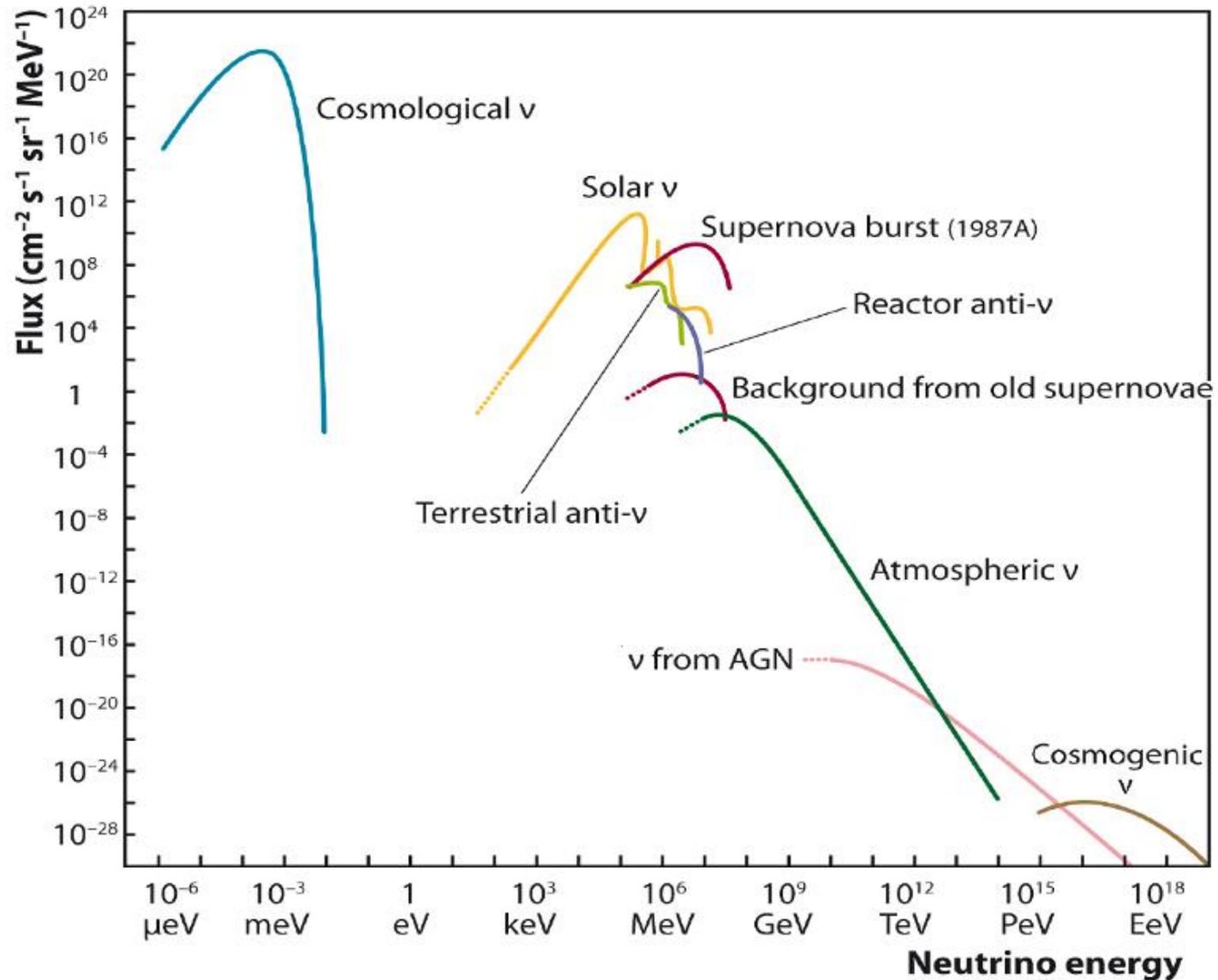
# 大爆炸中微子本底

微波背景辐射和大爆炸中微子有同样的产生机制，从早期的暴涨过程中退耦出来，冷却





# 中微子源的总结





# 总结

---

- ▶ 中微子
- ▶ 中微子参与的反应
  1. 带电流
  2. 中性流
- ▶ 中微子源