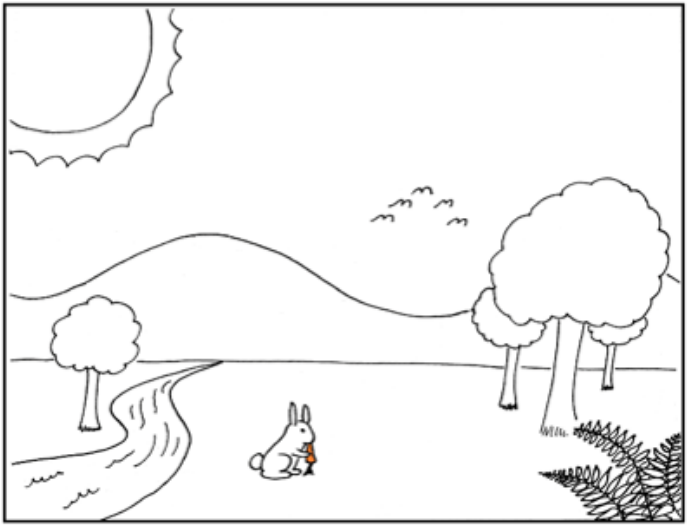
在地底深处用巨型中微子探测器仰望星空

Benda Xu

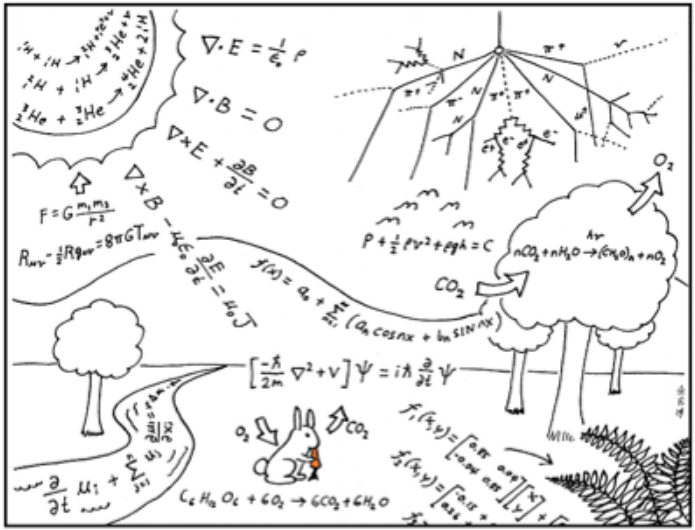
University of Chinese Academy of Sciences

2026-04-19

物理学院的学生如何看世界



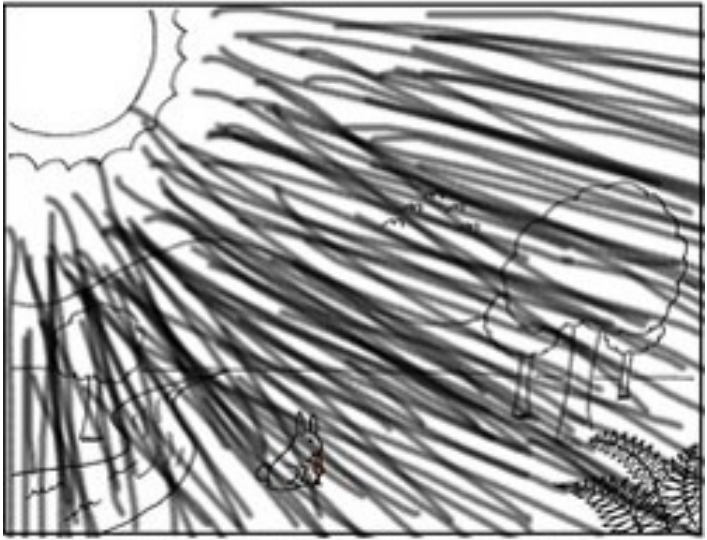
物理学院的学生如何看世界



This is how scientists see the world.

物理学院的中微子方向学生如何看世界

物理学院的中微子方向学生如何看世界



This is how solar neutrino scientists see the world.

宇宙中真实的幽灵——中微子

科学家　中微子如幽灵般神秘

营销号　中微子是幽灵

网友　科学家抓到鬼了

宇宙中真实的幽灵——中微子

科学家 中微子如幽灵般神秘

营销号 中微子是幽灵

网友 科学家抓到鬼了

高智商民间科学家质疑

2015 年诺贝尔奖：中微子穿过了地球都不发生反应，凭什么要跟（重）水反应？

历史的傲慢

Bethe, H. & Peierls, R. The “Neutrino” .
Nature 133, 532 (1934)

For an energy of $2{\cdot}3 \times 10^6$ volts, t is 3 minutes and therefore $\sigma < 10^{-44}$ cm.^{2} (corresponding to a penetrating power of 10^{16} km. in solid matter). It is therefore absolutely impossible to observe processes of this kind with the neutrinos created in nuclear transformations.

Bethe & Peierls 1934 论断逻辑

地球都挡不住中微子，人类没有可能探测到。

历史的傲慢

Bethe, H. & Peierls, R. The "Neutrino" .
Nature 133, 532 (1934)

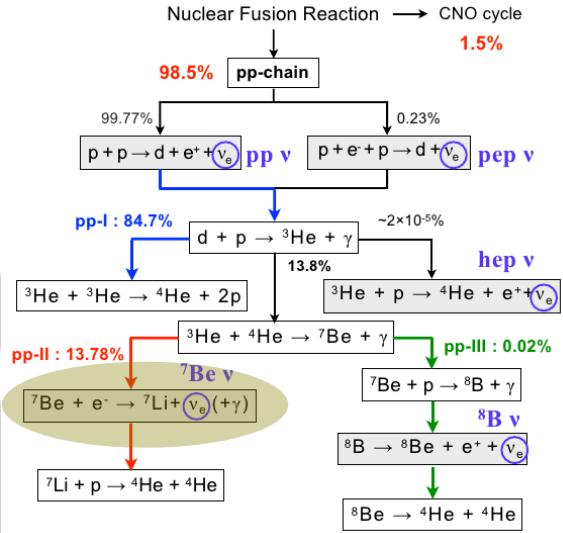
For an energy of $2{\cdot}3 \times 10^6$ volts, t is 3 minutes and therefore $\sigma < 10^{-44}$ cm.^{2} (corresponding to a penetrating power of 10^{16} km. in solid matter). It is therefore absolutely impossible to observe processes of this kind with the neutrinos created in nuclear transformations.

Bethe & Peierls 1934 论断逻辑

地球都挡不住中微子，人类没有可能探测到。

Hans Bethe 1967 Nobel Prize

for his contributions to the theory of nuclear reactions, especially his discoveries concerning the energy production of stars.



1960s – 2000s 太阳中微子之谜

- Homestake 实验 1968 年使用 600 吨 C_2Cl_4，发现了太阳中微子

$$\nu_e + {}^{37}\mathrm{Cl} \to {}^{37}\mathrm{Ar} + e^-$$

  1. 使用 He 气注入液体，气液萃取出 Ar
  2. 将 Ar 与 He 按原子量分离
  3. 盖革计数器观察 ${}^{37}\mathrm{Ar}$ 衰变
- 观测一个月，可以回收出几十个 Ar 原子。

1960s – 2000s 太阳中微子之谜

- Homestake 实验 1968 年使用 600 吨 C_2Cl_4，发现了太阳中微子

$$\nu_e + {}^{37}\mathrm{Cl} \to {}^{37}\mathrm{Ar} + e^-$$

  1. 使用 He 气注入液体，气液萃取出 Ar
  2. 将 Ar 与 He 按原子量分离
  3. 盖革计数器观察 ${}^{37}\mathrm{Ar}$ 衰变
- 观测一个月，可以回收出几十个 Ar 原子。

太阳中微子之谜

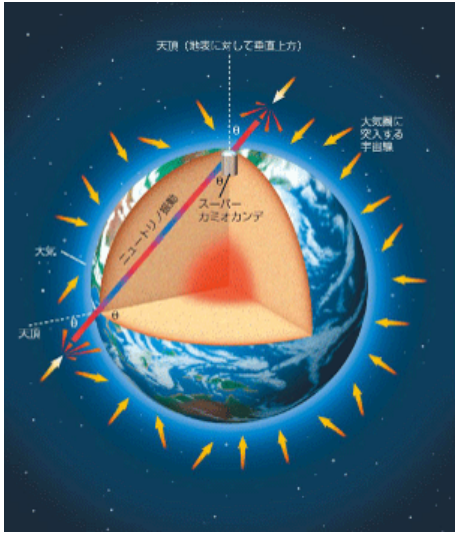
- 观测值是理论预测的 1/3；
- 几十年间不断被质疑，最后证明 600 吨中取几十个原子，实验技术够硬；
- 太阳中微子之谜持 30 年。

1998 中微子振荡发现

宇宙射线轰击大气，产生中微子 ν_μ 与 ν_e 比例应为 2

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

- Super-KamokaNDE（5 万吨水）实验 1998 年确认
  - 从上飞来的中微子符合比例
  - 从地下飞来的中微子不符合比例



2001 太阳中微子之谜解决

- SNO 实验（1 千吨重水）2001 年发现
- 重水 Cherenkov 探测，

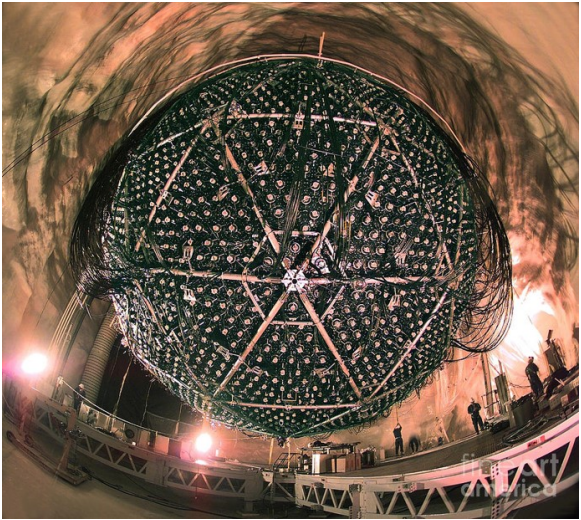
$$d + \nu \to p + n + \nu$$

测量所有中微子的流量，与 理论计算 相符。

- 测量 ν_e

$$d + \nu_e \to p + p + e^-$$

测量电子中微子的流量，与 其它实验 相符。



理论冲击：中微子具有质量

2015 年诺贝尔物理学奖授予了

- Takaaki Kajita，代表 Super-KamiokaNDE
- Arthur B. McDonald，代表 SNO
- 以表彰他们“发现了中微子振荡，从而证明了中微子具有质量”。

理论冲击：中微子具有质量

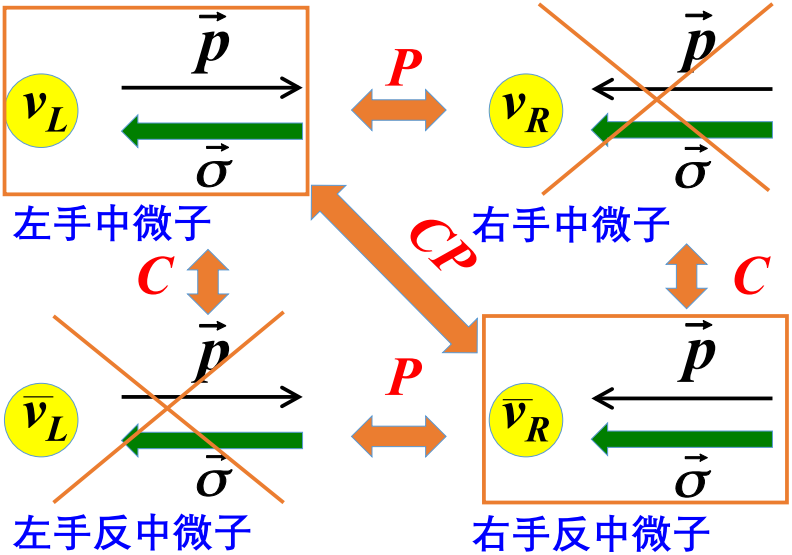
2015 年诺贝尔物理学奖授予了

- Takaaki Kajita，代表 Super-KamiokaNDE
- Arthur B. McDonald，代表 SNO
- 以表彰他们“发现了中微子振荡，从而证明了中微子具有质量”。

有质量的反证法逻辑

- 中微子种类变化 $\rightarrow \nu$ 有内禀时钟
- ν 质量为 0 $\rightarrow \nu$ 以光速运动 $\rightarrow \nu$ 时钟冻结

中微子的 CP 变换


$\vec{p}$
ν_L
$\vec{\sigma}$
左手中微子
P
$\vec{p}$
ν_R
$\vec{\sigma}$
右手中微子
CP
C
C
$\vec{p}$
$\bar{\nu}_L$
$\vec{\sigma}$
左手反中微子
P
$\vec{p}$
$\bar{\nu}_R$
$\vec{\sigma}$
右手反中微子

杨振宁李政道的 Weyl 中微子宇称不守恒理论

PHYSICAL REVIEW VOLUME 105, NUMBER 5 MARCH 1, 1957

Parity Nonconservation and a Two-Component Theory of the Neutrino

T. D. LEE, *Columbia University, New York, New York*

AND

C. N. YANG, *Institute for Advanced Study, Princeton, New Jersey*

(Received January 10, 1957; revised manuscript received January 17, 1957)

A two-component theory of the neutrino is discussed. The theory is possible only if parity is not conserved in interactions involving the neutrino. Various experimental implications are analyzed. Some general remarks concerning nonconservation are made.

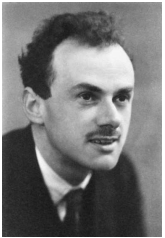
Dirac

Neutrino wave functions need four components.

T.D. Lee & C.N. Yang

Neutrino mass is zero and its wave functions need only two components. Weyl-Fermion

Dirac 方程与 Weyl 费米子



Paul Dirac

$$\mathrm{i}\gamma^{\alpha}\partial_{\alpha}\psi - m_{\nu}\psi = 0$$

Dirac 矩阵

时空指标

Dirac Spinor

$$\mathrm{i}\gamma^{\alpha}\partial_{\alpha}\psi_L - \cancel{m_{\nu}\psi_R} = 0$$

$$\mathrm{i}\gamma^{\alpha}\partial_{\alpha}\psi_R - \cancel{m_{\nu}\psi_L} = 0$$

Weyl Spinor

Hermann Weyl

中微子探测器必须巨大

总结：中微子质量的发现是最近一次人类对物理学基本规律（标准模型）的改写。

Bethe & Peierls 1934 论断逻辑

地球都挡不住中微子，人类没有可能探测到。

高智商民间科学家质疑

2015 年诺贝尔奖：中微子穿过了地球都不发生反应，凭什么要跟（重）水反应？

中微子探测器必须巨大

总结：中微子质量的发现是最近一次人类对物理学基本规律（标准模型）的改写。

Bethe & Peierls 1934 论断逻辑

地球都挡不住中微子，人类没有可能探测到。

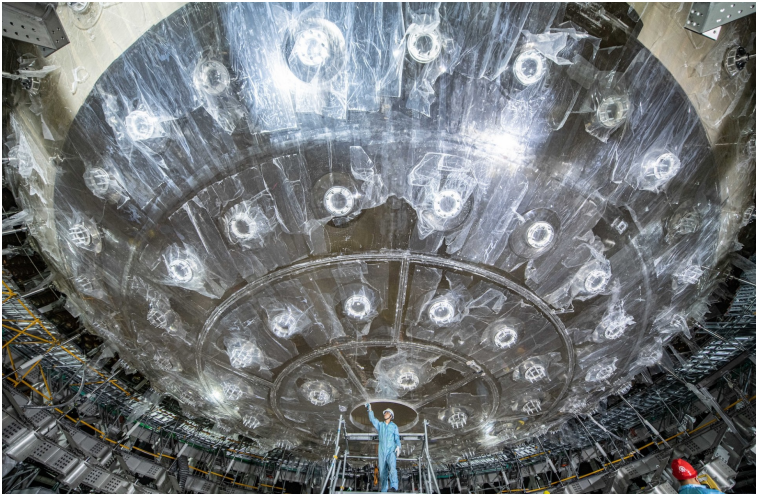
高智商民间科学家质疑

2015 年诺贝尔奖：中微子穿过了地球都不发生反应，凭什么要跟（重）水反应？

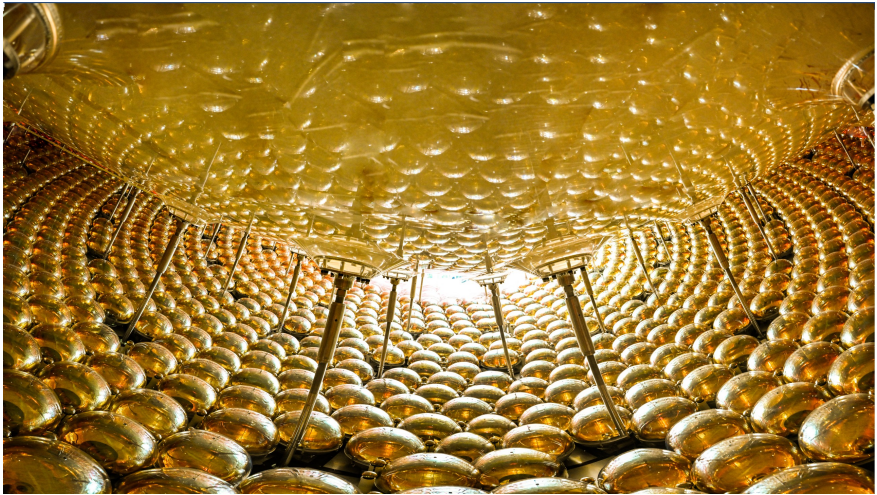
解答

概率问题，越大越容易捉到

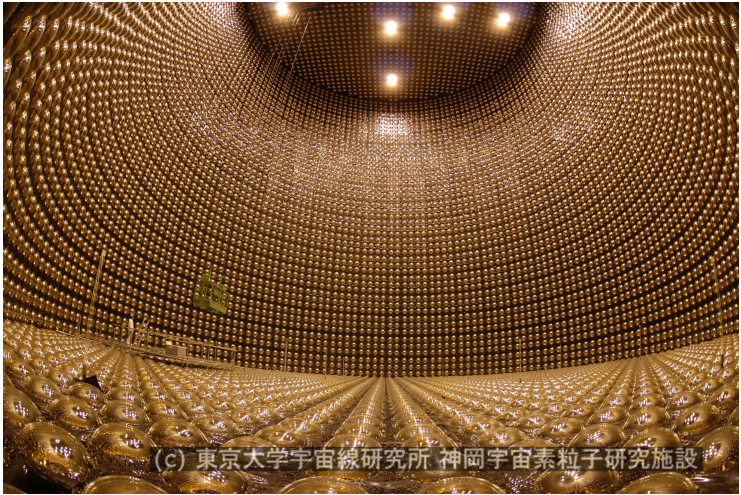
中国江门中微子实验 JUNO 2 万吨液闪



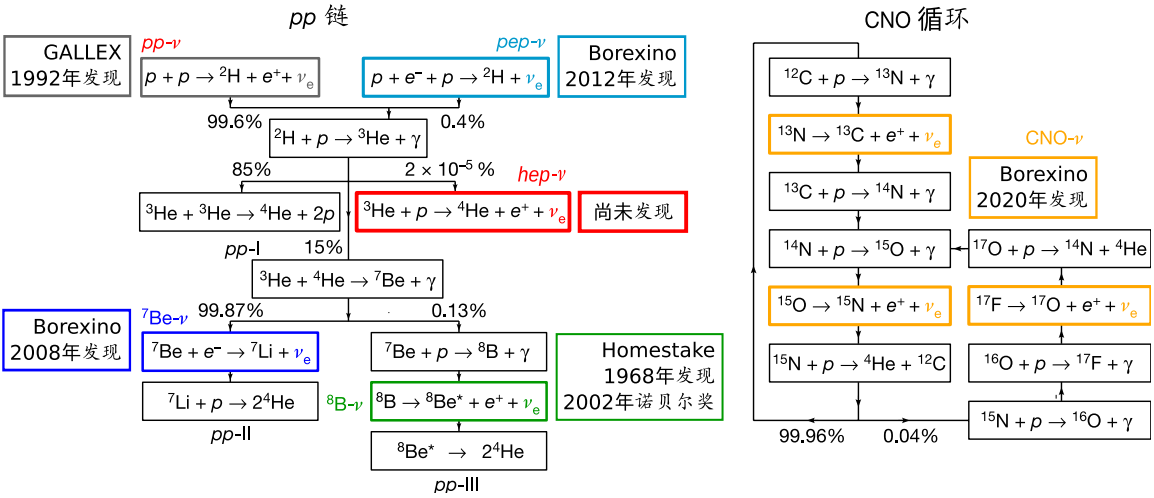
江门中微子实验光电倍增管阵列



日本超级神冈 Super-KamiokaNDE 5 万吨纯水



太阳 *hep* 中微子



极其稀有，还没找到，谁先找到谁被写进教科书。

1970s 温伯格标准模型有效场论 SMEFT 的预言

$$O^{(5)} \sim \frac{1}{\Lambda}(LH)(LH)$$

致中微子质量产生且违反轻子数（L）守恒的最低阶项。

- 中微子不是 Weyl 型，不是 Dirac 型，而是 Majorana 型。
- 正反中微子是同一种粒子？正反物质被连接了？→ 无中微子双贝塔衰变实验

第五阶算子关于中微子质量已经拿了诺奖，第六阶算子直接预言质子衰变！

寻找质子衰变，是后中微子质量时代最自然、最宏大的物理目标。

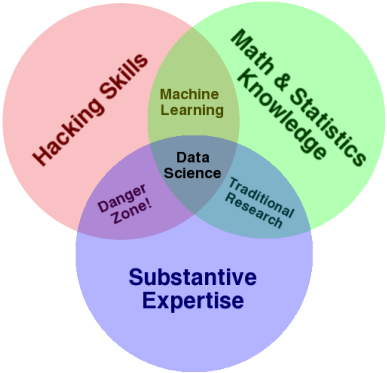
续本达课题组在 JUNO 与 SK 的工作

- 这三个直指宇宙终极命运的问题，正是我们国科大新成立的中微子实验室要解决的。

续本达

- JUNO 事例重建组召集人
  - 攻坚液闪探测器能量测量分辨率精度，研究中微子质量顺序
- Super-Kamiokande (SK) 太阳中微子组召集人
  - 寻找 hep 太阳中微子
- 预研究技术准备无中微子双贝塔衰变寻找
- JUNO & SK：质子衰变寻找

极客通缉令



- 我需要懂物理、懂数学，具备极客精神、能手撕底层算法代码的人。
- 用最硬核的算力，在万吨级数据里把这些‘幽灵’的拓扑结构抠出来。
- email: orv [AT] tsinghua [DOT] edu [DOT] cn