

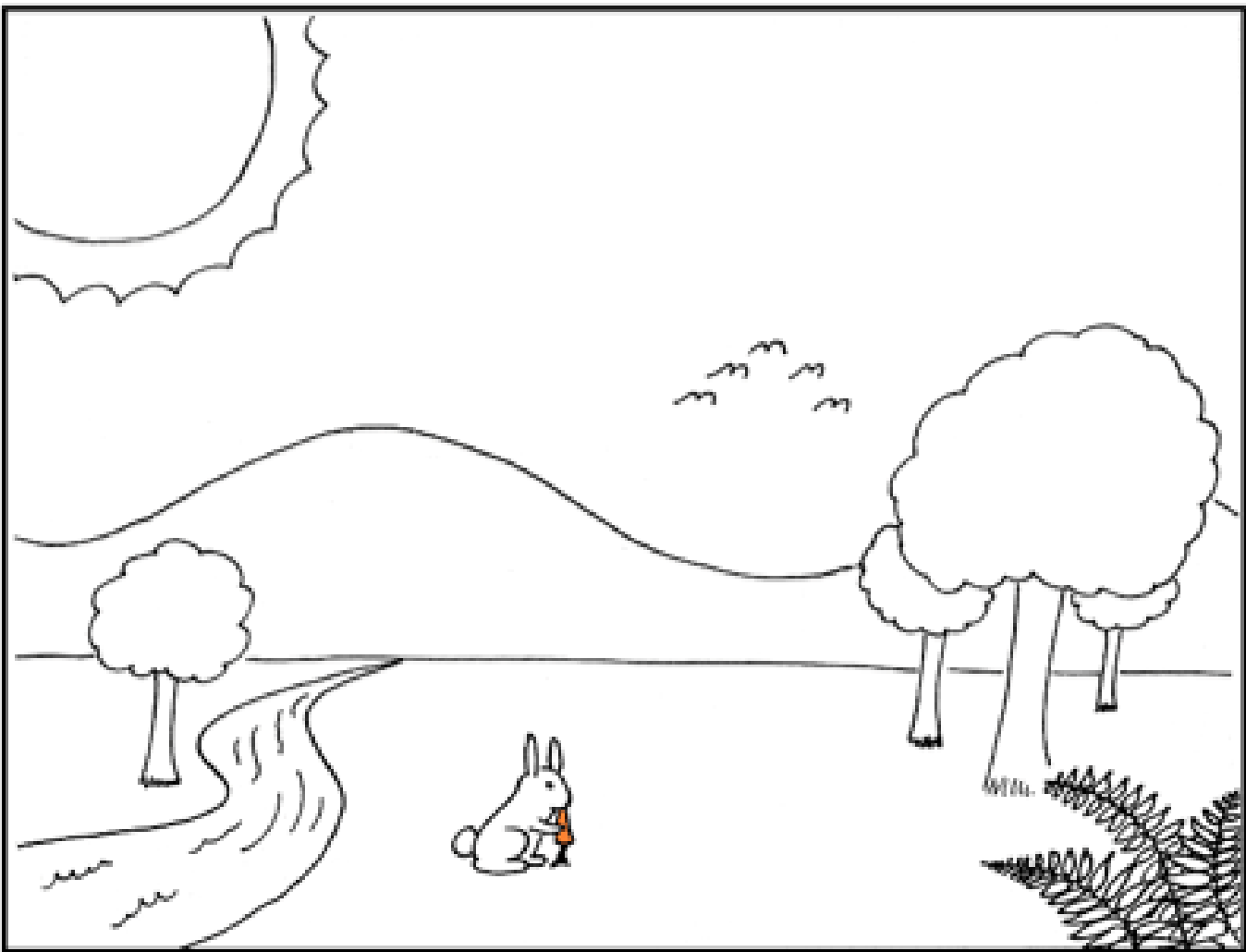
世纪求索：中微子质量本源



续本达

-
1. 中微子、宇称破坏与 Weyl spinor
 2. 太阳中微子难题与中微子质量的发现
 3. 中微子质量本源：路在何方？

科学家如何看待世界



你看到了什么？

A

流体力学

B

核聚变

C

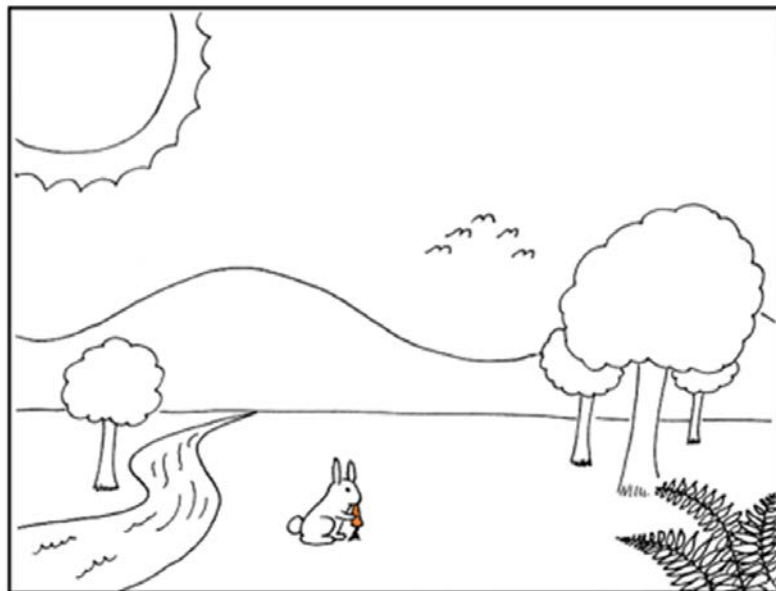
宇宙射线

D

热辐射

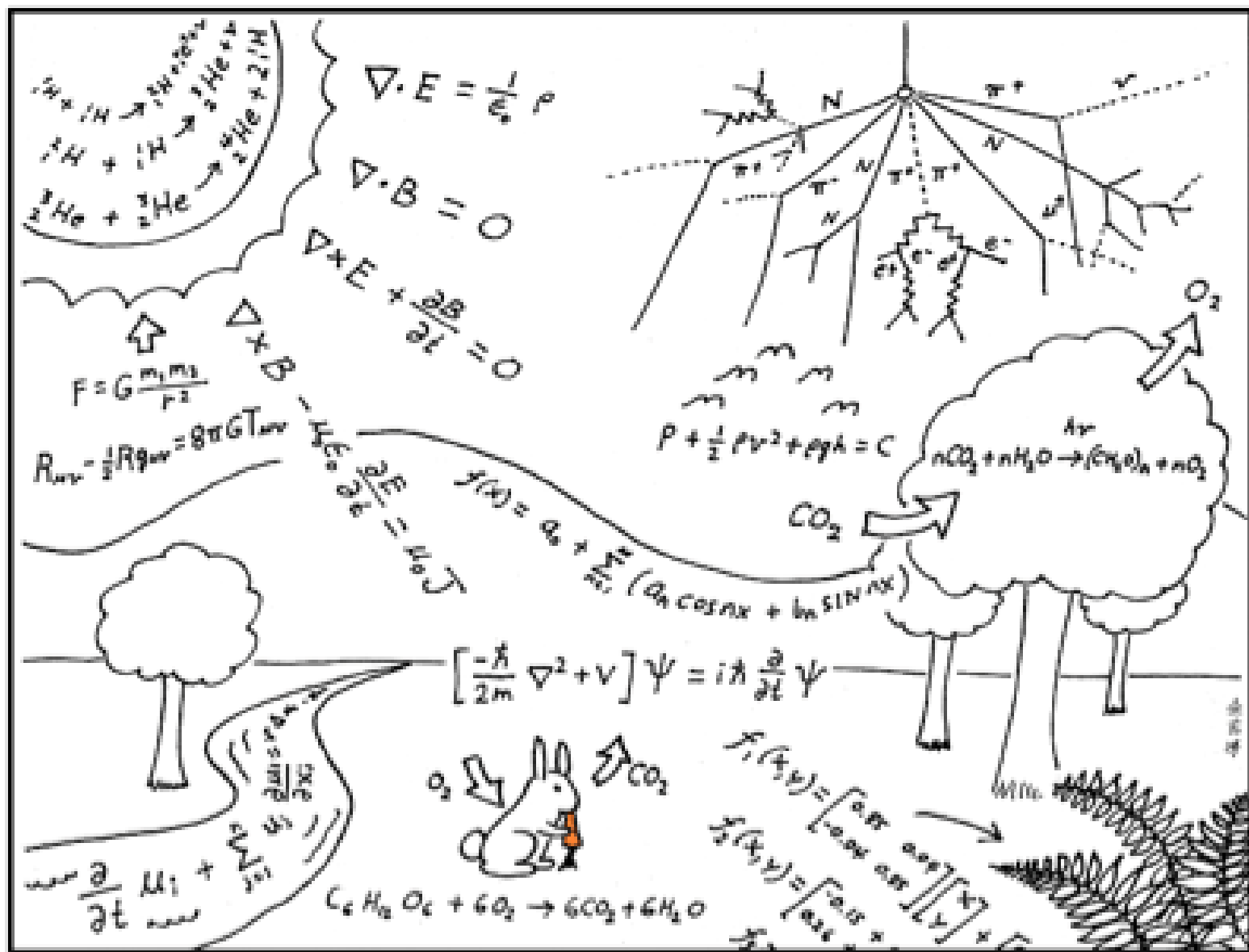
E

万有引力



提交

科学家如何看待世界

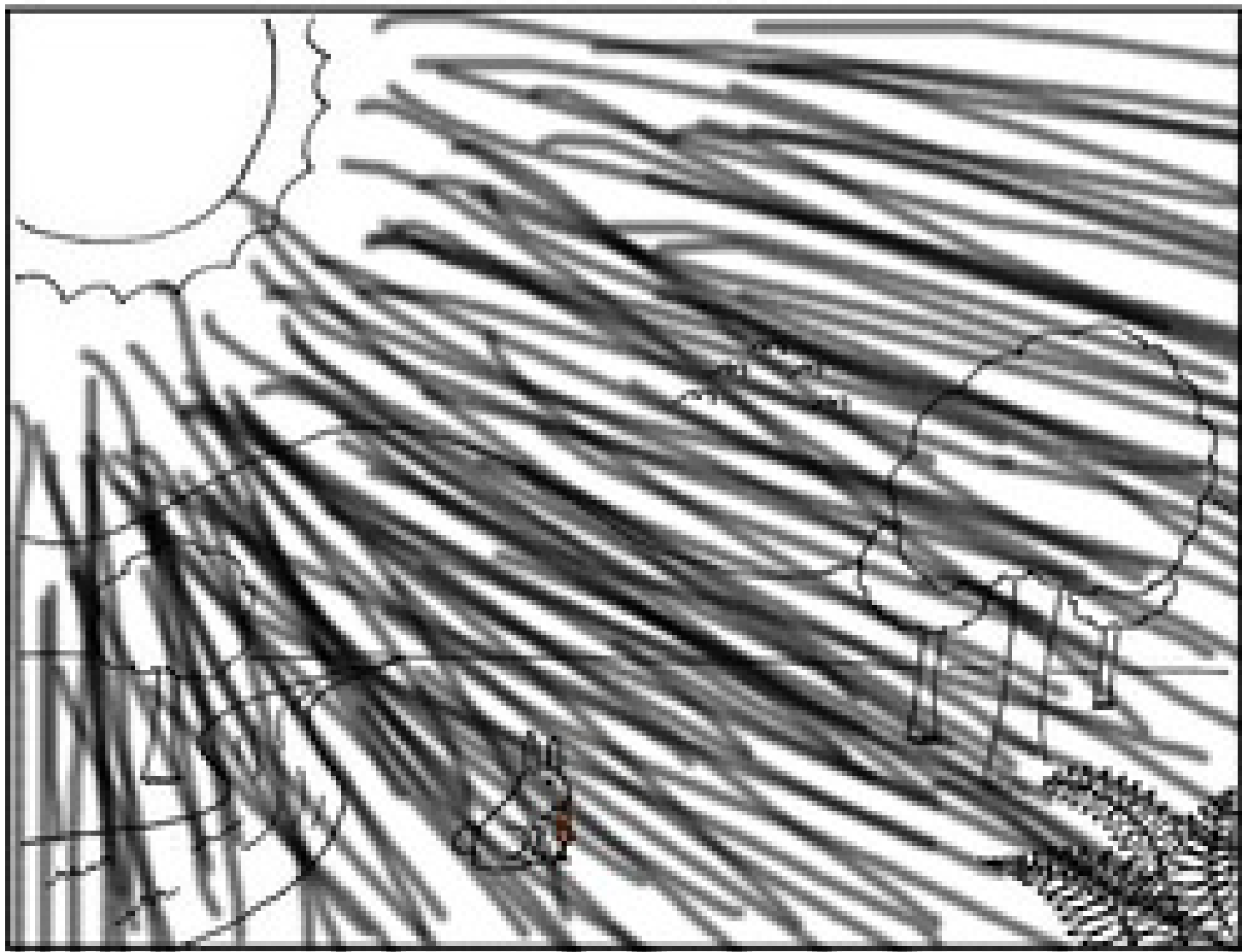


This is how scientists see the world.

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.

中微子的基本事实

- 中微子穿透力极强
 - 因为只参与弱相互作用，无电荷
 - 太阳中微子与电子的反应截面是 10^{-50}m^2
 - 类比：原子核尺度 10^{-30}m^2
- 太阳是日常生活中最强的中微子源
- 自旋 $\frac{1}{2}$ ，费米子

已知的基本粒子

mass →	$\approx 2.3 \text{ MeV}/c^2$	$\approx 1.275 \text{ GeV}/c^2$	$\approx 173.07 \text{ GeV}/c^2$	0	$\approx 126 \text{ GeV}/c^2$
charge →	$2/3$	$2/3$	$2/3$	0	0
spin →	$1/2$	$1/2$	$1/2$	1	0
	u up	c charm	t top	g gluon	H Higgs boson
QUARKS	$\approx 4.8 \text{ MeV}/c^2$	$\approx 95 \text{ MeV}/c^2$	$\approx 4.18 \text{ GeV}/c^2$	0	
	$-1/3$	$-1/3$	$-1/3$	0	
	$1/2$	$1/2$	$1/2$	1	
	d down	s strange	b bottom	γ photon	
LEPTONS	$0.511 \text{ MeV}/c^2$	$105.7 \text{ MeV}/c^2$	$1.777 \text{ GeV}/c^2$	$91.2 \text{ GeV}/c^2$	
	-1	-1	-1	0	
	$1/2$	$1/2$	$1/2$	1	
	e electron	μ muon	τ tau	Z Z boson	
中微子	$< 2.2 \text{ eV}/c^2$	$< 0.17 \text{ MeV}/c^2$	$< 15.5 \text{ MeV}/c^2$	$80.4 \text{ GeV}/c^2$	
	0	0	0	± 1	
	$1/2$	$1/2$	$1/2$	1	
	ν_e electron neutrino	ν_μ muon neutrino	ν_τ tau neutrino	W W boson	
				GAUGE BOSONS	

当今已知的基本粒子有几代？

A 2

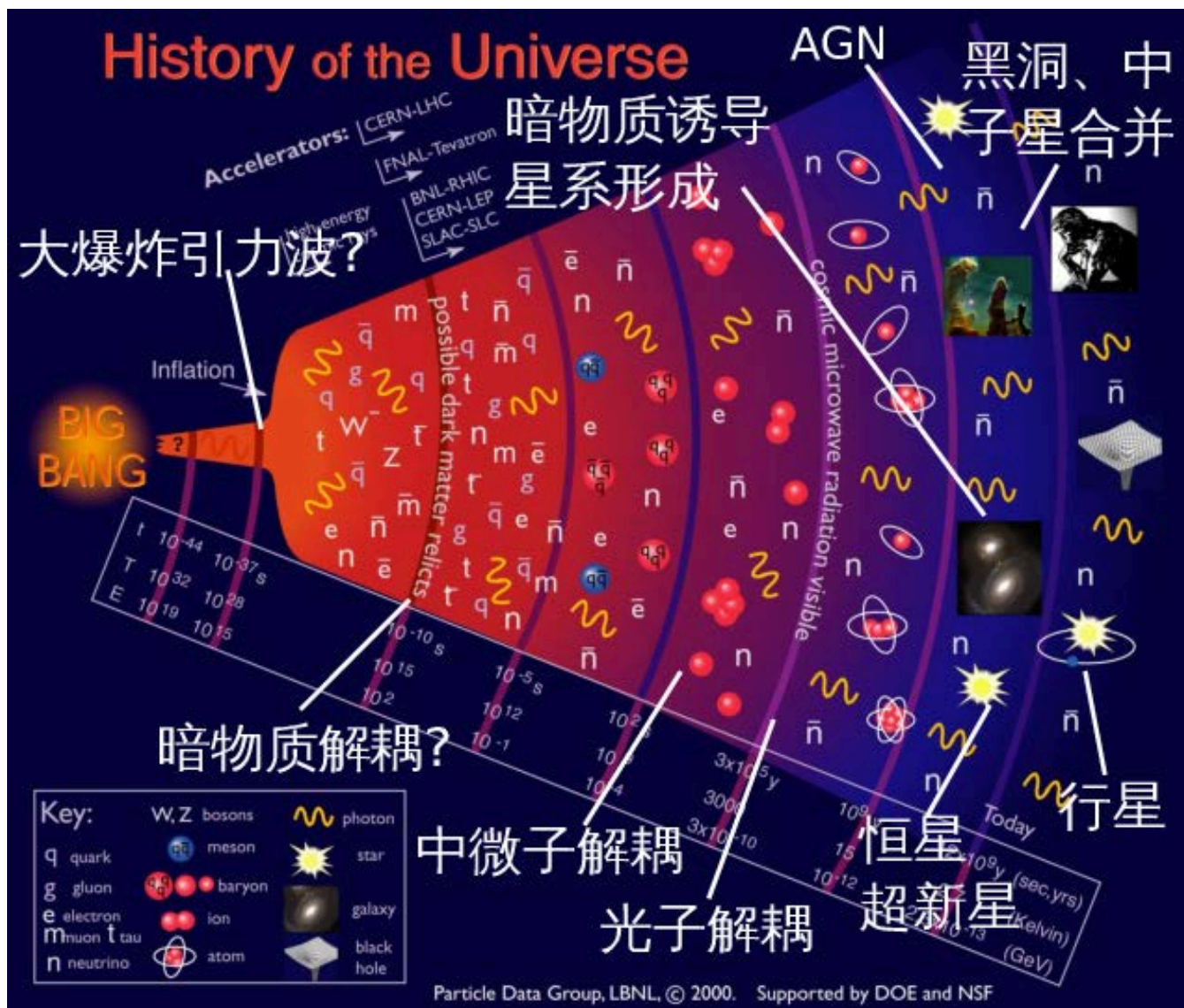
B 3

C 4

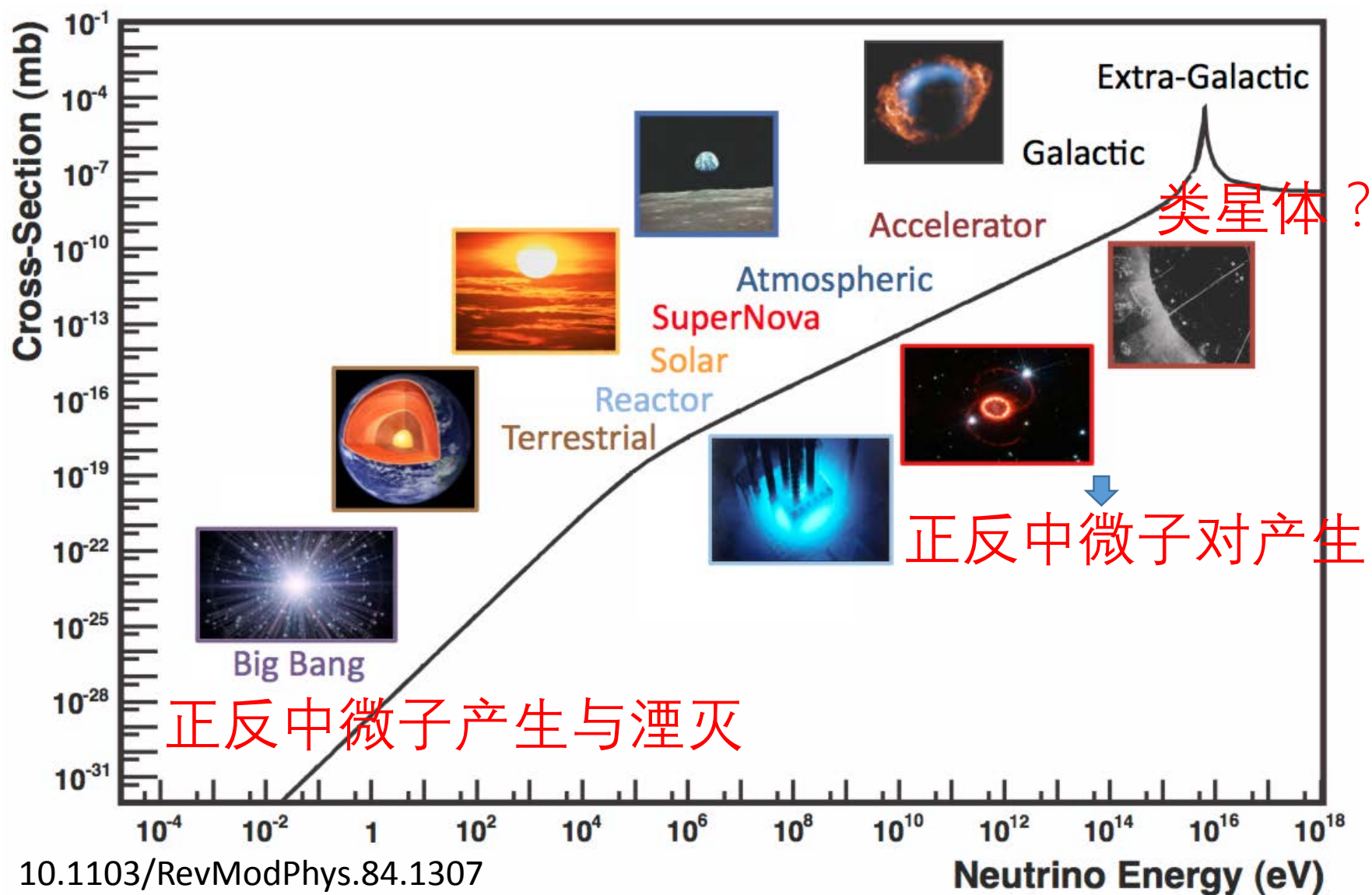
D 5

提交

自然界中的中微子



不同能量中微子与电子的散射截面

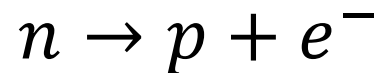


中子中微子

“我终于找到了一个绝望拯救方案…存在一个电中性粒子…自旋为 $1/2$ 并服从不相容原理。”

——泡利，1930年

上世纪早期的核衰变困惑



F. A. Scott, *Phys. Rev.* **48**, 391 (1935)

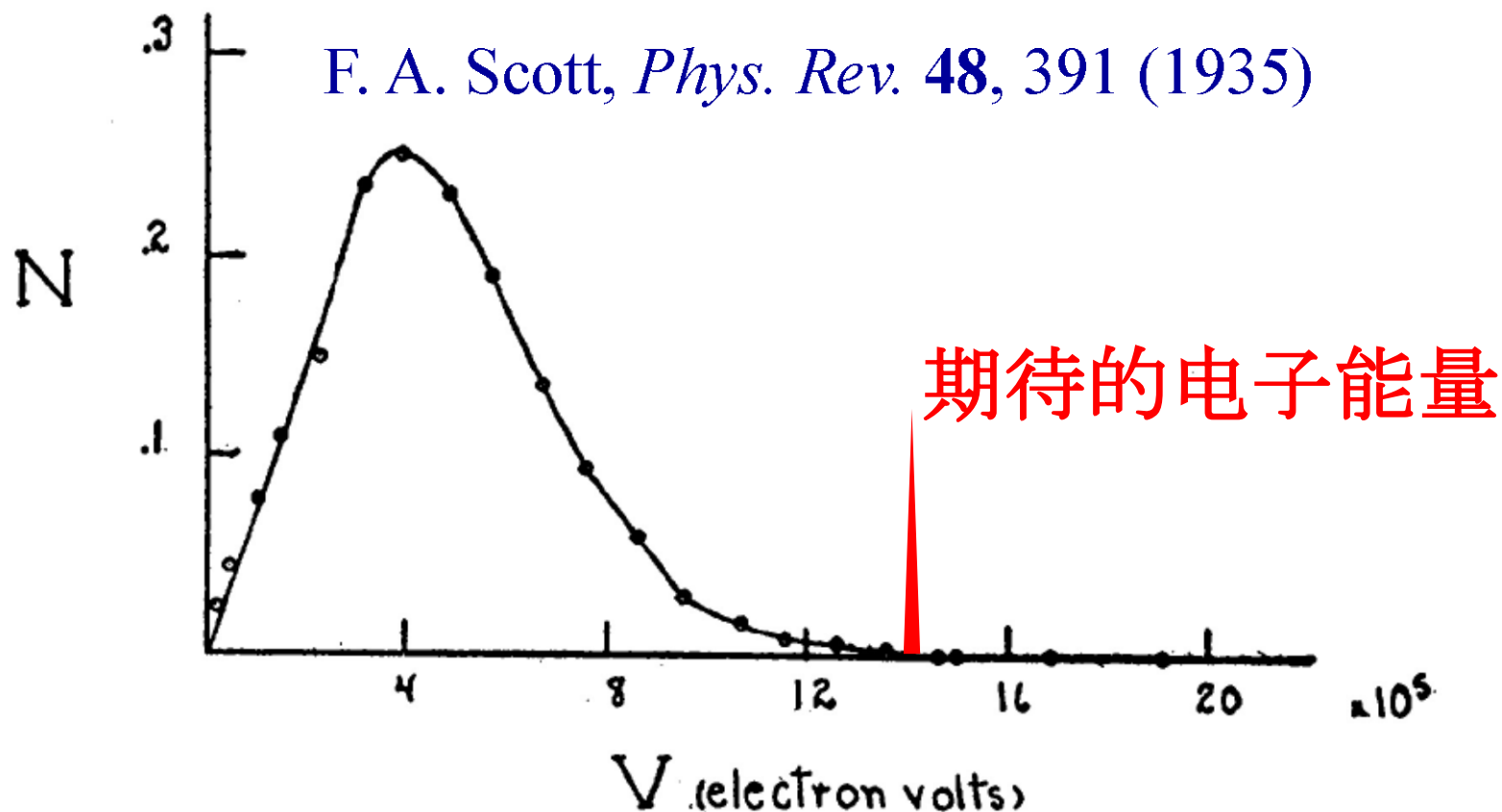


FIG. 5. Energy distribution curve of the beta-rays.

中微子：“绝望的泡利想法”

The Desperate Remedy

4 December 1930
Gloriastr.
Zürich

Physical Institute of the
Federal Institute of Technology (ETH)
Zürich

Dear radioactive ladies and gentlemen,

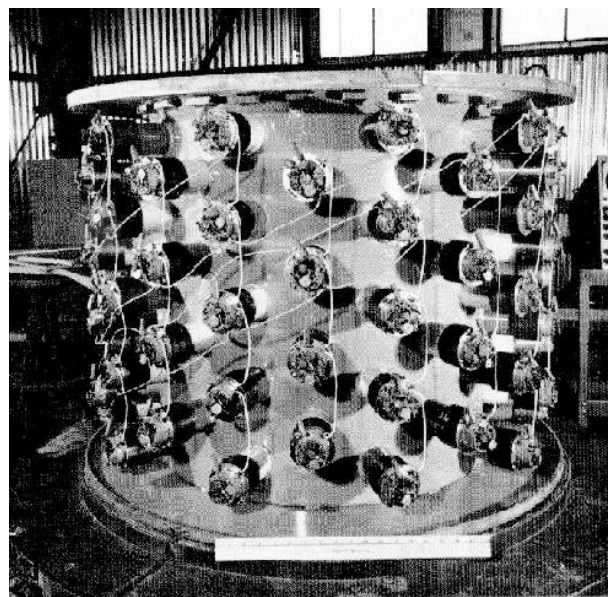
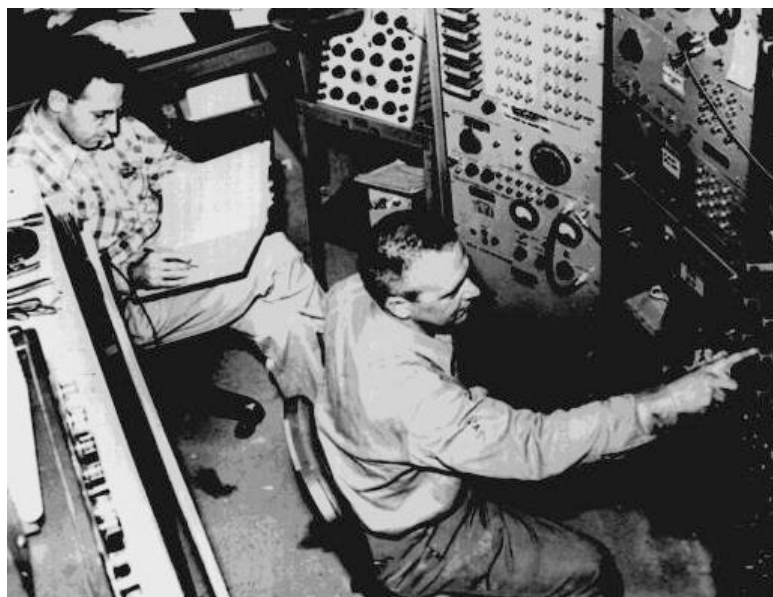
As the bearer of these lines, to whom I ask you to listen graciously, will explain more exactly, considering the 'false' statistics of N-14 and Li-6 nuclei, as well as the continuous β -spectrum, I have hit upon a desperate remedy to save the "exchange theorem"* of statistics and the energy theorem. Namely [there is] the possibility that there could exist in the nuclei electrically neutral particles that I wish to call neutrons,** which have spin 1/2 and obey the exclusion principle, and additionally differ from light quanta in that they do not travel with the velocity of light: The mass of the neutron must be of the same order of magnitude as the electron mass and, in any case, not larger than 0.01 proton mass. The continuous β -spectrum would then become understandable by the assumption that in β decay a neutron is emitted together with the electron, in such a way that the sum of the energies of neutron and electron is constant.



泡利：“能量被一种小质量的中性粒子“偷走”了”

长达四分之一世纪的寻找

直到1956年才被Cowan & Reins的实验证实。



泡利教授：很高兴地通知你，通过观测质子的反贝塔衰变，我们肯定是探测到了来自裂变产物的中微子。

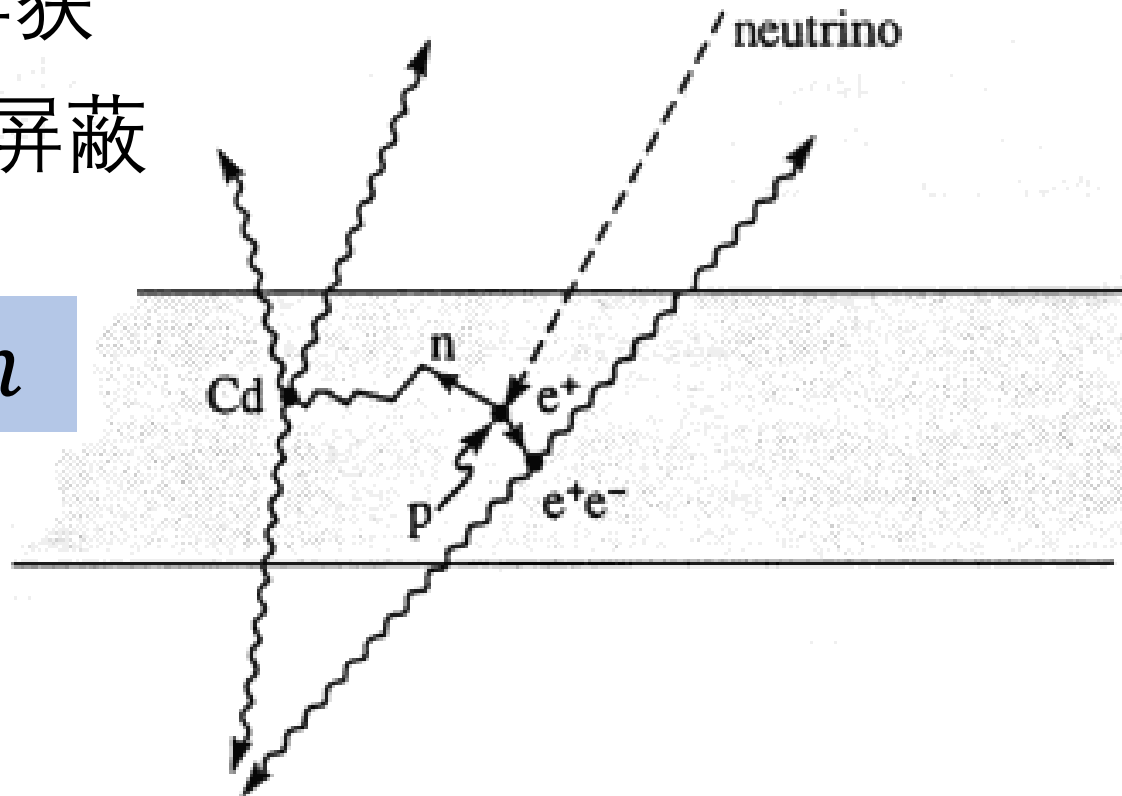
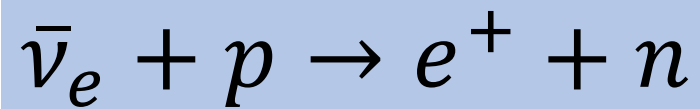
大科学仪器的起源

Reines remarked that before his and Cowan's work, a “big” physics experiment might use a one-liter detector. It was their background in weapons research... that emboldened Reines and Cowan to tackle such a large increase in experimental scale (2 x 200L).

~~物理学从此走向分裂~~

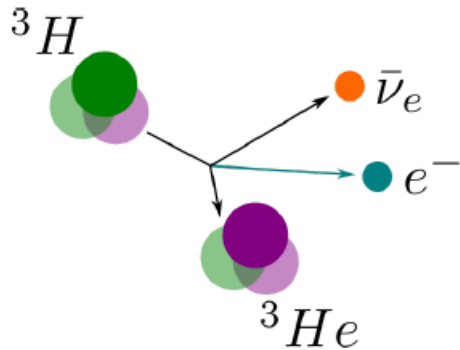
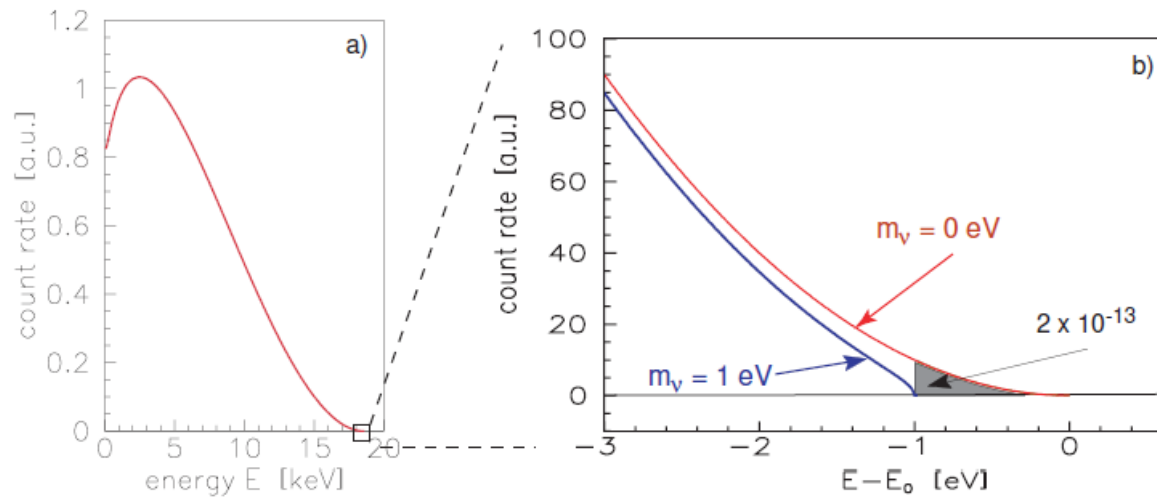
中微子的发现 Cowan & Reins 1956

- 中微子源：研究型反应堆
- 塑料闪烁体：Triethylbenzene
- CdCl_4 ：中子俘获
- 符合探测，水屏蔽

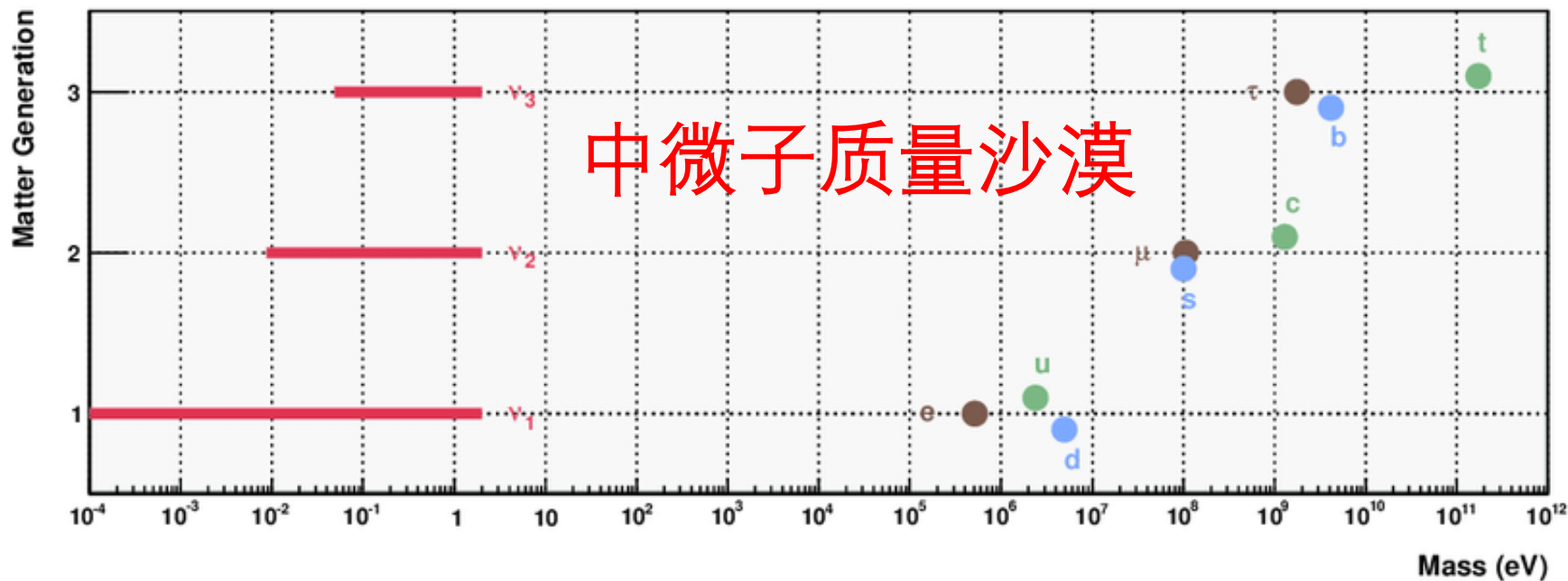


我们依旧不知道中微子质量

- KATRIN 实验2021年最新结果 $m_\nu < 0.9\text{eV}$



- Benefits from tritium:
 - Short lifetime of 12.3 years
 - Low endpoint energy around 18.6 keV
 - Superalowed transition

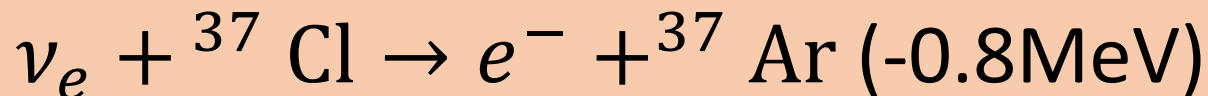
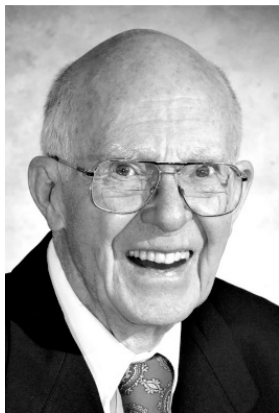


基本粒子质量

正反中微子，宇称破坏

Weyl Spinors

1955: Ray Davis寻找中微子



- 氯气？有毒，气态密度低
- 四氯化碳（ CCl_4 液体毒性略低）

化学放射计量，使用 Cl 捕捉中微子

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. 使用盖革计数器观察Ar-37的衰变



3800L四氯化碳观察原子反应堆：无果。

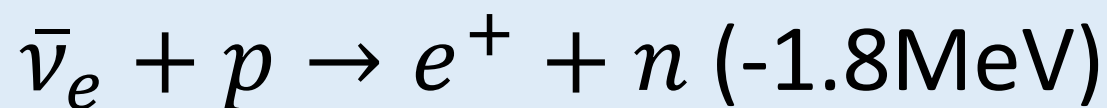
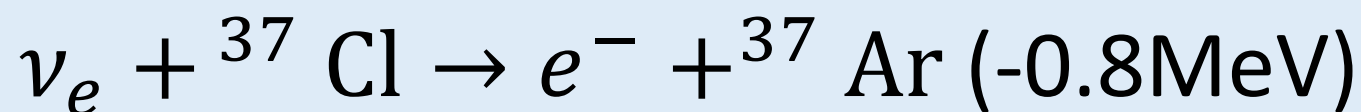
为什么Ray没有观测到中微子，但是Cowan和Reins观查到了？

- ☐ A 实验计数方法不可靠
- ☐ B 中微子不与 Cl 反应，核物理有问题
- ☐ C 只是反应堆中微子不与 Cl 反应
- ☐ D 以上解释都不对

提交

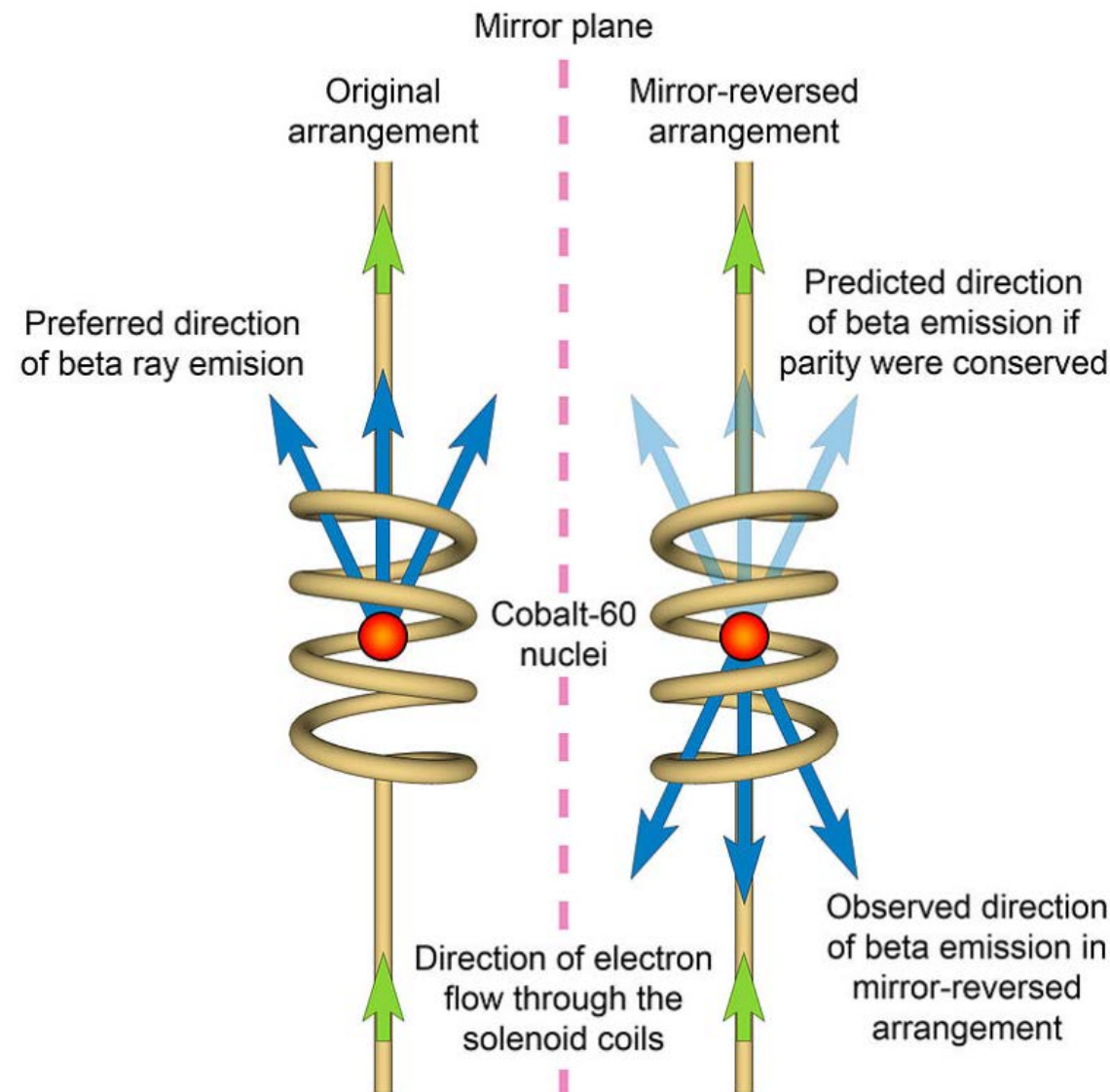
两个实验的对比

核反应堆旁的两个实验：



Ray 的实验证实，第一种模式的反应截面至多是第二种的 $\frac{1}{20}$ 。

结论：存在正反两种中微子，与负正电子对应。



吴健雄分别改变了磁场方向，发现电子方向始终与磁场方向相反。

$$\langle \vec{\sigma}_{Ni} \cdot \vec{p}_e \rangle \neq 0$$

结论：弱相互作用下宇称不守恒，但为什么？

新的中微子理论

PHYSICAL REVIEW

VOLUME 105, NUMBER 5

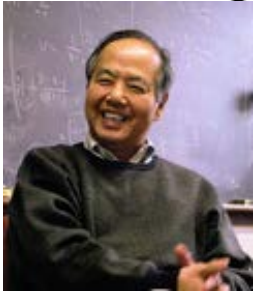
MARCH 1, 1957

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

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

Dirac
矩阵

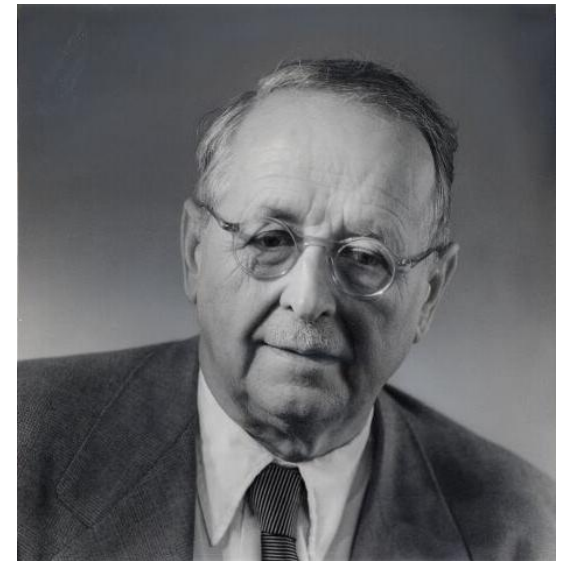
时空
指标

Dirac
Spinor

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

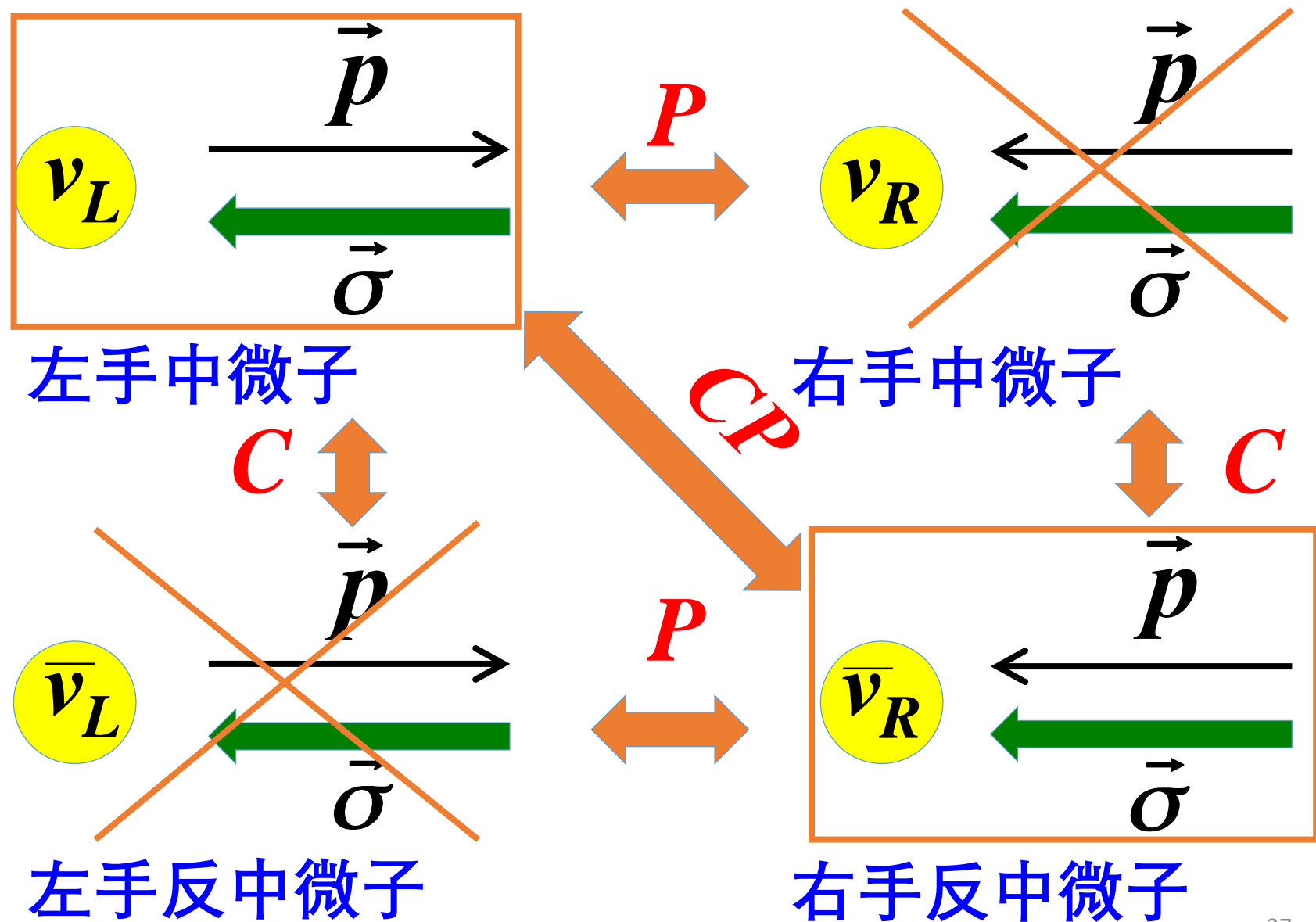
$$i\gamma^\alpha \partial_\alpha \psi_R - \cancel{m_\nu \psi_L} = 0$$

Weyl Spinor



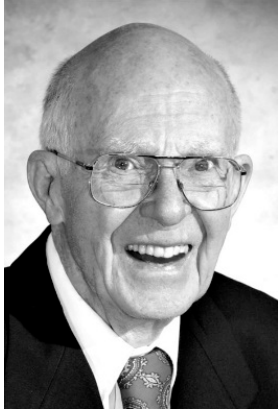
Hermann Weyl

中微子的CP变换



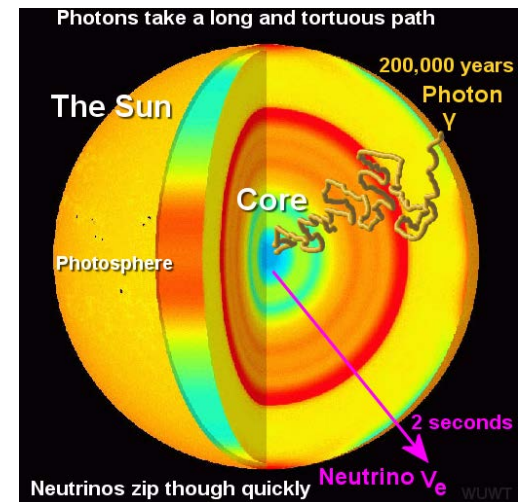
太阳中微子难题与中微子振荡

1959: 探索太阳的产能机制

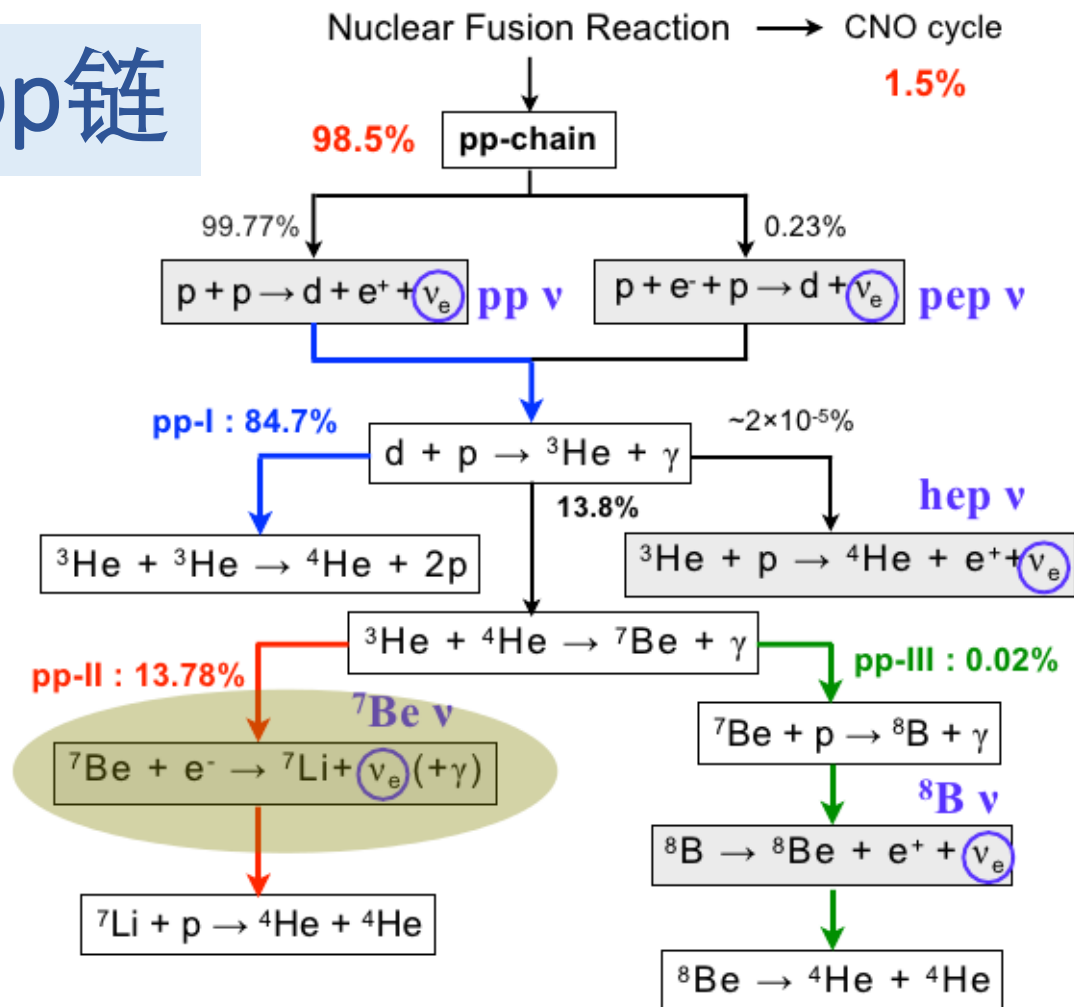
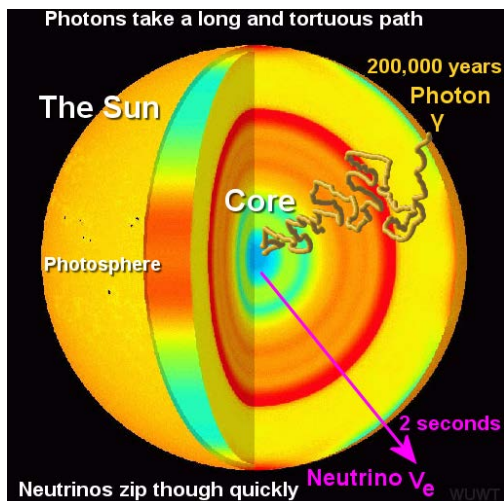


使用中微子看穿太阳！

- 太阳的寿命有多长？
- 太阳的能量从哪里来？
- 太阳的中微子可以揭示什么？

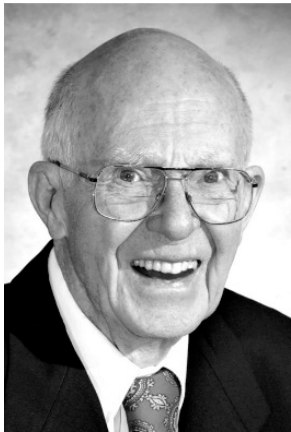


太阳中微子 pp链



模型由太阳的化学成分、光度和温度间接验证。
但中微子能提供直接证据。

1960s-1990s 太阳中微子之谜



Ray 使用既有的探测原理，把探测器扩大 100 倍，并放入了地下深矿材料换成了四氯乙烯，几经辗转，终于在 1968 年观测到了太阳中微子。

- 但观测值是理论预测的 $1/3$ 。
- 观测一个月，可以回收出几十个 Ar 原子。
- 实验遭到质疑：几百吨液体中找几十个 Ar，可信吗？
- 20多年间，Ray 证实了实验可信。太阳中微子之谜越发严重。



Ray 在 Homestake 矿井中的巨大探测器

如何解释 Ray Davis 实验结果？

A

实验做错了

B

太阳要熄灭了

C

中微子凭空消失了

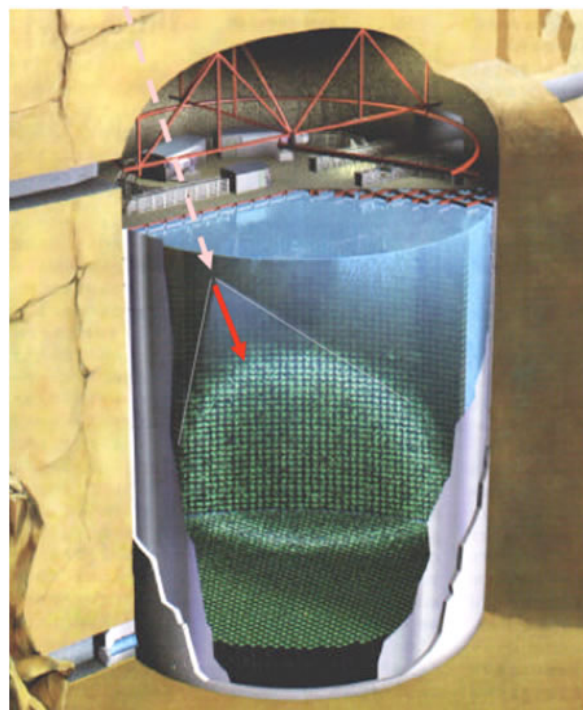
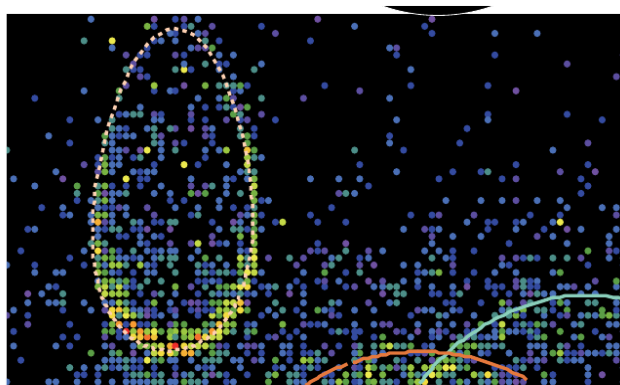
D

太阳还有其它产能机制

提交

水 Cherenkov 实验：(超级)神冈

- 容器内：带电粒子诱导 Cherenkov 光
- 容器壁有光电倍增管，光电效应光子计数
- 相对化学放射计数是实时观测



水 Cherenkov 实验：(超级)神冈

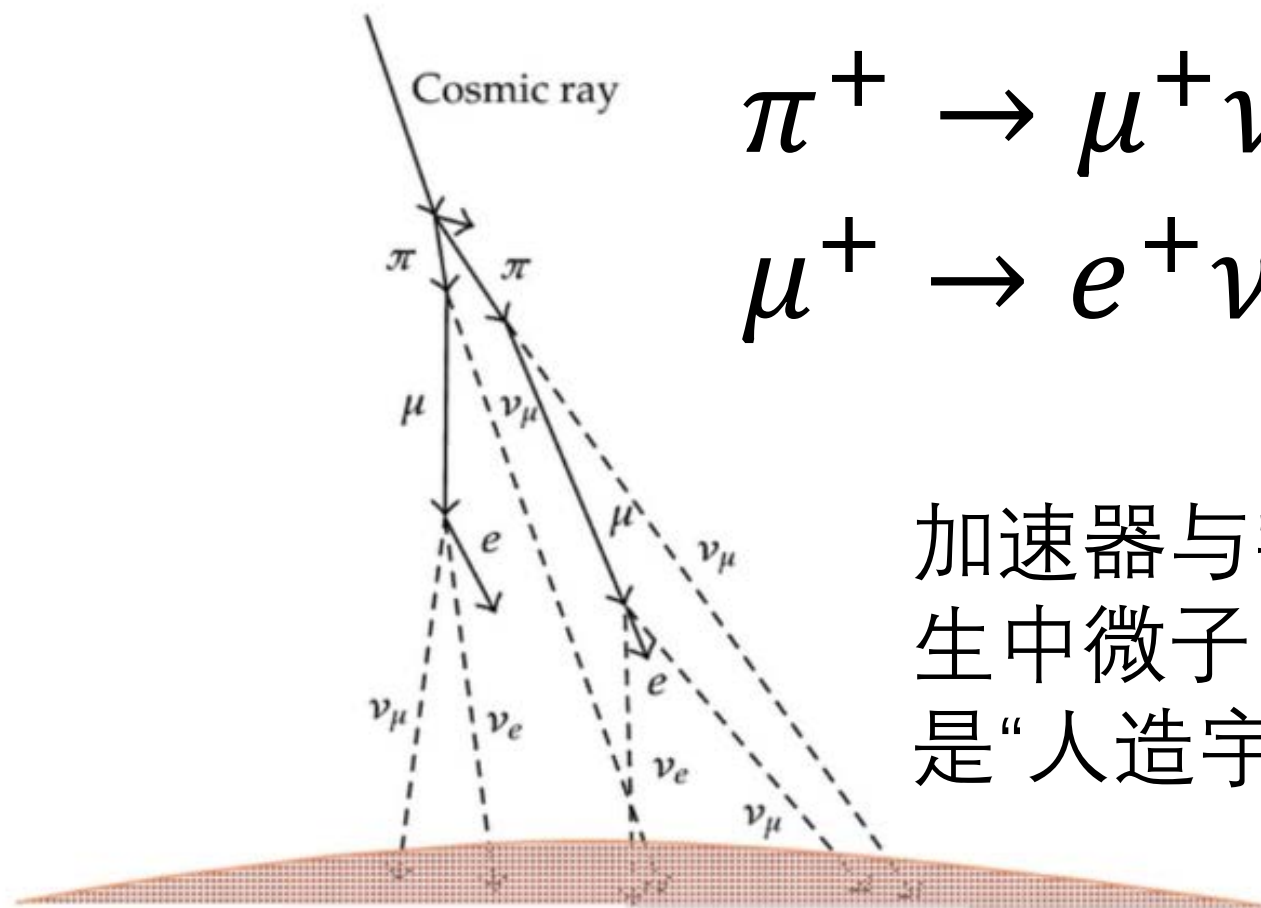
- 水的实验给出，太阳中微子的测量值是理论预测的 65%。
 - 实验确认了由Ray发现的太阳中微子问题。
 - 为什么与理论值的差距不一样？
-
- 1962年，Brookhaven μ 子中微子实验：使用 π^- 衰变产生的中微子，与质子反应产生 μ^+ 不产生 e^+ 。证明中微子具有味。



中微子有多个味，味之间可以转换。

大气和加速器中微子

质子加速，轰击靶，产生 π 介子



$$\pi^+ \rightarrow \mu^+ \nu_\mu \quad 26\text{ns}$$

$$\mu^+ \rightarrow e^+ \nu_e \bar{\nu}_\mu \quad 2.2\mu\text{s}$$

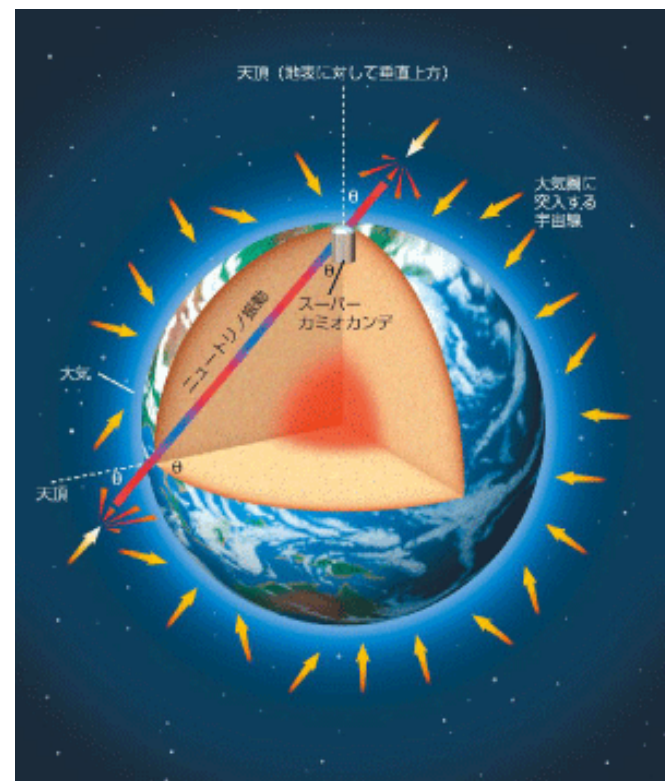
加速器与宇宙射线产生中微子的原理相同，是“人造宇宙射线”

来自大气中微子的线索

$$\pi^+ \rightarrow \mu^+ \nu_\mu \quad 26\text{ns}$$

$$\mu^+ \rightarrow e^+ \nu_e \bar{\nu}_\mu \quad 2.2\mu\text{s}$$

- ν_μ ν_e 比例应为2
- Kamokande 观察到中微子**变味**的迹象：
 - 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
- 1998年：扩大15倍的Super-Kamokande 最终确认



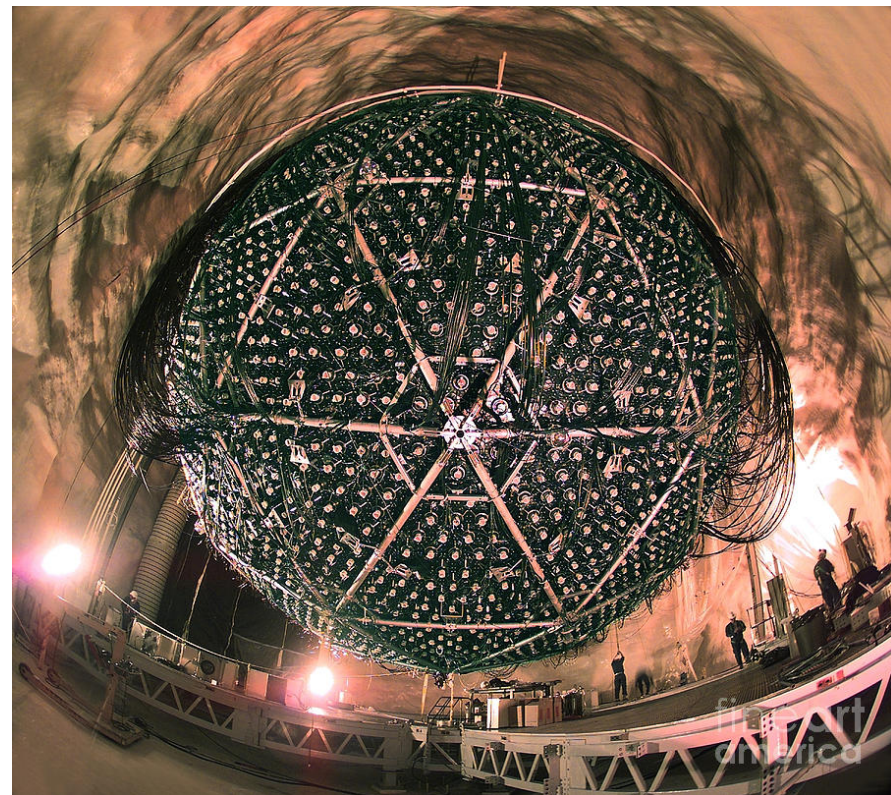
SNO 的巧妙设计：一箭双雕

- 重水Cherenkov探测
- $d + \nu \rightarrow p + n + \nu$
- 测量电子中微子流量，模拟早期实验
- $d + \nu_e \rightarrow p + p + e^-$

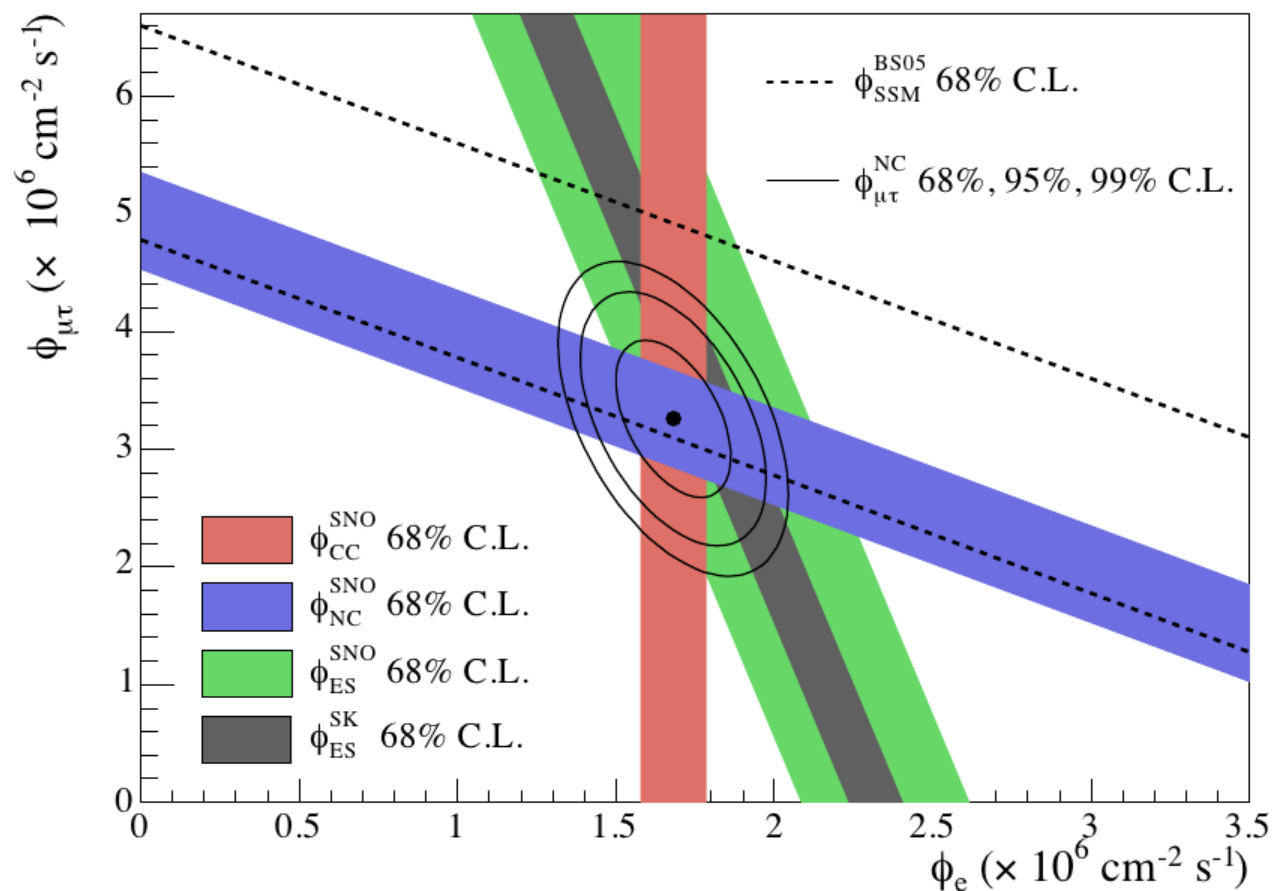
测量所有中微子的流量，太阳中微子总流量。与理论计算相符！

Ray 发现的世纪难题终于被人类解答。

2015 Nobel Prize: Super-Kamiokande, SNO



2001年太阳中微子消失之谜解决



BS05：太阳恒星模型

NC: neutral current

CC: charged current

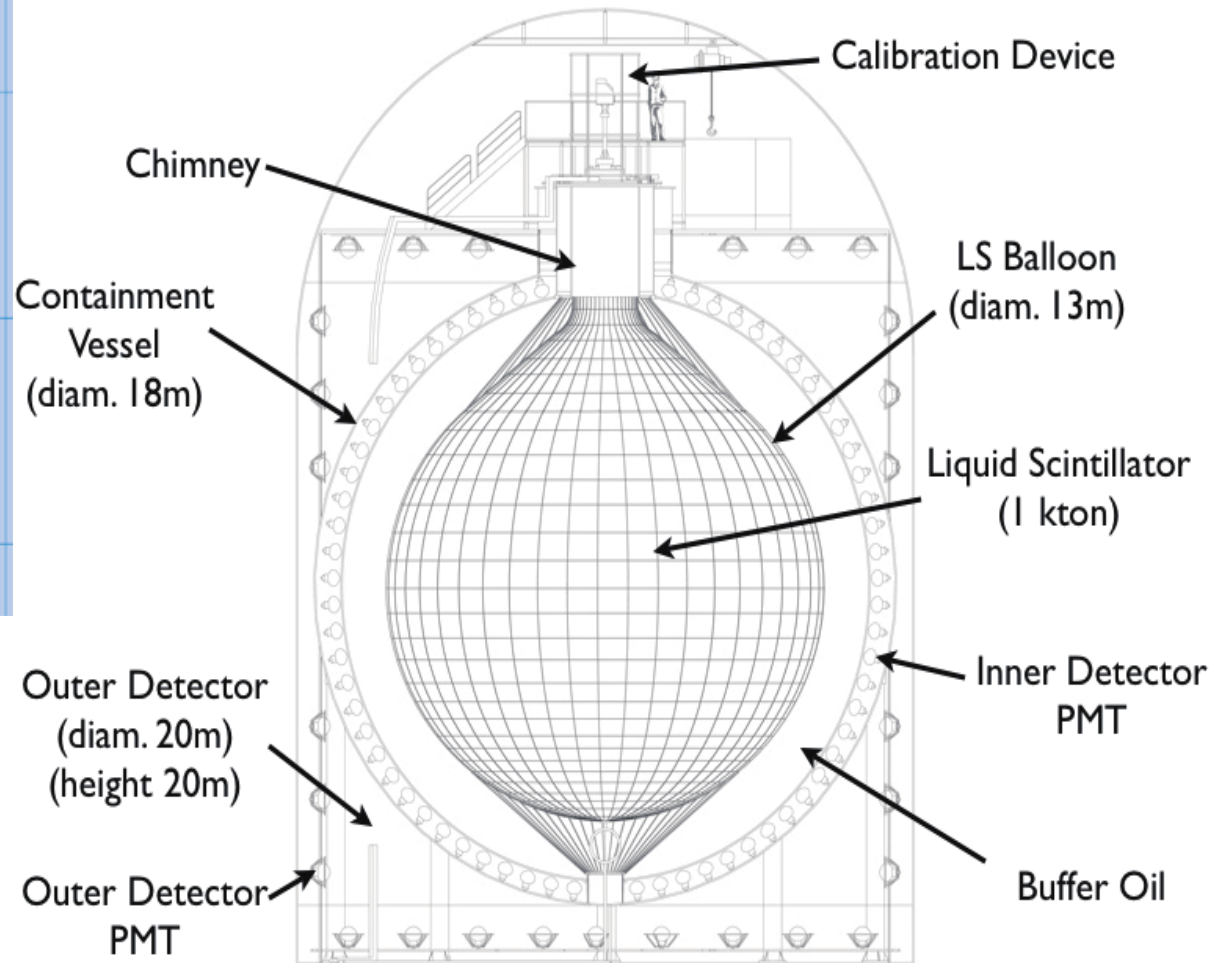
SK: super-Kamiokande

SNO: Sudbury Neutrino Observatory

KamLAND实验 确立中微子振荡



最大的液闪实验
巧妙利用反应堆
发现太阳 ν 振荡



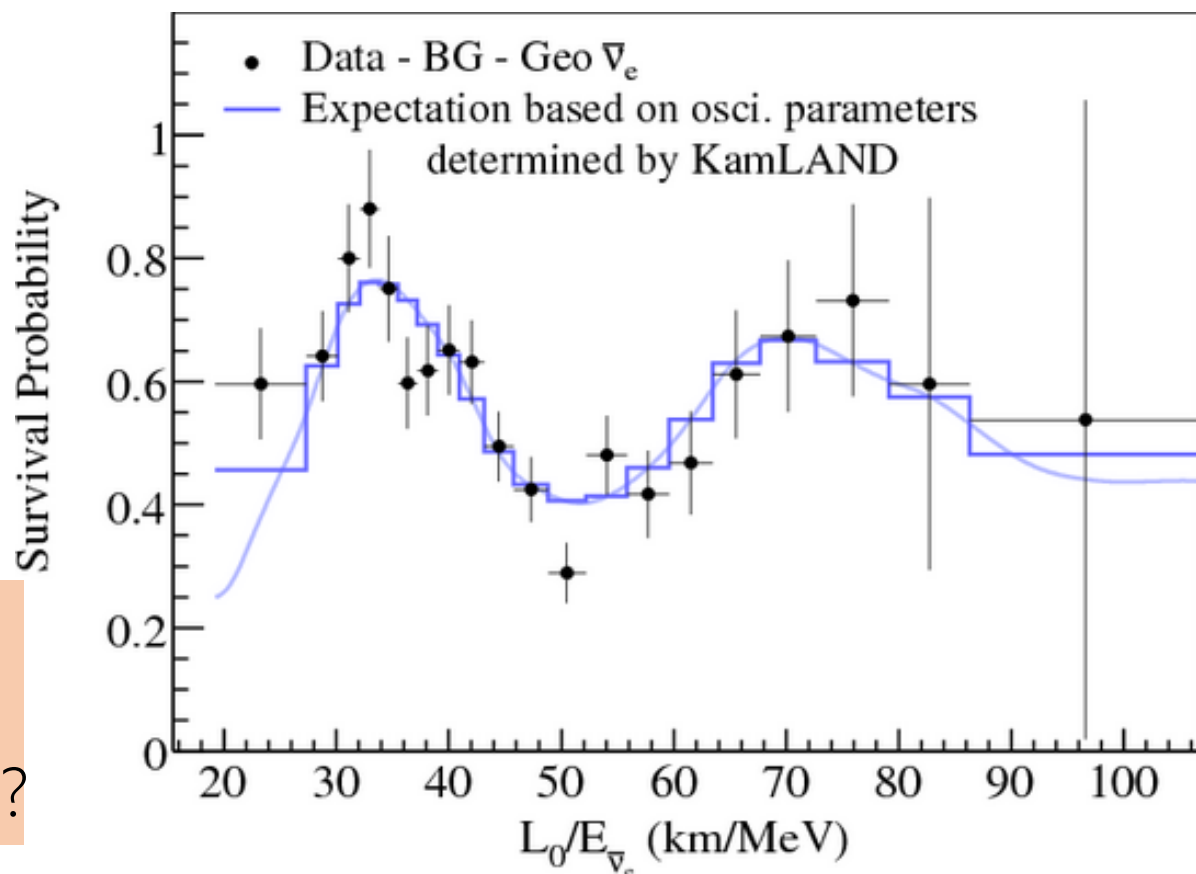
中微子振荡的最终确立

2002年，KamLAND 观测到反应堆中微子振荡
同时定出太阳中微子的振荡模式

2005年，KamLAND 报告了完整的中微子振荡周期

L_0 ：中微子飞行距离

E ：中微子能量

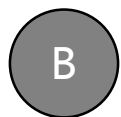


思考：反应堆中微子和太阳中微子的振荡为什么可以相互验证？

来自太阳的中微子是



中微子



反中微子

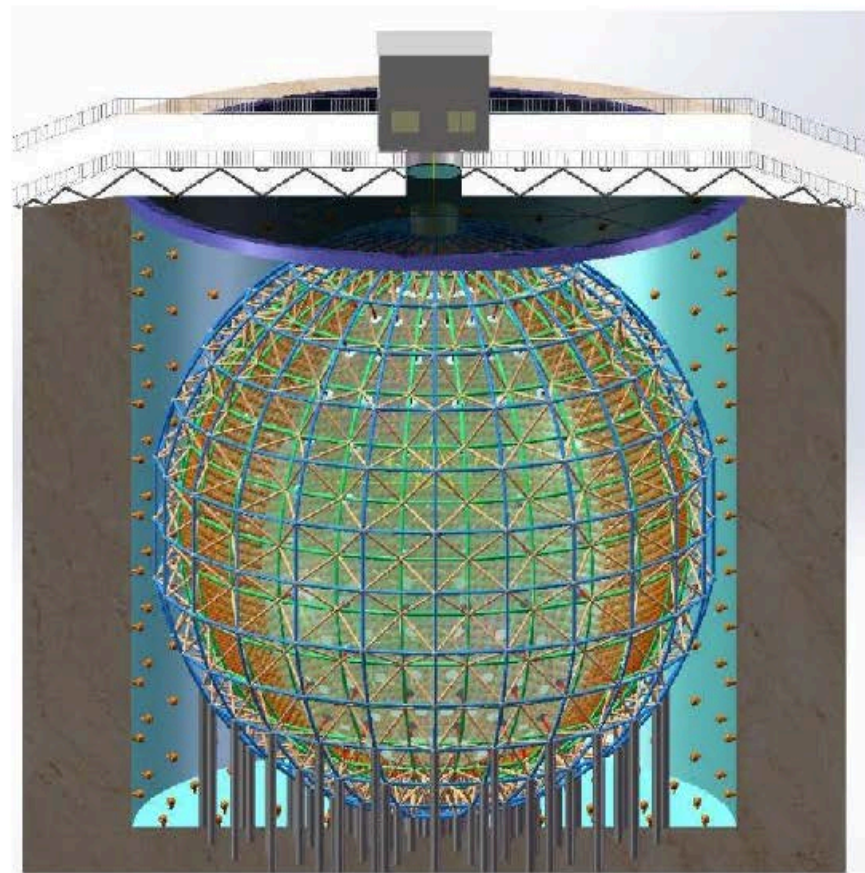
提交



- 质量到底有多大？为什么如此之小？
 - 质量顺序？（中国JUNO实验目标）
- 正反中微子是同一种粒子吗
 - Dirac型还是Majorana型费米子？
 - Majorana型费米子存在吗？
- 中微子与Higgs如何作用？
 - 右手中微子存在吗？
- 在锦屏地下实验室开展 $0\nu\beta\beta$ 寻找

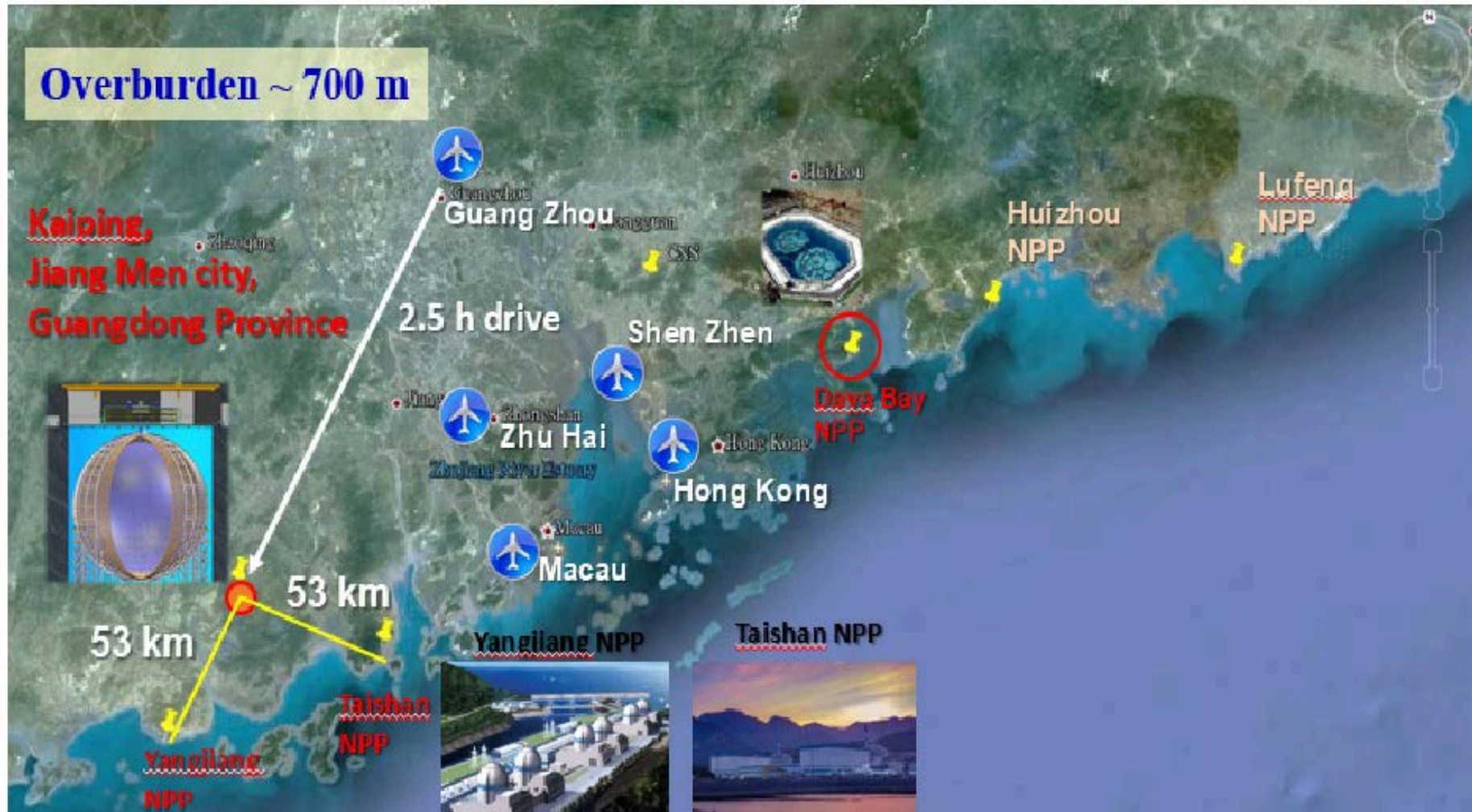
中微子的世界难题

- ① 质量到底有多大？为什么如此之小？
 - ▶ 质量排序？(中国 JUNO 实验目标)
- ② 正反中微子是同一种粒子吗
 - ▶ Dirac 型还是 Majorana 型费米子？
 - ▶ Majorana 型费米子存在吗？
- ③ 中微子与 Higgs 如何作用？
 - ▶ 右手中微子存在吗？
- ④ 轻子的 CP 破坏有多大？
 - ▶ 能否解释宇宙正反物质不对称？

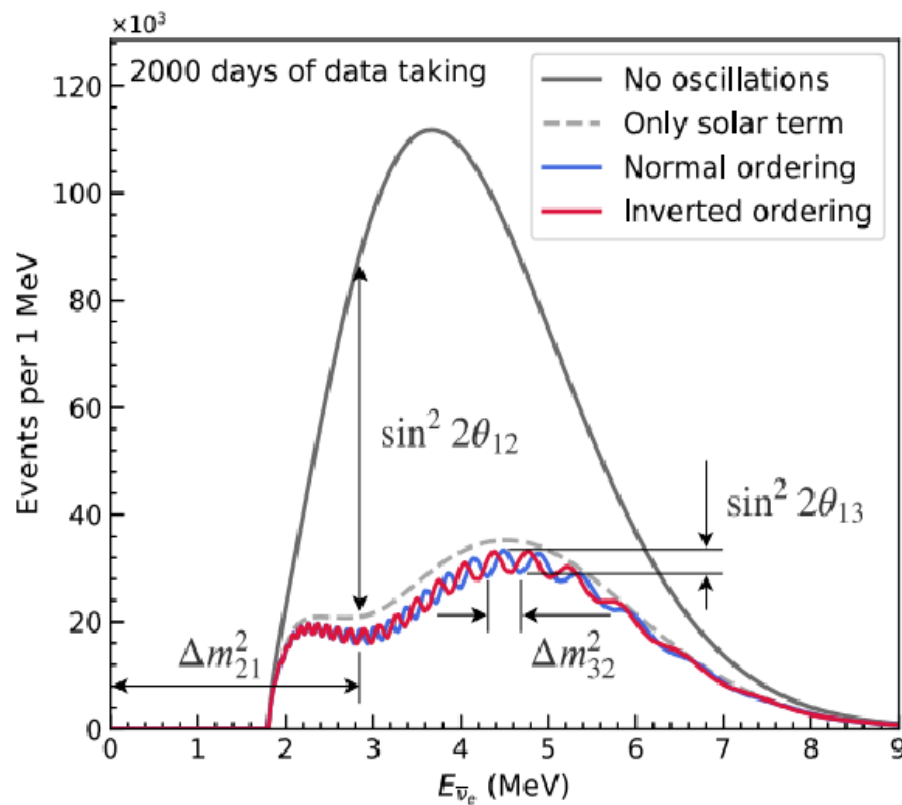
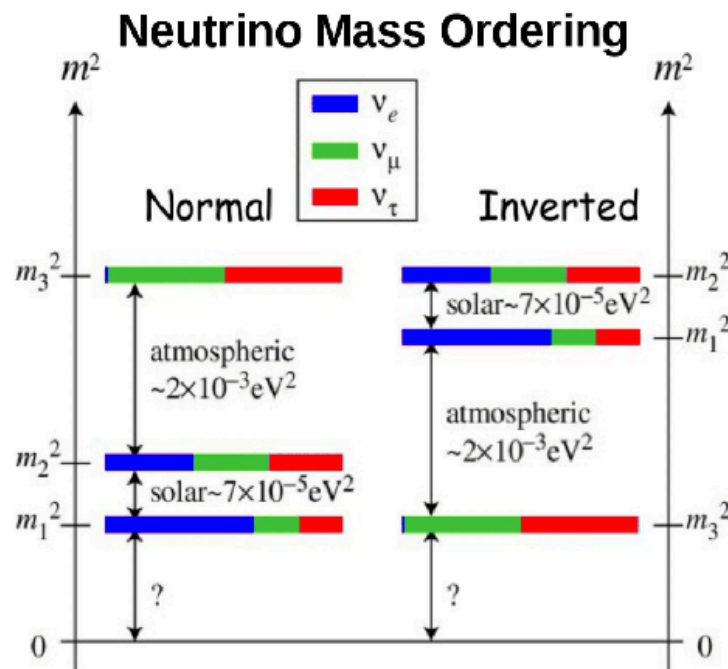


中国科学家的回应：江门中微子实验 (JUNO)

JUNO = Jiangmen Underground Neutrino Observatory



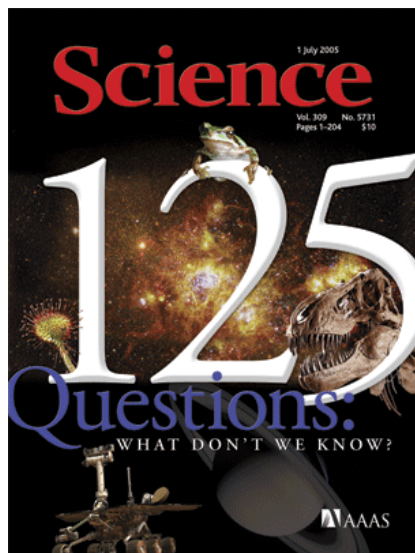
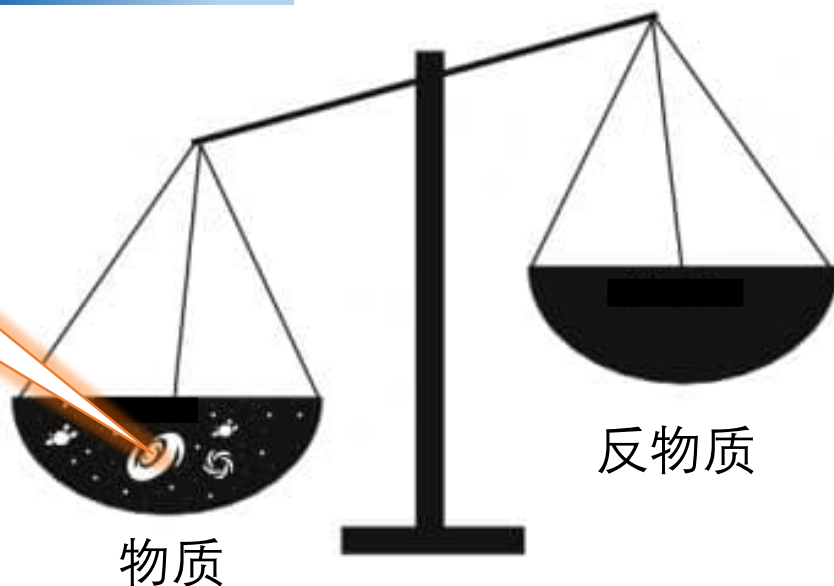
中微子质量排序的测量



精密测量反中微子能量是重中之重。

宇宙中物质从何起源？

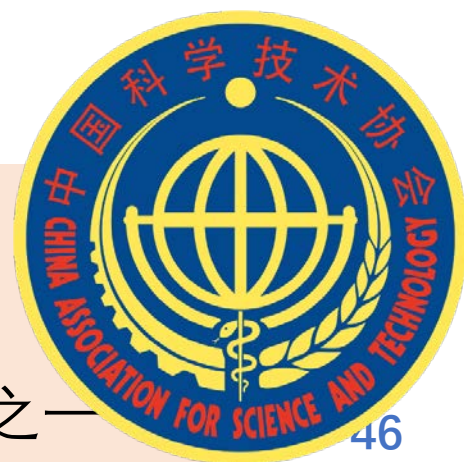
我们人类



2005和2021年均入选Science
125 个重大科学问题

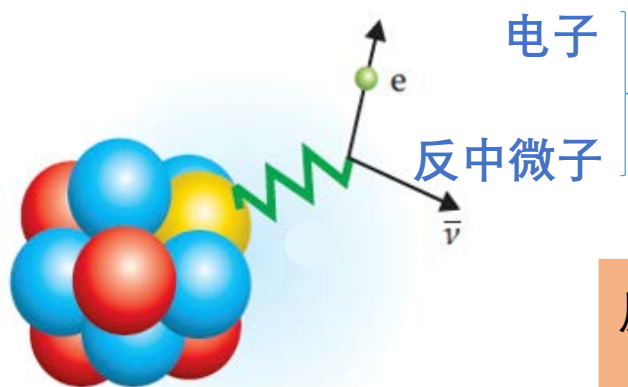
中微子质量和宇宙物质-反物质不对称的起源
是什么？

——中国科协2021十大科学问题之一



小中微子主导大宇宙

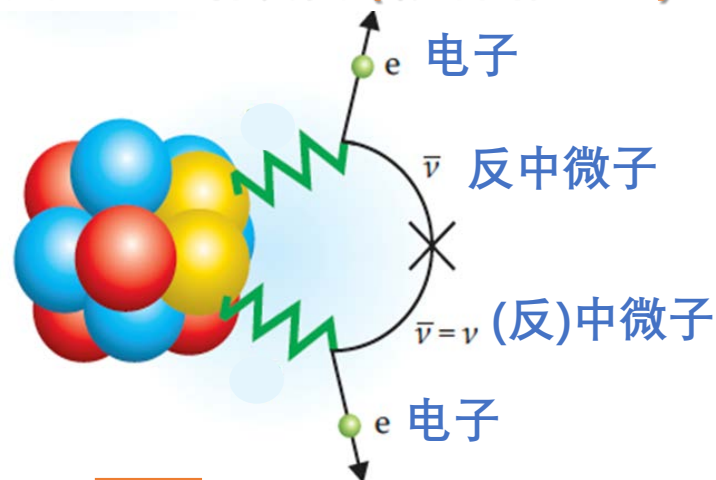
贝塔衰变 (地球能量的重要来源)



统称“轻子”

反应释放能量
叫做**Q值**

无中微子双贝塔衰变 (极稀有过程)



证实

?

物质

中微子

反中微子

反物质

发现中微子有质量，
暗示中微子正反等同，
它可能连通正反物质。

马纳拉纳费米子

Dirac方程与Majorana费米子



Paul Dirac

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

Diagram illustrating the Dirac equation with annotations:

- γ^α is labeled "Dirac 矩阵" (Dirac matrix).
- ∂_α is labeled "时空指标" (spacetime index).
- ψ is labeled "Dirac Spinor" (Dirac spinor).

$$i\gamma^\alpha \partial_\alpha \psi - m_\nu \psi^* = 0$$

$$i\gamma^\alpha \partial_\alpha \psi^* - m_\nu \psi = 0$$

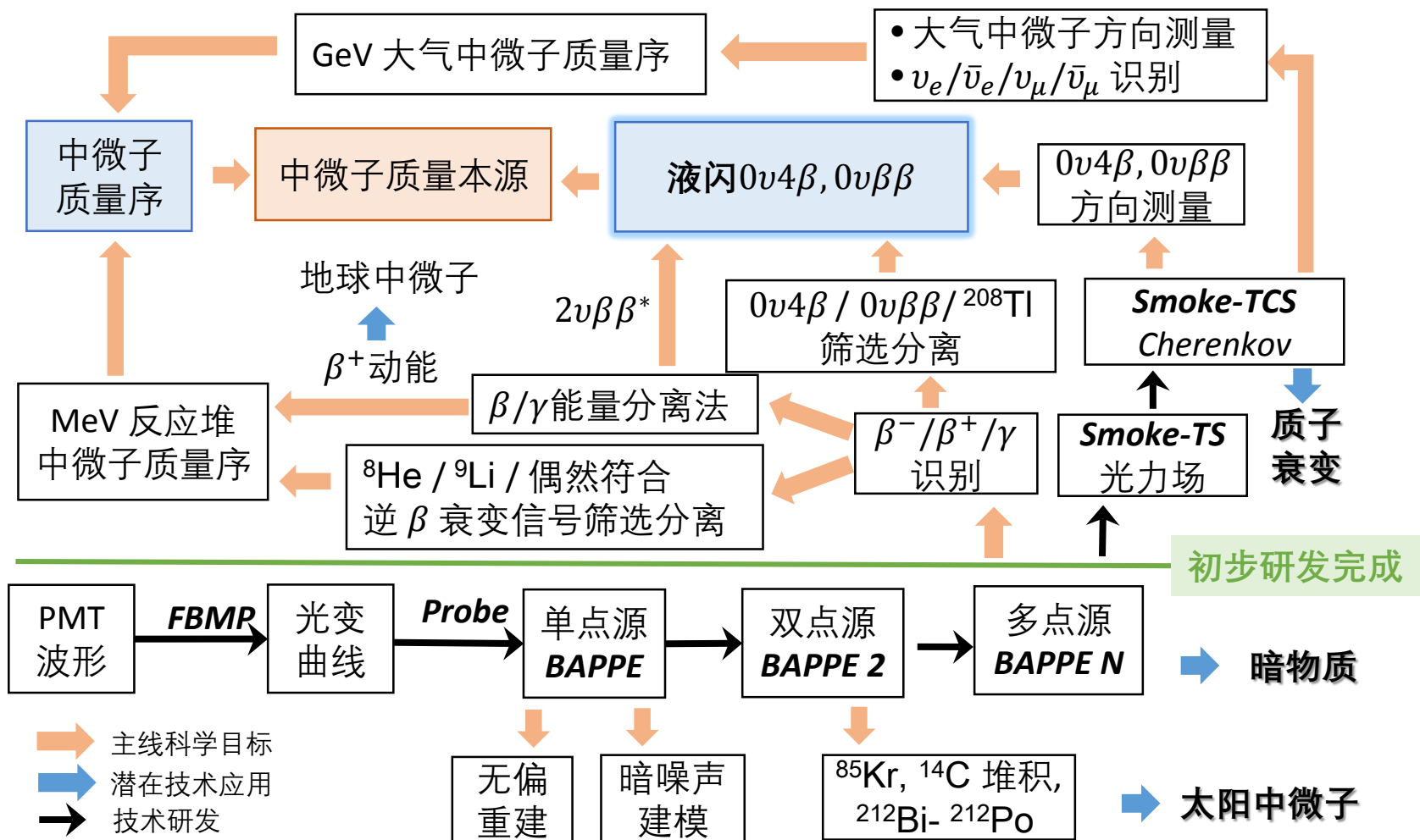
Majorana Spinor



Ettore Majorana

中微子研究@清华

未来十年中微子本源研究路线



- **FBMP:** fast bayesian matching pursuit algorithm 快速贝叶斯匹配追踪算法
- **BAPPE:** Bayesian probe for point-like events 点源贝叶斯响应函数
- **TCS:** tracking Cherenkov scintillation 径迹切伦科夫闪烁
- **Probe:** 响应函数
- **Smoke:** 发光能力场

中微子参与哪些基本相互作用？

- ☐ A 强相互作用
- ☒ B 弱相互作用
- ☐ C 电磁相互作用
- ☒ D 引力相互作用

提交

总结

- 中微子的质量和振荡的发现对粒子物理和天体物理影响深刻
- 我们对中微子知之甚少：质量，CP破坏
- 中微子为天文观测开辟了全新的窗口