

大气中微子及中微子振荡的发现

王 为

(中山大学物理科学与工程技术学院 510275)

未来的粒子物理学史上会提到：1998年和2015年在大气中微子物理的发展和粒子物理标准模型(Standard Model)的完善上是非常值得纪念的两个年份——1998年，超级神冈中微子探测实验(Super-Kamioka Neutrino Detection Experiment, 简称 Super-Kamiokande, 也简称 Super-K)的物理学家们在大气中微子数据中发现了大气中微子振荡毋庸置疑的直接证据；2015年，Super-K这个意义深远的发现让日本东京大学的梶田隆章(T. Kajita)教授同SNO实验的前发言人加拿大皇后大学的麦克唐纳(A. McDonald)教授一起获得了2015年的诺贝尔物理学奖。此外，本年度诺贝尔物理学奖授予中微子振荡的发现的喜讯之后不久，由于中微子物理领域在自1998年以来的十几年中的巨大突破，6个做出突出贡献的中微子实验合作组及其发言人又同时获得了2015年度的科学大奖“基础物理突破奖”(Breakthrough Prize in Fundamental Physics)。这6个国际实验合作组及其突出贡献人包括：Super-K合作组及其做出贡献的梶田隆章教授和铃木洋一郎(Y. Suzuki)教授，SNO实验合作组及其做出贡献的麦克唐纳教授，KamLAND实验合作组及其做出贡献的铃木厚人(A. Suzuki)教授，大亚湾反应堆中微子实验合作组及其做出贡献的王贻芳教授和陆锦标教授、K2K和T2K合作组及其做出贡献的西川公一郎(K. Nishikawa)教授。应该说，让这些中微子科学家们此次获得这些荣誉和奖励的物理突破要从1998年大气中微子振荡的发现

说起：超级神冈中微子实验大气物理组的梶田教授代表超级神冈合作组在1998年在日本的高山(Takayama)举行的世界中微子大会(Neutrino'98)上宣布了图1所示的结果。在这篇短文中，让我们一起从头来理解和了解图1所表达信息的来龙去脉以及其深远的物理意义。

超级神冈中微子探测实验 Super-Kamiokande 的前身是 KamiokaNDE, 也就是神冈核子衰变实验(Kamioka Nucleon Decay Experiment)。KamiokaNDE 探测器的示意图见图2, 它是个以纯水为介质的切伦科夫探测器, 内壁布满了检测光子的光电倍增管, 有效探测质量接近1000吨; Super-K探测器的示意图见图3, 它的设计同样是以纯水为介质的切伦科夫探测器, 内壁同样也布满了直径为20英寸的光电倍增管, 但是它的有效探测质量为2.5万吨, 远远超出了

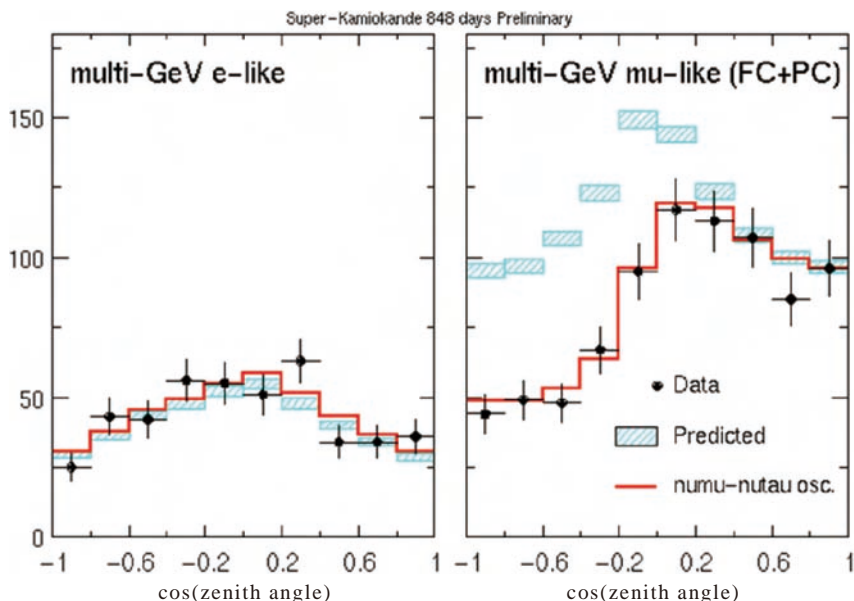


图1 Super-K在1998年世界中微子大会上展示的数据——电子型中微子事例观测与预测符合良好, 但是向上的缪子型中微子事例则少了大约50%。Super-K的观测以毋庸置疑的数据说明了中微子在振荡, 而且混合角接近最大混合。中微子上下事例的对称性质见图7

中微子研究与进展

KamiokaNDE，所以能够在短时间内积累足够的中微子信号，这对于研究反应概率极小的中微子至关重要。追述这段历史，我们意识到 Super-K 中微子探测实验的前身原本是个探测核子（这里指质子）衰变的 KamiokaNDE 实验，而不是我们今天要讲的中微子。那么 Super-K 实验是怎样从它前身的质子衰变实验转向以中微子为主要研究目标的呢？我们知道，质子衰变是很多大统一理论导出的一个必然现象，同时也是宇宙中物质与反物质不对称所必需的重子数不守恒这个条件的一个必然要求，KamiokaNDE 就是为了这个意义深远的目的于 1983 年在东京大学小柴昌俊（M. Koshiba）教授的领导下在日本岐阜县神冈镇的一个废弃矿井中建成的。超级神冈实验和它的前身神冈实验都是建在神冈观测站深地实验室中的水切伦科夫探测器，利用带电粒子在介质中超过光速时会发出切伦科夫辐射光的特性来探测在它内部发生的粒子反应。图 4 给出了切伦科夫光环产生的示意图。将探测器建在地下是为了降低地表大量宇宙射线造成的本底信号，提高实验的灵敏度。在科学史上，自然很爱同科学家们开玩笑——他们获得的发现往往不同于初衷，KamiokaNDE 的成功只是再一次向探索自然真理的科学家们证明了这个科学史上比比皆是的意想不到。1987 年，原本是为了探测质子衰变的神冈实验为人类首次探测到了来自太阳系之外的中微子——超新星 1987A 的中微子，这个大发现直接导致了小柴昌俊教授获得了 2002 年的诺贝尔物理学奖。但是这仍然不是神冈实验完全不同于其初衷的成功故事的全部。由于能量适合的大气中微子在神冈探测器中造成的中微子事例是它所探索的质子衰变信号的重要本底，物理学家们需要深入详



图 2 神冈实验 KamiokaNDE 的探测器模型，橙色为光电倍增管。探测器分为光学独立的内外两层以便能够区分带电的粒子是来自探测器之外还是产生在探测器内部

图 4 给出了切伦科夫光环产生的示意图。将探测器建在地下是为了降低地表大量宇宙射线造成的本底信号，提高实验的灵敏度。在科学史上，自然很爱同科学家们开玩笑——他们获得的发现往往不同于初衷，KamiokaNDE 的成功只是再一次向探索自然真理的科学家们证明了这个科学史上比比皆是的意想不到。1987 年，原本是为了探测质子衰变的神冈实验为人类首次探测到了来自太阳系之外的中微子——超新星 1987A 的中微子，这个大发现直接导致了小柴昌俊教授获得了 2002 年的诺贝尔物理学奖。但是这仍然不是神冈实验完全不同于其初衷的成功故事的全部。由于能量适合的大气中微子在神冈探测器中造成的中微子事例是它所探索的质子衰变信号的重要本底，物理学家们需要深入详

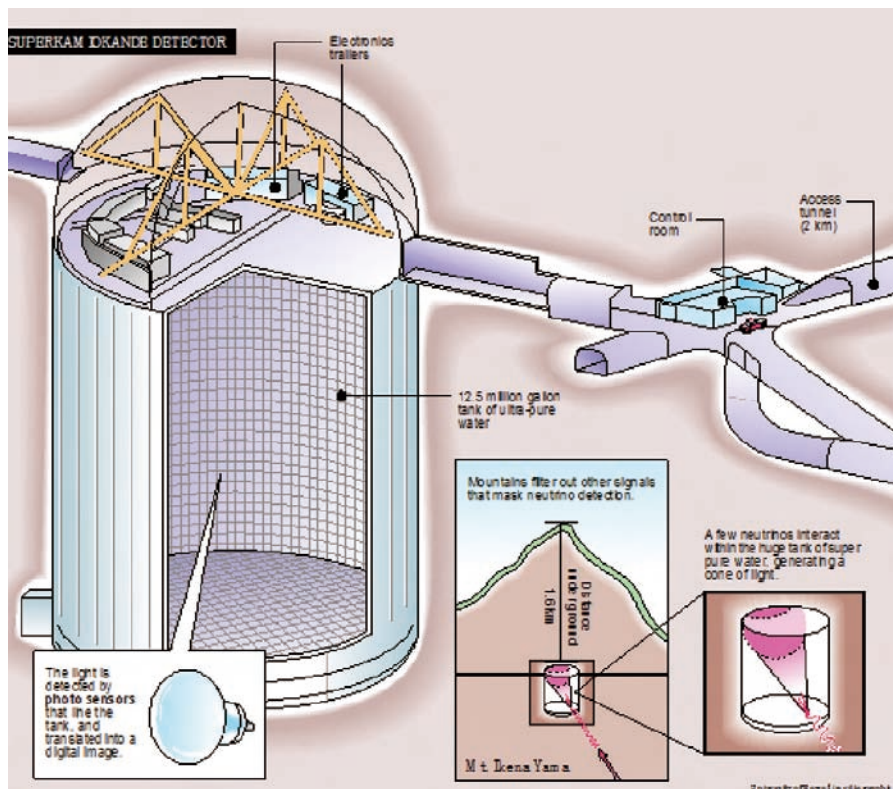


图 3 超级神冈实验（Super-Kamiokande）示意图。探测器同神冈一样分为光学独立的内外两部分，内部的光电倍增管数目超过了 1 万 1 千个，光阴极的覆盖率达到了 ~40%，具有良好的缪子电子事例的分辨能力和事例方向重建能力——这是 1998 年发现大气中微子振荡的关键因素

详细了解大气中微子信号的特征。在研究的过程中，科学家们发现，理论计算的缪中微子与电子中微子比例与一些实验观测严重不符。图 5 给出了大气中微子产生的示意图和不同实验的缪中微子与电子中微子相对比例的观测值与预测值的对比（我们后面会详细介绍这个比值的物理意义）。在 Super-K 实验之前的一些实验，包括 KamiokaNDE 实验，由于探测器本身的局限，对大气中微子实验数据没有一致的结论，只能说是观测到了一个可能存在的“大气中微子异常”。这

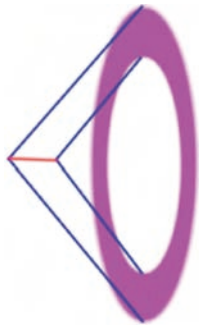


图 4 带电粒子在透明介质中超过介质中的光速时产生的切伦科夫辐射光的示意图。红色的径迹为带电粒子的轨迹，蓝色的线条给出了切伦科夫辐射的方向和起始位置，紫色的光环即为切伦科夫光在粒子运行前方的平面上投射而成的。在神冈和超级神冈探测器中光环的形状由于桶壁的形状会有不同的表现

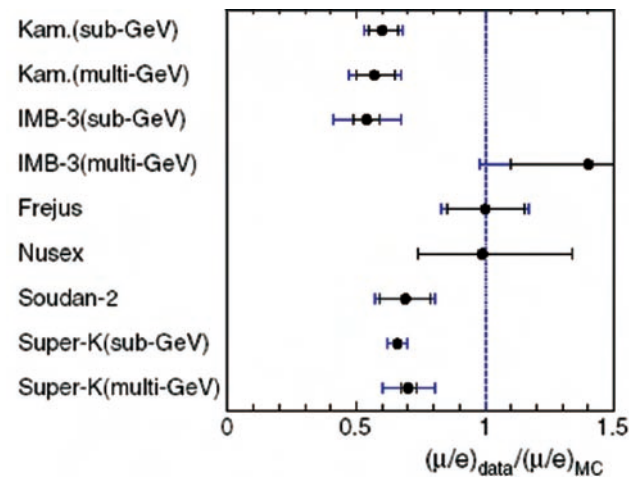
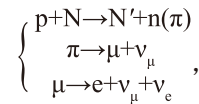


图 5 大气中微子实验数据缪中微子与电子中微子理论与实验的双比值对比。如果中微子没有发生变化，理论与实验的这个缪中微子电子中微子比例应该相符。但是 KamiokaNDE 和部分 IMB-3 的数据表明这个比例实验只是理论的一半上下。这说明一部分中微子发生了原有理论中预想不到的变化：要么缪中微子数减少了；要么电子中微子数增加了

个“大气中微子异常”引起了领域内极大的兴趣和争论，但是由于实验数据的限制和不同实验结果间存在不一致，没有结论。回顾历史，我们现在知道就是这个大气中微子的异常在一群执着的科学家的追索下演变成了 1998 年的中微子振荡的巨大发现，给中微子物理进而是粒子物理标准模型的研究带来了革命性的变化；也就是这个“异常”使得 KamiokNDE 的升级版实验 Super-Kamiokande 中同样的三个尾字母“nde”不再代表“Nucleon Decay Experiment”，而变成了“Neutrino Detection Experiment”。这个选择也许是 Super-K 的科学家们在冥冥中已经预感到了即将到来的中微子革命。

为了讲述并理解余下的故事，现在有必要让我们来一起看看大气中微子的特征并进一步理解升级后的世界最大水切伦科夫探测器超级神冈如何分辨不同的中微子事例。

大气中微子由主要成分为质子的宇宙射线打在大气中的原子核上产生的末态强子衰变得来，可以用以下的三个主要反应来表示它的产生过程：



其中 N 和 N' 表示大气中受质子轰击前后的原子核。我们忽略了三个公式中的初末态粒子的电荷和生成的中微子的正反性质。此外，我们也忽略了除了 π 强子之外其他强子的贡献，这些细节并不影响我们后续的讨论。整个过程可以由图 6 的左图示意。从上述的级联反应公式可以看出，如果级联反应被严格遵守，大气中微子中缪中微子同电子中微子的比例基本为 2。同时，由于相对论的时钟延长效应，如果缪子的速度接近光速，那么它有可能在抵达中微子探测器之前来不及衰变，那么最后一个级联反应就不会发生，从而在高能量区造成缪子型中微子多于电子型中微子的现象。大气中微子中缪中微子和电子中微子的相对份额能够相对精确地通过计算和模拟获得，图 6 的右图是 Honda、Bartol 和 Fluka 等几个不同的工作组所做的计算。需要指出的是由于地球磁场的影响，虽然宇宙射线在进入地球的磁场之前是各向同性的，但是低能的

中微子研究与进展

射线由于受磁场影响较大，大气中中微子束流并不完全是各向同性的，尤其是低能的中微子。但是高能区受地磁场影响小，基本还是保持原本的各向同性，造成了高能中微子束流上下对称的现象，见图7。需要着重指出的是，由于中微子反应发生的概率极小，整个地球对于大气中中微子来说几乎是透明的，它们在产生后几乎都毫无阻碍地入射到了 Super-K 探测器，带着它们在产生时的原本特征。

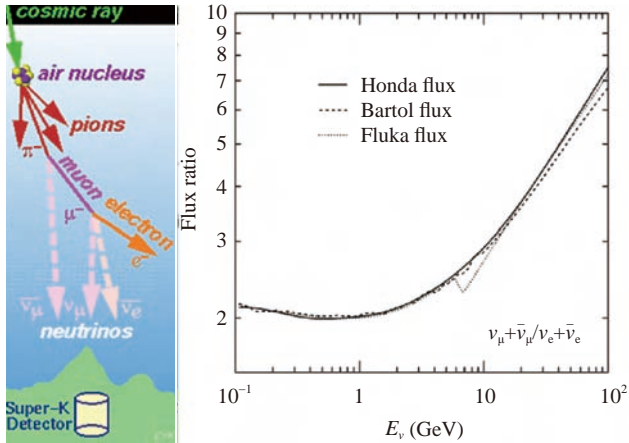


图6 大气中中微子产生的示意图（波士顿大学 Edward T. Kearns 教授提供）和缪中微子同电子中微子的比例。从产生原理看，缪中微子与电子中微子比例接近2，是个能够准确预测的物理量。在低能区这个比例基本为2，随着能量的提高由于相对论效应造成更少的缪子有机会衰变而逐渐变大

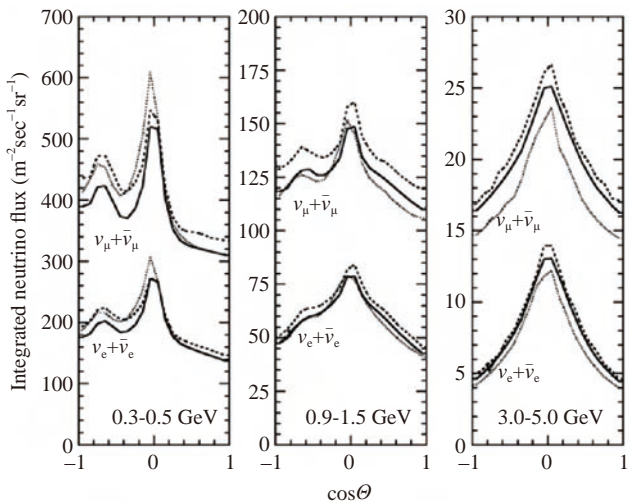


图7 中微子束流基本上上下对称（这里的极角为中微子传播方向与指北的地轴的交角）。在低能区由于地磁场的影响，上下对称受到一定程度的破坏。因此，如果中微子没有发生任何变化，探测器内探测到的自上而下与自下而上的中微子数目应该几乎相等

Super-K 探测器不仅仅是具有了比 KamiokaNDE 探测器更大的探测质量，同时，它的各项指标也使得它能够分辨电子型和缪子型的中微子事例。作为基本粒子家族成员的中微子在发生反应产生相应的带电轻子的时候会保持原来的轻子味：电子中微子产生电子而缪中微子产生缪子。我们知道缪子比电子要重 200 多倍，在介质中几乎沿直线传播；而电子较轻，在介质中径迹变向较大。因此，它们产生的切伦科夫光环非常不同：缪子由于径迹较直，它的切伦科夫光环有清晰的边界而电子的则相对模糊。图8显示了两种光环的不同特征，图9、图10则是两个真实的 Super-K 大气中微子候选事例。正是升级后的探测器所具有的探测质量和粒子识别这样的有力武器使得 Super-K 在建成后的两年多的时间里就积累了足够的大气中微子数据，以图1中毋庸置疑的证据证明了大气中微子振荡的存在，进而说明了中微子具有微小但是非零的质量。



图8 电子型和缪子型中微子事例切伦科夫辐射的不同特征。缪子的轨迹直而电子的轨迹多变

Super-K 的发现要求中微子具有质量，这同原来一直非常完美的粒子物理标准模型的对中微子质量为零的预测不同，使得人类第一次跳出标准模型之外，发现了新的物理。中微子振荡的发现开创了粒子物理研究的一个新时代。我们现在意识到中微子的三个味道本征态由三个质量本征态混合而成，反之亦然。取决于中微子是否是它自身的反粒子，即中微子是否为 Majorana 粒子，混合矩阵可由三个混合角和一或三（若为 Majorana 粒子）个 CP 相位描述，

$$\begin{pmatrix} \nu_e \\ \nu_\mu \\ \nu_\tau \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & \cos \theta_{23} & \sin \theta_{23} \\ 0 & -\sin \theta_{23} & \cos \theta_{23} \end{pmatrix} \begin{pmatrix} \cos \theta_{13} & 0 & e^{-i\delta_{CP}} \sin \theta_{13} \\ 0 & 1 & 0 \\ -e^{i\delta_{CP}} \sin \theta_{13} & 0 & \cos \theta_{13} \end{pmatrix} \begin{pmatrix} \nu_1 \\ \nu_2 \\ \nu_3 \end{pmatrix}$$

$$\begin{pmatrix} \cos \theta_{12} & \sin \theta_{12} & 0 \\ -\sin \theta_{12} & \cos \theta_{12} & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & e^{i\varphi} & 0 \\ 0 & 0 & e^{i\eta} \end{pmatrix} \begin{pmatrix} \nu_1 \\ \nu_2 \\ \nu_3 \end{pmatrix}$$

三味中微子振荡公式相对复杂，但是由于三个中微子质量本征态形成的两个质量平方差相差较大，中微子振荡概率在多数情形下可由两味道的振荡公式很好地描述：

$$P_{\nu_\alpha \rightarrow \nu_\beta} = \sin^2 2\theta \sin^2 \frac{\Delta m^2 L}{4E}$$

其中 θ 为混合角， Δm^2 为两个质量本征态的质量平方差， E 为中微子的能量， L 为中微子传播的距离。

Super-K 划时代的发现很快就被利用人工产生的缪子型中微子束的长基线中微子实验 K2K (KEK to Kamioka, KEK 为日本高能物理研究所的缩写, K2K 实验的中微子束流由 KEK 的加速器产生) 所验证。

同时，其他早期和同时代的不够精准的其他实验的大气中微子数据也获得了一致的结果。K2K 实验之后，后续的升级实验 T2K (Tokai to Kamioka, Tokai 即东海, 是 KEK 在东京北部的东海村设立一个新的加速器设施 J-PARC 所在地) 和建在美国的长基线实验 MINOS (Main Injector Neutrino Oscillation Search) 又进一步验证了 Super-K 实验的结果。

MINOS 探测器也具有探测大气中微子的能力，并且通过同束流中微子数据的联合分析提高了 MINOS 实验结果的精度。Super-K 之后，建在南极的以观测宇宙中超高能量中微子事例为目标的的天体物理实验 IceCube 也通过增加其光学探测模块的密度建成了 DeepCore 实验。

DeepCore 的结果也验证的 Super-K 实验大气中微子结果。另外需要指出的是在 Super-K 在大气中微子数据中发现中微子振荡的信号之后，SNO、KamLAND、MINOS、T2K 以及大亚湾、RENO 和 Double Chooz 等利用太阳中微子、加速器中

微子数据中发现中微子振荡的信号之后，SNO、KamLAND、MINOS、T2K 以及大亚湾、RENO 和 Double Chooz 等利用太阳中微子、加速器中

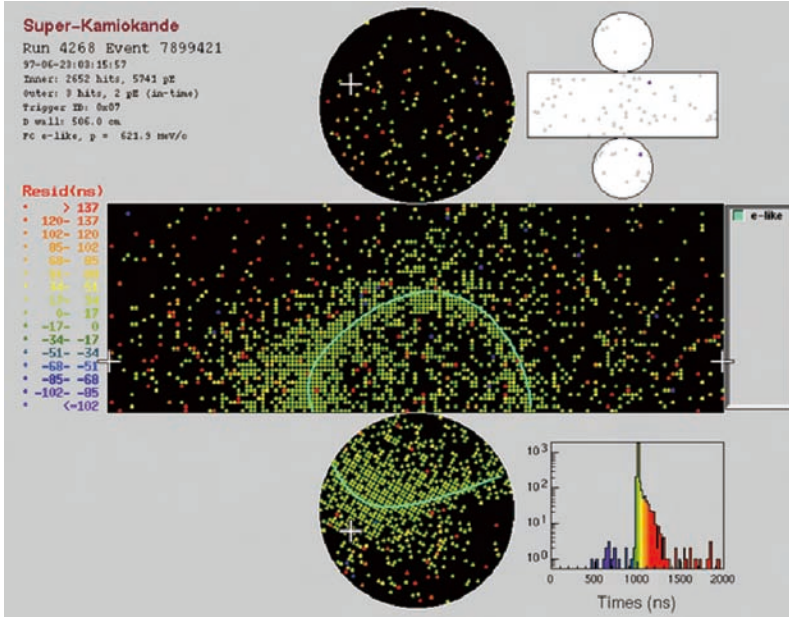


图9 Super-K 探测器中的一个电子中微子候选事例。由于电子轨迹多变，因此在介质中形成模糊的切伦科夫光环

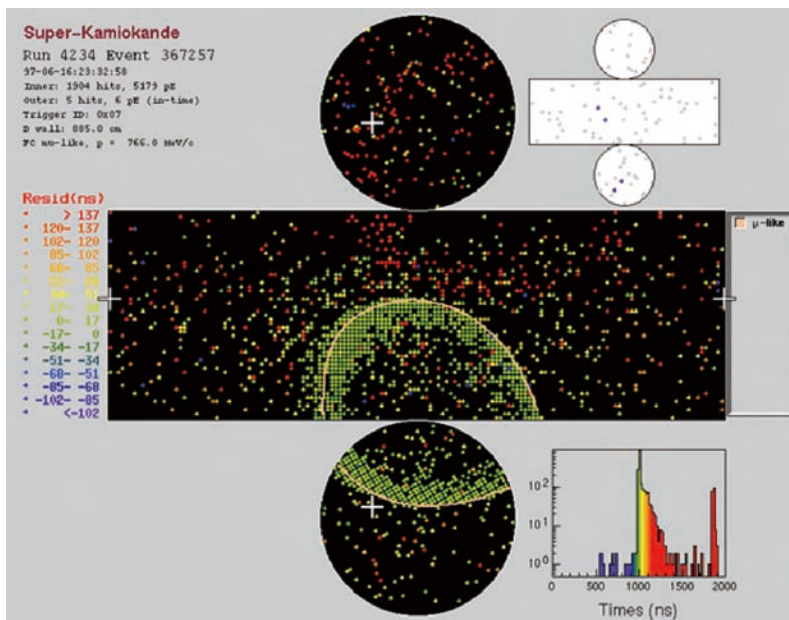


图10 Super-K 探测器中的一个缪中微子候选事例。由于缪子远重于电子，在介质中径迹比较直，因此它能够形成清晰的切伦科夫光环边界

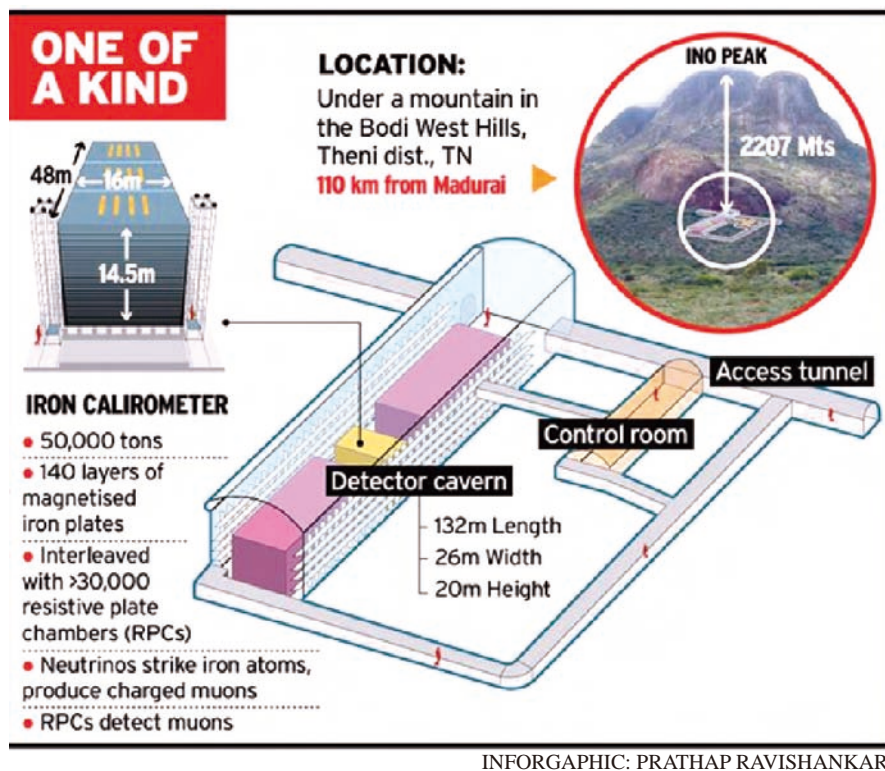


图 11 印度的 INO (India-based Neutrino Observatory) 地下中微子实验观测站示意图。实验的核心是带有磁场的 Iron Calorimeter (铁量能器) 这个能够在一定程度上分辨正反中微子的探测器

微子以及反应堆中微子的实验一起已经比较全面地测出了除中微子混合矩阵中狄拉克 CP 相位之外的三个混合角。到目前为止, 我们对于 θ_{23} , θ_{12} , θ_{13} , Δm_{21}^2 和 $|\Delta m_{32}^2|$ 的值都有了相当程度的认识, 但是我们对于中微子是否为 Majorana 粒子, θ_{23} 是否精确等于 45 度, Δm_{32}^2 的符号, 也就是所谓的中微子质量排序问题, 以及中微子混合矩阵中的狄拉克 CP 相位仍然没有答案。

大气中微子不仅给我们提供了发现中微子振荡的历史机遇, 它也是人类已知的中微子源中能量分布最宽 (由几十 MeV 到十几 TeV)、基线跨越最大 (由几十千米到穿越地球的上万千米)、经历的介质多变 (由空气到地核的高于 10 g/cm^3 的密度) 的一个自然中微子源, 它的这些性质给我们提供了良好的研究超出标准模型之外新物理信号的机会。在惰性中微子寻找、中微子非标准相互作用、中微子衰变、中微子退相干效应、变质量中微子、寻找狭义相对论破坏

及 CPT 对称性破坏等新物理方面, 大气中微子都曾经甚至仍然保持着最好的实验结果。通过大气中微子的能量及其穿越地球内特定密度区的组合, 中微子物理学家们在近年提出了利用大气中微子的物质效应解决中微子质量排序问题的构想, 以位于印度的 INO (India-based Neutrino Observatory) 和南极的 PINGU (Precision IceCube Next Generation Upgrade) 这两个实验为代表。INO 实验是一个以铁板作为靶、以 RPC (Resistive Plate Chamber) 为探测中微子反应末态粒子的传感器并加有磁场的地下大气中微子探测装置 (图 11)。一个有趣的历史故事是大气中微子的首次探测是在印度的考拉金矿场的地下实验室里于 1965 年完成的。可惜的是考拉矿场于 1990

年左右关闭了, 实验也因此终止。INO 实验的探测器由于加有磁场, 它将能够区分正负粒子, 因此能够很大程度上区分正反大气中微子, 这将能够给研究带来一个额外的观测量, 提高实验的灵敏度。PINGU, 如它的名字的来历解释的那样, 是当前建在南极的天体物理实验 IceCube 实验的一个更为密集光学模块的升级实验 (图 12)。IceCube 以及建在其内的 DeepCore 和 PINGU 都是利用南极的冰层作为探测媒质, 利用中微子反应末态带电粒子在冰内的切伦科夫光来探测中微子。INO 和 PINGU 之外, 创造了历史并开创了一个新时代的 Super-K 实验也有一个升级计划: 建造一个更大的水切伦科夫探测器 Hyper-Kamiokande (简称 Hyper-K 或 HK)。HK 将具有 1 百万吨的探测质量, 在探测大气中微子、探索核子衰变和超新星中微子等物理目标之外, 它同时还是一个更强的中微子束流长基线实验的远端探测器。

中微子振荡这个撼动了几乎完美的粒子物理标准

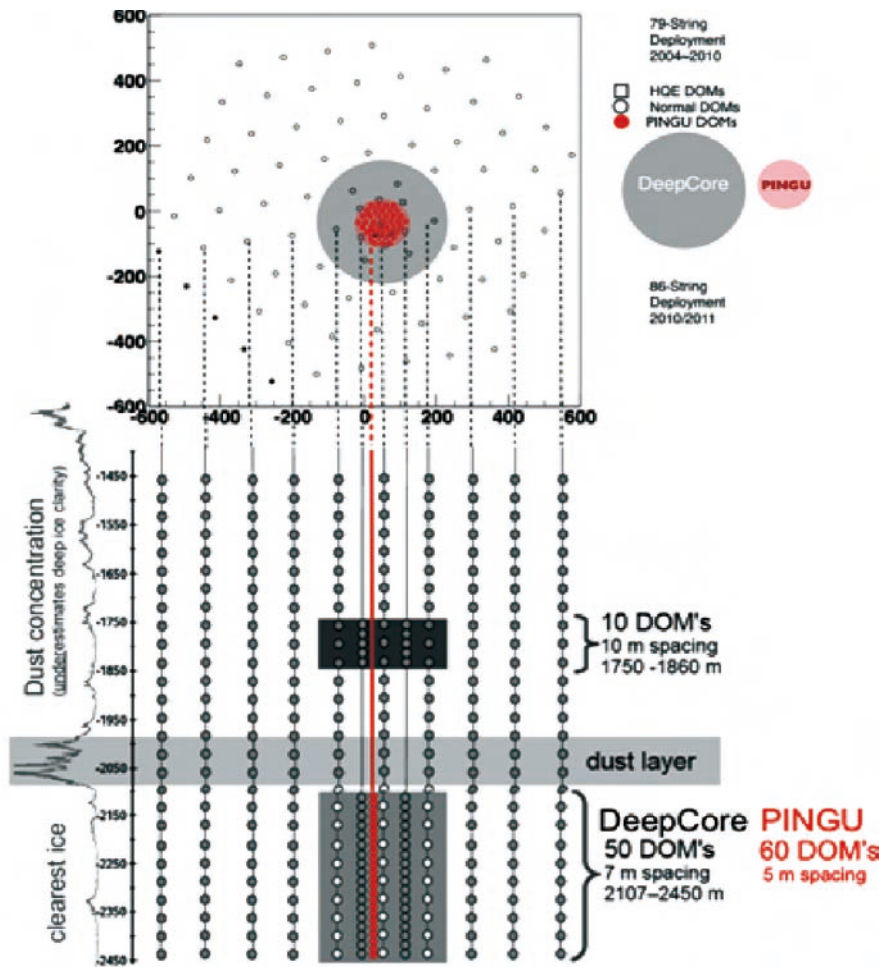


图 12 通过增加光学传感器 DOM 的密度，IceCube/DeepCore 实验计划进一步压低探测能量的下限，建设 PINGU 实验，以便探测到不同中微子质量排序造成的大气中微子在地球内部的物质效应的不同信号，进而测量中微子质量排序

现确实是偶然得来的，但是这并不等同于碰运气。我们都知道另外一句名言：“机会往往青睐那些有准备的人”。没有神冈及同代实验把质子衰变的本底事例大气中微子的研究推到那时人类认知的极限，科学家们无法幸运地“偶然”观测到同样具有划时代意义的超新星 1987A 的中微子，也不可能发现大气中微子的异常；没有一群固执的中微子物理学家们为解决那“异常”去执着地追求更可靠的实验装置、更多更精确的中微子事例并用在此基础上改进的物理分析去推进人类对自然和宇宙的认知极限，发现中微子振荡也无从谈起。科学，需要踏踏实实且持之以恒的努力。回顾历史展望未来，我们可以看到在未来的中微子研究中利用大气中微子的实验仍然是不可或缺的一个研究方式，它独特的性质与其他实验手段形成了良好的互补，为人

模型的伟大科学发现是在研究理解质子衰变的大气中微子本底事例过程中获得的，印证了那句古老谚语：“一人的垃圾是他人的宝藏”。很多伟大的科学发

类探索基础物理规律提供了一把宝贵的钥匙。我们期待大气中微子的研究能够帮助人类进一步推进认知前沿，同时我们也时刻准备获得新的意想不到。



科苑快讯

酵母中提取鸦片类药物

在不久的将来，鸦片类药物可以完全由酵母菌生物合成。斯坦福大学 (Stanford University) 的斯莫克 (Christina Smolke) 和同

事们设计出能够利用糖生产鸦片类药物蒂巴因 (thebaine) 和氢可酮 (hydrocodone) 的酵母菌。研究工作结合了酶和生物工程，以及菌株优化技术。蒂巴因需要活跃于植物、哺乳类动物、细菌和酵母菌自身中的 21 种酶，而氢可酮需要 23 种酶才能合成。

虽然目前使用该技术尚无法进行大规模生产，但是却证明了酵母菌可以像生产啤酒一样生产鸦片类药物。未来可以在确保安全合法的情况下生产必需的药物，并且避免因种植罂粟而引发的法律问题。

(高凌云编译自 2015 年 9 月 25 日《欧洲核子中心快报》)