

地球中微子: 来自地球深部的信使

韩然^{1*}, 牛耀龄^{2*}, 李玉峰^{3*}, 李志伟⁴, 徐亚^{5,6}, 刁宇飞⁷, 高若菡², 王安东⁸, 曹俊³, 赵亮^{5,6}, 何锦成⁹, 冒鑫¹

1. 北京卫星环境工程研究所, 可靠性与环境工程技术重点实验室, 北京 100094;
2. 中国地质大学地球科学与资源学院, 北京 100083;
3. 中国科学院高能物理研究所, 北京 100049;
4. 中国科学院测量与地球物理研究所, 大地测量与地球动力学国家重点实验室, 武汉 430077;
5. 中国科学院地质与地球物理研究所, 北京 100029;
6. 中国科学院地球科学研究院, 北京 100029;
7. 中国地质科学院水文地质环境地质研究所, 石家庄 050061;
8. 东华理工大学地球科学学院, 南昌 330013;
9. 华北电力大学核科学与工程学院, 北京 100026

* 联系人, E-mail: hanran@ncepu.edu.cn; yaoling.niu@durham.ac.uk; liyufeng@ihep.ac.cn

2018-05-04 收稿, 2018-07-27 修回, 2018-08-01 接受, 2018-09-04 网络版发表

国家自然科学基金(11405056)和国家重点研发计划(2018YFA0404100)资助

摘要 中微子是构成物质世界最基本的单元之一, 在自然界广泛存在. 正在建设的江门中微子实验站(JUNO)是我国第二个大型国际领先的中微子实验站. 地球中微子(geo-neutrino)是地球内部天然放射性元素(主要是²³⁸U, ²³²Th和⁴⁰K三种同位素)衰变产生的反电子中微子. 它们在衰变过程中也同时释放出大量热能, 是驱动地球演化的主要热能来源之一. 地球中微子的通量和产生的热能成固定比例. 因此, 测量地球中微子的通量, 可以获得放射性元素分布及其对地热能的贡献. 江门中微子实验站的探测器质量为2万吨, 运行一年所获取的地球中微子事例数达到400个以上, 超过全球已有地球中微子探测器10年所探测事例的总和. 江门中微子实验站周围500 km以内贡献50%以上的地球中微子事例数, 利用地球科学手段可合理、有效估算实验站周围及邻区地壳的贡献, 实验站测量总数减去地壳贡献, 可得到地幔的贡献. 因此, 有效充分利用实验站可望帮助解决放射性元素衰变对地热能的贡献、测量Th/U比值和来自地幔的放射性地热等问题, 并推动国内中微子地球科学研究的交叉领域发展. 本文首先介绍了地球内部有关热量未解决的科学问题及地球中微子可能的贡献, 其次介绍了地球中微子研究的国内外现状及精确地壳结构模型研究的重要意义, 随后着重介绍了江门中微子实验的地球中微子探测潜力及其独特的地理位置和探测优势对地球科学研究的意义, 最后给出总结和展望.

关键词 地球中微子, 放射性生热, Th/U 比, 地幔放射性地热能, 江门中微子实验站

地球内部包含巨大的热量. 在地球的演化过程中, 其内部热能作为驱动整个地球发展演化的内在动力, 促使原始地球的物质经过漫长的地质历史时期分异成现代地球的圈层结构, 也控制着现今地壳

及地幔的活动性, 包括板块构造运动、岩浆活动、地震等. 地球内部热能的不均匀分布是各种地球内动力作用的直接驱动力.

地球内部热能量分布是影响地球动力学过程的

引用格式: 韩然, 牛耀龄, 李玉峰, 等. 地球中微子: 来自地球深部的信使. 科学通报, 2018, 63: 2853–2862

Han R, Niu Y L, Li Y F, et al. Geo-neutrino: Messenger from the Earth's interior (in Chinese). Chin Sci Bull, 2018, 63: 2853–2862, doi: 10.1360/N972018-00444

重要因素. 地幔对流是通过物质运动传递热量的过程, 其驱动力是物质组成密度差或温度差导致的密度差和浮力差, 是地球内部向地球表面输送能量, 导致地球热损失的有效途径^[1~6]. 地幔对流的形式直接影响到板内火山活动到底是起源于浅部上地幔还是来自下地幔的地幔柱活动. 地球化学家根据板内地震和洋中脊喷发的熔岩成分的不同倾向于地幔的分层对流, 也有人对该观点持怀疑态度. 地震学家根据不同的地震证据也有不同的认识^[5,7,8]. 由于对流是物质携带能量的迁移流动, 所以地幔对流的形式和地幔中物质的分布密切相关.

在地球的形成和一系列演化过程中, 热能的产生、迁移、转化和损失(最终到太空)起着决定性的作用. 可以说, 找到了地球演化的能量来源就等于解决了地球科学一系列的基本问题. 而地球能量来源中, 地幔能量又极为重要.

基于大量地表热流值的统计和计算, 地球内部热损失到空间的地表热流总通量为 (47 ± 2) TW ($1 \text{ TW} = 10^{12} \text{ W}$)^[9~12]. 地球内部的热能来源主要有地球早期残热, 地壳、地幔中所含放射性元素(主要是Th, K, U)的生成热. 虽然潮汐生热、重力能和壳幔分异热等过程也能贡献部分热量, 但是这些对地球内部的热贡献甚小. 各项地热能对地表热通量的贡献^[13], 如图1.

从图1中可以看出, 地球热损失总量和地壳生热已经基本确定, 但是其他各项的争议很大^[14~16]. 地壳中放射性元素生热可以通过地壳岩石放射性元素丰度获知, 可信度比较高, 总热量为7~9 TW. 而对于地幔中放射性元素生热的估算有很大的不确定性. 目前世界上最深的钻孔只有12 km, 还不及地壳平均厚度的三分之一(造山带壳-幔界面深度普遍大于35 km); 岩浆和构造作用可将地球深部的岩石(或岩浆)带到地表, 但岩浆作用本身就是元素分异的过程, 而且在地幔岩输送到地表的途中和在近地表条件下会发生成分改变, 故难以对地幔中岩石放射性元素丰度进行准确估计, 所以地幔中放射性元素的生热估算很不确定. 此外, 放射性热能所占的比例、放射性元素在地幔中的分布及这些元素如何在地下积聚热量并如何影响地幔对流活动等这些问题至今悬而未决. 地幔中放射性元素的含量及分布已成为国际地球科学领域研究的热点和难点.

在粒子物理学家成功探测到地球中微子后, 地

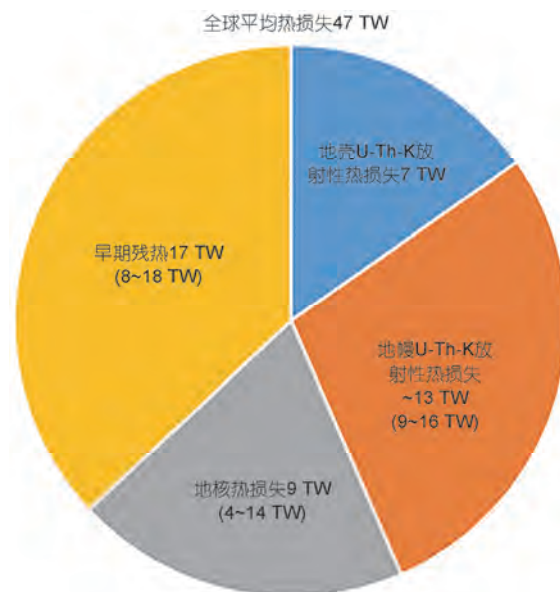


图1 地表热流量来源分布图. 地球热损失总量和地壳生热量已经基本确定, 但其他各项贡献争议很大

Figure 1 The composition of surface heat flux. The total flux is relatively well constrained, but the fraction of each part is under debate

球科学家又将目光投向这一新兴交叉学科来解决地球深部重大科学问题. 地球中微子研究具有深远的科学意义, 这也是继100多年前粒子物理学家和地质学家合作计算地球年龄之后又一次携手合作, 站在科学的前沿解决科学问题.

我国的江门地下中微子实验站(Jiangmen Underground Neutrino Observatory, JUNO)是一个国际领先的中微子实验站, 用来测定中微子质量顺序、精确测量中微子混合参数, 并进行天体物理、地球科学以及宇宙学等多项科学前沿研究^[17]. 江门中微子实验的探测器总质量为2万吨, 运行一年所获取的地球中微子事例数达到400个以上^[17], 比现有全球地球中微子探测器全部数据的总和还要多. 大统计量、高精度的数据将有利于减小测量不确定度, 更好地区分不同的地球科学模型, 帮助解决如下几个重要地球科学问题: (1) 放射性元素衰变对地热能的贡献; (2) 检验不同的地幔对流和地球化学模型; (3) 测量Th/U比值; (4) 测量来自地幔的放射性热能(尤其是南海附近的地幔放射性热能); (5) 更重要的是地球的热演化史, 即, 以诺贝尔奖得主Harold Urey命名的Urey比值=地球放射性生热/地球热损失, 仍然争议很大. 基于这些重要科学问题, 江门中微子实验站将开拓国内地球科学与粒子物理学交叉研究的新领域.

1 地球中微子介绍

1.1 地球中微子定义及意义

地球中微子(geo-neutrino)是地球内部放射性元素天然 β -衰变产生的反电子中微子($\bar{\nu}_e$)。地球内部的放射性主要是来自于半衰期寿命非常长的放射性同位素,如 ^{238}U , ^{232}Th , ^{40}K , ^{235}U 和 ^{87}Rb 。这些同位素在衰变时,与太阳相反,它们释放出 $\bar{\nu}_e$ 。其中 ^{235}U 的丰度远小于 ^{238}U ,不占主要贡献。同样, ^{87}Rb 衰变释放的地热能仅占1%左右,也忽略不计。基于此,仅 ^{238}U , ^{232}Th 和 ^{40}K 称为生热元素(HPEs)。这3种同位素在衰变过程中释放地球中微子的同时还释放出能量,地球中微子通量和放射性能量以固定的比例释放^[18],因此可以通过测量地球中微子的通量获得放射性元素衰变能量的信息,进而得到放射性热能对总地热能的贡献。这样,地球中微子就成了探测地球整体及深层信息的一个新手段。利用它可以解决,包括以下在内的诸多科学问题:

(1) 放射性元素衰变的热能对地热损失的贡献。虽然目前总的地热能损失准确到47 TW,但是对于地热能的来源(地球早期残热、放射性元素衰变及重力势能转化热量)及各部分对地热能的贡献还没有解决。从地壳中观测的数据可以推出放射性热能至少有8 TW。硅酸盐地球模型(BSE)给出20 TW放射性热能^[19~24],然而根据目前的地球化学和地球物理数据,也不能排除放射性热能在地球中占的更多。如前所述,地球中微子的通量和放射性热能是直接相关的,通过测量地球中微子通量可以得到放射性热能所占的比例。

(2) 检验不同的地球化学模型。目前BSE模型是与观测数据最一致的地球化学模型,但是它在与其他球粒陨石如含有长寿命放射性元素的顽火辉石球粒陨石之间的亲缘关系还存在争议。BSE的数据都是基于地壳以及上地幔的,而未包含下地幔,因此放射性元素全部的丰度无法建立在观测数据上。地球中微子从地球内部穿出并携带地球内部整体的放射性元素的信息,通过测量地球中微子的通量可以得到放射性元素的丰度,其丰度是许多地球物理和地球化学模型用来描述地球内部复杂过程的一个极为重要的参数,因此通过地球中微子的测量可以检验BSE模型及其他地球化学模型的合理性。

(3) 测量Th/U比值。测量地幔Th/U比值的可能

变化可解释氧化态的 U^{6+} (相对于还原态的 U^{4+})在地球演化中进入地幔的时间,也可以判断地核里是否有Th和U元素。目前对该比值的估算还有很大的争议。Th和U衰变的地球中微子能谱形状不同,可以根据不同的能谱形状区分Th和U,进一步判断Th/U比值。地球中微子为Th/U比值测量提供一个新的手段。

(4) 测量来自地幔的放射性地热能。目前世界上最深的钻孔为俄罗斯(前苏联)二十世纪七八十年代位于Kola半岛的科研钻孔,钻孔深度为12345 m,只达到该区陆壳厚度的1/3,无法直接取得地幔样品。而对地幔的估计主要是基于宇宙化学模型参数,此模型表明地幔深层的放射性元素的丰度要远远大于从地幔上层取得样品所测量的丰度。除了对地幔总能量的认识不同之外,地幔内物质的分布也存在争议,有人认为地幔内物质是均匀分布的,也有人认为上地幔物质亏损不相容元素而下地幔富集不相容元素,还有人根据夏威夷和西非地幔的低速层认为这两处更富集不相容元素^[19~24]。地球中微子通量是估算地幔放射性元素的最好方法,但是为了提高其探测精度,还需要更多来自全球不同地方地球中微子的观测数据。有科学家提议将中微子探测器放在远离大陆的地方,如放在海洋壳层中(含有很少的地壳放射性元素),以便更精确地探测来自地幔的放射性热能。

(5) 地心是否存在类反应堆。地球化学家对于地心是否含有裂变元素有较大争议。如果地心中真的存在类似反应堆裂变出的中微子,那么测出的反电子中微子能谱和反应堆来的一样,这可以通过探测反电子中微子方向来区分来自反应堆和地心的裂变中微子。

1.2 地球中微子研究现状

地球中微子从地球内部瞬发出来并且几乎不与其他物质发生反应,到达地球表面的地球中微子通量大概为 10^6 个/($\text{cm}^2 \text{ s}$)^[18]。但是对它们的探测也非常困难,这是因为反电子中微子与物质的相互作用只是弱相互作用,反应和探测的几率都很小,它与物质的反应截面仅约为 10^{-43} cm^2 ^[18]。在2005年,位于日本Toyama的KamLAND实验组第一次捕捉到了地球中微子的信号,收集了749 d共有 25_{-18}^{+19} 个地球中微子事件^[25],表明了探测地球中微子的可能性,发表在*Nature*上,并选为当期杂志的封面文章。随后位于意

大利Gran Sasso地下国家实验室Borexino合作组,也公布了探测到的地球中微子的信号,并于2015年又一次发表了最新的研究结果^[26],收集了2055.9 d的数据共有77个事件. KamLAND于2015年又公布了收集8.19 a的数据^[27],给出总事例数 116^{+28}_{-27} ,相对应的地球中微子在KamLAND的通量为 $(3.4 \pm 0.8) \times 10^6 \text{ cm}^{-2} \text{ s}^{-1}$,对应产生的地热是 $11.2^{+7.9}_{-5.1} \text{ TW}$. 图2给出KamLAND实验的数据分析结果.

尽管这两个实验组证明了探测地球中微子的可能性,但还存在以下困难: (1) 目前存在的中微子探测器太小,捕捉到的地球中微子统计信息太少,无法区分不同的地幔模型. KamLAND和Borexino^[28]联合分析给出地幔中U和Th放射性元素的含量在 1σ 范围内是 $R(\text{Th}+\text{U}, \text{mantle}) \approx (23 \pm 10) \text{ TNU}$ (此结果假设Th/U比值在1.7~3.9之间)(TNU是地球中微子的测量单位,表示在1 a内1 kt单位靶质量的液闪可测到的地球中微子数目). (2) 80%的地球中微子来自U衰变链,20%来自Th衰变链,因为过低的统计量,造成根据不同的能谱

分开U和Th的贡献比较困难. (3) 迄今为止可以测量地球中微子的仅有KamLAND和Borexino两个实验点,尚难解决地球科学的基本问题,只有全球有更多可探测地球中微子且具不同地质条件实验点的结果相结合,才能更好地区分依赖于实验点的地壳地球中微子的贡献和不依赖于实验点的地幔地球中微子的贡献.

需强调的是,所有中微子实验站所观测到的地球中微子是地壳中微子和地幔中微子的共同贡献. 地壳贡献可以利用地壳岩石放射性元素分布或者地表热流分布来推算. 对地幔研究来说,地球科学的测量手段有限,粒子物理实验目前尚未实现中微子方向的研究,地幔产生的地球中微子还无法利用粒子物理手段获得. 目前计算地幔中微子是通过总地球中微子通量(地幔加地壳)减去地壳中微子通量^[29]. 所以利用地幔中微子研究地幔科学问题,依赖于实验测量总的地球中微子通量的精度,也依赖于地壳中微子的研究精度.

KamLAND和Borexino是2个已经探测到地球中微子的实验站,第3个实验站是位于加拿大Sudbury的SNO+实验站,即将用1000 t液闪来探测地球中微子,因Sudbury的特殊地理位置,SNO+的测量将对古大陆板块的地壳位置的测量有重大意义. 此外,除了正在建设的江门中微子实验站外,我国正在提出的四川西部锦屏二期的地下中微子实验站也有望将地球中微子列为其主要的研究目标,锦屏因其本底少并且地处厚地壳处,是对来自地壳的地球中微子研究的绝佳位置,并且大量的中微子是来自青藏高原,可以对青藏高原附近的地壳活动和地质物质迁移提供研究手段. 图3给出正在取数和将要取数的中微子实验站单位时间单位靶质量所预期的地球中微子数目(TNU)^[29]. 其中KamLAND的靶质量是1 kt, JUNO的靶质量是20 kt, Borexino的靶质量是300 t, SNO+的靶质量是1 kt, 锦屏实验站的设计靶质量是4 kt. 从图中显示,锦屏实验站所处地壳最厚,因此单位靶质量测到的地球中微子数目最多,且有学者认为锦屏附近之下有俯冲的印度洋板块地壳夹层,可能要远大于此.

综合以上分析,目前取数或者将要取数的实验站都受制于统计量, JUNO运行后是每年400个地球中微子事例,锦屏每年100个左右, SNO+每年20个左右, KamLAND每年14个左右,而Borexino只有4.2个左右^[29]. 到2025年,将这5个(KamLAND, Borexino, SNO+, JUNO和锦屏)世界不同地点的探测器进行地球中微子联合分析,减掉具有实验点依赖性的地壳

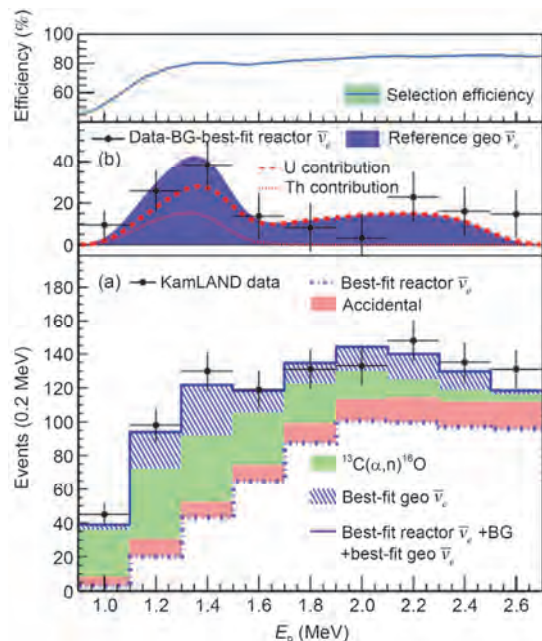


图2 KamLAND实验观测到的能谱^[27]. (a) KamLAND的最佳拟合值, (b) 去掉包括反应堆本底之后地球中微子的能谱, 并和地球模型预测的相比较

Figure 2 Prompt energy spectrum of the $\bar{\nu}_e$ events in KamLAND^[27]. (a) Data together with the best-fit background and geo $\bar{\nu}_e$ contributions. (b) Observed geo $\bar{\nu}_e$ spectrum after subtraction of reactor $\bar{\nu}_e$ and other background sources. The blue shaded curve shows the expectation from the geological reference model

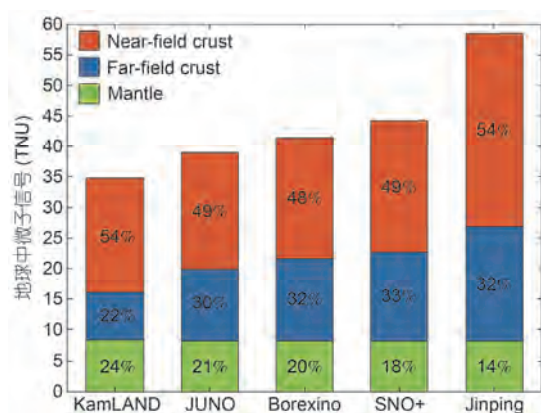


图3 正在取数和将要取数的中微子实验站单位时间、单位靶质量所预期的地球中微子数目(TNU)^[29]。给出了近实验站地壳(near-field crust), 远实验站地壳(far-field crust)和地幔的不同贡献比例, 近实验站是指实验站周围 $6^{\circ} \times 4^{\circ}$ 的区域。陆壳地幔岩石圈贡献的地球中微子数目较少(小于 2 TNU), 将其包含进近远实验站地壳贡献里

Figure 3 Geoneutrino flux predictions at geoneutrino detectors in TNU^[29], showing contributions from near-field crust (NFC), far-field crust (FFC), and the mantle (asthenospheric+lithospheric). NFC is a 6° longitude by 4° latitude region centered at the detector location. NFC and FFC include the small contribution (<2 TNU) from the underlying Continental Lithospheric Mantle (CLM)

中微子的贡献, 认为地幔对地球中微子的贡献是一样的, 可将地幔的地球中微子通量测量到 8.2 ± 2.9 TNU, 不确定度可以降到 35%^[29], 比仅用 KamLAND 和 Borexino 的数据误差减小 2.5 倍, 在这个精度下可以清楚地区分不同的硅酸盐地球(BSE)模型, 也可将地幔生热不确定性限制到一个很小的范围内, 如图 4。其中假设探测器探测值不确定度为 KamLAND 11%, JUNO 6%, Borexino 13%, ANO+9%, Jinping 4%。

除了从实验精度和统计量方面提高地幔中微子的测量精度以外, 国际上不同的研究组也在积极地研究提高地壳中微子的测量精度方案。地壳中微子通量和放射性元素的丰度和展布密切相关。利用全球模型计算的地壳中微子通量的不确定度均在 15% 以上。究其原因, 对于实验站地球中微子通量贡献最大的为其附近的沉积层和上地壳, 而观测的全球沉积层和上地壳的 U 和 Th 的丰度不确定度分别为 21% 和 10%^[30]。因此, 降低计算不确定度的主要途径是除了加密观测站周围的地壳网格之外, 就是通过布局合理的系统采样来降低实验站周围的 U 和 Th 丰度的不确定度。

根据 KamLAND 和 Borexino 的经验, 精确测量实验站周围 U 和 Th 的丰度可降低地壳中微子的误差, KamLAND 的误差由 16.7% 减小到 10% 以内^[31], Borexino 的误差由 17% 减小到 13%^[32]。Huang 等人^[33]对 SNO+

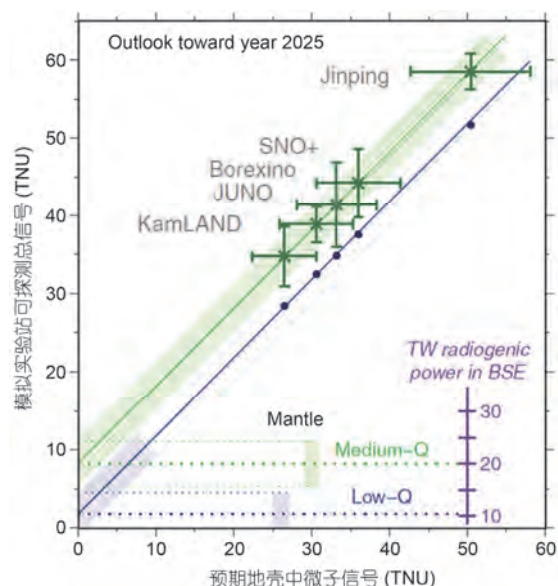


图4 模拟到 2025 年的时候, 不同实验站所能探测到的总事例数与地壳中微子预期事例数的关系。图中截距是来自地幔中微子的贡献, 标出了硅酸盐地球模型(BSE)下的低热量贡献模型(low-Q), 中热量贡献模型(medium-Q)和高热量模型(high-Q)位置。中热量模型在图中转化为地幔放射性生热是 (12 ± 4) TW^[29]

Figure 4 Simulated measurements in year 2025 (vertical axis) vs. predicted crustal events ions at geoneutrino detectors KL, JUNO, BX, SNO+, and Jinping (JP). The x-intercept stands for the contribution of geoneutrinos from the mantle. We show results for two BSE compositional estimates, previously termed medium-Q and low-Q models. The solution of mantle flux for the medium-Q model translates into (12 ± 4) TW of radiogenic power in the mantle^[29]

实验站周围 $6^{\circ} \times 4^{\circ}$ 范围进行了岩石采样测量其 U 和 Th 丰度, 建立网格为 $1 \text{ km} \times 1 \text{ km} \times 0.1 \text{ km}$ 的三维地壳模型并对 SNO+ 的地球中微子通量进行了估算, 对 SNO+ 的地壳中微子通量估算为 $28.2^{+6.0}_{-4.2}$ TNU, 不确定度降为 13.6%。

在这些研究中, 针对中国的反电子中微子分布都是根据全球模型给出的, 精度不高。为了开辟国内地球中微子交叉领域的研究, 培养国际地球中微子领先研究小组, 急需根据中国各地实际的地质情况给出地壳中微子通量的精确分布, 尤其是针对我国江门地下中微子实验站周围的研究, 不仅对实验站建设、新方法在粒子物理上的应用、数据分析所需要, 还因其特殊的地质情况, 对地球科学有重要意义(见下)。

2 江门中微子实验站和地球中微子

2.1 实验站介绍和地球中微子探测能力

JUNO 于 2015 年开始建设, 计划 2020 年建成, 建

设内容包括: 位于地下700 m的地下洞室、大型水池、一个装满2万吨液体闪烁体和光电倍增管的中微子探测器以及相关配套设施. 2万吨的液体闪烁体探测器位于地下700 m, 能量测量精度可达到3%. 液体闪烁体是探测中微子的介质, 当大量中微子穿过探测器时, 会在探测器内以极小的概率与媒介发生反应, 发出极其微弱的闪烁光, 从而被光敏器件(这里是18000个光电倍增管)探测到. 2020年JUNO将以目前所存在探测器20倍的重量加入到探测地球中微子的行列, 其第一年取的数据将达到400个地球中微子事例^[34], 比现有实验站数十年所取得的数据还要多.

基于全球采集的样本分析出的U和Th含量, 将JUNO的经度和纬度以及U/Th固定比值作为输入参数, 使用不同的地球化学模型, 估算的JUNO探测器能探测到地球中微子通量范围, 如图5所示.

根据JUNO探测器的设计参数(如液体闪烁体纯度、探测器效率和能量测量精度等)、实验站附近的

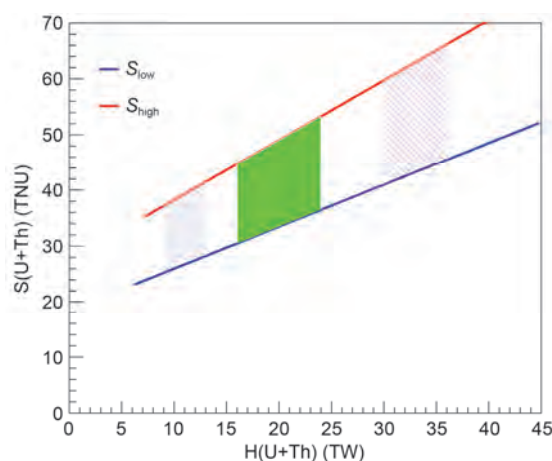


图5 地球中微子信号是放射性地热能的函数(地球内部U+Th产生的热量). 红色虚线和蓝色点画线分别对应根据两种极端的地幔放射性元素含量模型得到的最大与最小限值. 红线和蓝线限定的紫色、绿色和粉色四边形区域, 分别是基于宇宙化学、地球化学、地球动力学的估算. 最低和最高分别是根据两种极端的地幔放射性元素含量的模型得到, 中间阴影部从左到右分别是宇宙化学模型、地球化学模型及地球动力学模型

Figure 5 The expected geoneutrino signal at JUNO as a function of radiogenic heat due to U and Th in the earth $H(U+Th)$. The red line and blue line correspond to two limiting cases calculated from two mantle emission models with extreme radiation element abundance. The purple, green and pink regions between the two lines denotes the region allowed by cosmochemical, geochemical and geodynamical models, respectively. The two limiting cases are calculated from two mantle emission models built with extreme radiation element abundance. The shallow regions between the two lines denotes the region allowed by cosmochemical, geochemical and geodynamical models, respectively

商业核反应堆阳江和台山的反应堆功率及基线长度及采用最新的振荡参数, 我们估算出JUNO在一年内可以探测到的地球中微子、反应堆中微子及其他非中微子本底的个数及能谱(核反应堆在运行时也释放出中微子, 称为反应堆中微子, 其事例数多少与反应堆的运行功率和到实验站的距离即基线长度等相关. 阳江台山核电站距离实验站约为53 km, 实验站每年能探测到约16100个反应堆中微子事例数^[17], 反应堆中微子与地球中微子在1.8~3.4 MeV的能量区间有重合, 它是地球中微子探测的主要背景本底). 图6给出了信号和本底的能谱, 表1给出了每年能探测到的中微子数目.

从图6和表1中可以看出, JUNO地球中微子的测量难度在于非常大的反应堆中微子本底. 地球中微子和反应堆中微子是无法单个事例区分开来, 只能根据地球中微子和反应堆不同的能谱形状做总体形状拟合区分. 对与地球中微子主要来自U和Th的衰变, 衰变能谱形状不确定度小, 而反应堆中微子来自反应堆内核素的裂变, 其能谱形状的不确定度大. 因此针对地球中微子的探测, 其实验的不确定度主要来自反应堆能谱形状的不确定度. 在反应堆能谱形状不确定度设为1%的情况下, 1, 3, 5及10年所测量得到地球中微子的不确定度分别为13%, 8%, 6%和5%^[34].

2.2 实验站附近地球科学研究意义

与其他地球中微子探测实验相比, 我国处于世界先进水平的大型JUNO实验站测量地球中微子的优势和意义体现在以下几个方面:

首先, JUNO实验站是一个国际前沿的中微子观测站, 它第1年取数收集到的地球中微子数目, 比全球已有地球中微子观测站累积10年的数据量还要多, 其精度也高出很多. 利用JUNO大统计量和高精度的优势, 可以将如放射性生热的模型给出更好的限制区间. 尤其是来自U和Th的地球中微子区分主要靠能谱的不同, JUNO的大统计量使得将U及Th能谱的高精度区分成为可能, 从而为精确测量地球中Th/U比值提供前所未有的机会. 将来, JUNO入射中微子方向的测量可进一步提高地幔中微子的测量精度, 甚至可以解决地心中是否有裂变元素的存在以及地壳、地幔组成不均一的一系列基本科学问题.

其次, 地球中微子的传播随着距离的平方衰减

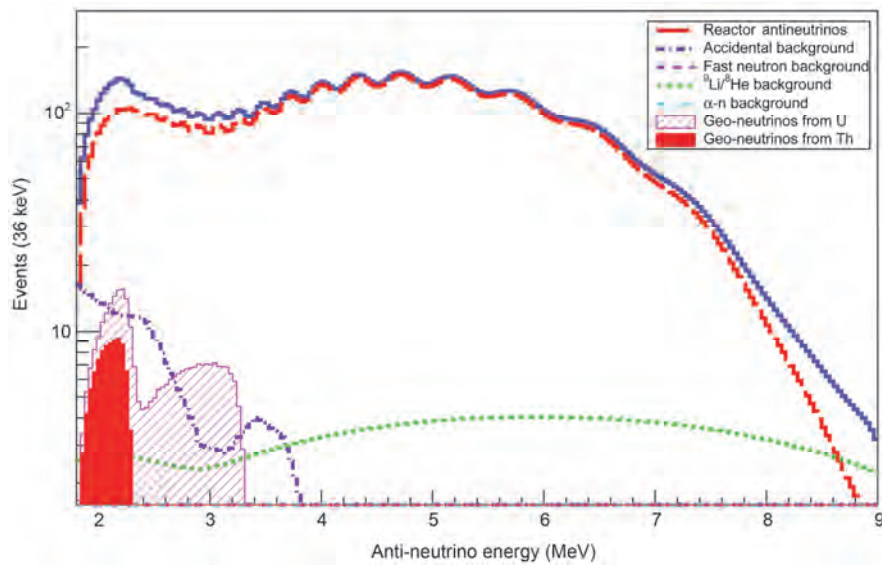


图6 JUNO运行1年后,地球中微子(红色阴影区来自Th的衰变,粉色斜线区来自U衰变的地球中微子)、反应堆中微子(红色虚线)与其他非中微子本底能谱。蓝色实线为所有的能谱总和

Figure 6 The energy spectra of geo-neutrinos, reactor antineutrinos, and other non-antineutrino backgrounds at JUNO for one year of data-taking. The blue solid line is the total spectrum and the red dashed line is the reactor antineutrinos. The red solid area and stippled pink area are antineutrinos from Th and U in the Earth, respectively. All the non-antineutrino backgrounds are also shown with legend

表1 JUNO运行1年,地球中微子、反应堆中微子与其他非中微子本底的事例数^{a)}

Table 1 Event numbers and corresponding rate and shape systematic uncertainties of the signal and backgrounds used in the simulation

来源	事例数(年)	事例率不确定度(%)	谱型不确定度(%)
地球中微子	408(406)	待测量量	待测量量
反应堆中微子	16100(3653)	2.8	1
${}^9\text{Li}-{}^8\text{He}$	657(105)	20	10
快事件(ns)	36.5(7.66)	100	20
${}^{13}\text{C}(\alpha, n){}^{16}\text{O}$	18.2(12.16)	50	50
偶然符合本底	401(348)	1	忽略

a) 表格第2列中,第1个数是1.8~9.0 MeV区间内的事例数,第2个数是1.8~3.3 MeV区间的事例数

(即, $1/r^2$), 因此实验站周围的放射性元素对探测信号贡献远大于世界其他点的贡献。经研究, 江门周围500 km半径内对探测器总信号的贡献大于50%^[17]。不仅实验站周围地质性质对地球中微子测量有较大的影响, 而且针对地幔中微子的研究, 需结合地球科学手段建立实验站附近的精细三维地壳模型。根据地质、地球物理和地球化学研究得到的精细三维地壳模型, 也可为实验站周围区域的地球科学问题提供一定的帮助。JUNO实验站位于广东省江门地区, 而广东省位于欧亚大陆的东南缘, 与现代洋陆俯冲带

的距离甚远, 但是该地区具有非常复杂的地质结构和构造热演化历史。中生代以来, 该区岩石圈明显减薄, 火山岩浆活动频繁, 花岗岩广泛存在, 而该区大地热流值也明显偏高。将JUNO提供的地球中微子信号的测量及利用地球科学得到华南地区地壳结构和组成相结合, 可以为该区域地热能的分布及测量精度提供一定的实验依据, 并为深入认识华南地区的构造演化过程提供重要数据。

最后, JUNO方圆500 km内部分是海洋(大陆架地壳结构), 部分是陆地, 其高统计量也会为提高中微子入射方向的测量精度, 将来自陆地的地球中微子和海洋地球中微子区分开来。海洋一侧陆架具有较薄的地壳结构及比较成熟的岩性结构, 陆洋分离, 对研究南海深部地幔放射性生热是一个极佳的条件。

3 结论与展望

综上所述, 中微子科学一直是物理学以及相关交叉学科的研究热点, 1988, 1995, 2002和2015年4次诺贝尔物理学奖均颁给了中微子相关研究。我国大亚湾反应堆中微子实验于2012年发现了第3种中微子振荡模式, 取得了世界瞩目的重大成果, 被授予基础物理学突破奖和2016年度国家自然科学一等奖。正

在建设的江门中微子实验站是我国的第2个大型国际中微子实验站. 实验使用2万吨液体闪烁体, 预期2020年建成, 将是研究反应堆中微子、地球中微子、超新星中微子、太阳中微子等多目的的实验站.

地球中微子是地球内部天然放射性元素衰变产生的反电子中微子, 它们在衰变的同时释放出大量热能, 是驱动地球演化的地热能的主要来源之一. 地球中微子的通量和产生的能量成固定比例. 因此, 测量地球中微子的通量, 可以获得放射性元素分布及其对地热能的贡献.

地球中微子是一个新的前沿交叉领域, 汇集了地球物理、地球化学和粒子物理等学科. 国际上地球中微子的前沿学科发展已有十几年. 受制于统计精度, 国际上KamLAND和Borexino实验站对地球化学模型还不能给出确定性的结论, 而规模大得多的江门中微子实验有望解决这个问题, 为地球科学研究提供新的方法和工具.

江门中微子实验的探测器比目前世界最大的地球中微子探测器大20倍, 运行一年所获取的地球中微子数据(400个)就比现有其他地球中微子探测器10年积累的全部数据(<200个)还要多. 大统计量、高精

度的数据将有利于减小不确定度, 更好地区分不同的地学模型, 帮助解决如放射性元素对地热能的贡献、计算Th/U比值、测量来自地幔的放射性热能以及地球的热演化史等地球科学问题, 开创国内地球科学和粒子物理交叉学科研究的新领域.

地幔中微子的观测在地球科学界引人注目. 地幔中微子的测量主要靠实验测量值减去地壳中微子的通量. 地壳中微子通量主要通过地壳结构分析、放射性元素丰度分析进行计算. 利用地壳中微子的研究收集分析已经取得的大量放射性元素丰度数据, 该研究将提高对观测站周围的地质认识. 另外, Leyton等人^[35]建议将气体/液体时间投影室(TPC)放在远离大陆架的深海里, 不仅可以精确地绘制地幔成分空间等值图, 而且可以测量到⁴⁰K衰变产生的反电子地球中微子(目前尚有难度).

最后, 地球中微子是一个新的前沿交叉领域, 汇集了地球物理、地球化学和粒子物理等学科, 因此建立一支交叉学科的队伍、培养一批交叉学科人才不仅为江门中微子实验站运行后的数据分析做准备^[36], 也为我国和国际深地实验(如锦屏地下实验)的多学科发展提供后备力量.

参考文献

- 1 Montelli R, Nolet G, Dahlen F A. Finite-frequency tomography reveals a variety of plumes in the mantle. *Science*, 2004, 303: 338
- 2 Moresi L, Solomatov V. Mantle convection with a brittle lithosphere: Thoughts on the global tectonic styles of the Earth and Venus. *Geophys J Int*, 1998, 133: 669–682
- 3 Monnereau M, Quere S. Spherical shell models of mantle convection with tectonic plates. *Earth Planet Sci Lett*, 2001, 184: 575–587
- 4 Lowman J P. Mantle convection models featuring plate tectonic behavior: An overview of methods and progress. *Tectonophysics*, 2011, 510: 1–16
- 5 Hager B H, Michael G. Mantle convection and the state of the Earth's interior. *Rev Geophys*, 1987, 25: 1277–1285
- 6 Davies G F, Richards M A. Mantle convection. *J Geol*, 1992, 100: 151–206
- 7 Foulger G R. Plates vs. Plumes: A Geological Controversy. New Jersey: Wiley-Blackwell, 2010
- 8 Ritsema J, van Heijst H J, Woodhouse J H. Complex shear wave velocity structure imaged beneath Africa and Iceland. *Science*, 1999, 286: 1925–1928
- 9 Jaupart C, Labrosse S, Lucazeau F. Temperatures, heat, and energy in the mantle of the Earth. In: *Treatise on Geophysics*, Vol. 7: The mantle. Amsterdam: Elsevier Science B V, 2015. 253–303
- 10 Mareschal J C, Jaupart C. Energy budget of the Earth. In: *Encyclopedia of Solid Earth Geophysics*. Amsterdam: Elsevier Science B V, 2011. 285–291
- 11 Furlong K P, Chapman D S. Heat flow, heat generation, and the thermal state of the lithosphere. *Annu Rev Earth Planet Sci*, 2013, 41: 385–410
- 12 Davies J H. Global map of solid Earth surface heat flow: Global surface heat flow map. *Geochem Geophys Geosys*, 2013, 14: 4608–4622
- 13 Sramek O, McDonough W F, Kite E. Geophysical and geochemical constraints on geoneutrino fluxes from Earth's mantle. *Earth Planet Sci Lett*, 2013, 361: 356–366
- 14 Lay T, Hernlund J, Buffett B A. Core-mantle boundary heat flow. *Nat Geosci*, 2008, 1: 25–32

- 15 Jr R A, McDonough W F, Luong M. The K/U ratio of the silicate Earth: Insights into mantle composition, structure and thermal evolution. *Earth Planet Sci Lett*, 2009, 278: 361–369
- 16 Mareschal J C, Jaupart C, Phaneuf C. Geoneutrinos and the energy budget of the Earth. *J Geodyn*, 2012, 54: 43–54
- 17 JUNO Collaboration. Neutrino physics with JUNO. *J Phys G Nucl Part*, 2016, 43: 030401
- 18 Fiorentini G, Lissia M, Mantovani F. Geo-neutrinos and Earth's interior. *Phys Rep*, 2007, 453: 117–172
- 19 Hart S R, Zindler A. In search of a bulk-earth composition. *Chem Geol*, 1986, 57: 247–267
- 20 Allegre C J, Poirier J P, Humler E. The chemical composition of the Earth. *Earth Planet Sci Lett*, 1995, 134: 515–526
- 21 McDonough W F, Sun S S. The composition of the Earth. *Chem Geol*, 1995, 120: 223–253
- 22 Lyubetskaya T, Korenaga J. Chemical composition of Earth's primitive mantle and its variance: Method and results. *J Geophys Res-Solid Earth*, 2007, 112: B03211
- 23 Javoy M, Kaminski E, Guyot F. The chemical composition of the Earth: Enstatite chondrite models. *Earth Planet Sci Lett*, 2010, 293: 259–268
- 24 O'Neill H S, Palme H. Collisional erosion and the non-chondritic composition of the terrestrial planets. *Philos Trans*, 2008, 366: 4205
- 25 Araki T, Enomoto S, Furuno K, et al. Experimental investigation of geologically produced antineutrinos with KamLAND. *Nature*, 2005, 436: 499–503
- 26 Agostini M, Appel S, Bellini G, et al. Spectroscopy of geoneutrinos from 2056 days of Borexino data. *Phys Rev D*, 2015, 92: 031101
- 27 Gando A, Gando Y, Hanakago H. Reactor on-off antineutrino measurement with KamLAND. *Phys Rev D*, 2013, 88: 033001
- 28 Fiorentini G, Fogli G L, Lisi E, et al. Mantle geoneutrinos in KamLAND and Borexino. *Phys Rev D*, 2012, 86: 033004
- 29 Sramek O, Roskovec B, Wipperfurth S A. Revealing the Earth's mantle from the tallest mountains using the Jinping Neutrino Experiment. *Sci Rep*, 2016, 6: 33034
- 30 Rudnick R L, Gao S. Composition of the continental crust. *Treat Geochem*, 2003, 3: 1–64
- 31 Enomoto S, Ohtani E, Inoue K, et al. Neutrino geophysics with KamLAND and future prospects. *Earth Planet Sci Lett*, 2005, 258: 147–159
- 32 Coltorti M, Boraso R, Mantovani F, et al. U and Th content in the Central Apennines continental crust: A contribution to the determination of the geo-neutrinos flux at LNGS. *Geochim Cosmochim Acta*, 2011, 75: 2271–2294
- 33 Huang Y, Strati V, Mantovani F, et al. Regional study of the Archean to Proterozoic crust at the Sudbury Neutrino Observatory (SNO+), Ontario: Predicting the geoneutrino flux. *Geochim Geophys Geosys*, 2015, 15: 3925–3944
- 34 Han R, Li Y F, Zhan L, et al. Potential of geo-neutrino measurements at JUNO. *Chin Phys C*, 2016, 40: 29–36
- 35 Leyton M, Dye S, Monroe J. Exploring the hidden interior of the earth with directional neutrino measurements. *Nat Commun*, 2017, 8: 15989
- 36 Han R, Xi Y F. Geo-neutrino: Bring the heat information from the Earth's interior (in Chinese). *Mod Phys*, 2015, 27: 43–46 [韩然, 习宇飞. 地球中微子——把脉地球内部热量. *现代物理知识*, 2015, 27: 43–46]

Summary for “地球中微子：来自地球深部的信使”

Geo-neutrino: Messenger from the Earth's interior

Ran Han^{1*}, Yaoling Niu^{2*}, Yufeng Li^{3*}, Zhiwei Li⁴, Ya Xu^{5,6}, Yufei Xi⁷, Ruohan Gao², Andong Wang⁸, Jun Cao³, Liang Zhao^{5,6}, Jincheng He⁹ & Xin Mao¹¹ Science and Technology on Reliability and Environmental Engineering Laboratory, Beijing Institute of Spacecraft Environment Engineering, Beijing 100094, China;² School of Earth Sciences and Resources, China University of Geosciences, Beijing 100083, China;³ Institute of High Energy Physics, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China;⁴ State Key Laboratory of Geodesy and Earth's Dynamics, Institute of Geodesy and Geophysics, Chinese Academy of Sciences, Wuhan 430077, China;⁵ Institute of Geology and Geophysics, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100029, China;⁶ Institute of Earth Science, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100029, China;⁷ Chinese Academy of Geological Sciences Shuiwen Geology Institute of Environment Geology, Shijiazhuang 050061, China;⁸ School of Earth Sciences, East China University of Technology, Nanchang 330013, China;⁹ School of Nuclear Science and Engineering, North China Electric Power University, Beijing 102206, China

* Corresponding authors, E-mail: hanran@ncepu.edu.cn; yaoling.niu@durham.ac.uk; liyufeng@ihep.ac.cn

For half a century we have established with considerable precision the Earth's heat flow to be (47 ± 2) TW. However, it remains under debate what fraction of this power comes from Earth's primordial heat and what fraction comes from the radiogenic heat. This debate comes from the uncertainties on the composition of the Earth, the question of chemical layering in the mantle, the nature of mantle convection, the energy required to drive plate tectonics, and the power source of the geodynamo.

The surface heat flux, as measured in boreholes, provides limited insights into the relative contributions of primordial versus radiogenic sources of the mantle's heat budget. Geoneutrinos are unique probes that bring direct information about the amount and distribution of heat producing elements in the crust and mantle. Cosmochemical, geochemical, and geodynamic compositional models of the Bulk Silicate Earth (BSE) predicted different mantle neutrino fluxes.

The flux of geo-neutrinos at any point on the Earth's surface is a function of the abundances and distributions of radioactive elements within our planet. In 2005, the KamLAND collaboration published the first experimental result about the geo-neutrino measurement, and then Borexino collaboration claimed the second. However the existing geo-neutrino detectors (KamLAND and Borexino) have not accumulated enough geo-neutrino data to discriminate models that parameterize the mantle convection and identify hidden reservoirs in the mantle.

The particle physics community is trying to take a bold advantage of the development of the JUNO (Jiangmen Underground Neutrino Observatory). JUNO detector is a 20 kt liquid-scintillator, 20 times greater than KamLAND detector and 60 times greater than Borexino detector. The new JUNO detector will collect a much larger number of geo-neutrino signals, and thus have the potential to inform the geological community about the Earth's total geo-neutrino flux and details of the contribution from the region surround the detector. From those information, one can discriminate models of parameterized mantle convection, restrict the ratio of Th and U and also other potential question.

To solve the above questions, the important for Chinese Geoscience is to develop a model to predict the geoneutrino signal at JUNO with high a precision and accuracy. This result from the geoscience community will inform the particle physics community of the expect crust geoneutrino signal at JUNO, while on the other hand the physicists will independently determine their total signal, which has relative contributions from the Earth, reactors, accidentals and detector. In the case that the physicists and geologists get different numbers, beyond uncertainties, the respective communities will necessarily reassess their models.

Predicting the crust geoneutrino signal at JUNO demands that we accumulate the basic geological, geochemical and geophysical data for the regional area surrounding the detector. Experience tells us that in the continents the closest 500 km to the detector contributes half of the signal and it is this region that needs to be critically evaluated. This goal demands that the physical (density and structure) and chemical (abundance and distribution of Th and U) nature of the continent must be specified for the region. Doing so brings key fundamental benefits to the geoscience community.

The main tasks include surveys and descriptions of the geology, seismology, heat flow, and geochemistry of the regional lithosphere. In addition to these survey studies it is vitally important to involve computational geological studies, where all of the geological, geophysical and geochemical data are geo-located into an integrated, 3-dimensional model that is the essential physical and chemical database.

This paper presents the possibility and potential of a geo-neutrinos approach to a number of geoscience problems with state-of-the-art research in this area. It also discusses the JUNO and its many applications in the emerging research area of particle physics and earth sciences.

geo-neutrinos, radiogenic heat, Th/U ratio, radioactive geothermal energy of the mantle, Jiangmen Underground Neutrino Observatory

doi: 10.1360/N972018-00444