

# 地球中微子

## ——把脉地球内部热量

韩 然<sup>1</sup> 习宇飞<sup>2</sup>

(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 100094;

2 中国地质科学院水文地质环境地质研究所 050061)

### 一、地球内部热量

地球内部包含有巨大的热量，这些热量简称地球内热，它是驱动板块构造、地幔对流和地球自发电机的动力，是推动整个地球发生发展和演化的原动力。在 45 亿~47 亿年前的地球形成早期，地热促成了核、幔、壳的分异，使地球从一个太空中未曾分异的“混沌体”演变成现今所看到的多圈层的地球；在现今，地热驱动着诸如构造运动、岩浆活动、火山作用等一切内力作用，使地球发生着翻天覆地的变化。因此可以毫不夸张地说，地球就像是一架在宇宙太空中不停运转着的“热机”，其原动力就是地热。不仅如此，研究地热的资源分布规律及其开发利用途径；研究各类能源、矿产资源如石油、天然气、甲烷水合物等形成时的古地热条件，特别是含油气盆地的热体制、热历史；研究矿区、尤其是煤矿区的深部地温预测、矿井致热因素分析和矿山热害防治的地质-工程措施等也具有重大的应用价值。

地热的来源主要有地球早期残热和地壳、地幔中所含放射性元素生热，其中放射性元素  $^{238}\text{U}$  ( $^{235}\text{U}$  在地壳中含量非常少，一般忽略不计)、 $^{232}\text{Th}$ 、 $^{40}\text{K}$  的衰变生热是其主要来源，因此它们在地球中的含量和分布也就成为决定地球构造演化的主要因素。根据对地表热流的统计和计算，地球内部总热量已经基本确定为  $46\pm 2\text{TW}$  ( $1\text{TW}=10^{12}\text{W}$ )。然而，除地壳生热外，地热其他各项来源的不确定度远远大于地热总量的不确定度(图 1)。此外，放射性地热所占的比例、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也都悬而未

决。地幔对流是发生在地幔中的一种传热方式，地幔对流被认为是地球演化的最可能的驱动因素，并且与大洋中脊裂谷和大陆裂谷的形成、地表热点的分布和火山活动，以及某些矿物的生成密切相关而受到重视。地壳中放射性元素生热可以通过采样来获知，可信度比较高；对于地幔来说，由于目前缺少来自地表 200 km 以下岩石样品，难以对地幔中岩石放射性进行估计，对于地幔中放射性元素的含量的估算争议很大。地球科学家一直在寻找能够直接获得地幔中放射性元素信息的手段。

随着物理学界对于中微子的研究更加深入，地球科学家们开始将眼光投向利用中微子探测地球内部方法，1966 年埃德(W. Eder)第一次提出地球中微子的概念，1984 年克劳斯(L. Krauss)等人讨论使用地

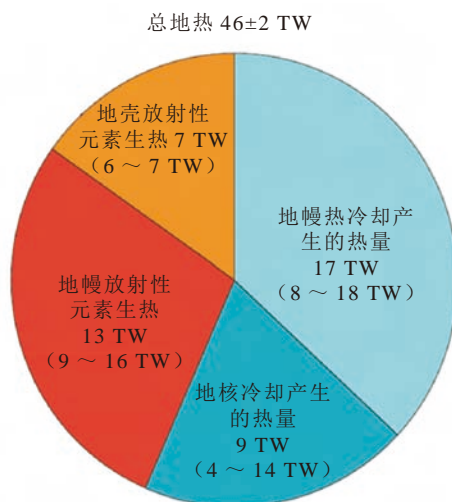


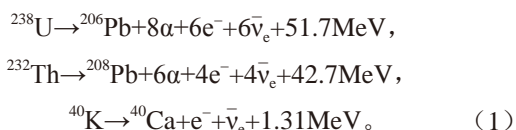
图 1 地热来源地分布图：总地热和地壳生热已经基本确定，但是其他各项的争议很大

球中微子来测量地球内部性质，1998年拉加(R. S. Raghavan)等和罗斯查尔德(M. Rothschild)等提出日本KamLAND实验和意大利Borexino实验测量地球中微子的可能性。在利用粒子物理方法研究地球年龄问题的一个多世纪之后，物理学家和地学家又一次重新携手解决科学问题，这开创了粒子物理和地球科学领域研究和应用的新局面。

## 二、地球中微子概述及探测方法

地球中微子(geo-neutrino)是地球内部放射性元素天然 $\beta$ 衰变产生的反电子中微子( $\bar{\nu}_e$ )。中微子是构成物质世界的最基本的单元之一，在自然界广泛存在，除地球中微子外还有如太阳中微子、大气中微子、反应堆中微子及超新星中微子等。

地球内部的放射性元素如 $^{238}\text{U}$ 、 $^{232}\text{Th}$ 和 $^{40}\text{K}$ 释放地球中微子的衰变公式如下，



这三种核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(单位时间单位面积产生的中微子数目)和放射性能量以固定的比例释放，它们之间的联系如下：

$$L = 7.64 \times m(\text{U}) + 1.62 \times m(\text{Th}) + 27.10 \times 10^{-4} \times m(\text{K}),$$

$$H_R = 9.85 \times m(\text{U}) + 2.67 \times m(\text{Th}) + 3.33 \times 10^{-4} \times m(\text{K}). \quad (2)$$

其中 $L$ 是地球中微子的亮度，单位是 $10^{24}\text{s}^{-1}$ ， $H_R$ 是放射性元素衰变产生能量，单位为 $10^{12}\text{W}$ ， $m(\text{U})$ ， $m(\text{Th})$ ， $m(\text{K})$ 分别为U、Th、K相应同位素的质量，单位为 $10^{17}\text{kg}$ 。从公式(2)可以看出它们均和放射性元素的含量相关，并且成一定比例。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，进而得到放射性地热的比例。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，利用它可以解决如下科学问题：

1) 放射性元素衰变对地热的贡献：虽然目前总的地热准确到 $46 \pm 2\text{TW}$ ，但是对于地热的来源(地球早期残热、放射性元素衰变及重力势能转化热量)及各部分对地热的贡献还没有解决。从地壳中观测的数据可以推出地壳放射性地热至少有 $6\text{TW}$ 。地球化学硅

酸盐地球模型(BSE)认为放射性地热有 $20\text{TW}$ ，然而根据目前的地球化学和地球物理数据，也不能排除放射性地热在地球中占的更多。如前所述，地球中微子的通量和放射性地热是直接相关的，通过测量地球中微子通量可以得到放射性地热占地球内部总热量的比例。

2) 检验不同的地球化学模型：目前地球化学BSE模型是与观测数据最一致的地球化学模型，但是，它与根据陨石确定的宇宙化学BSE模型的差异还存在争议。地球化学BSE的数据都是基于地壳的以及上地幔的，而未包含深层地幔，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建立的用来描述地球内部的复杂过程的一个重要的输入量，因此通过地球中微子的测量可以检验不同BSE模型及其他地球化学模型。

3) 测量来自地幔的放射性地热：目前世界最深的钻孔在 $12\text{km}$ 左右，无法直接取得深层地幔的样品。目前对地幔的估计主要是基于宇宙化学BSE模型参数，此模型认为地幔深层的放射性元素的丰度要远远大于从上地幔取得样品所测量的丰度。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，还需要更多的来自全球不同地方的地球中微子观测数据。有科学家提议将中微子探测器放在远离大陆壳层的地方，如放在海洋壳层中(含有很少的地壳放射性元素)可以更精确地探测来自地幔的放射性地热。

4) 地核是否是个类反应堆：地球化学家对于地核是否含有裂变元素有较大争议。有些观点认为地核中大概有 $20\text{TW}$ 的热量存在。如果地核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谱应和商业堆来的一样。可通过探测反电子中微子的方向来区分来自商业堆和地核的裂变中微子。

地球中微子与其他从地球发出的信息如地热或者惰性气体是不一样的，它是独一无二的，它可以从地球内部瞬发出来并且几乎不与其他物质相反应，到达

地球表面的地球中微子通量大概为  $10^6$  个/cm<sup>2</sup>/s, 但是对它们的探测非常困难。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。反电子中微子可和液体闪烁体中的质子发生反应如公式 (3),



其反应截面在 2MeV 为  $3.3 \times 10^{-44} \text{ cm}^2$ , 3MeV 下会多一个量级。反  $\beta$  衰变的阈能为 1.806MeV, 这样从  $^{40}\text{K}$  衰变而来的地球中微子就不能被探测到, 因其最大的能量在 1.31 MeV 左右 (图 2)。而从  $^{238}\text{U}$  和  $^{232}\text{Th}$  衰变而来的最大的能量均超过反应阈值是可以由公式 (3) 反应被探测到的。因此  $^{238}\text{U}$  和  $^{232}\text{Th}$  衰变产生的地球中微子有可能和安装在地下千吨量级的探测器相互作用而被探测到。

### 三、目前和地球中微子相关的实验研究现状

在 2005 年, 位于日本富山的 KamLAND 实验组第一次给出了捕捉到地球中微子的信号, 收集了 749 天共有  $25_{-18}^{+19}$  个地球中微子事件, 表明了探测地球中微子的可能性, 发表在《自然》杂志上, 并为当期杂志的封面。随后位于意大利格兰萨索地下国家实验室 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, 收集了 2055.9 天的数据共有 77 个事件 (图 3)。

尽管这两个实验组证明了探测地球中微子的可能性, 但是还存在以下的困难:

(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 的液闪探测器为 1000 吨, Borexino 仅有 300 吨。地幔内放射性元素的含量不依赖于实验地点, 因此可将世界上现在有能力测量地球中微子的实验数据合并分析地幔放射性元素生热。最近 KamLAND 和 Borexino 实验联合分析给出地幔中 U 和 Th 放射性元素的含量在  $1\sigma$  范围内是  $R(\text{Th} + \text{U}, \text{mantle}) \approx 23 \pm 10 \text{ TNU}$  ( $\text{Th}/\text{U} \in [1.7, 3.9]$ ) (TNU 是地球中微子的测量单位, 表示在 1 年内 1 千吨液闪中可测到的地球中微子数目)。尽管联合实验数据大大提高了测量精度, 但是它们的精度还是无法达到区分地幔模型的要求。80% 的地球中微子来自 U 衰变链里, 20% 来自

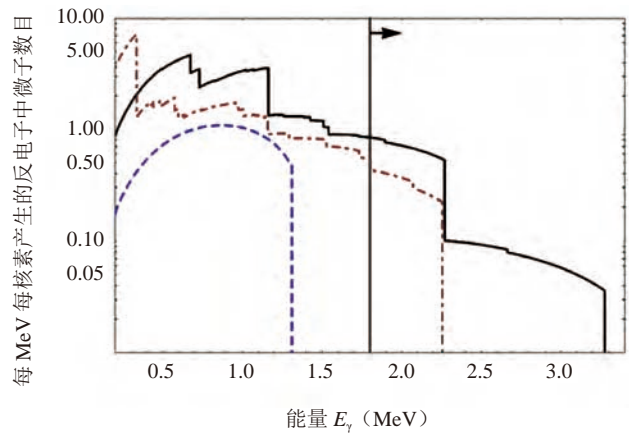


图 2 从  $^{238}\text{U}$ ,  $^{232}\text{Th}$  和  $^{40}\text{K}$  衰变而来的反电子中微子的能量分布。浅黑实线是  $^{238}\text{U}$  衰变产生的, 红色点划线是  $^{232}\text{Th}$  衰变产生, 它们均可被反  $\beta$  衰变反应而被探测到, 蓝线是由  $^{40}\text{K}$  衰变产生, 它因阈值低不能被探测到。竖黑线为阈值 1.8MeV

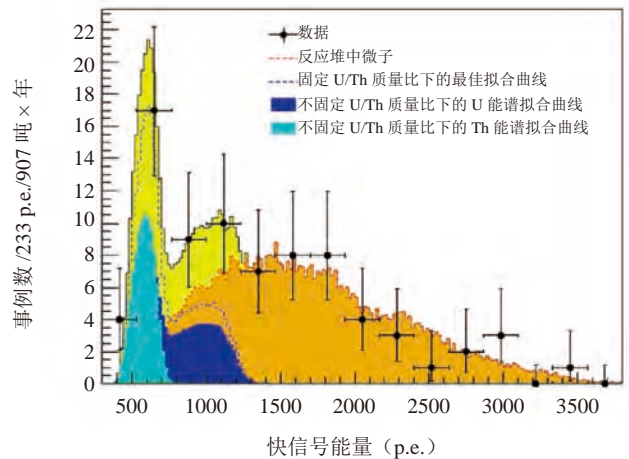


图 3 Borexino 实验组 2015 年最新公布的从运行 2056 天的实验数据中提取出的地球中微子和反应堆中微子能谱

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。

(2) 目前所有的探测器无法提供准确的入射中微子方向信息, 因此无法判断地核是否存在裂变元素及精确区分来自地壳和地幔的地球中微子等问题。

(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, 这对于解决地球科学的问题是不够的, 只有全球上更多的可探测地球中微子且具有不同地质条件实验点的结果相结合, 才能更好的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。

## 四、正在提议的测量地球中微子的实验

除了上面已经探测到地球中微子的两个实验以外，第三个即将取数的位于加拿大萨德伯里的 SNO+ 实验将用 1000 吨液闪来探测地球中微子，因萨德伯里的特殊地理位置，SNO+ 的测量将对古大陆板块的地壳位置的测量有着重大意义。

我国的江门地下中微子实验 (JUNO) 将有望成为第四个能探测到地球中微子的实验。JUNO 是一个国际领先的中微子实验站，以测定中微子质量顺序、精确测量中微子混合参数，并进行其他多项科学前沿研究。JUNO 于 2015 年开始建设，计划 2019 年底建成，这样 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，JUNO 第一年取的数据将达到 400 个地球中微子事件，将比现有实验数十年所取得的数据还要多。毫无疑问 JUNO 具有高统计量、高能量精度测量地球中微子的能力，与其他地球中微子探测实验相比它的优势体现在以下几个方面：

(1) 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，而该区大地热流也明显偏高。因此 JUNO 提供的地球中微子信号的测量可以为广东地区地热的分布及测量精度提供可靠的实验依据以及深入认识华南地区的构造演化过程和中国东部的岩浆构造活动提供机理；

(2) 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 和 Th 能谱的高精度区分成为可能，从而 JUNO 提供一个精确测量地球中 U 和 Th 比例的机会；

(3) 如前所述，地幔中的地热是研究的热点，而目前所存在的探测器因统计量和能量精度问题无法区分不同模型。JUNO 以其大统计量高能量精度的优势可能会提高地幔中微子的测量精度，从而有机会区分不同的地幔模型；

(4) JUNO 的高统计量也会为提高中微子入射方向的测量精度，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，甚至可以解决地核中是否有裂变元素的存在争议话题。

目前正在提议还可以有能力测量到地球中微子的实验如下：一是 LENA 探测器，它是已经在欧洲讨论了很多年的实验，将会建造一个 50 ~ 100 千吨液闪的大型闪烁体探测器，位于慕尼黑的 LENA 研究中心已经做了很多方面的研究，但是在 JUNO 立项后其建设的可能性非常小。第二个是 Dutch 南非组提出的 EARTH 实验，是将多个探测器放入 Isalad of Cruacao 地下实验室里，但是具体的探测器设计及性能还没有出。另外将中微子探测器放在远离大陆地壳的海洋里对地幔中微子的探测也是非常有帮助的，目前有 Hawaii 合作组提出的 Hanohano 实验就是为此目的所提的实验。最近，我国正在提出的锦屏二期的地下中微子实验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地质的迁移提供研究手段。

综上所述，对于地球中微子的研究需要地球学家和物理学家的携手合作才能更好地测量和检验地球内部深层结构和成分。特别是到 2020 年，江门地下中微子实验运行之后采集一年的数据将比目前实验存在的数据 10 年还多，锦屏地下实验将提供最少本底的地球中微子信号以及对青藏高原附近地质迁移的研究提供新手段，这些中微子的观测站提供了解决困扰科学界多年的难题的机会，更为重要的是为中国地球科学家和物理学家携手站在科学的前沿领域合作提供了机会，再一次开创跨学科合作研究的新局面。

