

Can Solar Neutrinos Heat the Earth?

Guowen Zhang

Hongshan District Bureau of justice of Wuhan City, Wuhan

Email: gwz1000@sina.com

Received: May. 12th, 2020, published: May. 15th, 2020

Abstract

There are always disputes about the energy sources such as driving mantle convection and plate motion, maintaining geomagnetic field and forming geothermal heat flow. The latest geoneutrinos detection shows that the decay of radioactive elements in the earth's interior can provide about 23TW of energy to the earth, it's about half of the heat that radiates from the earth's interior to the earth's surface (47 ± 2 TW), and at least half of that energy is from unknown sources. Some studies have speculated that solar neutrinos could heat the earth. We think that's possible, because neutrinos scatter coherently as they travel through the crystal, this greatly increases their cross section. The research shows that the cross section of the coherent scattering of neutrinos in the crystal is directly proportional to the fourth third square of the number of particles. Here, we analyze the crystal structure and distribution of the earth's interior, and discuss the heat generation of the coherent scattering of solar neutrinos and the earth's interior crystals. Our research shows that the coherent scattering of solar neutrinos and earth crystals produces a significant thermal effect when the crystal share in the earth is a certain proportion and the crystal size reaches the kilogram level, the energy released can reach 12.39 - 42.02 TW, which can provide energy for earth's evolution.

Keywords

Solar Neutrinos, Coherent Scattering, Crystal Inside the Earth, Energy Source of the Earth

太阳中微子能够加热地球吗？

张国文

武汉市洪山区司法局，武汉

Email: gwz1000@sina.com

收稿日期：2020年5月12日；发布日期：2020年5月15日

摘要

驱动地幔对流和板块运动、维持地磁场、形成地热流等能量来源，一直存在争议。最新的地球中微子探

测表明,地球内部放射性元素衰变能为地球提供了约23 TW的能量,约相当于地球内部向地表辐射热流 47 ± 2 TW的一半,还有至少一半的能量来源不明确。曾有研究推测,太阳中微子能够加热地球。但是,由于中微子与物质的作用截面非常小,所以普遍认为,除了少量来自宇宙的极高能量中微子外,太阳中微子不可能在地球内部产生明显的热效应。然而,最新的研究证实,中微子在晶体中传播时会发生相干散射,这将大幅度提高其作用截面。计算表明,中微子与晶体的相干散射作用截面与散射体粒子数的 $4/3$ 次方成正比。在这里,我们根据地球内部晶体分布情况,估算了太阳中微子与地球晶体的相干散射产生的热效应。结果表明,当地球内部的晶体份额占到某种比例,晶体尺寸达到千克级时,中微子与地球晶体物质作用释放的能量可达12.39~42.02 TW,完全可以加热地球,为地球演化提供能源。

关键词

太阳中微子,中微子相干散射,地球内部晶体,地球能量来源

1. 引言

在地质学领域,驱动地幔对流和板块运动、维持地磁场、形成地热流等能量来源,一直以来都存在争议[1][2][3]。目前,关于地球内部的能量来源较为流行的观点是:一部分来自地球内部放射性元素的衰变能,另一部分来自地球形成之初的重力势能[4]。但是,这种观点存在一些明显的不足。研究表明,地球内部放射性物质随深度增加而递减[5][6],这与地球内部温度随深度递增不一致;最新的地球中微子探测也表明,地球内部放射性元素衰变大约能为地球提供约23 TW的能量[7][8],目前地球内部向地表辐射的热流量大约为 47 ± 2 TW[9]。除此之外,维持地磁场还需要能量,有研究估算,维持地磁场的能量在1.7~170 TW[10],所以,还有相当一部分的地球能量来源不明确。而重力能也只是基于太阳系形成的星云假说的一种推测,不是确切的定论。另外,在地质历史上,还有短暂的地震和火山突然集中爆发事件[11][12]以及地磁场剧烈变化[13][14],这个能量来源,是放射性衰变能和早期重力势能均无法解释的。所以,一直有人在寻找其他可能的能量来源,并提出了多种理论假说,如太阳中微子说,热核反应说[10]、裂变说[15][16]、暗能量说[17]等等,但是,由于这些理论均存在明显缺陷而没有被人们所接受。

关于太阳中微子加热地球的研究,早在板块运动理论提出之前就开始了。1949年,Saxon[18]首先就太阳中微子与地球能量来源问题进行了研究。1954年和1955年,Cormack[19][20]连发两篇论文,对宇宙射线中微子被吸收而为地球提供热量的可能性进行了探讨。1964年Isaacs和Hugh[21]以及Reeves[22]也分别进行了类似的研究。这些早期的探索,都很零散,没有引起多少关注。

1996年10月,张国文[23]在当年的中国地球物理学会年会上提出了中微子地球演化说,并于1999年出版专著[24]系统地阐述了太阳中微子深入地球内部为地球演化提供能量的思想,认为太阳中微子能够与地球深部物质发生剧烈作用,并释放能量,导致外核熔化,驱动地幔对流和板块运动,形成地磁场,引起地震和火山爆发等一系列地球演化[25]。虽然该理论能够用中微子统一地解释地球许多毫不相干的演化现象,甚至包括行星的一些演化现象,但是,由于该理论关于太阳中微子为地球提供能量的机制不明确,又没有任何定量计算,更主要的是与当今主流观点相矛盾,所以也不为人们所接受。本文根据最新的中微子物理研究成果,对太阳中微子在地球内部释放能量的机制和途径进行了探讨,并估算了太阳中微子为地球内部提供能量的功率。

2. 太阳中微子加热地球的机制及热流估算

根据现代物理理论,太阳中微子在穿越地球的过程中,有极少数会被地球物质吸收,或者与地球物

质的原子发生散射，将一部分能量传递给地球物质。太阳中微子被地球物质吸收(发生核反应)，有一个阈能，所以反应截面非常小，与之相比，太阳中微子与地球原子发生散射，不存在阈能问题，所以散射截面远远大于其吸收截面，故我们在这里只讨论太阳中微子与原子散射向地球输送能量的情况，而不讨论其他形式输送的能量。太阳中微子在地球内部的散射包括太阳中微子与电子的散射和太阳中微子与核子的散射。

2.1. 太阳中微子与电子的散射的热效应

本根据标准模型，太阳中微子与电子的散射可分为荷流过程、弱中性流过程和弱中性流与荷流混合过程等三类散射。这三类过程的反应截面分别为[26] [27]:

1) 荷流过程:

$$\sigma_l = \frac{2G_\mu^2 m_e E_\nu}{\pi} \quad (1)$$

2) 弱中性流过程:

$$\sigma_n = \frac{2G_\mu^2 m_e E_\nu}{\pi} \left[1 - 4\sin^2 \theta_w + \frac{16}{3}\sin^4 \theta_w \right] \quad (2)$$

3) 混合参与过程:

$$\sigma_h = \frac{2G_\mu^2 m_e E_\nu}{\pi} \left[1 + 4\sin^2 \theta_w + \frac{16}{3}\sin^4 \theta_w \right] \quad (3)$$

上述各式中， G_μ 为费米常数， m_e 为电子质量， E_ν 为中微子能量， θ_w 为 Weinberger 角。

通过计算和根据实验测量，太阳中微子与电子的散射十分微弱，其总反应截面不超过 10^{-42} cm^2 ，即 $\sigma_e \leq 10^{-42} \text{ cm}^2$ 。太阳中微子到达地球表面总通量[28]大约为： $\phi = 6.5 \times 10^{10} \text{ cm}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$ ，所以太阳中微子与地球物质的散射率为:

$$S = \sigma_e \cdot \phi \leq 10^{-42} \times 6.5 \times 10^{10} = 6.5 \times 10^4 \text{ SNU}$$

这里，1SNU (Solar neutrino unit) = $10^{36} \text{ e}^{-1} \cdot \text{s}^{-1}$ ，亦即每 10^{36} 个靶粒子每秒钟有一次反应。地球的原子总数大约为:

$$N_{\text{earth}} = \sum W_{\text{earth}} \cdot e_i N_A / g_i \approx 1.36 \times 10^{50} \text{ 个}$$

上式中 $W_{\text{Earth}} = 5.976 \times 10^{24} \text{ kg}$ 为地球质量， $N_A = 6.02 \times 10^{23}$ 是阿伏伽德罗常数， e_i 和 g_i 分别为元素 i 的地球丰度值和克分子(地球质量和元素丰度等均采用黎彤的数据[29]，下同)。另外，在这里，我们只计算了 Fe、O、Mg、Si、S、Ni、Ca、Al 等丰度在前 8 位的元素的原子数，其他元素含量较少，予以忽略。太阳中微子的平均能量为 $E_\nu = 260 \text{ keV}$ ，考虑到弹性散射和非弹性散射，假定太阳中微子在散射中平均将一半的能量传递给电子，那么，太阳中微子通过与电子散射向地球输送的能量大约为:

$$Q_{e,\nu} = S \cdot N_e \cdot \frac{E_\nu}{2} \leq 1.87 \times 10^5 \text{ J/s} = 1.87 \times 10^5 \text{ W} \quad (4)$$

这个能量与地球内部向地表辐射的热流量(大约为 $47 \pm 2 \text{ TW}$ ， $1 \text{ TW} = 10^{12} \text{ W}$)相比，相差 10^8 数量级。由于我们在估算中取了最大值，实际相差可能还要大，所以，太阳中微子与地球物质的电子散射不可能为地球演化提供足够能量。

2.2. 太阳中微子与地球晶体物质散射的热效应

2.2.1. 中微子与核子的相干散射

中微子是微观粒子，具有波粒二象性，对于某些波长接近核子直径的长波低能量中微子，在穿越地球时会与原子核发生相干散射，这样将大大增加中微子的反应截面。Freedman [30]首先对这种相干散射进行了研究，认为当中微子的波长大于原子核的线度时，原子核将作为一个整体使中微子发生散射，散射的振幅等于所有核子相加，正比于核子数，而散射的几率是振幅的平方，正比于核子个数的平方。即：

$$\sigma_A = \frac{1}{16} \sigma_0 \left[\frac{E_\nu}{m_e c^2} \right]^2 A^2 \left[1 - \frac{Z}{A} + (4 \sin^2 \theta_w - 1) \frac{Z}{A} \right]^2 \quad (5)$$

上式中， A 为原子核所含核子数， $\sigma_0 = 1.76 \times 10^{-44} \text{cm}^2$ ， Z 为原子核中的质子数。因此，对于核子数在 100 个左右的重原子核来说，相干散射作用能够将太阳中微子的散射截面提高 104 倍。Akimov 等[31]人利用 14.6 kg 的碘化铯晶体闪烁体已经观察到了中微子的这种相干散射，其实验结果与理论计算基本一致。

Weber [32]曾研究认为，不仅中微子与单个原子核的相干散射正比于核子数的平方，而且中微子与晶体发生相干散射时，其散射截面与散射体(整个晶体)的粒子数 N 的平方成正比，即 $\sigma \propto N^2$ 。据此推论，对于一个数十克的散射体(晶体)来说，若含有 10^{20} 个粒子，中微子与其发生作用的反应截面将比通常情况下提高 10^{20} 个数量级。中微子与单个原子核的作用截面约在 10^{-43}cm^2 数量级，若能够将此作用提高 10^{20} 倍，那么其作用截面将达 10^{-23}cm^2 数量级，这与相同能量的伽马射线与物质的相互作用截面相当。倘若真的如此，那么太阳中微子将会为地球提供可观的能量。然而，虽然 Weber 声称他用实验验证了自己的理论，但是没有其他学者能够重复他的实验[33]，因而遭到了广泛的反对。罗俊和陈晓等[34]研究了 Weber 的理论后，认为中微子与晶体的相干散射，必须符合晶体散射的 Bragg 要求，为此，罗俊和陈晓等人沿着 Weber 的思路，同时引入晶体散射的 Bragg 限制，计算了入射中微子波长与散射晶体尺寸可比条件下的相干散射截面，推导出了如下结果：

$$\sigma \approx \pi |U_{IF} \Xi U_{IO}|^2 N^{4/3} / (c^2 \hbar^2 b^2) \quad (6)$$

从中可以看出，散射截面与散射体粒子数 N 的 $4/3$ 次方成正比，即 $\sigma \propto N^{4/3}$ 。这个结论比 Weber 的理论减少了一个因子 $N^{2/3}$ ，相比 Weber 对太阳中微子与 26 克蓝宝石(其所含粒子数约为 10^{22} 个)相互作用力可达 10^{-11} 牛顿的估算，减小了 15 个数量级，只有 10^{-26} 牛顿，这已远远超出人类能够测量的范围，换句话说，测量结果必然为零。

不过，太阳中微子与晶体的相干散射作用虽然无法测量到，但是这种作用毕竟客观存在，其热效应也是存在的。因此，如果罗俊和陈晓等人的计算是正确的，那么对于一个重 1kg 的晶体(含有约 10^{24} 个原子)来说，太阳中微子与其发生相干散射的截面将比单个原子的散射截面提高 $N^{1/3}$ 倍，达 10^8 数量级。研究表明，地球内部存在大量大小不等的晶体物质[35]，假设晶体物质所含总的核子数为 N ，那么，根据 Kippenhahn 和 Weigert [36]给出的中微子与核子散射截面的近似公式：

$$\sigma_\nu \approx 10^{-44} \left(\frac{E_\nu}{m_e c^2} \right)^2 \text{cm}^2 \quad (7)$$

公式中， E_ν 为中微子的能量， $m_e c^2$ 为电子的质量能量约 511 eV， c 为光速，太阳质子-质子主序的中微子平均能量约为 260 keV，即有 $\frac{E_\nu}{m_e c^2} \approx 0.509$ ，所以太阳中微子与地球原子核的平均散射截面为

$\sigma_\nu \approx 2.59 \times 10^{-45} \text{ cm}^2$ 。假定太阳中微子在散射时平均能够将 $1/n$ 的能量传递给原子核，这样，考虑罗俊和陈晓等[34]的研究结果[公式(6)]，可得到太阳中微子通过与晶体原子相干散射向地球输送能量为：

$$Q_{A,\nu} = N^3 \cdot \sigma_\nu \cdot \phi \cdot \frac{E_\nu}{n} = N^3 n^{-1} \times 10^{-48} \text{ J/s} \quad (8)$$

式中， $\phi = 6.5 \times 10^{10} \text{ cm}^2$ 为太阳中微子到达地面的通量， $E_\nu = 260 \text{ keV}$ 为太阳中微子的平均能量[28]。

2.2.2. 地球内部晶体物质分布

晶体物质一个显著的特点就是表现为弹性各向异性。地震波在地球内部的传播观测证明，地球内部不同深度范围的物质均存在各向异性[37] [38] [39]，虽然各向异性可能有着不同的起因，但是毫无疑问，有相当一部分是由晶格优势取向引起的，这说明地球内部存在一定数量的晶体。目前，人们通过高压物理实验，并结合地震波观测，给出了地球内部矿物晶体分布及结构相变情况(见表 1)。地壳中存在丰富的石英晶体等矿物，克拉通根部则含有大量昂贵的钻石晶体[40] [41]，上地幔主要组分为橄榄石，随着深度的增加，压力的增大，橄榄石会发生相变，形成尖晶石等矿物质。下地幔主要为钙钛矿相矿物，在 2700 km 深处钙钛矿会转变成为结构完全不同的过钙钛矿(SiO₆ post-perovskite) [42] [43] [44]。

地震波研究表明，地球内核呈现弹性各向异性。对于内核呈现弹性各向异性的形成机制，是一个研究热点，一般认为，内核各向异性可能起源于六方紧密堆积(hcp)的铁晶体[45]或者液态非球状包体[46]优势定向排列，而造成这种优势取向的机制也可能是麦克斯韦应力引起的铁晶体晶格定向排列等[47] [48]因素。同时，根据地震波的扰动变化，人们推测内核存在千米尺寸的散射体[49] [50] [51]。内核中还含有一个内内核，有研究认为，它是一个巨型的铁晶体[35]，直接约为 1200 km。即使是液态外核也有可能部分处在液晶状态[52]。这些地球内部各层构造中尺寸各异的各种晶体，它们对太阳中微子的相干散射或强或弱，特别是在地球深部，随着压力增大，会形成许多性能特异的致密晶体，这将增强相干散射作用。所以，可以肯定，这些相干散射能够拦截相当一部分太阳中微子，使它们将部分能量传递给地球。

Table 1.

表 1. 地球内部不同深度的物相组成[37] [38] [39]

深度(km)	压力(GPa)	物相组成
地壳内部	小于0.9	各种岩石不同分布格局
33	0.9	橄榄石(Mg ₂ SiO ₄)，石榴石(Mg ₂ Al ₂ Si ₃ O ₁₂)
100~150	3.1~6.5	Mg ₂ SiO ₄ ， Mg ₂ Al ₂ Si ₃ O ₁₂ 稳定或含水，部分熔融
220	10	斜方Mg ₂ SiO ₄ →βMg ₂ SiO ₄ 亚稳相
400	14	斜方Mg ₂ SiO ₄ →βMg ₂ SiO ₄ →γ尖晶石相Mg ₂ SiO ₄
670	25	Mg ₂ SiO ₄ 后尖晶石相 Mg ₂ SiO ₃ ， Mg ₂ SiO ₄ ， Mg ₂ Al ₂ Si ₃ O ₁₂ 向钙钛矿相转变SiO ₄ →SiO ₆ 六配位
1000	39	斜方钙钛矿相硅酸盐→四方结构→密排六方结构
2900	137	四方结构→密排六方结构→立方结构SiO ₆ 六配位
5080	317	含少许轻元素的铁液态外核界面
6371	364	铁晶体

2.2.3. 太阳中微子与地球内部晶体相干散射产生的热量

假如地球的内内核真的是一个直径约 1200 km 的庞大晶体，如果它全部由铁原子组成，那么这个晶

体所包含的原子数为：将包含 1.04×10^{47} 个铁原子，则太阳中微子相干散射的截面在内核可以提高 10^{15} 倍。假设 $n=100$ ，将 $N=1.04 \times 10^{47}$ 代入式(8)得 $Q_{A,v} = 34.26 \text{ TW}$ ，这就是说被内核散射的太阳中微子平均只要向地球传递 1% 的能量，就足以地球的演化提供所需的能量。

如果内核不是一个大晶体，而是由若干的稍小一些的晶体组成，考虑整个地球内核(包括内核)共有 $N_{core} \approx 1.06 \times 10^{48}$ 个铁原子，即使内核全部由比内核小 1 百亿(10^{10})倍的次一级的晶体组成，如果太阳中微子的相干散射能够将 1/3 的能量传递给地球，那么仍然可以向地核输送 11.71 TW 的能量。

另外，地幔中也有大量晶体物质，太阳中微子在地幔中的相干散射也必然大量存在。假定地幔物质(占地球总质量 68.1%)有 20% 由晶体组成，同时假定质量在 1 g~1 kg 的晶体占 70%，质量在 1~ 10^3 kg 的占 20%，质量在 10^3 ~ 10^6 kg 的占 8%，质量在 10^6 ~ 10^9 kg 的特大晶体占 2%，那么通过计算可以得到太阳中微子向地幔输送的能量在 0.68~7.76 TW (见表 2)。

因此，综合考虑地核和地幔中的晶体，可知太阳中微子与地球晶体物质的相干散射，向地球输送的能量在 12.39~42.02 TW。因此，我们认为，地球内部的能量来源，除了放射性物质提供的外，其他的不明能量很可能就是太阳中微子与地球内部晶体原子相干散射提供的。

Table 2.

表 2. 太阳中微子输送给地幔的能量估算

晶体质量	所占比例(%)	所含原子数(个)	散射截面($\times 10^{44} \text{ cm}^2$)	向地幔提供的能量
1 g~1 kg	70	10^{22} ~ 10^{27}	10^7 ~ 10^9	0.001~0.16 TW
1~ 10^3 kg	20	10^{27} ~ 10^{30}	10^9 ~ 10^{10}	0.04~0.46 TW
10^3 ~ 10^6 kg	8	10^{30} ~ 10^{33}	10^{10} ~ 10^{11}	0.18~1.85 TW
10^6 ~ 10^9 kg	2	10^{33} ~ 10^{36}	10^{11} ~ 10^{12}	0.46~4.61 TW
合计	100			0.68~7.76 TW

3. 讨论

严格地讲，这里，我们对太阳中微子通过晶体原子的相干散射向地球输送能量还是一种定性的研究，由于对地球内部晶体的分布和大小不清楚，我们对太阳中微子向地球输送能量的估算是十分粗略的，不能说是严格意义上的定量计算。但是，这并不影响我们的结论。

Huguet 等[53]研究表明，目前基于重力势能形成的熔融原始地球不可能通过冷却结晶形成固体地球内核而使外核保持液态。在地球内部高温压力条件下，为了使内核结晶，需要使液态金属的温度低于凝固点(或者熔融温度)多达 1000 度。同时，如果地球中心达到了这个温度，那么整个地核就会迅速结晶，但事实不是这样。实际上，地球内部降温十分缓慢，每 10 亿年才降低 100 度，不可能一下子出现 1000 度的大幅降温。因此，固态的内核不可能是从均相液体外核中产生的。这就是说，要么固体内核另有成因，要么液态外核是后来形成的。如果外核是后来形成的，则需要一个加热因素。我们认为，这个加热因素就是太阳中微子。

那么，地球物质又是如何被太阳中微子加热的呢？大家知道，晶体中的原子并非固定不动，而是在平衡位置附近做振动，晶体吸收的能量越多，温度越高，振动的幅度越大。根据量子力学，晶体晶格振动的能量是量子化的，若晶格是由 N 个原子组成的，则其能量为[54]：

$$E_n = U + \sum_{i=1}^{3N} \left(n_i + \frac{1}{2} \right) h\nu \quad (n = 0, 1, 2, \dots; i = 1, 2, \dots, 3N) \quad (9)$$

式中 U 为原子静止于平衡位置上时晶体的能量。这表明晶体的能量由静止能量和振动能量两部分组成。振动能量可以连续地分布于从 0 到原子被撞击离开平衡位置所需要的能量，因此，晶体可以拦截各种能谱的太阳中微子。当太阳中微子撞击晶体的原子核时，通过与原子核的某个夸克交换一个 Z 玻色子，将它的一些动量传递给原子核，使原子核处于某种激发态，随后原子核将以发射一个光子释放掉这部分能量或者以晶格振动的方式转化为热能。当然，能量足够高的中微子甚至可以直接将原子撞离平衡位置，使之发生扩散。这种能量传递，不受中微子振荡影响，可以保持中微子通量不变；同时由于是中微子流(Natural Current)吸收，中微子损失了能量，不一定湮灭。假设太阳中微子能量为 260 keV，因撞击晶体原子损失能量 60 keV，仍然会带着 200 keV 的能量穿过地球而远去。

根据上述研究，如果太阳中微子与地球晶体物质相干散射释放的能量是地球内部能量的主要来源，那么地球中心的内核就是地球热源的中心，地幔中存在晶体的地方也都可以产生能量，但是随着能量的生产和积累，晶体将会被融化成液体。由于晶体消失，这时相干散射无法进行，能量生产终止，液体冷却，并重新结晶形成晶体。于是，中微子的相干散射作用又开始进行，能量再次积累，晶体再次被融化，如此反复，这样导致地球内部一系列物质和能量流动。

另外，目前，探测太阳中微子的实验都发现太阳中微子有所丢失[55][56][57]，然而各种实验发现太阳中微子丢失的比例在 1/3 到 1/2。对于中微子振荡来说，这无法合理解释，因为中微子振荡虽然在不同的探测点可能不同，具有随机性，但是从大的时间尺度来说应该一致，不应该存在巨大差异。如果太阳中微子能够与地球内部晶体发生显著相干散射，那么太阳中微子探测存在这种差异则是必然的。因为地球各处晶体物质存在差异，太阳中微子在穿过地球时在各处的能量损耗也不相同，导致各种能量的太阳中微子比例会发生变化。

4. 结论

太阳中微子与物质的相互作用截面虽然非常微弱，但是由于中微子是微观粒子，具有典型的波粒二象性，当太阳中微子在地球内部的晶体物质中传播时，如果其波长与晶体原子的尺寸接近，那么太阳中微子将会发生相干散射，这将极大地提高其散射截面，此时，若晶体大小达到一定程度(如含有 10^{24} 个以上的原子)，太阳中微子与晶体原子的相干散射就能够显剧地加热地球，为地球的各类演化提供足够的能量。

参考文献

- [1] 盖保民地球演化[M]. 中国科学技术出版社,北京,1996.
- [2] 王鸿祯(1997)地球的节律与大陆动力学的思考.地学前缘,(3):1-12.
- [3] 滕吉文,宋鹏汉,张雪梅等(2016)地球内部物质的运动与动力.《科学通报》, 61 (18):1995-2019
- [4] Buffett, B. A. (2007). Taking earth's temperature. Science, 315(5820), 1801–1802.
- [5] 池顺良(2003)放射性元素集中于上地壳的原因及其地球动力学意义.地球科学, (01):17-19.
- [6] AH Lachenbruch(1968)Preliminary geothermal model of the Sierra Nevada.Journal of Geophysical Research,73 (73):6977-6989
- [7] M Agostini,S Appel, G Bellini, J Benziger,D Bick (2015)Spectroscopy of geoneutrinos from 2056 days of Borexino data,Phys.rev.d, 92 (3):031101
- [8] Gando, A., Dwyer, D. A., McKeown, R. D., & Zhang, C. (2011). Partial radiogenic heat model for Earth revealed by geoneutrino measurements. Nature Geoscience, 4(9), 647–651.
- [9] Davies, J. H., & Davies, D. R. (2010). Earth's surface heat flux. Solid Earth, 1(1), 5–24.
- [10] EI Terez,IE Terez (2013)Thermonuclear Reaction as the Main Source of the Earth's Energy.International Journal of

Astronomy and Astrophysics, 03 (3) :362-365

- [11] Haiquan Wei,Guoming Liu,James Gill(2013)Review of eruptive activity at Tianchi volcano, Changbaishan, northeast China: implications for possible future eruptions. *Bulletin of Volcanology*,75(4):706.
- [12] IN Bindeman(2006)The secrets of supervolcanoes.*Scientific American*, 294 (6) :36-43.
- [13] 邓晋福,莫宣学,MF.J.FLOWER,苏尚国,罗照华,赵海玲,赵志丹,喻学惠,刘翠(2005)白垩纪大火成岩省与地幔对流[J].*地学前缘*,(02):217-221.
- [14] Y Guyodo, JP Valet(1999)Global changes in intensity of the Earth's magnetic field during the past 800 kyr.*Nature*,399 (6733) :249-252.
- [15] Bao Xue Zhao.U(1999)Th distribution, nuclear fission and their relationship with geodynamics in outer core.*Geological review*.45(4):344-0.
- [16] MA Xuechang(2016)Discussions on the Driving Force of Crustal Movement: Nuclear Energy and Earth Evolution.*Acta geologica sinica*.90(1):24-36.
- [17] Yuan Xuecheng,Jiang Mei,Geng Shufang(2015)Dark matter dark energy and geodynamics. *Acta geologica sinica*.89(12):2213-2224.
- [18] D Saxon(1949)The Neutrinos from the Sun and the Source of the Earth's Heat.*Studies in Higher Education*,39(9):1523-1541.
- [19] AM Cormack(1954)Heat Generation in the Earth by Solar Neutrinos.*Physical Review*, 95 (2) :580-581.
- [20] AM Cormack(1955)Neutrinos from the Sun,Reports on Progress in Physics, 39(1)Supplement) :28-37.
- [21] JD Isaacs,B Hugh(1964)Neutrino and Geothermal Fluxes.*Journal of Geophysical Research*, 69 (18) :3883-3887.
- [22] H Reeves(1964)The Detection of Solar Neutrinos.Nasa Sti/recon Technical Report N ,75 (1-2) :117-131.
- [23] 张国文.中微子地球动力理论,见中国地球物理学会年刊(1996),北京:中国建材出版社,1996,314.
- [24] 张国文.中微子地球演化说——探索地球起源与演化的奥秘,武汉:武汉测绘科技大学出版社,1999.
- [25] 张国文(2018)中微子与地球演化的能量来源.汉斯预印本,3(1): 1-4.
<https://doi.org/10.12677/HANSPrePrints.2018.31010>
- [26] Chowdhury D,Eberhardt O(2015)Global fits of the two-loop renormalized Two-Higgs-Doublet model withsoft Z,2,breaking. *Journal of High Energy Phys-ics*.
- [27] 李娜(2012)vee 散射和小 Higgs 模型.[D]. 郭滨.辽宁师范大学.
- [28] John N Bahcall and Carlos Peña-Garay (2004)Solar models and solar neutrino oscillations.*New Journal of Physics*,6 (1) :63
- [29] 黎彤(1976)化学元素的地球丰度.*地球化学*.3,167-173.
- [30] D. Z. Freedman(1974) “Coherent neutrino nucleus scattering as a probe of the weak neutral current,” *Phys. Rev. D* 9, 1389. 28. DOI: 10.1103/PhysRevD.9.1389
- [31] D Akimov, JB Albert, P An, C Awe, PS Barbeau(2017)Observation of coherent elastic neutrino-nucleus scattering.*Science*, 357 (6356) : 1123-1126
- [32] Weber J. (1985)Method for Observation of Neutrinos andAntineutrinos. *Physical Review C Nuclear Physics*.31:1468-1475.
- [33] 冯国强(2006)太阳中微子反常相干散射的实验检验.[D].华中科技大学.
- [34] 陈晓,范淑华,罗俊(1997)低能中微子被晶体散射时的散射截面计算.*华中理工大学学报*.15:109-110.
- [35] Tao Wang, Xiaodong Song & Han H. Xia(2015)Equatorial anisotropy in the inner part of Earth's inner core from autocorrelation of earthquake coda.*Nature Geoscience*,8: 224–227.
- [36] R Kippenhahn,A. Weigert(1990)Stellar structure and evolution.Berlin Heidelberg:Springer-Verlag.18.
- [37] 李乐,周蕙兰,陈棋福 (2004)地球内核的地震学研究进展,*地球物理学进展*, 19 (2) :238-245.
- [38] 王良书;陈运平;米宁等(2005)从地震波各向异性到各向异性地震学:地震波各向异性研究综述.*高校地质学报*,11(4):544-551.
- [39] 熊大和(1996)高压物理研究在地球科学中的应用.*物理*, 25 (4) :199-205
- [40] Joshua M. Garber et al.(2018)Multidisciplinary Constraints on the Abundance of Diamond and Eclogite in the Cratonic Lithosphere, *Geochemistry,Geophysics,Geosystems*.19 June
<https://doi.org/10.1029/2018GC007534>.

- [41] Stachel, T. & Harris, J. (2008) The origin of cratonic diamonds- constraints from mineral inclusions. *Ore Geol. Rev.* 34, 5–32.
- [42] Iitaka, T., Hirose, K., Kawamura, K. and Murakami, M. (2004) The elasticity of the MgSiO₃ post-perovskite phase in the Earth's lowermost mantle. *Nature*, 430(6998): 442-445.
- [43] Hirose, K. and Lay, T., (2008) Discovery of Post-Perovskite and New Views on the Core-Mantle Boundary Region. *Elements*, 4(3): 183-189.
- [44] Wookey, J., Stackhouse, J. S., Kendall, J. M. (2005) Efficacy of the post-perovskite phase as an explanation for lowermost-mantle seismic properties. *Nature*, (438)1004-1007.
- [45] 刘斌, 张群山, 王宝善, 傅容珊, H. Kern T. Popp (2000) 内核地震波速各向异性的成因. *地球物理学报*. 43(03):312-321.
- [46] Singh S C, Taylor M A J, Montagner J P. (2000) On the presence of liquid in Earth's inner core. *Science*. 287(5462):2471-2474.
- [47] Karato S. (1999) Seismic anisotropy of the Earth's inner core resulting from flow induced by Maxwell stresses. *Nature*. 402(6764):871-873
- [48] Karato S (2001) Inner core anisotropy due to the heterogeneity level. *Geophysical Research Letters*. 28(1):85-86
- [49] Vidale J E, Dodge D A, Earle P S (2000) Slow differential rotation of the Earth's inner core indicated by temporal changes in scattering. *Nature*. 405(6785):445-448
- [50] Cormier V F, Li X, Choy G L (1998) Seismic attenuation of the inner core: viscoelastic or stratigraphic?. *Geophysical Research Letters*. 25(21):4019-4022
- [51] Cormier V F, Li X (2002) Frequency dependent seismic attenuation in the inner core: Part II. A scattering and fabric interpretation. *Journal of Geophysical Research*, 108(B2):1-15.
- [52] Ozawa, Haruka; Takahashi, Futoshi; Hirose, Kei; Ohishi, Yasuo; Hirao, Naohisa (2011) Phase Transition of FeO and Stratification in Earth's Outer Core. *Science*. 334(6057): 792~794.
- [53] L Huguet, JAV Orman, II Steven (2018) MA Willard. Earth's inner core nucleation paradox. *Earth & Planetary Science Letters*, 487 :9-20
- [54] 韩汝琦改编, 固体物理学. 高等教育出版社, 北京, 1988.
- [55] 柳卫平 (2002) 太阳中微子问题研究进展[J]. *原子核物理评论*, (01):20-23.
- [56] DAVIS R (1964) Chlorine solar neutrino results. *Physical Review Letters*. (12):303.
- [57] Y Fukuda, T Hayakawa, E Ichihara et al. (1998) Constraints on neutrino oscillation parameters from the measurement of day-night solar neutrino fluxes at Super-Kamiokande. *Physical Review Letters*, 82 (9) :1810-1814