

中微子振荡诱导放射性衰变研究

张国文, 张梦珂

武汉市中微子科技公司, 湖北 武汉

收稿日期: 2024年6月5日; 录用日期: 2024年7月5日; 发布日期: 2024年7月15日

摘要

放射性元素的衰变率通常被认为是恒定不变的常数, 但是近年来有关太阳中微子通量可能影响放射性元素衰变率的研究引起了人们的关注和争论。本文根据中微子振荡理论和放射性元素衰变模型, 研究了中微子振荡的物质效应及所形成的有效势场对放射性原子的影响。结果表明, 中微子振荡的物质效应(MSW)是中微子与介质核子的共振; 该共振不同于单个粒子之间的碰撞反应, 它是中微子与介质粒子之间通过势场耦合的集体行为; 该共振在强烈影响中微子振荡, 导致中微子味转换几率增强的同时, 也会对介质原子产生影响, 激发其中的不稳定放射性原子核, 增大其衰变几率。同时, 我们还证明, 即使中微子不能与介质核子(包括其中的放射性核素)形成共振(MSW), 只要中微子振荡能够形成稳定的周期性有效势场, 也会对放射性原子的衰变率产生影响。最后, 我们对放射性元素衰变率测量值的波动进行了解释, 并讨论了中微子振荡诱导放射性衰变的重要意义。

关键词

中微子振荡, 放射性原子核衰变, 中微子振荡诱导放射性原子核衰变, 衰变率

Research on Neutrino Oscillation-Induced Radioactive Decay

Guowen Zhang, Mengke Zhang

Wuhan Neutrino Science & Technology Co., Ltd., Wuhan Hubei

Received: Jun. 5th, 2024; accepted: Jul. 5th, 2024; published: Jul. 15th, 2024

Abstract

Usually, the decay rate of radioactive elements is considered to be a constant, but in recent years, studies on the possible influence of the solar neutrino flux on the decay rate of radioactive elements have attracted attention and controversy. In this paper, we investigate the material effects of neutrino oscillations and the influence of the resulting effective potential field on radioactive nuclei based

on the theory of neutrino oscillations and the model of the decay of radioactive elements. The results show that matter effect on neutrino oscillations (MSW) is a resonance of neutrinos with atoms in medium. This resonance is different from the reaction of collisions between individual particles and is a collective behavior between neutrinos and atoms in medium linked by a potential field. This resonance, while strongly affecting neutrino oscillations and leading to enhanced neutrino flavor conversion probability, also affects atoms in medium, exciting unstable radioactive nuclei in them and increasing their decay probability. Furthermore, we show that even if neutrinos cannot form resonances (MSW) with atoms in medium (including radioactive atoms therein), neutrino oscillations can have an effect on the decay rate of radioactive atoms as long as they are capable of forming a stable periodic effective potential field. Finally, we explain the fluctuations in the measured decay rates of radioactive elements and discuss the significance of neutrino oscillation-induced radioactive decay.

Keywords

Neutrino Oscillation, Decay of Radioactive Nuclei, Neutrino Oscillation-Induced Decay of Radioactive Nuclei, Decay Rate

Copyright © 2024 by author(s) and Hans Publishers Inc.

This work is licensed under the Creative Commons Attribution International License (CC BY 4.0).

<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>



Open Access

1. 引言

长期以来,放射性元素的衰变被认为是由原子核的内禀性决定的,与外力无关,其衰变率或半衰期是一种不变的常数。然而,近20多年来,有关太阳中微子通量影响放射性元素衰变率的研究对此提出了挑战。该挑战首先源于对放射性元素半衰期的测量,在该测量中,人们发现某些放射性元素的半衰期存在一定的季节性波动[1]-[4]。2001年,Falkenberg [5]将放射性元素半衰期的波动与太阳中微子通量的季节变化联系起来进行研究,认为放射性元素半衰期与太阳中微子通量存在正相关。随后,其他一些物理学家也纷纷投入到此类研究中。然而,最终他们却得出了针锋相对的结论。一些研究者[6]-[13]报告他们的结果印证了Falkenberg的观点。与此同时,另一些研究者[14]-[19]则表明,他们的结果排除了放射性元素衰变率与太阳中微子通量存在关联性的可能。不过,争论的双方都承认,一些放射性核子衰变率的测量结果存在波动,只是他们的解读有分歧。前者认为,放射性衰变率的波动是太阳中微子通量[6] [9]、太阳自转及太阳耀斑[7] [13]等因素造成的;后者则认为,衰变率波动是测量仪器及技术原因造成的[18] [19],而衰变率本身是不变的。例如,德国布鲁克海文国家实验室(BNL)对 ^{32}Si 的放射性衰变率进行了长期测量,积累了数年的连续测量数据。Jenkins等[6]在对这些数据进行分析后发现, ^{32}Si 的衰变率波动与太阳中微子通量的波动高度一致,而且这种高度一致性也出现在其他放射性元素衰变率的测量中。而Pommé等[17]则将 ^{32}Si 衰变率的波动与测量时的气候环境进行了对比,认为是温度和相对湿度影响了仪器,导致测量数据波动,与太阳中微子没有关系。然而有一些测量结果的波动,明显排除了仪器等因素的影响[11] [13]。而有些实验测量则表明,中微子通量变化对放射性衰变没有明显影响[20] [21]。事实上,从理论上讲,现代物理学既没有证明放射性衰变率是不变的,也没有证明其是可变的[22]。有研究认为,放射性核子与中微子作用没有阈能限制[23]。所以中微子通量越大,其与放射性核子的作用截面也越大。即便如此,放射性核子与中微子的作用概率也非常低。因为中微子与核子的反应截面与中微子能量的平方成正比[24],没有阈能限制虽然能够降低中微子反应的能

量, 但是其反应截面却会因能量的降低而减小, 最终的反应效率还是难以提高。因此, 通过一般的碰撞作用, 中微子难以影响放射性核子的衰变率。为此, Sturrock [13]认为, 中微子和 β 衰变之间可能存在某种耦合, 从而导致 β 衰变发生变异。

针对上述问题, 本文根据中微子振荡理论和放射性元素衰变模型, 研究了中微子振荡与放射性原子核可能产生的联系, 分析了中微子振荡的物质效应和中微子振荡形成的周期性有效势场对介质中不稳定放射性核素衰变率的影响, 从理论上说明了中微子对放射性元素衰变率影响的客观存在, 并对相关实验结果(争论)作出了解释。

2. 中微子振荡的物质效应对放射性衰变的影响

2.1. 中微子振荡理论

自 Pontecorvo [25]于 1957 年提出中微子振荡概念以来, 中微子振荡研究取得了丰硕成果, 现已经发展形成了一套完善的中微子振荡理论[25]-[27]。根据该理论, 三种味的中微子在传播中能够进行味的相互转换。以两味中微子(如 $\nu_e \leftrightarrow \nu_\mu$)为例, 在真空中传播时, 途中 $\nu_e \rightarrow \nu_\mu$ 的转换几率为:

$$P_{\nu_e \rightarrow \nu_\mu} = \sin^2 2\theta \cdot \sin^2 \frac{\Delta m^2 L}{4E} \tag{1}$$

上式中, L 是振荡基线长度, E 是中微子能量, θ 为真空中的混合角, $\sin^2 2\theta$ 是振荡振幅, $\Delta m^2 = |m_2^2 - m_1^2|$ 为两个质量本征态的质量平方差。公式(1)显示, 只要中微子的质量和真空中的混合角不为 0, 就存在中微子振荡。

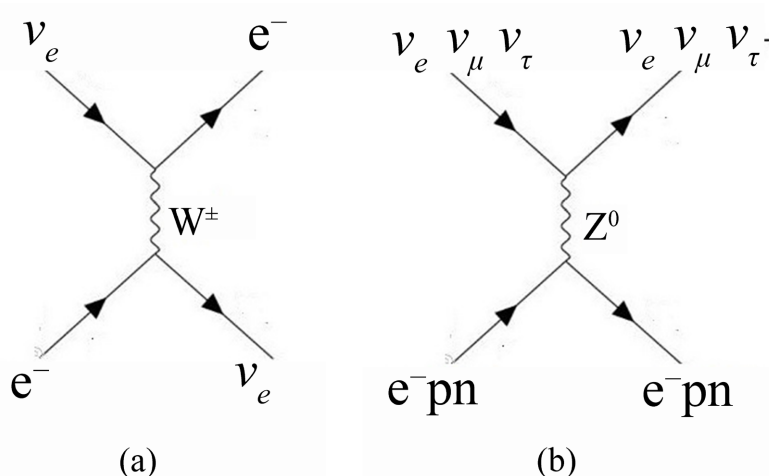


Figure 1. Feynman diagrams of the interaction between neutrinos and matter: (a) Weakly charged current interaction between electron neutrinos and matter; (b) Weakly neutral current interaction between three flavors of neutrinos and matter

图 1. 中微子与物质相互作用的费曼图: (a) 电子中微子与物质的弱带电流作用; (b) 三种味的中微子与物质的弱中性流作用

在物质介质传播时, 由于中微子会与介质中的中子、质子和电子发生相干散射作用, 所以导致中微子振荡发生相应的变化。对于 ν_e 来说, 不仅会与电子发生“弱带电流”作用(图 1(a)), 交换带色子 W^\pm , 还可以与电子发生“弱中性流”作用, 交换不带电的 Z^0 玻色子(图 1(b))。而 ν_μ 和 ν_τ 与电子仅存在中性流作用(图 1(b))。因此, ν_e 的能量有一个带电流的额外项 $V_{CC} = \sqrt{2}G_F N_e$, 其中 N_e 是物质中电子的数密度, G_F 为弱相互作用的费米常数。考虑此额外项, 根据薛定谔方程可得到物质效应下 ν_e 转换为 ν_μ 的几率为:

$$P_{\nu_e \rightarrow \nu_\mu} = \sin^2 2\theta_m \sin^2 \left(\frac{\Delta m_m^2 L}{4E} \right) \quad (2)$$

上式中, θ_m 称为物质效应混合角, Δm_m^2 是有效质量平方差, 其值分别由下列公式给出:

$$\tan 2\theta_m = \frac{\Delta m^2 \sin 2\theta}{\Delta m^2 \cos 2\theta - 2\sqrt{2}EG_F N_e} \quad (3)$$

$$\Delta m_m^2 = \sqrt{\left(\Delta m^2 \cos 2\theta - 2\sqrt{2}EG_F N_e \right)^2 + \left(\Delta m^2 \sin 2\theta \right)^2} \quad (4)$$

当 $\Delta m^2 \cos 2\theta - 2\sqrt{2}EG_F N_e = 0$ 时, 混合角 $\theta_m \sim \pi/4$ 为极大值, 即两味中微子获得最大混合, 表明中微子与介质核子形成了共振。由此得到共振条件为:

$$V(N_e) = \sqrt{2}G_F N_e = \frac{\Delta m^2 \cos 2\theta}{2E} \quad (5)$$

显然, 在满足共振条件时, 真空混合角 θ 可以不达到最大混合值。因此, 这一效应也称为物质增强的中微子振荡。由于该共振效应是 Wolfenstein [26]、Mikheyev 和 Smirnov [27] 共同发现的, 所以也称为 Wolfenstein-Mikheyev-Smirnov (MSW) 机制。1968 年, 布鲁克海汶实验室的 Davis Jr. 等 [28] 探测到了来自太阳的中微子, 但发现探测到的太阳中微子个数只有预期的三分之一, 这就是著名的“太阳中微子失踪问题”。Mikheyev 和 Smirnov [27] 利用 MSW 机制, 很好地解释了太阳中微子失踪问题。

2.2. 中微子振荡对放射性衰变的影响

中微子在介质中传播的 MSW 机制是一种典型的物理共振, 该共振的产生与原子核的 β 衰变一样, 源于弱相互作用。根据 Fermi [29] 理论, 原子核的 β 衰变是一种自发跃迁, 其中的 β 粒子和中微子类似于一种辐射。这种跃迁的产生源于原子核内部的量子(能量)涨落, 亦即, 由于母核从量子涨落中获得了能量, 处于激发态, 进而导致 β 衰变发生。如果存在中微子振荡形成的 MSW 共振, 母核除了能够从量子涨落中获得能量外, 还会从 MSW 共振中获得激发能量, 增大跃迁(β 衰变)几率。前人对 MSW 共振的研究, 主要关注中微子味的转换, 至今还未见共振对介质粒子影响的研究。对于介质来说, 中微子振荡产生 MSW 共振时, 随着中微子味的变换, 也产生了有效势波动, 这个波动的有效势反过来影响介质中的核子, 使介质中的核子受共振激发。众所周知, 共振是一种受迫振动, 对脆弱系统具有极大的破坏作用。MSW 共振的能量波动虽然十分微弱, 对一般的原子不会产生实质影响, 但是对于介质中不稳定的放射性原子核系统来说, 任何微扰都可能激发其加速崩溃, 增大其衰变的几率(图 2)。

α 衰变主要由强相互作用控制, 中微子振荡形成的弱有效势, 对原子核的 α 衰变似乎难以产生影响。然而, 由于弱相互作用与强相互作用存在一些耦合和联系(图 3), 中微子振荡也必将导致强相互作用的波动。这个耦合的桥梁就是希格斯场(Higgs field) [30]-[32]。按照汤川秀树相互作用理论, 所有的微观粒子相互作用都是由相应的媒介粒子来传递的。传递弱相互作用的媒介粒子是 W^\pm 和 Z^0 , 它们的质量非常大, 分别约为 80.4 GeV 和 91.2 GeV, 但是这些粒子并不是原子核内部所固有的, 而是在发生弱相互作用时产生的。在此过程中, 希格斯粒子与媒介粒子 W^\pm 和 Z^0 发生耦合, 导致规范对称性破坏, 使得原本没有质量的 W^\pm 和 Z^0 玻色子获得质量。由此可见, 中微子振荡也包含希格斯场的振荡。希格斯场振荡很可能引诱和放大夸克的某种振荡, 从而激发不稳定的丰中子放射性原子核, 增大 α 衰变的几率。

由于中微子振荡的频率很高, 通过 MSW 共振, 原子核能够在极短时间内积累可观的能量。在 α 衰变中, 假设没有外场存在时 α 粒子的动能和衰变常数分别为 E_{m0} 和 λ_0 , 有外场激发时其衰变常数为 λ_v ,

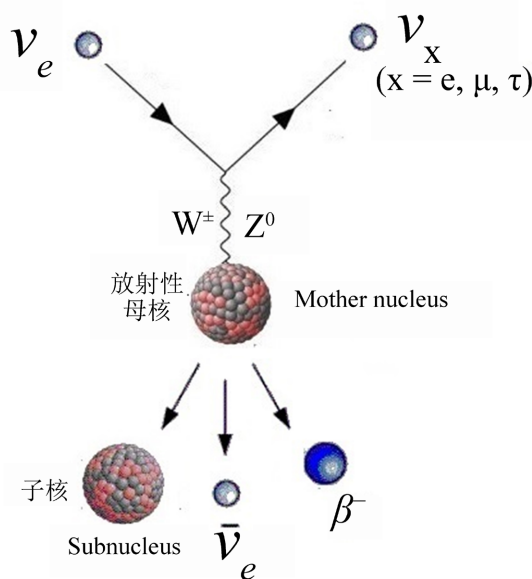


Figure 2. Schematic diagram of neutrino oscillation-induced decay of a radioactive nucleus

图 2. 中微子振荡诱导放射性核子衰变示意图

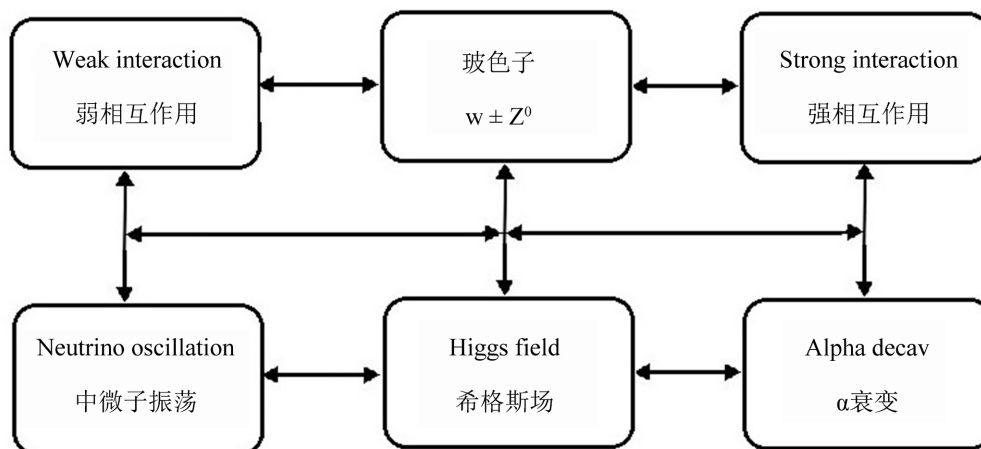


Figure 3. Schematic diagram of the coupling of neutrino oscillations to α -decay

图 3. 中微子振荡与 α 衰变的耦合示意图

获得的额外动能为 ΔE ，则有外场激发时的最终动能为 $E_m = E_{m0} + \Delta E$ 。根据 Geiger 和 Nutall [33] 总结得到的原子核 α 衰变常数与 α 粒子动能 E 的关系：

$$\lambda \propto E_{\alpha}^{86.25} \tag{6}$$

比较得到：

$$\frac{\lambda_v}{\lambda_0} \propto \left(\frac{E_{m0} + \Delta E}{E_{m0}} \right)^{86.25} = \left(1 + \frac{\Delta E}{E_{m0}} \right)^{86.25} > 1 \tag{7}$$

上式显示，即使放射性核子从共振获得的能量很小，但是由于指数效应，衰变率的增量也十分可观。

太阳内部物质密度变化特别大，中心的密度约为 150 g/cm^3 ，所以会有一些太阳中微子在传播途中产生 MSW 共振。例如，当中微子质量平方差 $m_{21}^2 = 7.5 \times 10^{-5} \text{ eV}^2$ 和混合角 $\theta_{12} = 34^\circ$ 时，根据公式(5)可计算

出在太阳中心区域满足共振条件的中微子能量 $E = \frac{\Delta m^2 \cos 2\theta}{2\sqrt{2}G_F N_e} \approx 2 \text{ MeV}$ 。太阳的将 ${}^8\text{B}$ 系列产生的中微子的能量大于该值, 满足共振条件, 能够形成 MSW 共振。倘若在共振区域存在放射性核子, 那么共振行为无疑会激发这些不稳定的放射性核子, 增大其衰变几率。

3. 周期性振荡对放射性衰变的影响

中微子振荡除了 MSW 共振外, 还存在一般的振荡, 那么一般的中微子振荡能否对放射性核子的衰变率产生影响呢? 答案是肯定的。当然, 这要满足一个条件, 即中微子振荡能够在放射性核子所处的区域形成稳定的周期性有效势场(振荡)。下面, 我们对此予以说明论证。

在低温低密度的介质中, 中微子的有效势哈密顿量可以表示为[25]-[27]:

$$\mathcal{H}_{\text{eff}}(\chi) = \sum_{e,\mu,\tau} V_a \bar{\nu}_{aL}(\chi) \gamma^0 \nu_{aL}(\chi) \quad (8)$$

其中, V_a 为有效势能, 大小由下列关系式定义:

$$V_a = V_{CC} \delta_{ae} + V_{NC} (\delta_{ae} + \delta_{a\mu} + \delta_{a\tau}) = \sqrt{2} G_F \left[N_e \delta_{ae} - \frac{1}{2} N_n (\delta_{ae} + \delta_{a\mu} + \delta_{a\tau}) \right] \quad (9)$$

上式中, 下标 $a = e, \mu, \tau$, N_n 是中子的数密度。由上式可知, 中微子总的有效势能随着中微子振荡而变化。上述所谓的中微子有效势, 其实是介质物质对中微子形成的有效势。当中微子振荡时, 中微子形成的弱相互作用场也随着中微子振荡而振荡, 并反作用介质核子。这个中微子作用介质核子的有效势的大小, 主要与电子中微子的通量(因为影响放射性衰变的主要是电子中微子)密切相关, 可以用下式表示:

$$V_\nu(t) = V_0 \cos \omega t \quad (10)$$

上式中, V_0 和 ω 分别为中微子初始有效势和振荡角频率, 且令 $t = 0$ 时, 中微子有效势 $V_0 = \sqrt{2} G_F N_{\nu_e}$ (N_{ν_e} 为电子中微子的数密度), 于是(10)式可写成:

$$V_\nu(t) = \sqrt{2} G_F N_{\nu_e} \cos \omega t = \sqrt{2} G_F N_{\nu_e} (e^{i\omega t} + e^{-i\omega t}) \quad (11)$$

如果中微子振荡能够形成周期性有效势场, 故可将中微子振荡施加给放射性核子的有效势外场视作周期性微扰。利用周期性微扰理论, 可得到原子从 n 态跃迁到 k 态的跃迁几率。简单推导如下[34] [35]:

$$\text{设 } \hat{H}'(t) = V_0 \cos \omega t, \text{ 或 } \hat{H}'(t) = F (e^{i\omega t} + e^{-i\omega t}) \quad (12)$$

$$\text{因 } H'_{nk} = \int \phi_n^* H' \phi_k d\tau = F_{nk} (e^{i\omega t} + e^{-i\omega t}) \quad (13)$$

$$\text{(其中 } F_{nk} = \int \phi_n^* H' \phi_k d\tau)$$

$$\text{故 } a_n^{(1)}(t) = \frac{F_{nk}}{i\hbar} \int_0^t [e^{i(\omega_{nk} + \omega)t'} + e^{i(\omega_{nk} - \omega)t'}] dt' = \frac{F_{nk}}{i\hbar} \left[\frac{e^{i(\omega_{nk} + \omega)t} - 1}{i(\omega_{nk} + \omega)} + \frac{e^{i(\omega_{nk} - \omega)t} - 1}{i(\omega_{nk} - \omega)} \right] \quad (14)$$

在周期性微扰外场作用下, 通常 $a_n^{(1)}(t)$ 很小。只有当 $\omega \approx \pm \omega_{nk}$, 才会有明显贡献。

当 $\omega \approx \omega_{nk}$, 第一项可以忽略, 当 $\omega \approx -\omega_{nk}$, 第二项可以忽略, 所以只有外场微扰含有 $\omega \approx -\omega_{nk}$ 时, 体系才能从 $n \rightarrow k$ 态, 由此可见, 此跃迁实际是一种共振跃迁。跃迁几率为:

$$P_{n \rightarrow k} = |a_n^{(1)}(t)|^2 = \frac{2F_{nk}^2}{\hbar^2} \frac{\sin^2 \frac{1}{2}(\omega_{nk} - \omega)t}{(\omega_{nk} \pm \omega)^2} \quad (15)$$

当 t 很大时, 利用公式 $\lim_{a \rightarrow \infty} \frac{\sin^2 a\chi}{\chi^2} = \pi a \delta(\chi)$, 可得:

$$P_{n \rightarrow k} = \frac{2\pi t}{\hbar^2} |F_{nk}|^2 \delta(\omega_{nk} \pm \omega) \quad (16)$$

其中, 吸收能量为 $-\hbar\omega$, 释放能量为 $+\hbar\omega$ 。因这里讨论的是外场激发, 故取“-”。将上式除以时间得到跃迁速率:

$$p_{nk} = \frac{2\pi}{\hbar^2} |F_{nk}|^2 \delta(\omega_{nk} - \omega) \quad (17)$$

公式(11)和(13)都是对激励外场中微子有效势的描述, 两者等价, 比较两者可得:

$$F_{nk} = \sqrt{2} G_F N_{\nu_e} \quad (18)$$

$$\text{故有: } p_{nk} = \frac{2\pi}{\hbar^2} \left| \sqrt{2} G_F N_{\nu_e} \right|^2 \delta(\omega_{nk} - \omega) = \frac{4\pi G_F^2 N_{\nu_e}^2}{\hbar^2} \delta(\omega_{nk} - \omega) \quad (19)$$

由上述公式可知, 在中微子振荡形成的周期性外场激励下, 当跃迁频率等于中微子有效势的振荡频率时, 跃迁速率达到极大值, 即产生共振。

需要特别注意的是, 这里的跃迁频率并不一定是原子核发生 β 或 α 衰变的频率, 而是指原子内部任何能够增加衰变激发能的态跃迁。只要该态跃迁储存了外场的激发能量, 就会增大原子核衰变的几率。由此可见, 在某一区域, 只要中微子有效势振荡的频率与放射性原子的某一态跃迁的频率相近, 中微子振荡就会激发放射性原核子, 增大其衰变几率。

4. 对部分放射性衰变率测量结果的解释

由于中微子与核子的反应截面极低[24], 中微子通量的增大对放射性核子衰变率的影响可忽略不计。特别是反应堆中微子的实验表明[20] [21], 放射性衰变率并不随中微子通量的变化而显著变化。所以, 中微子通量影响放射性核子衰变率的观点既没有理论依据, 也与实验结果不符。Sturrock [13]可能注意到了这些结果, 于是, 他猜测 β 衰变可能与中微子通量的方向性有关, 即中微子和 β 衰变之间存在一种耦合, 该耦合是一个集体过程, 而不是粒子-粒子过程。中微子振荡就是一种粒子的集体过程。该集体过程是由有效势场介导的, 凡是被波动的有效势场涵盖的放射性核子都会受到影响。而波动的有效势主要与中微子振荡的物质效应和振荡形成的周期性相关。在地表, 除了太阳中微子外, 还有大气中微子和反应堆中微子等, 也可能形成周期性有效势场并影响放射性实验样品的衰变。同时, 不同的放射性核子可能因内部振荡特征的不同而对不同频率的周期性有效势场敏感, 所以不同的研究者在不同的实验地点和环境条件下, 测得不同的放射性元素衰变率所得的结果不一致是十分正常的。

根据前面的讨论, 我们认为影响地表放射性核子衰变率的主要因素大致有:

1) 太阳。① 日地距离及太阳自转的变化会影响太阳中微子抵达地表时的振荡周期及振荡频率, 而不同的振荡周期及频率对放射性核素会造成不同的影响[6]。② 太阳耀斑及磁场活动会增加宇宙线中的质子数量, 改变宇宙线运动方向, 由此造成大气中微子的能谱及振荡周期等发生变化, 从而影响放射性核子衰变率[7]。

2) 宇宙线。除了太阳活动影响宇宙线外, 地磁场活动也影响宇宙线。宇宙线的变化会对大气中微子抵达地表时的振荡周期和振荡频率产生影响。另外, 大气的厚度也会影响大气中微子抵达地表时的振荡周期和振荡频率, 而大气的厚度主要受月球引力和季节等因素的影响。一些衰变率与宇宙线具有正相关的结果[36]以及氡衰变率的 27 天及昼夜波动[9]可能是大气中微子振荡导致的。

3) 地表环境。① 反应堆中微子源与放射性样品的距离。② 大气层的高度(或厚度)。这些都会导致中微子振荡周期的变化, 从而可能影响放射性衰变。

4) 介质。中微子在真空(大气)中的振荡与其在物质中的振荡具有较大差别。中微子振荡发生了变化, 其对放射性核子的影响也会变化。

5) 放射性核子。不同的放射性核子的内部振荡会不完全相同。若核子内部的某一振荡频率与中微子有效势的振荡频率一致, 则影响最大。

5. 对前人关于放射性元素衰变率研究的再审视

前人认为放射性元素衰变率恒定不变, 主要是基于无数实验经验的总结。然而, 也并非所有实验测量结果都显示放射性元素衰变率是不变的。事实上, 早就有研究发现[37] [38], 当某些外因, 譬如核外电子密度等环境因素发生变化时, 放射性元素的半衰期也会发生一些变化。当我们认真地审视前人的实验就会发现, 他们的实验主要是在机械力、热力、重力和电磁力变化的环境下进行的[37] [38], 涵盖的范围并不全面, 未发现在强相互作用力和弱相互作用力变化条件下的实验。放射性衰变反应主要是核力作用导致的, 受强相互作用力和弱相互作用力等核力影响最大。中微子振荡是一种能够深入原子内部的弱作用力, 其对放射性原子核的影响远远大于机械力、热力、重力和电磁力。尤其是核外电子云的屏蔽保护作用, 使得除了核力之外的力, 无法对原子核施加显著影响。当原子核外围电子被削减或剥离时, 原子核放射性的稳定性便受到明显影响[37] [38]。同时, 中微子振荡中的味变换还伴随着质量的变化及希格斯场的波动, 而希格斯场与夸克、反夸克、弱规范场粒子都存在相互作用[30]-[32], 因此, 中微子振荡形成的弱相互作用场和质量波动对放射性原子核的影响应该在情理之中。

6. 中微子振荡扰动放射性元素衰变对宇宙学及地学的意义

目前, 地球演化的能源或动力机制问题仍然没有得到根本解决。张国文[39] [40]曾提出中微子地球演化说, 认为地球演化的一切能量来源于太阳中微子。但是受当时中微子研究的局限, 关于中微子为地球提供能量的机制论述模糊, 所以中微子地球演化说自提出以来并未受到普遍关注。如果中微子振荡对放射性元素衰变的影响是真实的, 那么地球演化的能源问题便可能最终得到解决, 这对于地球(行星)演化将具有重大意义。虽然学术界普遍认为, 放射性元素释放的衰变能够为地球的演化及各种构造运动提供能量, 但是人们一直不明白宏观上分布大体均匀的放射性物质如何能够驱动地球差别化(如地幔对流)和周期性(火山、地震活动等)运动。如果放射性元素衰变受中微子振荡影响, 那么一切问题可能会迎刃而解。此外, 在恒星内部, 中微子通量和物质密度都非常大, 更容易形成 MSW 共振, 这无疑会显著影响恒星内部核子 β 衰变的衰变率, 而核子的 β 衰变寿命决定天体快中子俘获核合成过程(r -过程)的时间标度, 对宇宙重元素的起源研究具有重要意义[41]-[43]。同时, r -过程还有一个一直令科学家困惑的问题, 就是理论预言的原子核 β 衰变寿命总是高于实验数据[44] [45]。如果考虑恒星内部中微子振荡能够影响原子核 β 衰变的衰变率, 那么这一长期的困惑可能会得到解决。所以, 如果中微子振荡扰动放射性原子核衰变被证实, 那么宇宙学和地球科学将会被改写。

7. 结语

本文从理论上初步证明了中微子振荡能够诱导放射性核子衰变, 但这只是一种定性说明, 还缺乏定量计算, 也就是说在中微子振荡诱导下, 放射性衰变率的变化率到底有多大, 还无法知晓。对于这一问题, 可以通过实验予以解决。最简单的方法就是测量在不同距离的大气中微子或反应堆中微子振荡扰动下的放射性核子的衰变率波动情况。大气中微子振荡的昼夜变化十分明显, 实验表明[9], 氡的衰变率日波动显著, 可使用氡作为样品, 在不同的地方同时测量其衰变率。利用反应堆中微子进行实验便于控制实验距离和进行对比实验。前人利用反应堆中微子实验, 主要考虑的是使中微子通量最大化, 所以通常在尽量靠近反应堆的地方实验。在最靠近反应堆的地方, 检测的衰变率几乎没有波动[20] [21], 而在稍微

远离反应堆的地方, 则发现了衰变率波动[46] [47]。因此, 在距离反应堆不同的地方进行放射性衰变率检测, 可能会得到理想结果。总之, 中微子是一种神秘的粒子, 其性质至今也未能完全弄清。因此, 对于中微子的一切新探索, 均应该持开放的态度。如果中微子振荡诱导放射性衰变得得到实验的证实, 那么对于地球科学、宇宙学和物理学均具有重要意义。

参考文献

- [1] Alburger, D.E. Harbottle, G. and Norton, E.F. (1986) Half-Life of ^{32}Si . *Earth and Planetary Science Letters*, **78**, 168-176. [https://doi.org/10.1016/0012-821X\(86\)90058-0](https://doi.org/10.1016/0012-821X(86)90058-0)
- [2] Ellis, K.J. (1990) The Effective Half-Life of a Broad Beam $^{238}\text{Pu}/\text{Be}$ Total Body Neutron Radiator. *Physics in Medicine and Biology*, **35**, 1079-1088. <https://doi.org/10.1088/0031-9155/35/8/004>
- [3] Norman, E., Browne, E. Chan, Y., et al. (1998) Half-Life of ^{44}Ti . *Physical Review C*, **57**, 2010-2016. <https://doi.org/10.1103/PhysRevC.57.2010>
- [4] Siegert, H., Schrader, H. and Schötzig, U. (1998) Half-Life Measurements of Europium Radionuclides and the Long-Term Stability of Detectors. *Applied Radiation and Isotopes*, **49**, 1397-1401. [https://doi.org/10.1016/S0969-8043\(97\)10082-3](https://doi.org/10.1016/S0969-8043(97)10082-3)
- [5] Falkenberg, E.D. (2001) Radioactive Decay Caused by Neutrinos? *Apeiron*, **8**, 32-45.
- [6] Jenkins, J.H., Fischbach, E., Buncher, J.B., et al. (2009) Evidence for Correlations between Nuclear Decay Rates and Earth-Sun Distance. *Astroparticle Physics*, **32**, 42-46. <https://doi.org/10.1016/j.astropartphys.2009.05.004>
- [7] Jenkins, J.H. and Fischbach, E. (2009) Perturbation of Nuclear Decay Rates during the Solar Flare of 2006 December 13. *Astroparticle Physics*, **31**, 407-411. <https://doi.org/10.1016/j.astropartphys.2009.04.005>
- [8] Jenkins, J.H., Herminghuysen, K.R., Blue, T.E., et al. (2012) Additional Experimental Evidence for a Solar Influence Onnuclear Decay Rates. *Astroparticle Physics*, **37**, 81-88. <https://doi.org/10.1016/j.astropartphys.2012.07.008>
- [9] Veprev, D.P. and Muromtsev, V.I. (2012) Evidence of Solar Influence on the Tritium Decay Rate. *Astroparticle Physics*, **36**, 26-30. <https://doi.org/10.1016/j.astropartphys.2012.04.012>
- [10] Sturrock, P.A., Steinitz, G., Fischbach, E., et al. (2016) Analysis of Beta-Decay Data Acquired at the Physikalisch-Technische Bundesanstalt: Evidence of a Solar Influence. *Astroparticle Physics*, **84**, 8-14. <https://doi.org/10.1016/j.astropartphys.2016.07.005>
- [11] Milián-Sánchez, V., Scholkmann, F., Fernández de Córdoba, P., et al. (2020) Fluctuations in Measured Radioactive Decay Rates Inside a Modified Faraday Cage: Correlations with Space Weather. *Scientific Reports*, **10**, Article No. 8525. <https://doi.org/10.1038/s41598-020-64497-0>
- [12] Milián-Sánchez, V., Iglesias-Martínez, M.E., Scholkmann, F., et al. (2022) Reply to: Role of Ambient Humidity Underestimated in Research on Correlation between Radioactive Decay Rates and Space Weather. *Scientific Reports*, **12**, Article No. 2530. <https://doi.org/10.1038/s41598-022-06179-7>
- [13] Sturrock, P.A. (2022) Neutrino-Flux Variability, Nuclear-Decay Variability and Their Apparent Relationship. *Space Science Reviews*, **218**, Article No. 23. <https://doi.org/10.1007/s11214-022-00878-3>
- [14] Norman, E.B., Browne, E., Shugart, H.A., et al. (2009) Evidence against Correlations between Nuclear Decay Rates and Earth-Sun Distance. *Astroparticle Physics*, **31**, 135-137. <https://doi.org/10.1016/j.astropartphys.2008.12.004>
- [15] Kossert, K. and Nähle, O.J. (2015) Disproof of Solar Influence on the Decayrates of $^{90}\text{Sr}/^{90}\text{Y}$. *Astroparticle Physics*, **69**, 18-23. <https://doi.org/10.1016/j.astropartphys.2015.03.003>
- [16] Bellotti, E., Broggini, C., Carlo, G.D., et al. (2015) Search for Time Modulations in the Decay Rate of ^{40}K and ^{232}Th . *Astroparticle Physics*, **61**, 82-87.
- [17] Pommé, S., Pelczar, K., Kossert, K., et al. (2021) On the Interpretation of Annual Oscillations in ^{32}Si and ^{36}Cl Decay Rate Measurements. *Scientific Reports*, **11**, Article No. 16002. <https://doi.org/10.1038/s41598-021-95600-8>
- [18] Pommé, S. and Pelczar, K. (2022) Neutrino-Induced Decay: A Critical Review of the Arguments. *Space Science Reviews*, **218**, Article No. 64. <https://doi.org/10.1007/s11214-022-00932-0>
- [19] Pommé, S. and Pelczar, K. (2022) Role of Ambient Humidity Underestimated in Research on Correlation between Radioactive Decay Rates and Space Weather. *Scientific Reports*, **12**, Article No. 2527. <https://doi.org/10.1038/s41598-022-06171-1>
- [20] de Meijer, R.J., Blaauw, M. and Smit, F.D. (2011) No Evidence for Antineutrinos Significantly Influencing Exponential β^+ Decay. *Applied Radiation and Isotopes*, **69**, 320-326. <https://doi.org/10.1016/j.apradiso.2010.08.002>
- [21] Barnes, V.E., Bernstein, D.J., Bryan, C.D., et al. (2019) Upper Limits on Perturbations of Nuclear Decay Rates Induced

- by Reactor Electron Antineutrinos. *Applied Radiation and Isotopes*, **149**, 182-199.
<https://doi.org/10.1016/j.apradiso.2019.01.027>
- [22] Aston, J.P. (2012) Is Radioactive Decay Really Exponential? *Europhysics Letters*, **97**, Article 52001.
<https://doi.org/10.1209/0295-5075/97/52001>
- [23] Elmaghraby, E.K. (2017) Configuration Mixing in Particle Decay and Reaction. *Reports on Progress in Physics*, **13**, 1-7.
- [24] Formaggio, J.A. and Zeller, G.P. (2012) From eV to EeV: Neutrino Cross Sections across Energy Scales. *Reviews of Modern Physics*, **84**, 1307-1341. <https://doi.org/10.1103/RevModPhys.84.1307>
- [25] Pontecorvo, B. (1957) Mesonium and Anti-Mesonium. *Sovietic Journal of Experimental and Theoretical Physics*, **33**, 549-551.
- [26] Wolfenstein, L. (1978) Neutrino Oscillations in Matter. *Physical Review D*, **17**, 2369-2379.
<https://doi.org/10.1103/PhysRevD.17.2369>
- [27] Mikheyev, S.P. and Smirnov, A.Y. (1989) Resonant Neutrino Oscillations in Matter. *Progress in Particle and Nuclear Physics*, **23**, 41-136. [https://doi.org/10.1016/0146-6410\(89\)90008-2](https://doi.org/10.1016/0146-6410(89)90008-2)
- [28] Davis Jr., R., Harmer, D.S. and Hoffman, K.C. (1968) Search for Neutrinos from the Sun. *Physical Review Letters*, **20**, Article 1205. <https://doi.org/10.1103/PhysRevLett.20.1205>
- [29] Fermi, E. (1934) Versuch einer Theorie der β -Strahlen. I. *Zeitschrift für Physik*, **88**, 161-177.
<https://doi.org/10.1007/BF01351864>
- [30] Higgs, P.W. (2014) Nobel Lecture: Evading the Goldstone Theorem. *Reviews of Modern Physics*, **86**, Article 851.
<https://doi.org/10.1103/RevModPhys.86.851>
- [31] Higgs, P.W. (1964) Broken Symmetries, Massless Particles and Gauge Fields. *Physics Letters*, **12**, 132-133.
[https://doi.org/10.1016/0031-9163\(64\)91136-9](https://doi.org/10.1016/0031-9163(64)91136-9)
- [32] Salam, A. and Ward, J.C. (1959) Weak and Electromagnetic Interactions. *Il Nuovo Cimento (1955-1965)*, **11**, 568-577.
<https://doi.org/10.1007/BF02726525>
- [33] Geiger, H. and Nuttall, J.M. (1911) The Ranges of the α Particles from Various Radioactive Substances and a Relation between Range and Period of Transformation. *The London, Edinburgh, and Dublin Philosophical Magazine and Journal of Science*, **22**, 613-621. <https://doi.org/10.1080/14786441008637156>
- [34] 周世勋, 陈灏. 量子力学教程(第三版) [M]. 北京: 高等教育出版社, 2022.
- [35] 余向阳, 王俊忠. 周期性微扰的严格表述[J]. 四川师范大学学报(自然科学版), 1991(4): 135-137.
- [36] Kenneth, J., Chen, M.P. and Huang, C.K. (2003) Origin of Natural Radioactivity. *Geological Journal of China Universities*, **9**, 1-10.
- [37] 白希祥. 束缚态 β -衰变及其天体物理意义[J]. 原子核物理评论, 2003(1): 11-17.
- [38] 周书华. 核外环境对衰变率的影响[J]. 原子核物理评论, 2010, 27(3): 267-273.
- [39] 张国文. 中微子地球动力学理论[C]//中国地球物理学会. 1996 年中国地球物理学会第十二届学术年会论文集. 北京: 中国建材出版社, 1996: 314.
- [40] 张国文. 中微子地球演化说——探索地球起源与演化的奥秘[M]. 武汉: 武汉测绘科技大学出版社, 1999.
- [41] 王章银, 牛中明. 相对论准粒子无规相位近似对原子核 β 衰变寿命的研究[J]. 中国科学(物理学 力学 天文学), 2016, 46(1): 184-193.
- [42] Burbidge, E.M., Burbidge, G.R., Fowler, W.A., et al. (1957) Synthesis of the Elements in Stars. *Reviews of Modern Physics*, **29**, 547 -650. <https://doi.org/10.1103/RevModPhys.29.547>
- [43] Langanke, K. (2003) Nuclear Weak-Interaction Processes in Stars. *Nuclear Physics A*, **718**, 92-100.
[https://doi.org/10.1016/S0375-9474\(03\)00684-5](https://doi.org/10.1016/S0375-9474(03)00684-5)
- [44] Nikšić, T., Marketin, T., Vretenar, D., et al. (2005) β -Decay Rates of r -Process Nuclei in the Relativistic Quasiparticle Random Phase Approximation. *Physical Review C*, **71**, Article ID: 014308.
<https://doi.org/10.1103/PhysRevC.71.014308>
- [45] Marketin, T., Vretenar, D. and Ring, P. (2007) Calculation of β -Decay Rates in a Relativistic Model with Momentum-Dependent Self-Energies. *Physical Review C*, **75**, Article ID: 024304.
<https://doi.org/10.1103/PhysRevC.75.024304>
- [46] Vasiliev, B.V. (2020) Effect of Reactor Neutrinos on Beta-Decay. *Journal of Modern Physics*, **11**, 91-96.
<https://doi.org/10.4236/jmp.2020.111005>
- [47] Vasiliev, B.V. (2020) The Beta-Decay Induced by Neutrino Flux. *Journal of Modern Physics*, **11**, 608-615.
<https://doi.org/10.4236/jmp.2020.115040>