

## 现代物理学基础的思考之四——《广义相对论的思考》

李学生 (Li Xuesheng)

山东大学副教授, 理论物理教师, 中国管理科学院学术委员会特约研究员, 北京相对论研究联谊会会员, 中国民主同盟盟员

[xiandaiwulixue@21cn.com](mailto:xiandaiwulixue@21cn.com), [1922538071@qq.com](mailto:1922538071@qq.com)

**摘要 (Abstract):** 物理学是科学的基本学科。本文章分析探讨了现代物理学的重要问题, 广义相对论, 供参考。

[李学生 (Li Xuesheng). 现代物理学基础的思考之四——《广义相对论的思考》. *Academ Arena* 2017;9(14s): 336-345]. (ISSN 1553-992X). <http://www.sciencepub.net/academia>. 7. doi:10.7537/marsaaj0914s1707.

**关键词 (Keywords):** 质点; 电荷; 引力; 电力; 空间; 方程; 量子力学; 广义相对论

## 第四章 中微子问题

## 1、中微子的发现的过程及其在现代物理学中的意义

## (1)中微子的提出

要追溯中微子发现的经过, 还要从 19 世纪末 20 世纪初对放射性的研究谈起。当时, 科学家们发现, 在量子世界中, 能量的吸收和发射是不连续的。不仅原子的光谱是不连续的, 而且原子核中放出的阿尔法射线和伽马射线也是不连续的。这是由于原子核在不同能级间跃迁时释放的, 是符合量子世界的规律的。奇怪的是, 物质在  $\beta$  衰变过程中释放出的由电子组成的  $\beta$  射线的能谱却是连续的, 而且电子只带走了它应该带走的能量的一部分, 还有一部分能量失踪了。

瑞士物理学家泡利在 1931 年最先假设有种新粒子“窃走了”能量。在 1931 年, 泡利在美国物理学会的一场讨论会中提出, 这种粒子不是原来就存在于原子核中, 而是衰变产生的。1932 年真正的中子被发现后, 意大利物理学家费米将泡利的“中子”正名为“中微子”。1933 年, 意大利物理学家费米提出了  $\beta$  衰变的定量理论, 指出自然界除了已知的引力和电磁力以外, 还有第三种相互作用—弱相互作用。 $\beta$  衰变就是核内一个中子通过弱相互作用衰变成一个电子、一个质子和一个中微子。他的理论定量地描述了  $\beta$  射线能谱连续和  $\beta$  衰变半衰期的规律,  $\beta$  能谱连续之谜终于解开了。如果中微子有引力质量, 那么根据 Einstein 的质能方程, 必须把能量  $E^*$  的一部分用来产生中微子, 这样留给电子的能量就比  $E^*$  小。泡利推算出中微子是没有质量的观点是错误的, 由于中微子的引力质量非常小, 因此在埃利斯的实验中发现电子也偶尔确实会有能量为  $E^*$  的情况。泡利的中微子假说和费米的  $\beta$  衰变理论虽然逐渐被人们接受, 但终究还蒙上了一层迷雾: 谁也没有见到中微子。就连泡利本人也曾说过, 中微子是永远测不到的。

## (2)中微子的发现

在泡利提出中微子假说的时候, 我国物理学家王淦昌正在德国柏林大学读研究生, 直到回国, 他还一直关心着  $\beta$  衰变和检验中微子的实验。1941 年, 王淦昌写了一篇题为《关于探测中微子的一个建议》的文章, 发表在次年美国的《物理评论》杂志上。1942 年 6 月, 该刊发表了美国物理学家艾伦根据王淦昌方案作的实验结果, 证实了中微子的存在, 这是这一年中世界物理学界的一件大事。但当时的实验不是非常成功, 直到 1952 年, 艾伦与罗德巴克合作, 才第一次用成功地完成了实验, 同一年, 戴维斯也实现了王淦昌的建议, 并最终证明中微子不是几个而是一个。在电子俘获试验证实了中微子的存在以后, 进一步的工作就是测量中微子与质量相互作用引起的反应, 直接探测中微子。由于中子与物质相互作用极弱, 这种实验是非常困难的。直到 1956 年, 这项试验才由美国物理学家弗雷德里克·莱因斯完成。首先实验需要一个强中微子源, 核反应堆就是合适的源。这是由于核燃料吸收中子后会发生裂变, 分裂成碎片时又放出中子, 从而使其再次裂变。裂变碎片大多是  $\beta$  放射性的, 反应堆中有大量裂变碎片, 因此它不仅是强大的中子源, 也是一个强大的中微子源。因为中微子反应几率很小, 要求用大量的靶核, 莱因斯选用氢核(质子)作靶核, 使用了两个装有氯化镭溶液的容器, 夹在三个液体闪烁计数器中。这种闪烁液体是一种在射线下能发出荧光的液体, 每来一个射线就发出一次荧光。由于中微子与构成原子核的质子碰撞时发出的明显的频闪很有特异性, 从而证实了中微子的存在。其检测机制是: 1) 核反应堆里的  $\beta$  衰变会产生中微子和反中微子(泡利的假设); 2) 一部分反中微子应该会被质子俘获而变成中子和正电子; 3) 正电子会碰到电子而湮灭, 产生一对伽玛光子; 4)

中子会被镉核俘获而产生光子（比正负电子对湮灭约晚几个微妙）。这样，这一理论机制应该意味着同时有三个光子的产生。所以，实验物理学家就用一种“符合电路”检测三个光子同时出现的事件。只要同时检测到了三个光子，就认为检测到了反中微子。但是其中的每一步理论预言的反应是无法单独检测的。

1978年，斯坦福大学物理学家马丁·佩尔和同事发现了 $\tau$ 轻子，在理论上这意味着 $\tau$ 中微子的存在，因为中微子是轻子的“前辈”。但是，由于 $\tau$ 中微子几乎没有质量，又不带电，且几乎不与周围物质相互作用，因而一直难寻踪迹。1982年，费米实验室的科学家用实验支持了 $\tau$ 中微子存在的假设。1989年，欧洲核子研究中心科学家证实 $\tau$ 中微子是标准模型中的第三个，也是最后一个轻中微子。1980年，前苏联的科学家曾对 $b$ 能谱的测量推得中微子有静止质量。1998年6月，日本科学家经过一段时间的观测后，也证实了中微子具有静止质量。根据电子、放射性核和子核的旋转情况，泡利推算出中微子具有自旋，是左手征的。在量子力学中，场的能量集中在波包中，electric field的能量集中在光子中，因此引力场的能量应当集中在中微子中。光波是electromagnetic field（即电磁质量）的传播，机械波是中微子（即引力质量）的传播。它们具有共性，说明了电磁质量和引力质量的等价性。

### （3）现代物理学对于中微子的研究

新华社东京2006年2月15日电（记者 钱铮）日本、美国等8个国家的科学家15日正式启动“冰立方”计划，准备借助南极点附近的冰观测宇宙的高能基本粒子——中微子。共同社15日援引日本千叶大学副教授吉田滋的话说，“冰立方”计划将依靠4800个检测仪，观测中微子和冰撞击时所产生的微弱的光，目前安装完成的540个检测仪已经投入观测工作。目前，8个国家的科学家正在南极点附近的冰层垂直向下挖洞，最深达冰面以下2500米。他们将间隔17米设置的60个检测仪用电缆连接起来，并把电缆下放到冰洞中深1400米至2500米的位置。科学家们打算在六角形的广阔冰层上，以125米的间隔设置80个这样的冰洞。到2009年，科学家们计划在南极建成体积为1立方公里的中微子观测站——“冰立方”。它的体积将是目前世界上最大的中微子观测装置——日本的“超级神冈”体积的2万倍，主要观测来自北极方向穿过地球的中微子。据悉，“冰立方”计划将耗资约300亿日元（约合2.57亿美元），其中美国承担80%，剩下的20%由日本、英国、德国、比利时、荷兰、瑞典和新西兰7个参与国分担。中微子是一种非常小的基本粒子，广泛存在于宇宙中。它可以自由穿过地球，不与任何物质发生作用，因而难以捕捉和探测，被称为宇宙间的“隐身人”。中微子研究是当前物理学研究的一大热点，美国科学家雷蒙德·戴维斯和日本科学家小柴昌俊因为在探测宇宙中微子方面取得的成就而获得2002年诺贝尔物理学奖。

据新华社北京2006年6月8日电 中国和美国科学家将联手在大亚湾核电站进行大规模的粒子物理实验。这项耗资近5000万美元的实验是中美两国迄今最大的基础科学研究合作项目。主持这个项目的中国科学院院士、中国科学院高能物理研究所所长陈和生8日在接受新华社记者专访时说：“国际合作组将在大亚湾核电站附近设置3个探测器进行中微子测量。”他说：“我们将在2008年建成隧道，2009年安装探测器，2010年开始获取数据。”根据计划，中方将投入1.5亿元人民币（约合1870万美元），负责基本建设和建造一半探测器；美方投入2500万至3000万美元，负责建造另一半探测器。陈和生说：“比较国际上目前进行的太阳、大气、反应堆和加速器这几类中微子实验，反应堆中微子实验最有可能获得突破性成果。”大亚湾与岭澳核电站群目前共有4个反应堆。大亚湾核电站紧邻高山，可以提供中微子实验必需的宇宙线屏蔽，这是一个巨大的优势。世界上其他可用于反应堆中微子实验的核电站附近都缺乏足够的岩石覆盖。陈和生说：“我们已完成大量深入研究和计算，并多次实地考察，提出利用大亚湾反应堆群精确测量中微子混合角 $\theta_{13}$ 的设想。这是目前世界上精度最高的实验方案。”中微子探测器为半径2.6米、高5米的圆柱体，每个重约100吨，里面分隔成3层同心圆柱。3个探测器将分别放置在山腹内，最近的距核电站360米，最远的2000米。一条隧道从地面进入山腹，连接3个放置探测器的地下实验室。联合投资这个重要实验并将参加合作研究的机构包括美国的布鲁克黑文国家实验室、劳伦斯·伯克利国家实验室。陈和生说：“大亚湾反应堆中微子实验投入相对较少而物理意义重大，有可能获得重大创新成果，这是中国基础科学研究领域的一次重大机遇。”

## 2、中微子的种类

中微子质量可能只有电子的百万分之一，中微子产生于太阳内的放射性衰变过程，或者宇宙射线中。中微子是基本粒子中的成员，分为三代。本世纪六七十年代，格拉肖、温伯格和萨拉姆三位科学家对基本粒子进行了分类，提出粒子物理学的框架是标准模型，即特质由12种基本粒子构成。它们包括6种夸克和6种轻子。夸克和轻子的大小不足原子的十亿分之一。夸克包括下、上、奇、粲、底、顶，共6种。轻子分为三代，第一代包括电子、电子中微子；第二代包括 $\mu$ （缪子）子和 $\mu$ 中微子；第三代包括 $\tau$ 子和 $\tau$ 中微子。第一代电子中微子和第二代 $\mu$ 中微子已分别在1956年和1962年通过实验被证实存在。1982年，费米实验室的

科学家用实验支持了  $\tau$  中微子存在的假设。1989 年，欧洲核子研究中心科学家证实  $\tau$  中微子是标准模型中的第三个，也是最后一个轻中微子。

由于中微子和电子都是一种轻子，但是中微子是电中性的，核力和电磁力都对中微子不起作用，因此实际上它与任何物质只能发生引力作用与弱相互作用。电子（同时具有引力质量和电磁质量）参与弱相互作用，但弱相互作用的主角是中微子（只具有引力质量），中微子具有波粒二象性，它的能量用  $h\nu$  表示。

1994 年，两个“天才设计师”——加利福尼亚大学研究生维多里奥·保罗内和费米国家实验室物理学家拜伦·伦德伯格提出了建立“ $\tau$  型中微子直接观测器”的构想，这一想法得到费米国家实验室的支持，并在两年后建成了观测器。

从 1997 年起，54 位来自美国、日本、希腊和韩国的科学家在费米实验室合作探测  $\tau$  中微子。他们用粒子加速器制造一股可能含有  $\tau$  中微子的中微子束，然后让中微子束穿过“ $\tau$  中微子直接观测器”内一个约 1 米长的铁板靶。这一铁板靶被两层感光乳剂夹着，感光乳剂类似于胶卷，能够“记录”粒子与铁原子核的相互作用。物理学家用 3 年时间从靶上的 600 多万个粒子轨迹中鉴定出了 4 个表征  $\tau$  轻子存在和衰变的痕迹，这也是表明  $\tau$  中微子存在的关键线索。 $\tau$  轻子的痕迹被科学家拍摄下来，并在计算机中形成三维图像，其主要特征就是其轨迹里有个结，这是  $\tau$  轻子在形成后迅速衰变的表现。据估算，几十万亿个  $\tau$  中微子中只有 1 个与靶中的铁原子核相互作用并生成一个  $\tau$  轻子。由此，科学家第一次找到了  $\tau$  中微子存在的直接证据。

美国加利福尼亚大学物理学家菲利普·雅格尔接受记者电话采访时说，发现  $\tau$  中微子存在的直接证据具有重要意义，它使科学家对物质基本粒子有个完整认识。雅格尔是“ $\tau$  中微子直接观测器”的建设者之一，观测器构想提出者之一维多里奥·保罗内曾是他带的研究生。雅格尔说：“由于我们现在有能力探测到  $\tau$  中微子，我们就能够设计出将物理学带到超越标准模型层次的实验。在不久的将来，将诞生更加激动人心的中微子物理学。”

1956 年宇称不守恒发现后，为解释有中微子参与的弱相互作用过程，李政道、杨振宁提出了二分量中微子理论，其物理实质是假定自然界只存在左旋中微子与右旋反中微子而不存在右旋中微子与左旋反中微子。中微子这种永久纵向极化的性质之所以可能，是因为当时中微子质量被认为等于 0，因而左旋中微子与右旋反中微子永远以光速运动，同时一切观察者所在的惯性系间的相对速度  $v$  都不可能超过  $c$  的缘故。假如中微子是亚光速的 Dirac 粒子，具有微小的质量  $m\nu$ ，设它在 S 系以速度  $u < c$  运动，则当 S' 系观察者以速度  $v$  相对于 S 系运动，又设  $v$  平行于  $u$  且  $v > u$  时，他将看到一个左旋中微子变成右旋中微子，一个右旋反中微子变成左旋反中微子，于是中微子不可能永久纵向极化的了，出现了宇称守恒的四分量中微子理论。即中微子的静止质量不为 0 与宇称不守恒的实验事实相矛盾。【1】证明宇称不守恒的实验-钴在低温下的  $\beta$  衰变。在【1】中倪光炯教授提出了中微子可能是超光速粒子，但这又和狭义相对论矛盾。在 1957 年前后，当时的确需要用光速的中微子（二分量 Dirac 方程）来解释宇称不守恒。后来，温伯格—萨拉姆理论建立，宇称不守恒是用左右手征旋量来体现的（电子与中微子的左右手征旋量不对称，中微子没有右手分量），不再需要“光速的中微子”，也就是中微子可以为亚光速运动，只要它没有右手分量。著名的核物理学家吴健雄教授验证了，在极化核  $^{60}\text{Co}$  的  $\beta$  衰变的实验室产生的中微子确实是一个左旋中微子。在自然界和实验中探测到中微子的自旋都与其运动方向相反，即服从左手定则，而成为左旋中微子；它的反粒子应该是右旋中微子。可是经实验证明在自然界中和实验里不存在右旋中微子。这就证明了中微子具有一定的方向性。

An.Lee 认为中微子就是由正负电子结合的产物，正负电子可组成为一正一负两个自绕一组的稳定结构，也可以两对正负电子组成四个一组具有相互传递缠绕的稳定结构，还可以组成为六个一组的具有立体空间相互缠绕的稳定结构。他认为中微子的正负电子学说推导出中微子应当具有基本三种类型，这和我们实际中探测到的三种中微子（电子中微子、 $\mu$  中微子和  $\tau$  中微子）是完全一致的。他说中微子的正负电子学说可以通过中微子相互碰撞和正负电子零速度下飘逸实验来证实。他表示，物理学世界及其研究还要以正负电子作为基点来考虑才行。按照这个思路，具有正引力质量的中微子至少应当是三种情况，即两倍电子的质量  $2m_e$ ， $4m_e$ ， $6m_e$ 。中微子的质量可能关系到宇宙平衡。宇宙中如果弥漫这种东西，而且是相对比较一致的，那么我们的宇宙就是一个均衡态的宇宙。光的传递可能是需要中微子作用的，只是我们觉察不到。笔者认为中微子是正负电子中和的引力质量部分。

现代物理学认为，粒子可分为三代轻子 ( $\nu_e, e; \nu_\mu, \mu; \nu_\tau, \tau$ ) 和三代夸克 ( $d, u; s, c; b, t$ )。在一定的条件下，这些轻子和夸克之间可以互相转化。但它们之间并不是你包含我或我包含你，而似乎是你中有我，我中有你。这反映粒子并不都是基本的。那么，在粒子世界中，是否能找出基本要素呢？根据有关事实认为：中微子 ( $\nu_e, \nu_\mu, \nu_\tau$ ) 和电荷是构成轻子和夸克的二大要素——中微子加上整份电荷构成了荷电轻子 ( $e, \mu, \tau$ )；中微子加上分数电荷构成了夸克。中微子有三种，这是粒子分为三代的基础。这三种中微子

是同一物质的三种不同状态，正如同一种物质会有固态、液态、气态一样。下面就以部分粒子的衰变为例，来作一下描述。

符号： $\xrightarrow{h_1(-1) \rightarrow h_2}$ 表示 $h_1$ 向 $h_2$ 转移 $a$ 份电荷；用[ ]括起来的表示一实物粒子或中间状态的 $h$ 组成（中括号前的字母为该粒子的代表符号）；在〈 〉内的为虚粒子的 $h$ 组成； $\Rightarrow$ 后为符合能量守恒的衰变结果。 $\leftarrow$

1、不稳定强子的衰变：其不稳定性在于，构成强子的夸克和虚胶子可以不通过转移电荷而直接组合成新的粒子。如： $\Delta^- [ddd \langle u - \bar{u} \rangle] \Rightarrow n [ddu] + \pi^- [d\bar{u}]$ 。 $\leftarrow$

2、稳定的奇异重子的衰变：一般（除 $\Sigma^0$ 以外）在虚胶子（由于能量的制约，只能是 $d - \bar{d}$ 、 $u - \bar{u}$ ）参与下，夸克 $s$ 与 $u$ 之间转移一份电荷后， $s$ 变成了 $u$ ， $u$ 变成了 $d$ ，然后重新组合： $\leftarrow$

$$\Lambda^0 [uds \langle u - \bar{u} \rangle] \xrightarrow{s(-1) \rightarrow u} [udu d\bar{u}] \Rightarrow p [udu] + \pi^- [d\bar{u}], \text{或} n [ddu] + \pi^0 [u\bar{u}]$$

$$\Lambda^0 [uds \langle d - \bar{d} \rangle] \xrightarrow{s(-1) \rightarrow u} [ddu d\bar{d}] \Rightarrow n [ddu] + \pi^0 [d\bar{d}]$$

$$\Sigma^+ [uus \langle u - \bar{u} \rangle] \xrightarrow{s(-1) \rightarrow u} [uum d\bar{u}] \Rightarrow p [uud] + \pi^0 [u\bar{u}] \leftarrow$$

$$\Sigma^+ [uus \langle d - \bar{d} \rangle] \xrightarrow{s(-1) \rightarrow u} [udu d\bar{d}] \Rightarrow p [uud] + \pi^0 [d\bar{d}], \text{或} n [dud] + \pi^+ [u\bar{d}]$$

$$\Sigma^- [dds \langle u - \bar{u} \rangle] \xrightarrow{s(-1) \rightarrow u} [ddu d\bar{u}] \Rightarrow n [ddu] + \pi^- [d\bar{u}]$$

$$\Xi^0 [uss \langle u - \bar{u} \rangle] \xrightarrow{s(-1) \rightarrow u} [usud\bar{u}] \Rightarrow \Lambda [sud] + \pi^0 [u\bar{u}]$$

$$\Xi^0 [uss \langle d - \bar{d} \rangle] \xrightarrow{s(-1) \rightarrow u} [dus d\bar{d}] \Rightarrow \Lambda [dus] + \pi^0 [d\bar{d}]$$

$$\Xi^- [dss \langle u - \bar{u} \rangle] \xrightarrow{s(-1) \rightarrow u} [dsud\bar{u}] \Rightarrow \Lambda [dsu] + \pi^- [d\bar{u}] \leftarrow$$

$$\Omega^- [sss \langle u - \bar{u} \rangle] \xrightarrow{s(-1) \rightarrow u} [ssud\bar{u}] \Rightarrow \Lambda [dsu] + K^- [s\bar{u}], \text{或} \Xi^0 [ssu] + \pi^- [d\bar{u}], \text{或} \Xi^- [dss] + \pi^0 [u\bar{u}]$$

至于 $\Sigma^0$ 的衰变，是其内部的胶子衰变成了光子（这是一种电磁相互作用，速度较快）： $\leftarrow$

$$\Sigma^0 [uds \langle d - \bar{d} \rangle] \xrightarrow{d(-\frac{2}{3}) \rightarrow \bar{d}} [uds \langle e - \bar{e} \rangle] \Rightarrow \Lambda [uds] + \gamma [e\bar{e}] \leftarrow$$

一些非主要的衰变方式，全是 $h$ 间转移分数电荷的结果，如： $\leftarrow$

$$\Sigma^- [dds \langle u - \bar{u} \rangle] \xrightarrow{d(-\frac{2}{3}) \rightarrow \bar{d}} [dde (\mu) \bar{\nu}_e (\bar{\nu}_\mu) u] \Rightarrow n [ddu] + e + \bar{\nu}_e, \text{或} n [ddu] + \mu + \bar{\nu}_\mu \leftarrow$$

3、中子和荷电轻子的衰变：由于能量的制约，中子同荷电轻子一样，在虚光子的参与下进行衰变：

$$n [udd] \langle e - \bar{e} \rangle \xrightarrow{d(-1) \rightarrow \bar{d}} p [udu] + \bar{\nu}_e + e \leftarrow$$

$$\mu \langle \bar{e} - e \rangle \xrightarrow{\mu(-1) \rightarrow \bar{d}} \nu_\mu + \bar{\nu}_e + e \leftarrow$$

$\tau$ 的衰变方式同 $\mu$ 类似，但因其能量巨大，还可激发出强子来。 $\leftarrow$

参考文献：

【1】《物理》第31卷4期255页2002年北京。

### 3、中微子的质量问题

《自然杂志》19卷4期的‘探索物理学难题的科学意义’的97个悬而未决的难题：65。中微子有无静止质量？66。有无中微子振荡？

在微观世界中，中微子一直是一个无所不在、而又不可捉摸的过客。中微子产生的途径很多，如恒星内部的核反应，超新星的爆发，宇宙射线与地球大气层的撞击，以至于地球上岩石等各种物质的衰变等。尽管大多数科学家承认它可能是构成我们所在宇宙中最常见的粒子之一，但由于它穿透力极强，而且几乎不与其他物质发生相互作用，因此它是基本粒子中人类所知最少的一种。被誉为中微子之父的泡利与费密曾假设它没有静止质量。根据物理学的传统理论，稳定、不带电的基本粒子中微子的静止质量应为零，然而美国科学家的研究从另一个角度有可能推翻这一结论。

据俄《知识就是力量》月刊报道，美国斯坦福大学的科研人员对最近24年来人类探测中微子所获数据进行分析后发现，从太阳飞向地球的中微子流运动具有某种周期性，每28天为一个循环，这几乎与太阳绕自己的轴心自转的周期相重合。美国科学家认为，这种周期性是由于太阳不均等的磁场作用造成的。磁场强度的变化，使部分中微子流严重偏移，致使探测器难以捕捉到。对此似可得出结论：中微子流有着自己的磁矩，既然有磁矩，就应有静止质量。在上世纪90年代以前，国际主流科学家们也认为中微子是没有质量的，因为这是标准模型的需要。然而近年包括我国在内的世界上的中微子振荡实验、观察，都探知到中微子有质量。令人惊讶的是，1938年意大利理论物理学家埃托雷·马约拉纳(Ettore Majorana)早就认为中微子有质量，并提出马约拉纳方程式。

1998年6月12日，东京大学的一个国际研究小组在美国《科学》杂志上发表报告说，他们利用一个巨大的地下水槽，证实了中微子有静止质量。这一论断在世界科学界引起广泛关注。由日、美、韩三国科学家组成的科研小组日前在此间宣布，他们在实验中观测到了250公里远处的质子加速器发出的中微子。这是人类首次在如此远的距离内观测到人造粒子。

日本文部省的高能加速器机构位于筑波科学城，东京大学宇宙射线研究所设在岐阜县的神冈，两地相距250公里。6月19日下午，科学家在高能加速器研究机构使用质子加速器向宇宙射线研究所的神冈地下检测槽发射中微子，并通过检测槽检测到了中微子。由于这批中微子来自筑波科学城方向，并且是在发射之后大约0.00083秒时检测到的，科学家因而断定，它们就是质子加速器发出的那批中微子。

这项实验是为了证实中微子有静止质量而设计的。1998年6月，日、美两国科学家宣布探测到中微子有静止质量。如果这一点被证实，现有的理论物理体系将受到巨大冲击。为了验证这一发现，科学家计划人工发射和接收中微子，观察中微子经过远距离传输后发生的变化，推断中微子是否有质量。

为了研究宇宙中的中微子，各种新型望远镜不断出现并投入使用。今年9月，一台专门研究中微子的特殊望远镜在地中海中开始安装。它不像普通望远镜那样直指天空，而是“反其道行之”面朝海底。这台“面海观天”的中微子望远镜名为“安塔雷斯”。它由英国、法国、俄罗斯、西班牙和荷兰等国科学家联合设计，安装地点位于距法国马赛东南海岸40公里处。望远镜在海面2.4公里以下，由13根垂入海中的缆状物组成，每个缆状物上将带有20个足球大小的探测器。2000年7月，日本文部省高能加速器研究机构发表实验结果称，由日本、美国和韩国科学家组成的实验小组在迄今的实验中，确认“中微子有质量”的概率已经达到95%。不过要最后作出“中微子有质量”的科学结论，需要99%以上的概率。CERN等一些其它研究机构也在筹划测中微子质量的试验。

参与该国际合作项目的英国设菲尔德大学科研人员介绍说，来自宇宙的中微子能畅行无阻地穿越包括地球在内的很多物体。虽然中微子无法直接探测到，但它在穿透地球过程中，偶尔会产生少量的高能量缪子中微子，并发散出特殊辐射光——切伦科夫光。“安塔雷斯”主要通过高灵敏度探测器检测该辐射来研究中微子。由于“安塔雷斯”面向海底，绝大部分宇宙射线会被厚厚的地层屏蔽掉，大大减少了观测过程中的本底噪音。专家说，这台望远镜的安装有可能为更深入揭示伽马射线爆发以及暗物质等宇宙奥秘提供重要线索。北京大学的刘川教授认为：中微子有质量（假设中微子振荡实验正确），它的速度小于光速。所谓“中微子运动速度等于光速”，是指1950年之前的说法，那时以为中微子没有静止质量。现代科技界认为中微子总质量上限确定到不及10亿分之一的氢原子质量，使暗物质的一种可能形式，它们在全部分物质中最多只占有1/8的分额。【1】

因发现第二代 $\mu$ 中微子而与人分享1988年诺贝尔物理学奖的莱昂·莱德曼评论说，找到 $\tau$ 中微子的直接证据是非常重要的且等待已久的结果。说其重要，是因为科学家将据此进一步研究三代中微子之间的关系；说等待已久，是因为25年前 $\tau$ 轻子就已经被发现，现在“另一个鞋子终于掉了下来”。 $\tau$ 轻子的发现者、荣获1995年诺贝尔物理学奖的马丁·佩尔说，证实 $\tau$ 中微子的存在具有里程碑的意义。在找到粒子家庭全部成员之前，粒子间相互转换的研究难以展开，现在这一障碍已被扫除。 $\tau$ 中微子的发现会给现实生活带来

什么改变？这还是科学家们无法预言的。不过，正如居里夫人 100 年前发现原子核裂变时没有人知道这一发现会有什么用处、而 40 年后人们用它制造原子弹和发电一样， $\tau$  中微子的发现也将给科学的发展带来深远影响。

美国能源部 LANL 实验室的液体闪烁体中微子探测器、加拿大 Sudbury 中微子观测站和日本超级神冈加速器实验的最新结果给出有力的证据：中微子以各种形式“振荡”，因此必定会具有质量。虽然质量很小，但宇宙中大量的中微子加起来可使总的质量达到相当高。美国费米国家实验室新的加速器实验 MiniBooNE 和 MINOS 将研究中微子震荡和中微子质量。

宇宙学告诉我们，当今宇宙中一定存在着大量的中微子。物理学家们最近发现越来越多的证据，表明它们具有小质量。甚至可能有超越现行标准模型 3 个以外更多类型的中微子。

加拿大 Sudbury 中微子观测站 (SNO) 发布的第一批结果和日本超级神冈的实验结果，对丢失的太阳中微子进行的证据越来越多。这两项实验均系国际合作，得到美国能源部的大力支持。

称为 MINOS 的长基线实验，利用费米实验室中微子主注入器工程建造的设备，寻找具有极小质量的中微子存在的证据。费米实验室新的主注入器作为 MINOS 实验的中微子源，实验的长基线从这里开始，探测器放在 735 公里之外的明尼苏达州北部原 Soudan 铁矿里。(Soudan 矿中现有 1000 吨探测器)

参加 MINOS 实验的科学家们对从费米实验室出来的中微子和到达 Soudan 铁矿中的探测器的中微子的特性进行测量和比较。这两个探测器中中微子相互作用的特点之别提供不同类型的中微子振荡的证据，因此得出中微子质量。

1995 年美国 LANL 的液体闪烁器中微子探测器 (LSND) 发现了缪子中微子变成电子中微子的证据。费米国家实验室有一台探测器称为 MiniBooNE，用来研究这一现象。因为更强的中微子束流，它比 LSND 获得更多的数据。MiniBooNE 的中微子束流由比 LSND 束流短约 10000 倍强脉冲组成。这大大提高了实验将来自自然产生宇宙线相互作用的束流感应中微子事例分开的能力。

现行的理论假设中微子根本就没有质量。中微子具有质量要求对理论进行修改，它起码有助于解释构成 90% 以上宇宙的暗物质。中微子质量以及其他所有轻子和夸克的来源，被认为是由因黑格斯玻色子传递的“黑格斯潮引起的独特相互作用。这个玻色子是费米实验室 TeV 能级加速器大力寻找的目标。如果找不到，可能会在 CERN 的 LHC 上找到。能形成重元素的核反应也能形成大量奇异的亚原子群，即中微子。它们属于轻子粒子群，比如常见的电子， $\mu$  介子和  $\tau$  介子。因为中微子几乎不与普通物质发生相互作用，所以可以通过它们直接看到星体中心，要做到这一点，我们必须能够捕捉到它们并对它们进行研究，物理学家正在朝这个方向努力。

不久前，物理学家还认为中微子没有质量，但最近的进展表明，这些粒子可能也有些许质量，任何这方面的证据也可以作为理论依据，找出 4 种自然力量中的 3 种——电磁、强力和弱力——的共性，即使很小的重量也可以叠加，因为大爆炸留下了大量的中微子。

参考文献：

【1】《物理》第 31 卷 11 期 759 页 2002 年 北京。

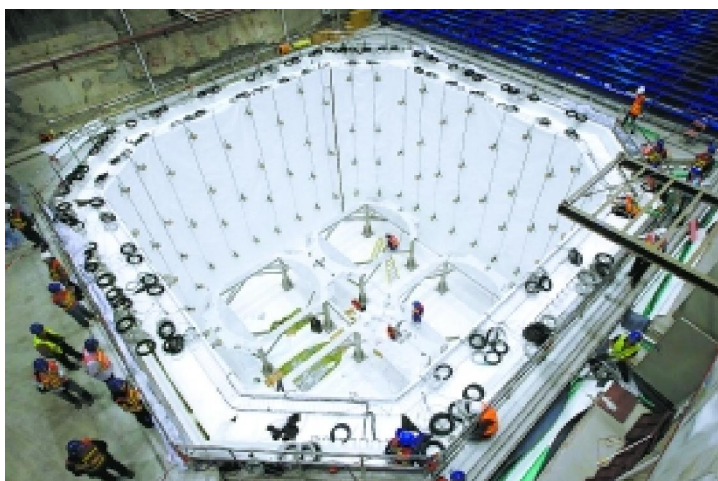
#### 4、太阳中微子失踪之谜

《自然杂志》1 9 卷 4 期的 ‘探索物理学难题的科学意义’的 9 7 个悬而未决的难题：6 4。太阳中微子之谜能否解决？

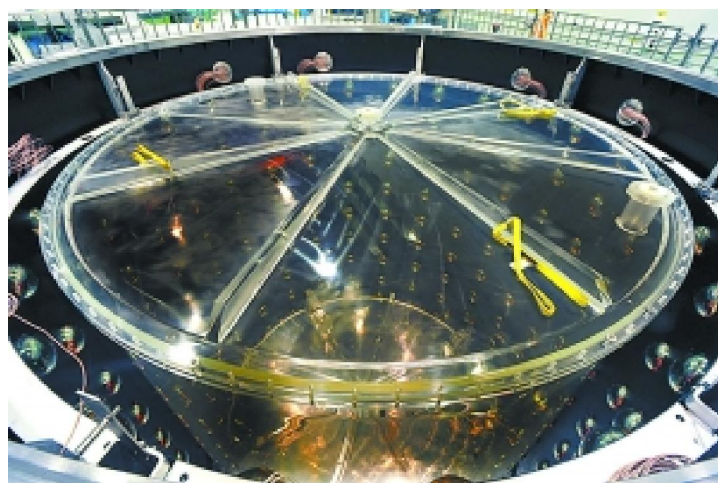
从 1993 年及 1995 年开始运行的水切连科夫探测器和镓探测器，长期对太阳中微子的测量证明，太阳中微子到达地球后确实有很大一部分失踪了。后来科学家又发现，就在大气圈上空产生的中微子，在运行过程中同样有很大一部分失踪了，大多数科学家都同意“味震荡”假说；它是说，中微子有少许静质量，质量本征态与弱作用本征态不简并，不同味道中微子在运行中就允许发生“味震荡”，就是说电子型中微子在运行过程中变成了难以探测的其他“味道”的中微子，为了证明这一假说的可靠性，科学家又把测量的对象对准了人工源（反应堆）中微子，虽然各有说词，但问题的严重性也终于浮出了水面：“震荡假说”如果成立，就会同时存在 5 个佐证：（1）找到可重复检测的双  $\beta$  衰变的观察依据；（2）中微子震荡的运行距离 (L) 具有线性数学结构；（3）高能端的观察事例数大于低能端；（4）可测量的  $\mu$  中微子数量与太阳运动方向相统一；（5）不出现中微子质量平方值为负的事例。然而事实恰好相反，由铃木厚人领导的“卡姆兰德”实验组提供了（2）（3）二项相反的测量依据，其它实验提供了（4）（5）二项相反的依据，第（1）项还没有找到。这就是目前的进展状况，实验能提供的都是证伪“震荡假说”的依据。简单的中微子失踪案向现有的科学理论提出了严重的挑战。

30年前，科学家计算出了从太阳流失的电子中微子的数量，但实际观测到的中微子的数量小于计算值。2001年加拿大萨德伯里中微子观测站的科学家证实了早先一些实验得出的假设：中微子事实上并没有失踪，只是在离开太阳后转化成了 $\tau$ 中微子和 $\mu$ 中微子，因此躲过了科学家的探测。笔者认为这三种中微子可以互相转化，说明它们都是只具有引力质量。中微子质量 $m_\nu$ 的实验测定值是根据相对论公式： $E^2=P^2c^2+m_\nu^2 \cdot c^4$ 来定义的，1966年全球平均的实验数据显示 $m^2(\nu_e)=-27 \pm 20 \text{eV}^2$ 。后来实验上进一步控制 $\beta$ 粒子能量在源中的损失，把1991—1995年间被认为不可靠的9个实验数据排除掉，在2000年的粒子表中给出新的全球平均值， $m^2(\nu_e)=-2.5 \pm 3.3 \text{eV}^2$ ， $m^2(\nu_\mu)=-0.016 \pm 0.023 \text{eV}^2$ ，式中的负号说明中微子的引力质量为负数，实验中观察到的只是其数值，没有考虑到其量纲。现代物理学认为：由于中微子比其它物质粒子的总数多十几亿倍，因此整个宇宙中中微子质量的总和大大超过其它物质的质量总和，占宇宙总质量的99%以上，中微子可能是控制宇宙运动变化的关键性因素。根据引力场的本质是相对space-time的观点，谈论中微子的总质量是没有意义的。

附录：据新华社北京2012年3月8日电(记者 吴晶晶 许林贵)  
大亚湾首次发现新中微子振荡 反物质消失之谜有望破解



科研人员在广东大亚湾反应堆3号中微子实验厅内紧张忙碌(资料图片)。



大亚湾中微子实验在洁净间中组装的中心探测器。新华社发



通往大亚湾中微子实验厅的隧道。

(1)新闻背景: 3月8日下午, 大亚湾反应堆中微子实验国际合作组中方发言人、中国科学院高能物理研究所所长王贻芳研究员向全世界宣布: 大亚湾实验以 5.2 倍标准偏差的置信度 ( $>99.9999\%$ ) 测得中微子混合角  $\theta_{13}$  不为零, 首次实验发现了中微子的第三种振荡模式。由于这一方案具有独特的地理优势和独到的设计, 得到了国际上的广泛支持, 目前汇集了来自中国大陆、美国、俄罗斯、捷克、中国香港和中国台湾等 6 个国家和地区的 200 多名科学家共同参与。据介绍, 大亚湾实验是一个中微子“消失”的实验, 它通过分布在三个实验大厅的 8 个全同的探测器来获取数据。每个探测器为直径 5 米、高 5 米的圆柱形, 装满透明的液体闪烁体, 总重 110 吨。周围紧邻的核反应堆产生海量的电子反中微子, 近点实验大厅中的探测器将会测量这些中微子的初始通量, 而远点实验大厅的探测器将负责寻找预期中的通量减少。在 2011 年 12 月 24 日至 2012 年 2 月 17 日的实验中, 科研人员使用了 6 个中微子探测器, 完成了实验数据的获取、质量检查、刻度、修正和数据分析。结果表明中微子第三种振荡几率为 9.2%, 误差为 1.7%, 从而首次发现了这种新的中微子振荡模式。这项来自中国的物理学发现在世界上引起了轰动, 在不到一天的时间里, 即有 1000 多条海外网络报道和评论, 掀起了一股中微子的热潮。

(2)“宇称不守恒”原来是中微子“捣鬼”——1956 年, 华人物理学家李政道和杨振宁提出了宇称不守恒定律。宇称就是左右方向性。在微观世界中, “左”和“右”是不对称的。比方说, 一辆汽车沿着公路向右方行驶。如果对着镜子做一辆一模一样的车, 这样所有零部件都反过来设计, 方向盘换到右边, 发动机也左右对称地反过来, 然后向左开, 那会怎么样? 在日常生活中, 当然没有任何问题, 反过来的汽车也会像在镜子里看第一辆车一样, 开得好好的。可是到了微观世界, 这辆车居然开不动了, 因为它违背了基本的物理规律, 这个规律就是宇称不守恒。这么匪夷所思的规律, 当然引起了人们的极大兴趣和怀疑。华人女物理学家吴健雄因此马上改变了去欧洲休假的计划, 夜以继日地进行实验, 花了几个月时间, 终于清楚地证明, 钴 60 同位素的衰变过程, 确实是左右不对称的。李政道和杨振宁也因此获得了 1957 年的诺贝尔物理奖, 这是诺贝尔奖史上获奖最快的一次。微观世界的左右为什么会不对称呢? 就在李杨提出宇称不守恒的同一年, 两个美国人柯万和雷因斯找到了中微子。后来人们才渐渐意识到, 这实际上是中微子捣的鬼。1930 年, 奥地利物理学家泡利为了解释贝塔衰变中能量似乎不守恒, 提出可能存在一种看不见摸不着的粒子, 是它偷走了能量。这种粒子不带电, 没有质量, 几乎不与物质发生相互作用, 因此捕捉不到它。泡利自己说: 天啊! 我预言了一种永远找不到的粒子。人们想尽了办法, 终于在 26 年后, 柯万和雷因斯在反应堆附近第一次找到了中微子存在的实验证据。雷因斯获得了 1955 年的诺贝尔奖。中微子极难探测, 曾被人称为“鬼粒子”, 它却像一只看不见的手, 控制着微观世界的基本规律, 甚至是宇宙的起源和演化。它具有很多奇怪的性质, 宇称不守恒, 本质上是因为不存在右旋的中微子, 只有左旋的中微子。既然右旋的中微子都不存在, 如果一个反应涉及到了中微子, 当然就不能发生它的左右镜像过程了。

(3)“中微子消失”缘由是中微子振荡, 第三种模式却一直没找到——在找到中微子后, 人们发现总共有三种不同的中微子, 分别是电子中微子、缪中微子和陶中微子。很多物理过程都能产生中微子, 比如太阳能发光, 是因为太阳内发生着核聚变, 这些核聚变同时也产生着中微子。太阳中微子跟太阳光一样, 向四面八方飞出, 地球上指甲盖大小的地方, 每秒钟就会落下 600 亿个太阳中微子。反应堆发电的能量来自核裂变, 它同样产生大量的中微子, 大亚湾核电站的 6 个反应堆, 每秒钟产生 35 万亿亿个中微子。宇宙起源于 137



亿年前的一次大爆炸，在第一秒钟就产生了无穷多的中微子，它们一直存留到现在，地球上指甲盖大小的地方，每秒钟就会落下 10 万亿个宇宙大爆炸残留的中微子。当柯万和雷因斯在反应堆边寻找中微子的时候，另一个美国科学家戴维斯开始在地下 1500 米的一个废旧金矿中寻找来自太阳的中微子。去这么深的地底下，是为了屏蔽地面上宇宙线对实验的干扰。由于太阳离我们太远，所以到达探测器的中微子远不如在反应堆附近的多，戴维斯比雷因斯晚了很多才看到太阳中微子。不过他发现了一个奇怪的现象，太阳中微子的数量只有预期的三分之一，这个困扰科学家几十年的问题，称为“太阳中微子失踪之谜”。在宇宙中，有很多能量非常高的宇宙射线，它们进入地球的大气层后，会打出中微子，称为大气中微子。从上世纪 80 年代起，人们就发现大气中微子似乎没有我们预计的多，称为“大气中微子反常”。1998 年，日本的超级神冈实验以确凿的证据，证明中微子存在振荡现象，一种中微子，能够在飞行中变成另一种中微子，然后再变回来。太阳中微子和大气中微子的丢失，都是因为它们变成了其它种类的中微子。更多的实验也证实了这个发现。戴维斯和超级神冈的领导者小柴昌俊获得了 2002 年的诺贝尔奖。根据中微子振荡理论，大气中微子振荡和太阳中微子振荡，对应着两个中微子混合角 23 和 12。还应该存在第三种振荡模式，对应中微子混合角 13。这个振荡小得多，因此一直没有找到，但是它关系到中微子物理的未来发展，也跟宇宙起源相关。因此引起了科学界的极大关注。

(4) 大亚湾场地佳精度高，引来众多合作者——从 2003 年起，中国的物理学家就开始规划利用大亚湾核电站发出的中微子来寻找这第三种振荡模式，测出 13。由于科学意义重大，世界上先后有 7 个国家的 8 个小组提出了类似的计划。大亚湾核电站的总功率世界第二，能发出更多的中微子，同时紧临高山，适合建立地下实验室，排除来自宇宙线的干扰，是世界上测量 13 的最佳场所。中科院高能所提出的实验方案，是世界上精度最高的，因此吸引了众多的国际合作者。美国也放弃自己的两个方案，转而加入大亚湾实验。经过八年的准备和建设，挖了 3 公里的隧道，建立了三个地下实验厅，研制了 8 个 110 吨重、却异常精密的中微子探测器，放置在实验厅内巨大的水池中。大亚湾实验的第一个实验厅于 2011 年 8 月 15 日开始运行。四个月后，三个厅全部投入运行，开始获取有意义的物理数据。又过了三个月，研究人员不分昼夜地分析实验数据，只用了 55 天的数据，就发现远厅的中微子数丢失了 6%，以确凿的证据证明 13 不为零。13 的大小大约在 9 度左右，虽然比另外两个混合角小得多，但却比我们最初预计的要大得多！诺贝尔奖获得者李政道、卡罗·鲁比亚教授以及十几位各大实验室负责人和粒子物理实验的发言人向中国高能物理研究所发来贺信。李政道先生说：“这是物理学上具有重要基础意义的一项重大成就！”大亚湾实验能够捷足先登，某种意义上可以说是运气不错。去年日本的大地震，不仅震出了福岛核事故，也震坏了 T2K 实验的加速器，直到今年才修好。和大亚湾同时起步的法国和韩国的实验规模只有大亚湾的四分之一，建设周期短，如果 13 这么大的话，他们是可抢先的。不过，运气只会光顾不懈拼搏的人。为了赢得国际竞争，大亚湾人从没有节假日的概念，每天两班倒工作 16 个小时。有的研究人员经常连续工作 30 多个小时。

(5) 新发现为破解“反物质消失之谜”开辟蹊径——大亚湾实验的发现让所有研究中微子的科学家都感到兴奋。即使是大亚湾的竞争对手、日本 T2K 实验的发言人小林隆和郑章基教授也来信祝贺，表示：“中微子振荡实验的光明前景令人激动不已。有了这个大的 13 混合角，若上天继续眷顾我们，或许在我们有生之年可以揭开物质层次和 CP 破坏的奥秘。”美国《科学》杂志在线版“科学此刻”栏目发表文章《中国物理学家揭露中微子测量的关键》，评价：“此次成果完成了一幅中微子的概念图”，并称“这为‘中微子与反中微子行为间不对称’的实验铺平了道路。其将可以解释为何现在的宇宙中有如此多的物质，却只有那么一丁点的反物质这一问题”。原来，宇宙起源中的物质与反物质不对称很可能与它有关。当宇宙大爆炸发生时，根据粒子物理规律，正反物质应该成对产生，是一样多的。可是我们现在的宇宙中，并没有发现大量反物质存在的迹象。那么反物质哪里去了？中微子存在振荡现象，同时意味着可能存在另一种不守恒，即电荷—宇称不守恒，就是上文说到的 CP 破坏（电荷用 C 表示，宇称用 P 表示）。李政道和杨振宁发现了宇称不守恒后，人们发现电荷和宇称乘起来一般来说却是守恒的，但也有很少的例外，称为 CP 破坏。如果存在大的 CP 破坏，那么在宇宙早期，反物质就有可能衰变得更快，导致现在的宇宙中只剩下了正物质。不过 CP 破坏很难测，现在还没有发现中微子的 CP 破坏现象。如果 13 很大，那么我们就可以设计实验，去测量 CP 破坏的大小，破解宇宙的奥秘。当然，这个发现对中微子研究的其它方方面面也有着重要影响。比如，我们将更容易确定三种中微子哪个最轻，哪个最重，也许会更难确定中微子是不是它自己的反粒子，等等。

（作者为中国科学院高能物理所研究员）

#### 作者 (Author):

李学生 (Li Xuesheng), 男, 山东大学副教授, 理论物理教师, 中国管理科学院学术委员会特约研究员、北京相对论研究联谊会会员, 中国民主同盟盟员, 中国科学院高能物理所研究员。2002 年撰写的论文《数学

归纳法的拓广》在《济南教育学院学报》上发表, 2004年8月撰写的理论物理学论文《引力质量与电磁质量之间的关系新探》在北京相对论研究联谊会第三届年会上发表, 得到了与会专家的初步认可; 2005年12月至今我撰写的论文《现代理论物理学的九个问题》、《真空不空》、《以太的发展史》在《香港新科技杂志》上发表。2007年在《格物》上发表论文《暗物质、暗能量和宇宙常数问题》; 2007年12月在《新科技》(香港)杂志上发表论文《以太的发展史》; 2002年在《山东师范大学学报(自然科学版)》教学科研上发表《在物理教学中注意培养科学美的观念》; 多篇有关文章在学术争鸣杂志 (Academia Arena, <http://www.sciencepub.net/academia>)上发表。 [xiandaiwulixue@21cn.com](mailto:xiandaiwulixue@21cn.com), [1922538071@qq.com](mailto:1922538071@qq.com)。

### 主要深入理解阅读的部分文献:

1. [日] 浅野四郎 浅野诚一 著 师华译。《狭义相对论的新图示法——space-time 圆图法——》 高等教育出版社 1992年版。
2. 《介质浮力存在的普遍性》 段灿光著 本文集。
3. 《没有太阳辐射, 大气将静止吗?》 段灿光著 本文集。
4. 《以太浮力论》 段灿光著 本文集。
5. 《再论以太浮力 —— 关于万有引力变化的讨论》 段灿光著 本文集。
6. Baidu. <http://www.baidu.com>. 2016.
7. Google. <http://www.google.com>. 2016.
8. H.C. 瓦尼安, R. 鲁菲尼, 引力与时空, 科学出版社, 北京, 2006, pp150-153.
9. Ma H, Cherng S. Nature of Life. Life Science Journal 2005;2(1):7 - 15.
10. Ma H. The Nature of Time and Space. Nature and science 2003;1(1):1-11. Nature and science 2007;5(1):81-96.
11. National Center for Biotechnology Information, U.S. National Library of Medicine. <http://www.ncbi.nlm.nih.gov/pubmed>. 2015.
12. Wikipedia. The free encyclopedia. <http://en.wikipedia.org>. 2015.
13. 狄拉克。《现代物理学参考资料》第3集[C]。科学出版社, 1978.38。
14. 王存臻、严春友 著。《宇宙全息统一论》山东人民出版社 1995年版。
15. 《彗星漫谈》 徐登里编著 32K、P107 1975年7月科学出版社。
16. 《数学在天文学中的运用》 刘步林编著 32K、P316 1979年9月科学出版社。
17. 《中国大百科全书·天文学》 主编: 张钰哲 1980年12月中国大百科全书出版社。
18. 《哈雷彗星今昔》 张钰哲著 32K、P97 1982年3月知识出版社。
19. 《天体力学浅谈》 [苏]尤·阿·里五波夫著, 李五行、陈晓中译 32K、P201 1984年11月科学普及出版社。
20. 《地学基本数据手册》 主编: 张家诚, 副主编: 李文范 16K、P1377 1986年3月海洋出版社。
21. 《彗星十讲》 胡中为、徐登里编著 32K、P158 1986年4月科学出版社。
22. 《中国百科年鉴·1986》 1986年10月中国大百科全书出版社。
23. 《简明天文学词典》 叶叔华主编 32K、P880 1986年12月上海辞书出版社。
24. 《中国百科年鉴·1987》 1987年12月中国大百科全书出版社。
25. 《哈雷彗星及彗星-地球关系》 天地生综合研究论文集 胡中为、阎林山 16K、P471. 1989年11月中国科学技术出版社。
26. 1995年6月21日 《中国青年报》。
27. 1997年12月19日 《中国科学报》。
28. Einstein 著, 方在庆、韩文博、何维国 译。《Einstein 晚年文集》 海南出版社 2000年3月第1版。

5/4/2017