

神秘的中微子

0572

A

◆王贻芳

中微子^[1]是近年来科学界的热门话题之一,2001年加拿大萨德伯里中微子天文台(SNO)的观测结果和2002年SNO与日本KamLAND实验的结果,均证实中微子可以发生振荡,即中微子质量不为零。这在科学上具有重要意义,它要求修改粒子物理的标准模型,预示着存在超出标准模型的新物理,如轻子数不守恒、质子衰变等。因此,中微子物理的进展连续两年被美国的《科学》周刊等国内外媒体评为当年十大科技新闻。2002年由于在“探测宇宙中微子”上的贡献,美国化学家戴维斯(R.Davis,Jr.)与日本物理学家小柴昌俊(Masatoshi Koshiba)获得诺贝尔物理学奖。

由于中微子是最轻的粒子,是所有粒子衰变的最终产物,宇宙中积存了大量自大爆炸开始以来产生的中微子,它们可以构成宇宙中的热暗物质,对宇宙结构的形成有重要影响。中微子振荡中的CP(空间与电荷共轭反演)破缺可能对理解宇宙中的物质-反物质不对称现象起关键作用。中微子也具有相当的应用价值,如作为探针研究遥远星系或地球深处,已发展成为中微子天文学与中微子地质学。

中微子及其基本性质

1930年,泡利(W.Pauli)为了解释原子核 β 衰变时能量似乎不守恒的问题,提出了一个猜想,认为是一种不可探测的中性粒子带走了能量。这种粒子随后被费米(E.Fermi)叫做“中微子”,以区别于中子。虽然泡利的这个猜想只是以一封私信的形式提出且从未正式发表文章,但由于费米 β 衰变理论的巨大成功,中微子很快被广泛接受。物理学家探测中微子的尝试在随后

的二十多年中从未间断,但受条件限制,绝大部分测量是间接的。其中最重要的成果之一是由中国科学家王淦昌提出的实验方法,即从原子核K俘获过程中证明中微子的存在,该实验最后是由美国人艾伦(J.S.Allen)完成。

1950年代,莱因斯(F.Reines)和考恩(C.Cowan)试图用质子反 β 衰变($\nu_e + p \rightarrow e^+ + n$)来直接探测中微子。他们计划用400公斤掺杂了氯化镉($CdCl_2$)的水作靶,测量正电子湮没而产生的两个0.511兆电子伏 γ 光子,以及大约15微秒后中子被镉俘获后所产生的几个总能量为9.1兆电子伏的 γ 光子。当时他们最大的问题是寻找所需强度的中微子源。莱因斯曾与费米讨论过利用原子弹爆炸后产生的中微子,但经过慎重考虑还是放弃了这个想法,最终采用了当时刚出现不久的反应堆。1956年,他们十分清楚地直接探测到了中微子,莱因斯因此获1995年诺贝尔奖。此后中微子实验研究得到很大发展。1960年代初,斯坦伯格(J.Steinberger)等发现存在两种中微子:电子中微子和 μ 子中微子,斯坦伯格因此获得1988年诺贝尔奖。1990年,位于瑞士日内瓦欧洲核子中心的大型正负电子对撞机发现有且只有三种中微子:电子中微子(ν_e)、 μ 子中微子(ν_μ)和 τ 子中微子(ν_τ),分别对应于三代轻子:电子(e)、 μ 子(μ)和 τ 子(τ)。

1950年代初,杨振宁等提出了弱相互作用中的V-A理论,假设中微子质量为零。V-A理论随后被电弱统一理论所继承,成为粒子物理标准模型的一部分。中微子质量是否绝对为零至关重要,它会影响到轻子数守恒、质子衰变、宇宙中的热暗物质以及宇宙结构等,因此,中微子质量问题一直是粒子物理学家与天体物理学家共同关心的热点问题。但由于中微子几乎不与任何物质发生作用,很难被探测到,其质量就难以测量了。到目前为止,测量中微子质量的最好结果

王贻芳:研究员,中国科学院高能物理研究所,北京100039。

Wang Yifang: Professor, Institute of High Energy Physics, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100039.

是由德国曼因兹(Mainze)大学的一个小组,通过测量氚的 β 衰变(${}^3\text{H}\rightarrow{}^3\text{He}+e^{-}+\nu_e$)能谱的最大端点而得到的。他们测得,在95%的置信度下中微子质量的平方小于2.2电子伏²。

1960年代初,费米的学生、意大利物理学家蓬泰科尔沃(B.Pontecorvo)提出,如果中微子有质量且其质量本征态与弱作用本征态不简并,由量子力学波函数的叠加可推知,不同的中微子之间可发生振荡,即一种中微子在飞行过程中变为另一种中微子。其在真空中的振荡(即一种中微子在飞行过程中变为另一种中微子)的概率可写为:

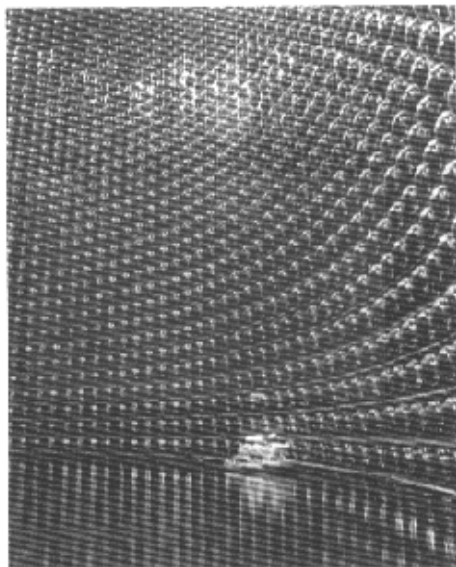
$$P = \sin^2 2\theta \sin^2(1.27\Delta m^2 L/E)$$

其中, E 为中微子能量, L 为飞行距离, Δm^2 为两种中微子质量平方差, $\sin^2 2\theta$ 为最大振荡概率。振荡在粒子物理中是一个相当普遍的现象,起源于微观粒子的波粒二象性。对于三代中微子,其振荡概率可写成矩阵形式,称作MNS(Maki-Nakagawa-Sakata)矩阵,这类似于夸克中的CKM矩阵。中微子振荡迅速引起人们的兴趣是因为它提供了一种证明中微子质量不为零的方法。例如由中微子在真空中的振荡概率公式可知,在两种中微子质量平方差约为0.001电子伏²,中微子能量为3兆电子伏时,在距离为1000米左右的地方应能测得中微子振荡。这比前述由氚的衰变测量中微子绝对质量的方法灵敏度高了好几个数量级,虽然它只能得到不同中微子质量之差。除此之外,与CKM矩阵类似,MNS矩阵中也存在一个CP破缺项。目前人们已知这种CP破缺与物质-反物质不对称有关,而CKM矩阵中的CP破缺项太小,不足以解释宇宙中为什么不存在一个反物质世界,因为“大爆炸”宇宙学的一个自然结果就是宇宙中应存在相同数量的物质与反物质。MNS矩阵中的CP项似乎可以解决这个难题,这是中微子振荡引起人们兴趣的另一个重要原因。

太阳中微子

1960年代初,美国普林斯顿高等研究院的巴卡尔(J.Bahcall)提出了一个完整的太阳模型,定量计算出太阳上发生的各种聚变反应所辐射出来的能量(包括中微子携带的能量)。为了验证巴卡尔提出的太阳模型,美国布鲁克黑文国家实验室的化学家戴维斯领导了一个小组来测量太阳核聚变中产生的中微子,即通过反 β 衰变($\nu_e+{}^{37}\text{Cl}\rightarrow{}^{37}\text{Ar}+e^{-}$)中产生的 ${}^{37}\text{Ar}$ 数来推算太阳中微子数。他将600吨含氯的工业溶剂置于3000米深的地下矿井中,通过化学方法提取反应产物 ${}^{37}\text{Ar}$ 。

戴维斯于1968年首次发表了令人吃惊的实验结



超级神冈探测器内部 超级神冈探测器包含上万只光电倍增管。

果,即观测到的太阳中微子只有巴卡尔预言的理论值的1/3,这就是有名的“太阳中微子丢失”之谜。在随后的30年中,戴维斯共探测到约2000个太阳中微子,结论仍然没变。当时对此有多种解释,太阳中微子发生振荡,即由电子中微子变成 μ 子中微子或 τ 子中微子,是其中的一种解释。依此解释,由中微子在真空中的振荡概率(实际的公式还要复杂一些),人们还不能得出 $\sin^2 2\theta$ 与 Δm^2 的唯一解,而是有4组解,习惯上分别称作“大角度混合解(LMA)”、“小角度混合解(SMA)”、“真空解(Vacuum)”和“低端解(LOW)”。

随后许多类似的实验均证实了戴维斯的结论,如意大利的Gallex实验和苏联的Sage实验,只是探测中微子用的材料不是Cl而是Ge。由日本科学家小柴昌俊领导的神冈实验在1980年代中期建造了一个类似于美国IMB实验室的水基契伦科夫成像探测器,也观测到类似结果,并于1987年与IMB一起首次观测到超新星爆发产生的中微子。只是这些实验只能证明探测到的太阳中微子比理论预言的少,而不能确定到底是由于中微子振荡还是太阳模型出了问题引起的。由于首次观测到“太阳中微子”,戴维斯获得2002年诺贝尔物理学奖可以说是当之无愧。小柴昌俊对“探测宇宙中微子”也有很大的贡献,但他真正的贡献在于证实中微子振荡。

太阳中微子问题的真正突破出现在2001年与

2002年。加拿大的SNO实验用1000吨的重水(D₂O)来同时测量三种中微子,获得了电子中微子消失及 μ 子中微子和 τ 子中微子出现的证据,且三种中微子数之和与巴卡尔的标准太阳模型预言一致^[2]。由于太阳中的核聚变只能产生电子中微子,因此新出现的其余两种中微子只能是由电子中微子振荡(或其他机制转换)而来。这个极为巧妙的方法是1985年由美国加州大学尔湾分校的华裔物理学家陈(H.Chen)提出的,可惜他在1987年去世,未能看到SNO成功的这一天。

大气中微子

中微子振荡的第二个实验证据即所谓“大气中微子反常”。主要由 π 衰变而来的大气中微子应满足: $\nu_\mu/\nu_e \approx 2$,即 μ 子中微子数应约为电子中微子数的两倍。自1970年代以来,许多实验均发现这一比例接近于1(误差很大)。由小柴昌俊领导的神冈实验也发现了类似结果(误差稍小)。神冈实验并非首创,也未取得突破性成果,其实验的最初目的——寻找质子衰变更是至今尚无结果。小柴昌俊的贡献在于他锲而不舍,在证实了“太阳中微子丢失”和“大气中微子反常”后,又建了一个比原来的探测器大10倍,总重达5万吨的超级神冈(Super-Kamiokande)探测器。经过近二十年的不懈努力,终于在1998年,获得了激动人心的结果,即 $\nu_\mu/\nu_e \approx 1$ 是由于 ν_μ 消失了,且其消失的百分比随能量与飞行距离的关系与理论预言基本相符^[3]。虽然其他解释还不能排除,但中微子振荡似乎是最自然,也是最可能的一种解释。这也是当年十大科技新闻之一,自此以后中微子振荡为越来越多的人所相信,圈内人士也开始期待小柴昌俊获诺贝尔奖。

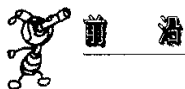
由于中微子很难探测,历史上有关中微子振荡的实验结果经常真假难辨。如莱因斯和法国的Bugey实验分别在1979年和1984年先后“发现”反应堆中微子消失,即中微子振荡现象;苏联在1980年代也曾宣布由 β 衰变测得中微子的绝对质量,这些结果随后被证明是错误的。目前人们对美国LSND实验所发现的加速器中微子振荡仍然存疑。而太阳中微子(电子中微子消失)与大气中微子(μ 子中微子消失)问题分别都有独立验证,因此结果是可信的。2002年诺贝尔物理学奖授予戴维斯和小柴昌俊,以表彰他们对天体物理学,特别是对“探测宇宙中微子的贡献”,这是因为虽然太阳与大气中微子问题都可以用中微子振荡来解释,但其他解释仍不能完全排除,所以诺贝尔奖委员会避免提及中微子振荡,尽管大家都明白这才是他们真正的贡献所在。

反应堆中微子

到目前为止,所有中微子振荡的实验证据均来源于大自然,因此中微子振荡在某种程度上依赖于人们对大自然的理解,如太阳模型、宇宙线在大气中的簇射过程等。所以从人工中微子源中探测到中微子振荡才是它的最终证明。候选的人工中微子源有两类,一是加速器,一是反应堆。1990年末期,日本的KEK实验室用12吉电子伏质子打靶产生中微子,并由超级神冈探测器探测,可惜由于超级神冈探测器的光电倍增管爆炸事故而未能获取足够的信息。虽然他们似乎看到中微子振荡的现象,但其统计显著性只有两倍均方误差,而一般物理发现均需3倍以上均方误差,即99.8%的统计显著性。

反应堆中微子实验自1980年代初开始,已进行了好几代。最早的开创者是吴健雄的学生,美国加州理工学院的贝姆(F.Boehm)教授。自ILL实验开始,发展至Chooz和Palo Verde实验,这些实验的探测原理与方法与莱因斯所用的基本一样,只是靶由水换成了液体闪烁体,由于事例率与距离平方成反比,与靶核数成正比,探测器与反应堆的距离也由10米增至1000米,重量也由100公斤增至10吨。实验的方法是观测反应堆由裂变过程所产生的电子反中微子数,并与预期的中微子数比较,如果发现中微子消失现象,则说明反应堆产生的电子反中微子发生振荡,变成了另一种中微子而没有被探测到。由于过去20年的不懈努力,人们对反应堆所产生的电子反中微子谱了解得很清楚,理论计算与实验比较只有3%的误差。

1994年,当超级神冈决定立项的时候,日本东北大学的铃木厚人(Atsuto Suzuki)教授就在思考神冈所在山洞的出路。到1996年他完成了一个非常大胆的KamLAND实验计划,即建一个世界上最大的液体闪烁探测器,包括周围由水构成的屏蔽层,总共5000吨液体,比当时正在建造中的Palo Verde探测器大了100倍!它可以测量周围180千米开外日本和南韩20多个核电站反应堆的中微子,这些核电站的发电量占全世界核电站的1/5左右。这个实验对 Δm^2 的灵敏度将提高100倍,与太阳中微子振荡的大角度混合解刚好一致,因此可能对太阳中微子问题给出最终回答。随后美、中等国共十几个单位近100位物理学家(包括笔者在内)相继参加。其探测目标不仅包括反应堆中微子,也包括太阳中微子、地质中微子和超新星中微子等^[4]。自1997年开始建造,KamLAND探测器于2001年全面建成。合作组在2002年12月6日的文章中^[5],



报告了引起全球媒体和圈内人士的关注, 并被评为了 2002 年十大科技新闻的重要结果; 约 40% 的反应堆中微子消失了, 或者说振荡为另一种中微子而没有被探测到。由于中微子是反应堆与太阳唯一共同的东西, 因此中微子消失现象只能用中微子本身的性质来解释。并且, 太阳中微子振荡的“大角度混合解”可以定量解释所有观测到的数据。因此可以肯定地说, 太阳中微子发生了振荡, 巴卡尔的标准太阳模型是正确的, 中微子是有质量的。至此中微子振荡得到最终的确认。

中微子应用

虽然基础研究一般不考虑应用, 但由于中微子的特殊性质, 它常常成为科幻作品的主角, 如前些年曾有过中微子通讯的说法。固然由于中微子极难探测而限制了其应用, 但中微子不带电, 不会像带电粒子一样被物质阻挡和磁场偏转, 也不会像光子和带电粒子一样, 与宇宙背景辐射相互作用。因此用中微子作探针, 可以直达宇宙深处或地心深处, 在天文与地质方面有广泛用途。

迄今为止, 天文学研究对象基本上是天体辐射的电磁波。最早利用的是可见光, 以后每一个新波段的引进均会给天文学界带来极大的震撼。中微子携带天体的许多信息, 也将极大地推动天文学的发展。自戴维斯 1960 年代末首次探测到太阳中微子以来, 中微子天文学对太阳物理、超新星、 γ 暴、宇宙线起源与加速机制、宇宙起源等方面的研究均起到关键作用。目前国际上中微子天文学尚处在起步阶段, 多个大型装置正在兴建或刚刚建成, 如美国在南极冰下所建的 AMANDA, 以及尚待建造的 ICECUBE、希腊在海底深处所建的 NESTOR、法国在海底深处所建的 ANTARES 等, 这些探测器均有一特点, 是利用冰或海水作为探测介质, 以获得巨大质量, 这是由中微子极难探测的特性所决定的。可以相信在不远的将来, 这些实验一定会取得丰硕的成果。

中微子地质学可以说是自 2002 年 KamLAND 实验开始的。地球的地壳、地幔, 甚至可能在地心都含有大量的铀与钍元素, 其含量及二者之间的比例反映了地球及行星的形成与演化的历史与规律, 对它们的测量是研究地质学和探索地球深处奥秘的一个重要, 有时也是唯一的手段。铀和钍均可通过级联衰变产生中微子, 其能量在 2.6 兆电子伏以下。KamLAND 实验在前述反应堆中微子实验中, 观测到 9 个地球本身发出的地质中微子, 5 个来源于铀, 4 个来源于钍。虽然这一数据还不足以说明太多地质学问题, 但这是人类首

次探测到地质中微子。再比如, 地球磁场随时间变化, 甚至南北极倒转是地质学上一个令人困惑的问题。过去一般认为这是由于地心含有铁质流体的缘故。最新的理论认为这是由于地心含有高密度铀元素缘故, 它们构成天然核反应堆, 其启动和关闭会造成地磁场的变化。这个理论即可由中微子来验证。再如, 中微子振荡概率与其通过的物质密度有关, 为完整测量其振荡概率, 需进行长基线实验, 即加速器中微子源与探测器直线相距 2000 千米以上。这类实验目前国际上已在筹划, 如果成功则可以得知中微子的振荡几率, 再进一步则可通过此方法测量中微子通过地段的物质密度。如果全球共有三四个源和探测器, 通过不同路径组合, 则可分别获得地球不同深度处, 如地壳、地幔甚至地心的密度。这也许是获得地球内部信息的唯一方法。也有人提出用超新星中微子给地球作全息照像。可以肯定的是, 与中微子天文学一样, 中微子地质学将会得到飞速发展。

中微子的另一个应用即核反应堆的安全监测。核电站的燃料可生产出制造原子弹的原料——钚, 因此国际原子能机构必须对无核国家的核燃料进行安全监测。过去一般方法为摄像、贴标签、人员现场视察等, 不能做到实时和远程监控。由于反应堆在运行过程中会释放出大量中微子, 通过建造一个中微子探测器, 可以实时监测反应堆的运行, 防止有人偷换燃料^①。该方法目前已在实验阶段, 如果成功, 可以很快投入实用。也许这是有关中微子的第一个专利。

中微子研究需解决的问题

中微子研究是当前粒子物理、天体物理和宇宙学研究的前沿热点, 近年来中微子物理研究的一系列重大成果预示着粒子物理研究的新突破。中微子物理正处于一个大发展时期, 它对天文学、地质学等其他学科的应用价值正在被越来越多的人所认识。当前需要解决的主要有以下两个问题。

中微子的绝对质量 中微子振荡只解决了不同中微子之间的质量差, 并不能给出绝对质量。这需要更高精度的氚 β 衰变实验或全新的实验方法, 如超新星中微子实验等天体物理方法。目前已有德国的下一代氚 β 衰变实验正在计划之中, 预期可将灵敏度提高近十倍。另一个与中微子绝对质量有关的量就是原子核无中微子双 β 衰变的寿命。如果这类事例能被观察到的话, 则不仅可得知中微子的绝对质量, 也可以证明中微子具有新的手征特性。

中微子振荡的物质效应与 MNS 矩阵 理论上中

微子振荡几率与物质密度有关,但其实验证明是至关重要的。另一方面,在MNS矩阵的6个独立参数中,目前仅知道四个,还有两个未知,其中包括最重要的CP破缺量。这需要超过2000千米距离的长基线加速器中微子振荡实验。目前已有美国、日本、欧洲等国积极地开始考虑加速器方案,同时还有许多物理学家包括中国物理学家在内在考虑探测器的设计方案。这是未来中微子物理发展的主要方向之一。

中微子是一个极为神秘的粒子,自其被定名后的70多年以来,人们对它的了解极为有限。自从发现中微子振荡以后,可以说它的神秘面纱已逐渐被揭开,随着科学的不断发展,人们一定会彻底了解它,并充分利用其特殊性能,在交叉学科与相关应用上取得突破。

[1] <http://www.hep.anl.gov/ndk/hypertext/nuindustry.html>
 [2] Direct Evidence for Neutrino Flavor Transformation from Neutral-Current Interactions in the Sudbury Neutrino Observatory. *Phys Rev Lett*, 2002, 89: 011301
 [3] Evidence for oscillation of atmospheric neutrinos. *Phys Rev Lett*, 1998, 81: 1562
 [4] Wang Y F. *Proc of 29th inter conf of High Energy Physics*, World Scientific, Singapore, 2000
 [5] First Results from KamLAND: Evidence for Reactor Anti-Neutrino Disappearance. *Phys Rev Lett*, 2003, 90: 021802
 [6] Bernstein A, Wang Y F, Gratta G, West T. Nuclear Reactor Safeguards and Monitoring with Anti-Neutrino detectors. *J App Phys*, 2002, 91: 4672

关键词: 中微子 振荡 中微子质量

跟踪·扫描

一种新的太阳能
光电转换装置

据英国 *Nature*, 2003, 421: 586 报道,美国科学家最近发明了一种新的非硅太阳能光电转换装置。这个装置具有多层结构,最上一层是一种染料分子用来吸收光子,它们吸附在一层金膜的表面,然后是一层二氧化钛(TiO₂)半导体,最后一层是二氧化钛载体。

金膜和二氧化钛半导体之间存在一个自发形成的局域电场,这个局域电场产生一个电势势垒,叫肖特基(Schottky)势垒。当光照到染料上时,染料分子释放出电子,电子注入到金的导带上。若使该装置产生电流,电子须穿越肖特基势垒到达二氧化钛的导带上,然后再传送到二氧化钛载体里。二氧化钛载体是电流收集器,电流从这里被送到外电路去。染料中不断失去的电子由金膜补充。这个装置有很高的电流生成量子效率,染料层吸收的大约10%的光子能够产生电流。

科学家解释道,受激染料使注入电子被加热,因而具有额外的迁移能。如果这些电子以弹道方式穿过金膜(即动量不改变),电子就可保持原有能量而穿过肖特基势垒到达二氧化钛层。若电

子在到达 Au-TiO₂ 结点之前已经冷却,则不能穿过势垒,因而无法产生光电流。弹道式模型在电子传输距离为20~50纳米的情况下似乎是合理的。另外一种可能的解释是,染料层将能量传给金膜,使电子在金膜中被激发,然后再注入到二氧化钛导带上产生电流。

由于在这种新装置中电流的产生主要基于大量载流子(电子)的生成,因此它不像传统光电转换装置那样对半导体材料的杂质和缺陷那么敏感。另外该装置的敏化染料层可自动再生,因而无需其他附加装置。科学家正通过引入光子阱结构以增强光的收集能力等方法使该装置达到实际应用水平。

(桂 华)

2002/2003 年度的
沃尔夫数学及物理学奖

2003年初,沃尔夫基金会公布了2002/2003年度的沃尔夫数学奖,奖给日本数学家佐藤干夫和美国数学家泰特(J.Tate)。

佐藤生于1928年,1952年由东京大学毕业,1963年获博士学位,1970年起在京都大学工作,1992年退休。佐藤的主要成就是创立一个全新领域——代数分析。其起点是他创造的“超函数理论”。超函数是广义函数(法文直译为分布)的推广,它同傅里叶积分算子一

起是线性偏微分方程理论的主要工具,后进一步发展成“微局部分析”,其对象是余切丛上微函数的层,此研究方法涉及同调代数,故名代数分析。整个理论在数学物理中有重要应用,特别是发展了和乐量子场论以及孤子方程的统一理论。这一切完全是日本人的独创。

泰特的主要研究方向是代数数论以及算术代数几何。他生于1925年,1950年在普林斯顿大学获博士学位,指导教师是大数学家阿廷(E.Artn)。1954年起,泰特在哈佛大学任教,1959年升为教授,直至1990年后转到得克萨斯大学任教。他是美国科学院院士,法国科学院国外院士,曾荣获美国数学会的科尔奖。泰特的博士论文是具有很大影响的经典文献,其中引进了傅里叶分析方法,1952年他又引入群上调方法,这两套方法改变了代数数论的方向。其后他又引入许多概念及方法影响数论的发展。

2002/2003年度的沃尔夫物理学奖,奖给哈佛大学的哈尔佩林(B. Halperin)和伊利诺伊大学的列盖特(A. J. Leggett)在凝聚态物理学广泛而重要的工作。哈尔佩林主要是研究2维熔化的无序系统以及强相互作用电子,列盖特主要研究He的轻同位素的超流现象以及宏观量子现象。

(胡作玄)

神秘的中微子

作者: [王贻芳](#)
 作者单位: [中国科学院高能物理研究所, 北京, 100039](#)
 刊名: [科学](#) PKU
 英文刊名: [SCIENCE](#)
 年, 卷(期): 2003, 55(2)
 引用次数: 0次

参考文献(6条)

1. [查看详情](#)
2. [Direct Evidence for Neutrino Flavor Transformation from Neutral-Current Interactions in the Sudbury Neutrino Observatory 2002](#)
3. [Evidence for oscillation of atmospheric neutrinos 1998](#)
4. [Wang Y F Proc of 29th inter conf of High Energy Physics 2000](#)
5. [First Results from KamLAND: Evidence for Reactor Anti-Neutrino Disappearance 2003](#)
6. [Bernstein A. Wang Y F. Gratta G. West T Nuclear Reactor Safeguards and Monitoring with Anti-Neutrino detectors 2002](#)

相似文献(10条)

1. 期刊论文 [何景棠. He Jingtang 中微子质量和中微子振荡实验 -物理学报2001, 21\(2\)](#)

本文介绍中微子质量测量的历史和现状。介绍太阳中微子丢失实验的结果和大气 μ 中微子丢失实验结果。这些结果表明存在中微子振荡, 即中微子具有质量。它是超出标准模型信号。本文还介绍了21世纪初研究中微子振荡的若干重要实验, 例如长基线中微子振荡实验以及建造 μ 子贮存环来产生高能电子中微子束进行中微子振荡的实验以及测量中微子振荡时的CP破坏的设想。

2. 学位论文 [陈伯伦 中微子实验和振荡参数分析的若干研究 2008](#)

宇宙大爆炸初期, 中微子已经大量的存在了。由于中微子本身质量非常小, 不带电, 只参加弱相互作用, 反映截面非常小, 因此, 大量的中微子长时间的存留下来。除了大爆炸后遗留下来的中微子, 宇宙中还存在广泛的中微子产生源, 例如超新星爆发, 恒星内部核反应, 宇宙射线以及地球上各种物质的衰变过程等。但是由于与物质的作用截面非常小, 中微子的探测非常困难, 因此我们对中微子的认识仍然很肤浅。自从Pauli提出中微子假说至今已经有70多年的时间了, 中微子依然是萦绕在科学家头脑中的难题。

现在我们知道存在三代中微子, 最早电子味的中微子在1956年通过反应堆实验被探测到。而放射性化学实验Homestake对太阳产生的电子味中微子进行探测, 发现电子味中微子在传播到地球的过程中发生了缺失现象。随后进行的一系列实验均证实了这一结论。对此存在很多可能的解释, 其中一种可能的解释就是中微子振荡机制, 也就是电子味中微子在从太阳传播到地球的过程中转换成了其他味的中微子。先期的实验只能证实探测器探测到的中微子比理论预期的少, 还不能确定这是由于中微子振荡引起的。太阳中微子问题的真正突破是在2001年后, 新一代的太阳中微子实验SNO通过1000吨重水同时测量三种味的中微子, 从而获得了电子味中微子的消失以及 ν_e, ν_μ, ν_τ 的产生证据, 而且三种中微子的总流量与John Bahcall给出的标准太阳模型的预言是一致的。虽然其他的解释还不能完全排除, 但是中微子振荡机制是对太阳中微子问题最自然, 最可能的一种解释。而此后进行的反应堆中微子实验KamLAND, 第一次探测到40%的反应堆中微子消失了。这最终确认了中微子振荡机制。现在可以肯定地说, 太阳中微子发生了振荡, 转换为其他味的中微子, 而且太阳中微子混合是大角度混合。中微子是有质量的。这有着重要的意义, 它要求修改粒子物理的标准模型, 预示着存在超出标准模型的新物理, 如轻子数不守恒, 质子衰变等。中微子物理成为近年来科学研究的一个重要方向。

中微子是一种极为神秘的粒子, 自从发现中微子振荡以后, 可以说它的神秘面纱已逐渐被揭开。研究中微子物理, 一个重要的方向就是分析中微子实验, 应用中微子振荡机制给出中微子参数的区间估计。我们首先回顾了粒子物理中中微子质量的描述, 给出Dirac质量, Majorana质量以及更为一般的Dirac-Majorana质量的表述形式。然后对中微子振荡进行了详尽的讨论, 得出在两味中微子的简单情况下, 真空和物质中的振荡生存几率。并主要讨论了均匀物质和绝热近似下的振荡公式以及物质效应引起的MSW共振机制。我们应用中微子振荡机制来解释太阳中微子实验, 使用了传统的最小方差分析以及贝叶斯分析方法, 对中微子实验数据进行了分析, 从而给出了太阳中微子问题的LMA MSW绝热解的参数区间。利用贝叶斯方法的独特性质, 我们还排除了中微子振荡的一些其他模型, 很好的验证了LMA解, 并且证明现在的LMA解已经非常稳定和可靠。另外, 通过太阳中微子实验的分析和大气中微子实验的结果, 轻子混合矩阵PMNS的6个独立参数中, 我们已经知道了四个, 还有两个是未知的, 其中包括了最重要的CP破坏相因子。由于混合矩阵中CP相因子都是与 θ_{13} 耦合在一起的, 因此实验对 θ_{13} 的测量变得尤为重要。只有完成对 θ_{13} 的测量, 才能开始至关重要的寻找CP破坏效应及其根源的实验研究。因而 θ_{13} 的探测对研究物理的核心意义重大。一旦 θ_{13} 被测定, 将极大地提高我们对太阳、大气和长基线中微子振荡次级效应的认识, 也将有助于我们研究超新星中微子振荡问题。位于中国广东的大亚湾反应堆中微子实验有可能会对 θ_{13} 进行很好的测量。我们使用不同的分析方法, 对大亚湾中微子实验的不同方案进行了模拟, 并给出了一个我们认为更为有效的探测器摆放方案, 在我们的模拟中, 大亚湾中微子实验有望探测到 $\sin^2 2\theta_{13} > 0.02$ 的值。大亚湾实验有着非常好的实验条件, 在技术上没有太多的困难, 是非常可行的反应堆中微子实验, 随着实验技术的发展, 大亚湾实验有可能取得比我们模拟更精确的结果。中微子研究是当前粒子物理、天体物理和宇宙学研究的前沿热点。近年来中微子物理研究的一系列重大成果预示着粒子物理研究的新突破。中微子物理正处于一个大发展时期。中微子是最轻的基本粒子, 是所有粒子衰变的最终产物。中微子有微小的质量, 使得它可以构成宇宙中的热暗物质, 对宇宙结构的形成有重要的影响。中微子振荡中的CP破坏可能对理解宇宙中的物质反物质不对称现象起关键作用。同时, 中微子携带天体的许多信息, 中微子不带电, 不会像带电粒子一样被物质阻挡和磁场偏转, 也不会像光子和带电粒子一样, 与宇宙背景辐射相互作用。因此用中微子作探针, 可以直达宇宙深处, 将极大地推动天文学的发展。中微子振荡生存几率与其通过的物质密度有关, 因此用中微子作探针, 还能测量中微子通过地段的物质密度, 从而获得太阳, 地球的内部信息。随着科学的发展, 我们会对中微子有更多的了解和认识。

3. 期刊论文 [王较过. WANG Jiao-Guo 中微子振荡与中微子的静止质量 -物理2000, 29\(11\)](#)

简要回顾了中微子的发现过程, 论述了中微子的基本性质及三种不同类型的中微子, 讨论了中微子振荡的最新实验结果及其与中微子静止质量的关系, 指出了中微子的静止质量在物理学与天文学中的重要性以及确定中微子的静止质量有待进一步解决的问题。

4. 期刊论文 [何景棠. HE Jing-Tang 中微子振荡实验——超出标准模型的实验检验\(I\) -物理2001, 30\(2\)](#)

文章总结了中微子振荡实验的历史和现状.介绍了几个太阳中微子丢失实验的结果和几个大气 μ 中微子丢失实验结果.这些结果表明存在中微子振荡,即中微子具有质量.它是超出标准模型信号.文章还介绍了21世纪初研究中微子振荡的若干重要实验,例如长基线中微子振荡实验以及建造 μ 子贮存环来产生高能电子中微子束进行中微子振荡的实验以及测量中微子振荡时的CP破坏的设想.

5. 学位论文 [黄秀菊 引力场中的质量中微子振荡](#) 2006

中微子是基本粒子家族中重要且具有特色的成员之一,是唯一一只参与弱相互作用的粒子,它在理论物理学及天体物理学中都占有着十分重要的地位。

泡利提出中微子假说之后,人们进行了一系列捕获中微子的实验.现在这些实验都用无可辩驳的事实证明了中微子是客观存在的基本粒子,同时也促使人们从多方面对中微子进行深入的研究.其中中微子的质量问题和中微子振荡现象是研究的热门课题.在费米弱作用理论乃至弱电统一理论中,都是把中微子当作无静止质量的粒子来处理的.用这样的理论来计算各种物理过程中的结果,都与实验符合得很好.另一方面,如果中微子质量不为零,则可很自然地解释某些现象(如宇宙中的热暗物质问题,太阳中微子丢失问题等).于是一些理论也试图赋予中微子以质量,同时人们也在用不同的方法来测量和计算中微子的质量.虽然随着实验技术的飞速发展,实验测量到的中微子质量上限值不断下降,但目前各种实验还未精确确定中微子的质量值。

另外,早在1958年, Pontecorvo就指出,如果中微子质量不为零,则不同种类的中微子之间可能会相互转化,即产生中微子振荡现象.由中微子振荡的量子力学可知,在探测点发现一种中微子转化为另一种中微子的振荡几率与混合角、中微子束的平均能量、中微子产生源—探测器间的距离以及两种中微子的质量平方差有关.本文在此基础上主要讨论中微子振荡的干涉相因子以及中微子振荡中的CP破坏效应.因此,本文的结构安排如下:

在第一章的引言中,介绍了中微子的发现、中微子的质量、以及中微子的混合和振荡现象,然后在此基础上,用量子力学的语言描述了中微子的振荡。

在第二章中,介绍了平直时空中的中微子振荡,得到了中微子振荡的干涉相因子.并且指出此因子与中微子束的平均能量、两种中微子质量平方差以及中微子产生点到探测点间的距离有关。

在第三章中,借助于短程线,讨论了爱因斯坦引力理论下的质量中微子振荡.首先利用标准方法讨论了Schwarzschild时空中中微子振荡干涉的相因子,然后用同样的方法分别讨论了Reissner-Nordström(R-N)场和Kerr场中的干涉相因子.由结果可知,虽然R-N场源的电荷和Kerr场源旋转的角动量的存在会对相因子的表示结果有贡献,但与Schwarzschild场中的情况相比,此贡献对相因子的增加很小.本章最后,本文给出了Robertson-Walker(R-W)场中中微子振荡的干涉相因子。

在第四和第五章中,分别在Brans-Dicke(B-D)引力理论和有挠引力理论下的静态球对称时空中计算了中微子振荡的干涉相因子.在B-D引力理论框架下得到对干涉相因子明显的贡献,这可以作为对一个B-D理论有效性的检验公式.而在有挠引力理论下得出的对真空相因子的修正在某些条件下比广义相对论对相因子的修正要大一些,但前者依然很小.因此中微子振荡实验不能提供一个证据来判断哪一个引力理论更好,广义相对论或是其它引力理论。

在第六章中,介绍了电荷共轭(C)与宇称(P)联合操作对称性的破坏(CP破坏).接着给出了直接CP破坏的理论研究和实验验证,CP破坏机制和新的CP破坏源.然后在此基础上,讨论了中微子振荡中的CP破坏效应,从中得出:在2味中微子振荡中,混合矩阵是实的,不存在CP破坏;但在3味中微子振荡中,由于混合矩阵不是实的,这直接导致CP对称性的破坏。

6. 期刊论文 [叶子飘, 胡宝坚 中微子振荡与太阳中微子问题](#) -湖南大学学报(自然科学版) 2002, 29(1)

认为太阳中微子问题主要是标准太阳模型没有考虑 7Be (3He , p) 9B 核反应道的竞争,并且在计算 7Be 中微子和 pep 中微子时,并没有考虑到太阳电子温度与离子温度的差异.如果考虑了这种差异,则太阳中微子问题可以得到很好地解决,而不需要修改太阳的其它重要参数.

7. 期刊论文 [焦善庆, 张金伟, 郝军, 张晓红 大气中微子 \$\nu\mu\$ 振荡几率估算](#) -益阳师专学报2000, 17(5)

据高能中微子的“长基线”实验设计参数,用数值实验常数相关联的唯象方法算出中微子质量数值,估算了中微子振荡几率,判断了 μ 中微子 $\nu\mu$ 与 τ 型中微子 $\nu\tau$ 最可能发生振荡.

8. 学位论文 [陈明君 中微子水基契伦可夫量能器的研究](#) 2006

近年来,中微子物理不断的获得突破,它已经成为最前沿的物理方向之一.而长基线中微子振荡实验具有丰富的物理内容,可以精确地测量中微子振荡参数,例如 $\sin^2\theta_{13}$,中微子在物质中的效应,质量平方差,CP破坏相角 δ 等.基于此目的,我们构建了一个全尺寸($1\text{m}\times 1\text{m}\times 13\text{m}$)的水基契伦可夫量能器模型,验证了它所组成的大型探测器可以用于长基线中微子振荡实验的远端探测器。

第一章中,简单叙述了中微子物理的发展历史,并讨论了中微子真空振荡理论和物质中的振荡理论.提及了可以验证中微子振荡的一些太阳中微子实验和大气中微子实验,得到了MNSP矩阵中的部分参数值.由此提出长基线中微子振荡实验,论及它所能测量的物理目标和一些长基线中微子振荡实验的未来发展状况。

在第二章,详细论述了所构建的水基契伦可夫量能器模型.首先,分析了已知的一些用于长基线中微子振荡实验的探测器类型,比较得出我们构造的探测器所具有的优点.对所构造的水基契伦可夫量能器的单个模型的论述,包括了量能器的结构,反射材料的筛选,光电倍增管的性能研究,电子学系统,以及净化系统等。

第三章,则论及GEANT4工具和基于此的单个水箱模拟程序G4WT. GEANT4是最近几年发展的用于高能物理研究的非常有效的模拟工具包,其中论及了G4WT模拟程序中的重点内容:GEANT4的光学过程描述.分析了G4WT模拟程序的框架结构,时间性能等。

第四章则包括了对水基契伦可夫量能器模型的具体测量.详细论述了实验的内容和过程,对于在水箱中不同位置 and 不同角度的取数,得到了水基契伦可夫量能器的水的有效衰减长度,和契伦可夫光的探测效率的角度依赖关系.最后,还述及了实验中一些不是理想的结果和讨论。

最后一章中,利用第四章的实验结果,结合G4WT模拟程序和基于GEANT3的模拟程序WCC的方法,以及采用了Minos的中微子产生子,基于H2B实验设计的背景,对于水基契伦可夫量能器的能量重建能力,背景等性能作了深入的分析和探讨。

本篇论文完整的描述了一个用于长基线中微子振荡实验的探测器模型.论证了该量能器的光产额,总的探测效率,水的有效衰减长度和粒子入射角度依赖关系都能很好的满足长基线中微子振荡实验.通过蒙特卡罗模拟可知,它将是长基线中微子振荡实验一个非常优秀的探测器的候选者。

9. 期刊论文 [焦善庆, 张金伟, 郝军, 张晓红 大气中微子 \$\nu\mu\$ 振荡几率估算](#) -益阳师专学报2000, 17(5)

据高能中微子的“长基线”实验设计参数,用数值实验常数相关联的唯象方法算出中微子质量数值,估算了中微子振荡几率,判断了 μ 中微子 $\nu\mu$ 与 τ 型中微子 $\nu\tau$ 最可能发生振荡.

10. 期刊论文 [肖鸿飞 在中微子振荡中的CP破坏](#) -原子与分子物理学报2003, 20(3)

讨论了中微子味混合与中微子振荡的理论,定量地研究了在中微子振荡中的CP破坏效应.在一类超对称模型中,计算了真空中中微子振荡几率和CP破坏效应。