

大气中微子的反常与超神冈的新成果

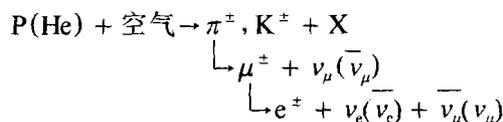
戴 长 江

(中科院高能物理所 北京 100039)

大气中微子的反常与太阳中微子的丢失一样,由于涉及到中微子是否具有非零静止质量和新的物理规律,因而引起人们极大的兴趣. 本文将就人们所关注的如下问题进行讨论:什么是大气中微子的反常,它有何意义? 人们已做了哪些实验、有何结果? 超神冈(Super-Kamiokande,下称SK)有何特点、有什么新成果? 最后简评了SK发表新成果的背景以及此成果即将产生的影响.

一、大气中微子的反常及其观测的意义

初级宇宙线如质子(P)或氦(He)进入大气层,将与空气相互作用:



所产生的次级粒子主要是 π^\pm ,它立即衰变为 μ^\pm 子和 μ 中微子 $\bar{\nu}_\mu(\bar{\nu}_\mu)$,之后 μ^\pm 衰变为电子 e^\pm 和电子中微子 $\bar{\nu}_e(\bar{\nu}_e)$ 以及 μ 中微子 $\bar{\nu}_\mu(\nu_\mu)$. 这样,一个 π^\pm 衰变将产生2个 $\nu_\mu(\bar{\nu}_\mu)$ 和一个 $\nu_e(\bar{\nu}_e)$. 两者的流强比:

$$r = \frac{(\nu_\mu + \bar{\nu}_\mu)}{(\nu_e + \bar{\nu}_e)} = 2$$

由 π^\pm 衰变而来的 μ^\pm 具有较长寿命($2\mu\text{s}$)和较强的穿透力,当它具有较高能量时,可能穿过大气到达地面而来不及衰变,这将导致 $\nu_e(\bar{\nu}_e)$ 的减少,即引起 $(\nu_\mu \pm \bar{\nu}_\mu)$ 与 $(\nu_e + \bar{\nu}_e)$ 流强比值(r)的升高,当中微子能量 E_ν 小于几个GeV时, $r = 2$,当 $5\text{GeV} < E_\nu < 100\text{GeV}$ 时, $2 < r < 9$.

对于大气中微子性质的实验研究,最好应知道大气中微子的绝对流强、能谱. 但由于人们还不能准确知道宇宙线的成分和能谱,以及地磁场对入射到大气层的宇宙线的影响. 因此,迄今所获得的大气中微子的绝对流强、能谱,其不确定性高达20%. 幸运的是 $(\nu_\mu + \bar{\nu}_\mu)$ 与 $(\nu_e + \bar{\nu}_e)$ 流强比值的误差 $< 5\%$. 至于 K^\pm 的

衰变,它类似于 π^\pm ,由于 K^\pm 的产额比 π^\pm 的低近一个量级,因而一般不予以考虑. 总之, $(\nu_\mu + \bar{\nu}_\mu)$ 与 $(\nu_e + \bar{\nu}_e)$ 流强的比值 γ 是研究大气中微子性质的一个重要参量,当然,它与大气中微子的能量有关.

$(\nu_\mu + \bar{\nu}_\mu)$ 与 $(\nu_e + \bar{\nu}_e)$ 流强比值 γ 的测量是基于:

$\nu_\mu(\bar{\nu}_\mu)$ 与靶核作用产生的 μ^\pm 以及 $\nu_e(\bar{\nu}_e)$ 与靶核作用产生的 e^\pm ,

通过 μ/e 流强比值的测量来确定 γ 值. 当然最好是能分别测出 μ^+/e^+ , μ^-/e^- ,目前由于所采用探测技术的限制,还不能区分 μ^+ 、 μ^- 事例或区分 e^+ 、 e^- 事例,只能给出类 μ 事例和类 e 事例,即给出 μ 、 e 事例率的比值.

由 μ 、 e 流强比的测量值来确定 $(\nu_\mu + \bar{\nu}_\mu)$ 、 $(\nu_e + \bar{\nu}_e)$ 流强比值 γ ,还必须准确知道大气中微子与靶核的作用截面,但目前人们还不能准确知道该作用截面,为消除此截面不确定性的影响,通常采用“双比值” R :

$R = (\mu/e)_{\text{data}} / (\mu/e)_{\text{MC}}$,也就是实测 μ/e 流强

比与蒙特卡罗模拟计算的 μ 、 e 流强比的比值. 在正常的情况下,双比值 R 应为一.

在大气中微子观测实验中,另一个重要的考察参量是大气中微子的流强随天顶角的分布. 宇宙线在空气中产生的次级粒子既有衰变的概率,也有与空气相互作用的概率. 那种概率为主,则取决于所处的空气密度. 空气稀薄时作用概率低而衰变概率高,中微子的产额高. 空气密度大时,则相反. 大气密度随距地面高度的升高而很快下降. 天顶角小时,具有空气密度大的空间大,因而作用概率较大,中微子的流强偏低. 随着天顶角的增大,具有空气密度小的空间将变大,衰变概率变高,中微子的流强也变大. 当天顶角 90° (水平方向)时,中微子

流强达极大,而后随着天顶角的增大,中微子流强又偏低.因此,正常的大气中微子流强随天顶角的分布是以天顶角 90° (水平方向) 为对称的.

对于大气中微子的研究,还有一个重要的考察参量是大气中微子向上、向下方向流强是否对称.如上述,正常的大气中微子是以水平方向为对称的,因此,在正常的情况下,所观测的类 μ 事例率上(天顶角 180°)、下(天顶角 0°) 方向是对称的.

总之,大气中微子观测参量的正常值是:双比值 R 等于 1,流强随天顶角的分布以水平方向为对称,类 μ 事例率上、下方向对称.

大气中微子观测参量偏离正常值的现象称大气中微子反常,具体表现为:双比值 R 不等于 1;大气中微子流强或双比值 R 随天顶角的分布形状畸变,即不再以水平方向为对称;类 μ 事例率上、下方向不对称,即上、下方向的类 μ 事例率的比值不等于 1.大气中微子反常的主要原因可能是中微子振荡.迄今,我们所知道的中微子有三种: $\nu_e(\bar{\nu}_e)$ 、 $\nu_\mu(\bar{\nu}_\mu)$ 和 $\nu_\tau(\bar{\nu}_\tau)$.就其性质而言,中微子具有自旋 $1/2$,不带有电荷,属于弱作用性质的,它可以穿行地球而几乎不发生作用.它具有非常小的静止质量,粒子标准模型认为中微子的静止质量为零.如果中微子的静止质量不为零,描述它的波函数在运动传播中其相位将发生变化,经过一定距离后,它将变化为另一种中微子.例如 $\nu_\mu \rightarrow \nu_\tau$.这就是我们所说的中微子振荡.由于 ν_μ 振荡为 ν_τ ,而探测器对 ν_τ 不灵敏.这将导致 ν_μ (或类 μ 事例) 的减少,具体表现为:双比值 $R < 1$; R 随天顶角分布畸变, $R(180^\circ) < R(0^\circ)$; 类 μ 事例率 $(180^\circ) /$ 类 μ 事例率 $(0^\circ) < 1$

总之,人们通过中微子反常现象的观测,借助于中微子振荡原因的分析,从而揭示中微子具有非零质量的本质.

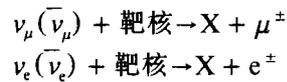
中微子静止质量是否为零的实验研究是至关重要的.

二分量中微子理论是以中微子静止质量 $M_\nu = 0$ 为前提的,如果 $M_\nu \neq 0$, 该理论将受

到严重的挑战.现代的基本粒子理论也认为 $M_\nu = 0$, 如果 $M_\nu \neq 0$, 人们必须超出标准理论框架,去寻找一个更加基本的粒子理论.对于天体物理,只要 $M_\nu = 10^{-2} \text{eV}$, 就足以用 MSW 效应来解释太阳中微子丢失的问题.对于宇宙学,只要 ΣM_ν 有几 eV, 就可解释宇宙中的热暗物质问题.因此,大气中微子反常的观测研究,对于确定中微子静止质量是否为零,对于天体物理、粒子物理以及宇宙学的发展具有重要意义.

二、已运行的实验及其结果

中微子属于弱作用性质,作用的事例率很低,探测很困难.为获取一定的事例率,探测器的规模一般很大,如千吨、甚至万吨.大气中微子主要是 $\nu_\mu(\bar{\nu}_\mu)$ 和 $\nu_e(\bar{\nu}_e)$, 对其探测主要是基于反应:



通过探测 μ^\pm 来确定 $\nu_\mu(\bar{\nu}_\mu)$ 而由 e^\pm 确定 $\nu_e(\bar{\nu}_e)$. 因此要求探测器能够探测并区分 μ, e , 能够测量 μ, e 的能量,最好能够测量 μ, e 的径迹和方向,以便测出如上述的双比值 R, R 天顶角分布以及类 μ 事例率的上、下方向的对称性.

典型的探测技术主要有二类,一是水切仑柯夫探测器,带电粒子 (μ^\pm 或 e^\pm) 入射到透明介质(水),当它的速度 (β) 大于光在该介质(折射率为 n) 中的速度时,将产生切仑柯夫辐射,辐射光的方向与带电粒子的方向之间夹角 θ 满足:

$$\cos \theta = 1 / n\beta$$

切仑柯夫光由安装在水容器周围的光电倍增管收集并给出光电信号,由与到达时间、所处位置相关的光电信号等信息可重建切仑柯夫光锥的半张角 θ 、入射粒子的径迹和方向.这样,由测得的 θ 就可确定入射粒子的速度 β , 进而确定其能量.

第二类的径迹量能器,是由吸收体(铁等)和计数器(正比管或闪烁体)夹层复合而成,具有一定的空间分辨,可重建入射粒子 (μ^\pm , 或

e^\pm) 的径迹, 并由其射程确定入射粒子的能量.

为屏蔽由宇宙线产生的背景, 这些大型的中微子探测器被安装在地下或山洞中. 它们往

往有多个物理目标, 如探测质子衰变、太阳中微子、大气中微子、超新星中微子、磁单极子等. 关于大气中微子, 某些已投入运行的实验及其结果列于表中:

实验组	探测技术	曝光量(千吨年)	$R=(\mu/e) \text{ data}/(\mu/e) \text{ MC}$	
神冈	水切仑柯夫	小于1GeV	8.3	$0.06 \pm 0.06 \pm 0.06$
		几GeV	8.2	$0.57^{+0.08}_{-0.07} \pm 0.07$
超神冈	从切仑柯夫	小于1GeV	33	$0.63^{+0.026}_{-0.025} \pm 0.05$
		几GeV	33	$0.65 \pm 0.05 \pm 0.08$
IMB	水切仑柯夫	7.7	$0.54 \pm 0.02 \pm 0.07$	
Soudan II	量能器	2.83	$0.61 \pm 0.14^{+0.05}_{-0.07}$	
Frejus	量能器	1.56	0.87 ± 0.16	
NuSEX	量能器	0.4	$0.99^{+0.35}_{-0.25}$	

水切仑柯夫探测器如神冈、超神冈和 IMB 不论是小于 GeV, 还是几 GeV 能量范围, 双比值 R 都接近 0.6, 而且其曝光量较大, 因此, 统计误差也较小. 对于量能器型探测器, Soudan II 测得的 R 值也接近 0.6, 只是统计误差较大. 至于 Frejus 和 NuSEX, 它们测得 R 值较接近于 1, 但因为曝光量太少, 统计误差大, R 取何值尚不能定论.

从各实验结果来看, 双比值 R 接近 0.6 是肯定的, 这可能意味着大气中微子振荡的存在, 但还未有可靠的证据.

三、超神冈的特点及其新成果

SK 是日、美合作的中微子和质子衰变实验, 位于日本中西部的神冈矿下 1000 米深处, 水切仑柯夫探测器是由 5 万吨纯水和 1 万 3 千多个光电倍增管构成的, 其中约 3 万吨水作为主探测器, 而外围的 2 万吨作为屏蔽探测器, 用于屏蔽高能宇宙线 μ 和探测器周围的背景. 因此, SK 规模大而具有高的事例率, 有屏蔽探测器而使背景较低. 这样, SK 可在较高信噪比和较高统计量的水平上做双比值 R、天顶角分布和上、下对称性的分析, 也有可能获得较高质量的新成果. 在 Neutrino'98 上, SK 发表的新结果:

$$* R = \frac{(\mu/e) \text{ 实验数据}}{(\mu/e) \text{ M.C. 计算}}$$

$$= \begin{cases} 0.63^{+0.026}_{-0.025} \pm 0.05 & (\text{对于 } < 1\text{GeV}) \\ 0.65 \pm 0.05 \pm 0.08 & (\text{对于几 GeV}) \end{cases}$$

* 对于几 GeV 能量的类 μ 事例:

$$\text{向上事例} / \text{向下事例} = 0.52^{+0.07}_{-0.06} \pm 0.01$$

假设没有中微子振荡时的计算值: 上、下事例比 = $0.98 \pm 0.03 \pm 0.02$

因此上、下不对称性有 5.7σ 超出

* 存在大混合角 ($\sin^2 2\theta > 0.8$) 的 $\nu_\mu \rightarrow \nu_\tau$ 振荡,

$$\Delta m^2 = 10^{-3} - 10^{-2} \text{eV}^2$$

结论: 获得中微子具有非零静止质量证据.

四、SK 发表新成果的背景及其影响

去年, SK 组也发表过大气中微子振荡的结果, 今年再次发表, 并加大了宣传力度, 其原因有: 一是实验结果的精度提高了, 置信水平更高了. 二是有争取经费的考虑. 日本政府今、明两年将削减经费各 15%, 这给 SK 的运行带来一定的困难, 为争取得到足够的经费, 他们只好加大宣传的力度. 但有一点是肯定的, 即他们的结果是可靠的. SK 组曾利用 KEK 的高能电子束流对水切仑柯夫探测器的性能和能量刻度进行校正, 因此, 他们的结果更加可信. 当然, 要想完全证实中微子静止质量不为零, 还需更高统计量的验证和其他实验的交叉检验. 这里需要强调的是 SK 的新成果对当前的天体粒子物理研究有很大的影响, 从理论上来看, 中微子具有非零静止质量, 人们必须超出粒子标准模

(下转第 13 页)

这就决定了多媒体技术在农业科学中大有作为:在农业规划、农业生产、农业病虫害监测与防治、农业生态的保护、农业气象服务、农业科技人才的培养等方面广泛应用多媒体技术,如对作物发育成长模型进行计算机模拟,可避免实物研究中干扰因素多、周期长、费用高等问题。多媒体技术的广泛应用已使传统农业向精确农业和持续农业转变,最大限度地利用土壤、水、化学投入等资源,实现农业的根本飞跃。美、日等发达国家在农业科学中应用多媒体技术一日千里,已在农业规划、环境监测、生态保护等方面取得重大进展,如美国在 80 年代中期研制成多媒体棉花管理专家系统 COMAX,为美国的棉花丰产提供了保证。我国是一个农业大国,但我国人均耕地只有世界的 1/3,水资源人均占有量只有世界的 1/4,这一切决定了农业的根本出路是提高资源的利用效率,关键是大力发展农业科技,提高农业投入中的科技含量,提高农业劳动者的素质。吉林农科院研制成的多媒体玉米生产专家系统声图文并茂,直观而形象,增强了科技成果集成力度,取得了较好的经济效益;中国农科院、中国科学院生态环境研究中心、国家气象局等单位的科学家利用多媒体技术对我国农业资源现状、利用与农业经济发展的关系,农业区域规划,生态环境与可持续发展的关系,三河(黄河、淮河、大运河)三湖(太湖、巢湖、洪泽湖)综合治理,南水北调,国土开发整治,中期气象预报特别是对台风、暴雨、冰雹等灾害性天气预报方面取得了可喜成果,为

(上接第 16 页)

粒子理论。在实验方面,它将极大推动中微子质量与振荡的实验研究,例如:1. 利用加速器、反应堆的长基线中微子振荡实验。2. 低能太阳中微子能谱的实验研究,它将直接测出太阳中微子能谱,给出中微子振荡结果,解决太阳中微子问题。正在酝酿的实验有 LENCSE 和 HELLAZ 等,最有前途的是 LENCSE,它是采用低放射性的加载稀土(Gd 或 Yb)闪烁探测器直

国民经济的发展作出了重要贡献。

三 多媒体技术在生物科学中的应用

如果说物理学对 20 世纪科技发展贡献最大的话,而 21 世纪或许是生物科学的世纪,作为生物科技核心的生物工程正方兴未艾。细胞工程、基因工程已在物种改良、濒危物种的保存等方面成效显著,多媒体技术为这一研究改善了实验条件、提供了新的途径和方法。北京大学生命科学学院、中科院生物所、中国科技大学、中国农业科学院等单位利用多媒体技术来研究生物大分子结构,转基因动、植物的整合性、远缘杂交,克隆技术等方面取得了一些成果,而我国在水稻基因图及其解码上的研究处于世界领先水平;美、英、以色列等国利用多媒体技术来研究生物信息的产生、传输,遗传信息的解码,大脑神经对信息的处理等取得了重要进展,中科院生物物理所也正在从事此方面工作;在疾病诊断方面,我国专家利用多媒体技术于 1995 年实现了京广两地远距会诊,通过信息高速公路还可实现世界范围内求医,也可配合各种信息技术实行传染病全球监测与预防;另外,在生物学、医学教学上广泛应用多媒体技术来增强学生的先期体验和感性认识,如对生物体的结构及各器官之间的功能联系,器官内部结构、功能及病理过程的多媒体教学,避免了传统教学方法的抽象性和片面性,用多媒体技术来设计理想实验等等,达到提高教学质量的目的。多媒体技术与可视虚拟技术、生物信息技术的结合必将促进生命科学进入一个新时代。

接测出太阳中微子能谱。3. 中微子螺旋度的精密测量,从另一新途径确定中微子是否有静止质量。特别是后两类(2,3)实验,花钱不多,又符合我国国情与特点,我国是稀土大国,对此类探测器的研制和实验具有雄厚的研究基础和丰富的经验。只要有关部门重视,抓住机遇,并给以足够的经费支持,中国人完全可以在不太长的期间内作出自己的贡献!