

# 探索中微子之谜:回顾与展望\*

周国荣<sup>1)</sup>

(五邑大学数学物理系 广东江门 529020)

**摘要** 中微子的静质量是20世纪末物理学中一个有待解决的重要问题,它在粒子物理学、宇宙学和天体物理学中占有重要的地位.文章首先评述了太阳中微子实验、大气中微子实验、超新星中微子实验和加速器中微子实验的历史、现状和发展.多年来的实验显示,中微子具有不为零的静质量,可以通过振荡过程在不同的味之间转换.至少有两个理论描述了中微子振荡,即真空振荡机制和MSW机制,文章讨论了这两个理论及其实验判据.最后,介绍了测量中微子静质量的现状.

**关键词** 中微子,中微子实验,中微子的静质量

## THE RIDDLE OF THE NEUTRINO:LOOKING BACK AND FOR WARD

ZHOU Guo Rong

(Department of Mathematics and Physics, Wu Yi University, Jiangmen, Guangdong 529020)

**Abstract** The neutrino mass, which plays an important part in particle physics, cosmology and astrophysics, was a problem unsolved at the end of the 20th century. A review is presented of the history, current status and development of experiments on solar, atmospheric, supernova and accelerator neutrinos. Experiments over the years show that the neutrino has mass and can change from one flavor to another through oscillations. There are at least two theories that describe the oscillations, the "just-so" and MSW. These theories and their experimental tests are discussed. Finally the status of current measurements of the neutrino mass is described.

**Key words** neutrinos, neutrino experiment, neutrino mass

### 1 引言

中微子的静质量是粒子物理学和宇宙学的前沿课题.在粒子物理学的标准模型中,中微子的静质量为零.但是,在过去的几十年,人们曾多次在实验上发现中微子具有静质量的证据.不过,由于中微子与普通物质的相互作用极弱,很难被探测到,使得可用的实验数据太少,因此,已有的观测结果难以对现有的理论构成威胁.然而,1998年6月,由日本和美国科学家组成的研究机构超级神冈(Super-Kamiokande)中微子天文台宣布,他们找到了有力的证据,表明中微子的静质量不为零.中微子具有静质量的结论在物理学和宇宙学中有巨大而深远的意义<sup>[1]</sup>.它为解决太阳中微子失踪问题提供了一个可行的途径;它将对粒子物理学的现有理论构成巨大的冲击;由于中微子具有静质量,宇宙结构的形成和演化以及最终命运将被改写.

中微子是奥地利物理学家泡利于1930年为了

解释原子核的 $\beta$ 衰变中电子射线能量的连续分布而假设的一种静质量极小的中性粒子.1934年,意大利物理学家费米发展了这个假说,建立了 $\beta$ 衰变理论,正式将这种粒子命名为中微子.按照当前的粒子物理学理论,自然界存在三类中微子,分别对应于轻子家族的三个成员:电子中微子 $\nu_e$ 、 $\mu$ 中微子和 $\tau$ 中微子.人们把中微子这三种类型称为中微子具有三种不同的“味”.到目前为止,我们对中微子的了解仍然极其有限.几十年来,中微子是否具有静质量一直为物理学家所关注.

### 2 中微子的实验探测

在自然界中,产生中微子的途径很多.太阳和恒星内部以及核反应堆内的核反应过程源源不断地产生大量中微子;高能宇宙线轰击大气层顶部的大气

\* 1999-09-24收到初稿,2000-01-10修回

1) 中国科学院理论物理研究所客座研究人员

分子时会产生次级中微子“雨”；超新星爆发时会在一瞬间释放大量高能中微子；在宇宙空间中，还存在大量产生于宇宙大爆炸时期的中微子背景。人们研究得最多的是来自太阳的中微子。

第一台太阳中微子探测器于1967年由戴维斯(R. Davis)<sup>[2]</sup>领导设计，用615t全氯乙烯(C<sub>2</sub>Cl<sub>4</sub>)做靶，安装在霍姆斯泰克(Homestake)一个废旧金矿地下1480m处，用于探测太阳内部核反应链中<sup>8</sup>B衰变时产生的中微子： ${}^7\text{Be} + \text{p} \rightarrow {}^8\text{B} \rightarrow {}^8\text{Be} + \text{e}^+ + \nu_e$ 。由于中微子与普通粒子的相互作用很弱，因此，要探测到中微子的存在是极其困难的。必须把探测器安装在地下很深的地方，以尽可能屏蔽掉背景辐射的干扰。当能量高于0.81 MeV的<sup>8</sup>B太阳中微子进入探测器时，就有可能与<sup>37</sup>Cl核反应而生成具有放射性的<sup>37</sup>Ar： ${}^{37}\text{Cl} + \nu_e \rightarrow {}^{37}\text{Ar} + \text{e}$ 。将反应生成的放射性<sup>37</sup>Ar从C<sub>2</sub>Cl<sub>4</sub>中分离出来，测量其辐射强度，就可以推算出参加反应的中微子通量。首批数据显示，太阳中微子通量的观测值只有理论预言值的三分之一。这就是所谓的太阳中微子失踪问题。

还可用水靶探测<sup>8</sup>B中微子，水靶的阈能为7.5 MeV。1987年开始运行的神冈二号(Kamiokande II)中微子探测器用680t水做靶，用光电倍增管探测太阳中微子与水分子中的电子碰撞后高速电子发出的切连科夫辐射。这台探测器通过一年的观测发现，来自太阳的电子中微子通量只有理论预言值的一半<sup>[3]</sup>。

上述方法只能记录到太阳中微子谱中能量较高的<sup>8</sup>B中微子，<sup>8</sup>B中微子约占太阳中微子总量的万分之二。太阳内部产生中微子的另一途径是 $\text{p} + \text{p} \rightarrow \text{D} + \text{e}^+ + \nu_e$ ，它产生的中微子的能量小于0.4 MeV。 $\text{p-p}$ 中微子是太阳中微子的主要来源，但是，氯探测器和水探测器探测不到这种中微子。探测 $\text{p-p}$ 中微子可用阈能较低的靶——镓，镓的阈能是0.24 MeV。

有两个小组使用了镓探测器。一个是GALLEX小组，由欧洲各国联合进行，探测器安装在意大利亚平宁山脉(Apennines)下的格兰萨索(Gran Sasso)隧道中。当中微子与镓碰撞后就生成挥发性的<sup>71</sup>GeCl<sub>4</sub>： ${}^{71}\text{Ga} + \nu_e \rightarrow {}^{71}\text{Ge} + \text{e}$ 。生成物中的Ge核通过电子俘获衰变，测量它的辐射强度就可推算出中微子通量。GALLEX小组已于1996年完成预定的任务。另一个使用镓探测器的是SAGE小组，由俄罗斯和美国联合进行，仪器安装在北高加索地区巴克珊(Baksan)的一个山洞中。GALLEX小组和SAGE小组的观测结果显示，太阳中微子通量的观测值只

有理论值的一半<sup>[4,5]</sup>。SAGE小组还肩负着一项重要任务，研究人员希望这台探测器能够运行到2002年，探测在为期11年的太阳活动周期内中微子通量可能出现的变化，以探究太阳内部活动对中微子产出率的影响。除GALLEX小组和SAGE小组外，还有一个使用镓的实验室GNO正在建造中，它将替代GALLEX小组继续从事探索中微子的工作(见表1)。

表1 太阳中微子实验

实验小组名称	实验/预言	阈能/MeV	运行年份
Homestake	0.33	0.814	1970—1995
Kamiokande	0.51	7.5	1986—1995
SAGE	0.52	0.233	1990—2006
GALLEX	0.60	0.233	1991—1996
Super Kamiokande	0.475	5.5(6.5)	1996—
GNO		0.233	1998—

为解释太阳中微子失踪之谜，人们提出了几个不同的方案。

(1) 采用非标准的太阳模型：处理太阳内部物理过程的标准模型可能有问题，比如太阳的总光度、太阳的年龄、太阳内部物质的状态方程以及它们对辐射的透明度可能需要修改。不过，在描述太阳的各种物理特性方面，目前的标准太阳模型<sup>[6]</sup>是相当成功的。因此，这种方案似乎并没有太大的吸引力。

(2) 改变核反应的截面：理论研究发现，增大 ${}^3\text{He} + {}^3\text{He} \rightarrow \alpha + 2\text{p}$ 的反应截面，可以减少 $\text{p-p}$ 循环产物<sup>7</sup>Be和<sup>8</sup>B的产出量，从而减少相应的中微子通量。在标准太阳模型中，太阳内部核反应涉及到的低能区的反应截面是高能区测量结果的外推，这种外推是否合适仍然是一个问题。但是，多种低能核反应的测量未发现反常情况。

(3) 减小<sup>37</sup>Cl和<sup>71</sup>Ga与中微子反应的截面：以往使用的这两个反应截面只是从理论上导出的，并没有直接的测量值。因此，有理由认为理论推导给出的截面偏大。不过，SAGE小组和GALLEX小组用<sup>51</sup>Cr中微子源进行的校准实验却表明，以往使用的反应截面是正确的<sup>[7]</sup>。

(4) 中微子振荡：中微子可能具有很小的静质量，这样，产生于太阳内部的电子中微子在它们从太阳到达地球的旅途中，就有可能通过所谓的中微子振荡转变为另一种味的中微子。由于一般的太阳中微子探测器探测不到其他两种味的中微子，因此，观测到的太阳中微子通量就小于理论预言。

为了证实电子中微子确实可以通过振荡过程转变为另一种味的中微子，首先需要建造能够探测这

些中微子的探测器.这些实验目前正在筹备或运行中.

1998年5月,座落在加拿大安大略北部小镇 Sudbury 的重水探测器(Sudbury neutrino observatory, SNO)安装完毕,1999年6月收集到第一批数据<sup>[8]</sup>.这台探测器安装在地下2km深处,主体是一个直径为12m的球形聚丙烯罐,用1000t重水做靶,9500只光电探测器监视着中微子与重水反应时出现的信号.这台使用重水做靶材的探测器不仅可以探测到电子中微子,而且还可以探测到其他两种味的中微子,从而可以检测来自太阳的电子中微子是否通过振荡过程转变成了另一种味的中微子.当中微子进入水罐后,就有可能与重水中的氘核发生反应: $\nu_e + D \rightarrow p + p + e$  和  $\nu_x + D \rightarrow \nu_x + p + n$ ,其中  $x$  代表其余两种味.这两起反应事例之比为中微子振荡提供直接的证据.重水探测器的阈能为几个 MeV,只能探测到<sup>8</sup>B中微子.由于一天只接收到20个中微子,因此,至少要一年的时间才能收集到足够的数量.表2是其余几个正在建造或计划中的太阳中微子实验装,其中SNO和ICARUS可以检测三代中微子,其余的只能检测电子中微子.

中微子的另一个重要来源是高能宇宙射线轰击地球大气层时产生的次级中微子“雨”.当宇宙线与大气层顶部的分子碰撞时,就产生大量次级粒子,其

中 $\pi$ 介子特别多,它们衰变时会出现一系列生成中微子的反应: $\pi^- \rightarrow \mu^- + \bar{\nu}_\mu$ ,  $\mu^- \rightarrow e^- + \nu_\mu + \bar{\nu}_e$ ,相应地, $\pi^+$ 的衰变产物与 $\pi^-$ 的衰变产物互为电荷共轭.由此可以预期, $\mu$ 中微子的通量是电子中微子通量的两倍.然而,各个大气中微子实验的结果表明,实测与理论预言并不相符.

表2 太阳中微子实验未来计划

实验小组名称	设备所在地	探测方法	阈能/ MeV	启用时间
Borexino	Gran Sasso	液体闪烁计数器	0.25 或以下	2001
Kamland	Kamioka	液体闪烁计数器	0.3	2001
ICARUS	Gran Sasso	液氩图像室	5.9	2000
LENS	Gran Sasso	液体闪烁计数器	0.244-0.301	计划

大气中微子实验主要测定电子中微子和 $\mu$ 中微子事例的比率并与数值拟合比较: $R = (\mu/e)_{DATA} / (\mu/e)_{fit}$ .测定这一比值的好处是可以避免由宇宙射线通量的不确定性引起的中微子通量的不确定性,并消除测量中微子通量时反应截面的不确定因素.探测大气中微子一般采用水切连科夫辐射的方法进行.表3是大气中微子实验的一些现状和展望,从中可以看到, $\mu$ 中微子通量的实测值只有预期值的一半.对这一现象的一种较好的解释是 $\mu$ 中微子在运动中通过振荡过程转变为探测器检测不到的 $\tau$ 中微子.

表3 大气中微子实验<sup>[9]</sup>

实验组名称	设备所在地	探测方法	实验/ 预言	运行年份
IMB	Cleveland, Ohio	水切连科夫辐射	0.54	1982-1991
Kamiokande	Kamioka, Japan	水切连科夫辐射	0.60	1983-1995
Soudan2	Soudan, Minnesota	铁靶热量计	0.66	1989-
Super-Kamiokande	Kamioka, Japan	水切连科夫辐射	0.61	1996-
ICARUS	Gran Sasso, Italy	液氩图像室		2000-

中微子还有一个重要的来源:超新星爆发.当大质量恒星耗尽核燃料后,自身的引力会使其迅速收缩,释放出巨大的能量,其中一部分推动外层气体迅速膨胀,另一部分则加热恒星的核心,产生大量中微子.如果中微子具有静质量,它们的运动速度就会小于光速,监测超新星爆发时中微子的到达时间,就有可能为确定其质量提供明确的线索.

1997年8月,英国和美国科学家开始了一项称为OMNIS(observatory for multiflavor neutrinos from supernova)的中微子探测计划<sup>[10]</sup>,它计划在美国新墨西哥州Carlsbad一个为堆放核废料而挖掘的岩盐洞穴和英国的Boulby盐矿中同时对超新星爆发时产生的高能中微子进行观测,预计可以探测到

三代中微子.超新星爆发时产生的中微子能量极高,可用更简单的方法探测:当中微子与原子核发生碰撞时,会使其中的中子脱离原子核.因此,检测到原子核的中子发射过程就可以探测到中微子的存在.

1998年初,韩国开始计划建造一台称为HANUL的中微子探测器<sup>[11]</sup>.这台探测器将使用磁谱仪配合水切连科夫辐射计探测遥远天体爆发时产生的高能中微子,其中的磁谱仪用来探测由中微子碰撞产生的轻子的径迹,由此可以分辨出入射的中微子和反中微子,并计算它们的能量.与此前的中微子探测器不同的是,这台仪器将安装在山顶上而不是地下深处.一般的中微子探测器总是希望尽可能将背景辐射屏蔽掉,HANUL的做法则不一样.设计者希

望通过探测器的特殊结构尽可能了解背景辐射的特征,从而轻易地将所需要的信号分离出来.这样的设计方案使得该项计划比以往的探测器的造价要便宜得多.

中微子探测中最为独特的要数建立在南极洲上的亚美达<sup>[12]</sup>(Antarctic muon and neutrino detector array, AMANDA)探测器.该项计划是1992年美国科学基金会倡议的,由威斯康星大学领导实施.来自美国、瑞典和德国的7个研究所参加了这项计划,1993年正式动工,在南极的冰层下建造一台探测遥远天体发出的高能中微子的探测器.由于南极地带独特的地理环境,探测器天线的构造较为简单.用热水钻在冰层上钻出约2000 m深的孔,将串满光电倍增管的电缆埋进去就行了.当高能中微子穿越冰层时,就有可能与冰层或岩石作用而产生轻子.快速运

动的轻子将发出切连科夫辐射而被光电倍增管捕获.南极地带背景辐射极微弱,蓝光和近紫外光区的光学透明度高,光电倍增管可以达到最佳效果,冰层对切连科夫辐射的透明度极好,是建造中微子探测器的理想地带.到目前为止,南极探测器已经建成AMANDA-A和AMANDA-B两套天线.从1997年开始,AMANDA-II的天线开始动工,预计有效探测面积比AMANDA-B大若干倍,它的目标是在三年内建造一台有效探测面积为平方公里级的中微子探测器.随着AMANDA-II的建成,亚美达将是世界上有效探测面积最大的中微子探测器,一般中微子探测器的有效探测面积不超过0.01平方公里.

由于超新星比较罕见,目前只对SN1987A做过观测,不能得到确切结论.表4列出了正在运行或规划中可探测超新星中微子的探测器.

表4 超新星中微子实验

实验组名称	设备所在地	探测方法	阈值/ MeV	预计事件数	启用年份
Super Kamiokande	Japan	水切连科夫辐射	5	4000	1996
SNO	Canada	水切连科夫辐射	5	800	1998
Borexino	Gran Sasso	液体闪烁计数器	0.25	20	2000
ICARUS	Gran Sasso	液氩图像室	5	10	1999
AMANDA	South Pole	冰切连科夫辐射	0.5	20000	1995

以上实验使用的中微子均来源于自然界中天然的物理过程.除了天然产生的中微子外,人们还对人工方法产生的中微子进行研究.位于新墨西哥州Los Alamos国家实验室的LSND(liquid scintillator neutrino detector)小组,利用从加速器中出射的质子碰撞水靶时产生的中微子进行实验.中微子探测器放置在离中微子源30 m处,内装167t矿物油,1220只光电倍增管严密地监视着中微子的行踪.这台探测器在原来纯净的 $\mu$ 中微子流中探测到不少电子中微子<sup>[13]</sup>.不过,这个结果尚未被其他实验室证实.

### 3 中微子振荡

在所有中微子探测器中,成绩最显著的是超级神冈探测器.它是目前世界上规模最大的中微子探测器,于1996年4月开始运行,它以确凿的证据证明了中微子振荡的假设.

按照中微子振荡的理论,中微子振荡的几率与其运动的距离有关.在一年的不同时间,地球与太阳的距离不同,中微子发生振荡的几率有差异.物理学家由此预期,探测到的电子中微子通量应该随季节有轻微的变化.由于这一方案考虑的是中微子在真

空中传播时发生振荡,因而又称为真空振荡机制.

有关中微子振荡,人们曾经提出过另一种可能的机制.当中微子在物质内部运动时,其振荡效应会由于相互作用而被放大.这一机制称为MSW机制<sup>[14]</sup>,这个名称是提出这一机制的三位研究者的名字的首字母的组合.由于太阳中微子到达地球上的探测器时,白天和黑夜穿过的物质区域不同,MSW机制的效应就有差别.因此,这一机制预言,探测到的太阳中微子通量应该具有昼夜起伏的现象.

上述中微子振荡的两种机制是否符合事实,需要用实验来检验.

1998年6月,超级神冈探测器的太阳中微子实验和大气中微子实验明确地显示出 $\mu$ 中微子和电子中微子振荡的证据<sup>[15]</sup>.太阳中微子振荡的证据同时对中微子振荡的两种机制作出了判决.在两年多的运行中,7000多例电子中微子事件并没有显示电子中微子通量随昼夜而发生变化.这一结果并不支持中微子振荡的MSW机制.另一方面,这7000多例电子中微子事件确实显示出,电子中微子通量随季节周期性地作轻微的变化.这一现象有力地支持了中微子的真空振荡机制.

在太阳中微子和大气中微子实验得到了中微子物理

振荡的有力证据后,超级神冈开始了一项新的计划,与相隔 250km 的高能加速器实验室(KEK)合作进行长基线实验,由该实验室产生的中微子束穿越地壳到达超级神冈探测器.这项叫做 K2K 的探测计划不仅能够进一步证实超级神冈的实验结果,也许还能够澄清是否存在“贫”中微子的疑难.K2K 实验开始于 1999 年 3 月,6 月 19 日成功地接收到第一个来自 KEK 的中微子信号<sup>[16]</sup>.长基线实验的好处是可以精确地知道中微子源的特性,避免了太阳中微子和大气中微子实验中对源的了解方面的争议,直接验证中微子振荡的假设.它使用一台本地探测器和一台远程探测器探测加速器中发射出来的中微子,比较两台探测器的结果就可以判断中微子在运动过程中是否经历了振荡.

#### 4 中微子的静质量

太阳中微子和大气中微子实验实际上是中微子振荡实验,这些实验可得到不同“味”的中微子的质量之差<sup>[17]</sup>.太阳中微子实验走过了 30 年的历程,积累了大量的实验数据.对实验数据的分析表明,中微子振荡能够给出较为满意的解释.所得出的两代中微子的质量差  $\Delta m_{\nu_{\mu\tau}}^2 \sim 10^{-5} \text{eV}^2$ ;大气中微子的探测历史虽然没有太阳中微子的探测历史长,但是也取得了相当大的进展.对各个大气中微子实验特别是超级神冈大气中微子实验的结果的综合分析表明, $\mu$  中微子转变为  $\tau$  中微子的中微子振荡能够较好地与实验数据吻合,由此得到的  $\mu\tau$  中微子的质量差  $\Delta m_{\mu\tau}^2 \sim 10^{-3} - 10^{-2} \text{eV}^2$ ;Los Alamos 的 LSND 实验实际上是短基线实验,它也属于中微子振荡实验,它给出  $\mu e$  中微子的质量差  $\Delta m_{\mu e}^2 \sim 0.2 - 10 \text{eV}^2$ .

中微子振荡实验不能给出中微子的绝对质量.中微子的静质量可以通过氚的  $\beta$  衰变  ${}^3\text{H} \rightarrow {}^3\text{He} + e^- + \bar{\nu}_e$  测定.假如中微子有静质量,电子能谱中的高能区就会变形,中微子的静质量决定了发射电子的最大能量.表 5 列出了电子中微子的静质量.

表 5 电子中微子的静质量

实验小组名称	质量上限/eV	测定年份
Mainz <sup>[18]</sup>	2.8	1998
Troitsk	2.5	1998
Livermore	7.0	1995
China	12.4	1995

通过不发射中微子的双  $\beta$  衰变实验室也可以测定电子中微子的质量,用这种方法给出的是中微子

的马约喇纳(Majorana)质量.这种双  $\beta$  衰变是极罕见的,至今尚未被观测到.将实验结果与理论作比较,就可估算中微子的马约喇纳质量上限.表 6 列出了这种实验的一些结果.

表 6 电子中微子的马约喇纳质量

实验小组名称	放射性核	质量上限/eV	测定年份
Heidelberg-Moscow	<sup>76</sup> Ge	0.2	1999
NE MO	<sup>100</sup> Mo	6-18	1998
Elegants	<sup>48</sup> Ca	3	1995
Milan-Gran Sasso	<sup>130</sup> Te	2.2-5.5	1998
Solotvina	<sup>116</sup> Cd	3.9	1997

除电子中微子外,其余两代中微子的质量也有一些初步的实验数据.重中微子的质量主要通过介子或轻子的衰变实验来测定.由于中微子是电中性粒子,因此,只能通过衰变过程中能量动量守恒的方法估算它们的质量.表 7 给出一些最新的结果.

表 7 重中微子的质量上限

实验小组名称	反应模式	质量上限 / MeV	测定年份
K. Assamagan <i>et al</i> <sup>[19]</sup>	$\pi^+ \rightarrow \mu^+ + \nu_\mu$	0.17	1996
CLEO <sup>[20]</sup>	$\tau^- \rightarrow 2\pi^- + \pi^+ + \pi^0 + \nu_\tau$	28	1999
ALEPH	$\tau \rightarrow 3\pi + \nu_\tau$	25.7	1998
	$\tau \rightarrow 5\pi + \nu_\tau$	23.1	1995
DELPHI	$\tau \rightarrow 3\pi + \nu_\tau$	25	1997
OPAL	$\tau \rightarrow 3\pi + \nu_\tau$	35.3	1996
	$\tau \rightarrow 5\pi + \nu_\tau$	43.2	1995
ALEPH + OPAL <sup>[21]</sup>	对现有结果做统计	15	1999

\* 表 1 至表 7 中的数据可以从以下网页获取: <http://www.physics.helsinki.fi/neutrino/>

中微子的实验和理论探索已经走过了大半世纪的历程,然而,我们对中微子的了解还很肤浅,对它的认识才刚刚开始.尽管人们很早就意识到,中微子具有不为零的静质量,然而,由于中微子具有极强的穿透力,人们得到的实验数据极为有限,因此,直到最近,这个问题才有了答案.综合 30 年的观测结果,人们发现,中微子振荡能够很好地解释它那神秘的特性.1998 年 6 月,超级神冈探测器得到的结果肯定了真空振荡机制,而对 MSW 机制却是否定的.当然,相反的情况也是可能的,在某些特定的参数下,MSW 机制的效应也许是观测不到的.因此,在中微子振荡理论中,真空振荡机制和 MSW 机制到底谁对谁错,或者两种机制都有可能,目前还不能给出最终的判决;既然中微子确实具有不为零的静质量,它的质量到底有多大就是一个很重要的问题.这个问题直接关系到我们赖以生存的宇宙的最终命运.到目前为止,实验只给出中微子静质量的上限,由于存在多种不确定因素,很难确切地给出中微子

的静质量.中微子的静质量到底有多大,还有待实验给出进一步的结果.

### 参 考 文 献

[ 1 ] 周国荣.物理,1999,28:290 [ ZHOU Guo Rong. Physics, 1999,28:290(in Chinese) ]  
[ 2 ] Davis R Jr, Harmer D, Hoffman K. Phys. Rev. Lett.,1968,20:1205  
[ 3 ] Suzuki Y. Phys. Nucl. Phys. ( Proc Supp. ),1995,B38:54; Fukuda Y *et al.* Phys. Rev. Lett.,1996,77:1683  
[ 4 ] GALLEX Collaboration. Nucl. Phys. ( Proc Supp. ), 1995, B38:68  
[ 5 ] Abdurashitov J N *et al.* Nucl. Phys. ( Proc Supp. ),1995,B38:60; Abdurashitov J N *et al.* Astrroph/9907113  
[ 6 ] Bahcall J, Basu S, Pinsonneault M. Phys. Letts.,1998,B433:1  
[ 7 ] Anselmann P *et al.* Phys. Lett.,1995,B342:440; Abdurashitov J N *et al.* Phys. Rev.,1999,C59:2246  
[ 8 ] Sincell M. Science,1999,284:1910  
[ 9 ] LoSecco J M. Hep ph/9909264  
[ 10 ] Glanz J. Science,1997,277:1032  
[ 11 ] Normile D. Science,1998,279:802  
[ 12 ] AMANDA Collaboration. Science,1995,267; AMANDA Collaboration. Astrroph/9906205  
[ 13 ] Watson A. Science,1997,277:30  
[ 14 ] Wolfenstein L. Phys. Rev.,1978,DI7:2369;

Mikheyev S P, Smirnov A Y. Sov. J. Nucl. Phys.,1985,42:913

[ 15 ] Normile D. Science,1998,280:1689; Normile D. Science,1998,280:1839  
[ 16 ] Normile D. Science,1999,283:928  
[ 17 ] Primack J R. Science,1998,280:1398  
[ 18 ] Weinheimer Ch. NEUTRINO'98, Takayama, Japan on 4-9 June,1998  
[ 19 ] Assamagan K, Brönnimann Ch, Daum M *et al.* Phys. Rev.,1996,D53:6065  
[ 20 ] CLEO Collaboration. Hepex/9906015  
[ 21 ] Cerutti F. Hepex/9903062



### 作者简介

周国荣,男,1962年4月17日出生.1982年毕业于北京大学地球物理系天体物理专业.1991年毕业于北京大学物理系理论物理专业.1996年进入五邑大学数学物理系从事物理学教学工作.现为五邑大学讲师,中国科学院理论物理研究所客座研究人员.1989年开始从事宇宙学、天体物理学和理论物理学方面的研究工作. E-mail:grzhou@163.net

## 封 面 说 明

极光——地球磁极偶发的神奇自然现象,被用来命名中国科学院光物理开放实验室最近研制成功的台面超强超短激光装置.字形虽同,但却表示着不同的含义.此处,极光代表着这种新型激光装置的一系列非常极端的特性:

(1) 极高的激光峰值功率.在仅300mJ的532nm激光泵浦下,可高效率地输出大于1TW(1TW=10<sup>12</sup>W)的峰值功率.聚焦后,靶面的峰值功率密度大于10<sup>18</sup>Wcm<sup>-2</sup>.在这样强的光强作用下,电子的振荡速度接近光速.

(2) 极短的激光脉冲宽度.单个脉冲的持续时间小于25fs(1fs=10<sup>-15</sup>s),在这样短的时间内,光子以光速运动的距离仅为6μm.

(3) 极小的空间尺寸.极光飞秒脉冲激光装置的占地面积不到6m<sup>2</sup>,可以宽松地置于光学平台上,为在普通光学实验室进行强场物理实验和极端条件物理实验提供了可能性.

(4) 输出激光与物质相互作用后,可产生以下一系列非常极端的物理条件:极大的功率密度:10<sup>18</sup>Wcm<sup>-2</sup>;极短的时间尺度:10<sup>-14</sup>s;极强的电场:10<sup>11</sup>Vcm<sup>-1</sup>;极强的磁场:10<sup>9</sup>Gs;极高的辐射温度:10<sup>9</sup>K;极强的辐射场:10<sup>22</sup>Wcm<sup>-3</sup>;极大的光压:10<sup>8</sup>bar;极大的加速度:10<sup>19</sup>g.

图案的设计采用蓝天下的自然极光作背景,在此衬托下,横空的红、绿、蓝三原色线条醒目地突出了该激光装置的超常特性,三种线条代表了极强、极短和极小的占地面积(国外将这类激光简称为3T或3U激光).光线所指的类似激光模拟核爆炸的圆形图案,代表这种激光的典型应用之一的快点火激光核聚变.在图案右上方的插图中,字母J、G分别为极光拼音的字首,图形代表了这种飞秒超短激光的电磁场函数.

(中国科学院物理研究所 魏志义)