

# 中微子质量,宇称不守恒,中微子振荡及其他\*

倪光炯†

(复旦大学物理系 上海 200433)

**摘要** 中微子有静止质量是与宇称不守恒的实验事实相矛盾的,而假如它是超光速粒子而有非零的固有质量(如近年来实验数据所显示的那样),才能与宇称不守恒相容.文章从这个新观点讨论了有关中微子五个方面的研究课题.

**关键词** 中微子,质量,宇称,超光速粒子,快子

## NEUTRINO MASS, PARITY VIOLATION, NEUTRINO OSCILLATION AND OTHER TOPICS

NI Guang-Jiong

(Department of Physics, Fudan University, Shanghai 200433, China)

**Abstract** A neutrino having rest mass contradicts the experimental fact of parity violation. But if it is a superluminal particle with nonzero proper mass as shown by recent experimental data, it would be compatible with parity violation. Five research topics related to neutrinos are discussed from this new point of view.

**Key words** neutrino, mass, parity, superluminal particle, tachyon

### 1 引言——一个不解之谜

1956年宇称不守恒的历史性发现<sup>[1,2]</sup>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<sup>[3]</sup>,其物理实质是假定自然界只存在左旋中微子( $\nu_L$ )与右旋反中微子( $\bar{\nu}_R$ )而不存在右旋中微子( $\nu_R$ )与左旋反中微子( $\bar{\nu}_L$ ).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零,因而 $\nu_L$ 与 $\bar{\nu}_R$ 永远以光速( $c$ )的速度( $u = c$ )运动,同时一切观察者所在的惯性系( $S$ 与 $S'$ 等)间的相对速度 $v$ 都不可能超过( $v < c$ )的缘故.

可是从20世纪70年代以后,从氚的 $\beta$ 衰变等实验分析逐渐显示:中微子可能具有非零的质量<sup>[4]</sup>.问题就立刻变得尖锐起来:假如中微子是亚光速的Dirac粒子(如电子那样),具有微小的静止质量 $m_\nu$ ,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 $\nu_L$ 变成 $\nu_R$ ,一个 $\bar{\nu}_R$ 变成 $\bar{\nu}_L$ ,于是中微子不可能是永久纵向极化的了.我们仍将需要宇

称守恒的四分量中微子理论.换言之,中微子一旦有静止质量,不论多么小,必定与宇称不守恒的实验事实相矛盾.许多年以来,这对笔者来说一直是个不解之谜,但文献上似乎从未对此有过认真的讨论.

### 2 中微子可能是超光速粒子,才能够与宇称不守恒相容

中微子质量 $m_\nu$ 的实验测定值是根据相对论公式:

$$E^2 = P^2 c^2 + m_\nu^2 c^4 \quad (1)$$

来定义的.它的能量 $E$ 已很难测,更不用说动量 $P$ 了<sup>[4]</sup>.因此实验的精度(置信度)一直不高.然而到1996年时,全球平均的实验数据已显示<sup>[5]</sup>电子中微子( $\nu_e$ )的质量平方是负的( $c = 1$ ):

$$m^2(\nu_e) = -27 \pm 20 eV^2. \quad (2)$$

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

\* 2001-05-30收到初稿,2001-09-13修回

† 通信地址:Department of Physics, Portland State University, Portland, OR 97207, USA

E-mail: gj\_ni@Yahoo.com

排除掉,在 2000 年的粒子表中给出新的全球平均值,它缩小了,但仍然保持为负值<sup>[6]</sup>:

$$m^2(\nu_e) = -2.5 \pm 3.3 \text{eV}^2, \quad (3)$$

$\mu$  中微子( $\nu_\mu$ )的情况也是类似的<sup>[6]</sup>:

$$m^2(\nu_\mu) = -0.016 \pm 0.023 \text{MeV}^2, \quad (4)$$

$\tau$  中微子  $\nu_\tau$  是 2000 年刚在费米实验室发现,至今尚未见到  $m^2(\nu_\tau)$  的实验数据.就笔者所知,在物理学界中,绝大多数人并不重视这个负号,他们或者认为(3)(4)二式在统计上没有什么意义,实验数据仍与  $m_\nu^2 = 0$  相容,或者认为即使中微子有微小的质量,那一定是(Dirac 粒子的)静质量(或所谓 Majorana 中微子,其反粒子就是自己,它也可能有非零的质量,但这种理论与我们下面的观点完全不同).只有极少数人认真地讨论  $m_\nu^2 < 0$  的物理意义.例如 Chodos 等<sup>[7]</sup>和张操<sup>[8]</sup>,他们把  $m_\nu^2$  改记为  $(-m_s^2)$ ,而  $m_s$  为正实数,称为“固有质量”(proper mass)或“快子质量”(tachyon mass).则容易证明,中微子的运动学关系变为:

$$E = \frac{m_s c^2}{\sqrt{u^2/c^2 - 1}} \quad P = \frac{m_s u}{\sqrt{u^2/c^2 - 1}}, \quad (5)$$

$$E^2 = P^2 c^2 - m_s^2 c^4. \quad (6)$$

这意味着中微子是一个“超光速粒子”,即“快子”(tachyon),它的速度  $u > c$ .有关快子的文献还可见文献[9].

为解释  $m_\nu^2 < 0$ ,即得到(6)式,张操依照 Dirac 的做法,提出一个量子方程<sup>[10]</sup>,在随后的共同研究中<sup>[11]</sup>我们进一步弄清楚这个方程的物理内容,原来正反映了最大程度宇称破坏的中微子性质:它只允许有  $\nu_L$  和  $\bar{\nu}_R$  这样的解,而把另两个解( $\bar{\nu}_L$  和  $\nu_R$ )禁戒掉了.又因为它们都是超光速粒子,这种永久纵向极化性质当然在任何惯性系都可保持.简言之,中微子是超光速这一特性把它具有(固有)质量与宇称(最大限度)破坏这两件事统一起来<sup>[12]</sup>,同时历史上长期存在的所谓“超光速佯谬”(超光速运动会破坏因果性)的问题也迎刃而解了<sup>[13]</sup>.

### 3 关于中微子研究的五个课题

在笔者看来,为进一步证实上述观点,有几个方面问题需深入研究:

(1)根据(1)式测量  $m_\nu^2$  的实验还是最直接的和极其重要的.一旦实验精度比(3)(4)式大为提高之后,中微子是否为超光速粒子将被确定下来.

(2)天体中的暗物质问题.许多学者认为:中微子是暗物质最可能的侯选者之一<sup>[14]</sup>.笔者也认为:暗物质问题与 3K 宇宙背景辐射是联系起来的,而中微子究竟是亚光速粒子(具有微小静质量  $m_0$ )或超光速粒子(具有微小的质量  $m_s$ )将可能有不同的观测效应.

(3)1987 年超新星爆发(SN1987A)时,两个实验室获得的中微子数据是极其宝贵的<sup>[15]</sup>,笔者希望这两个实验室的研究人员和文献[14]的作者能够从中微子可能是超光速粒子这一观点对数据作进一步的分析.

(4)近年来关于中微子振荡的实验报道被认为是证明中微子有静止质量的有力证据<sup>[16]</sup>.然而,根据(1)式或(6)式导出的群速度(粒子速度)  $u_g$  ( $u_g = d\omega/dk$ )与相速度  $u_p$  ( $u_p = \omega/k$ )的乘积关系都是(文献[11]中(8)式):

$$u_g u_p = c^2. \quad (7)$$

由此可见,假如中微子是超光速粒子( $u_g > c$ ),必有  $u_p < c$ .因此三种中微子( $\nu_e, \nu_\mu, \nu_\tau$ )在运动过程中,将可能来不及形成量子相干叠加态,它们之间发生味混合,即所谓中微子振荡的可能性将大大地被压抑下来.所以这个问题的研究与中微子究竟是否超光速有密切的关系.

(5)太阳中微子“失踪案”.地球上测到的来自太阳的(电子)中微子不到标准太阳模型理论预测的一半<sup>[17]</sup>,目前倾向于用中微子振荡来解释<sup>[16]</sup>.笔者也希望有关专家能从中微子可能是超光速粒子的观点重新予以计算,看一下在动力学(目前的量子场论仍可用于超光速粒子)和运动学(相空间积分)上分别可能带来什么变化.

总之,在笔者看来,当前全世界粒子物理研究中,有两类实验是最重要的.一是用加速器从实验上找到 Higgs 粒子(我们从理论上计算,曾预测 Higgs 粒子的质量应在 138GeV 左右<sup>[18]</sup>),第二类是关于中微子的实验,后者因中微子可能是超光速粒子而显得更诱人了.

### 参 考 文 献

- [ 1 ] Lee T D, Yang C N. Phys. Rev. ,1956 ,104 :254
- [ 2 ] Wu C S *et al.* Phys. Rev. ,1957 ,105 :1413
- [ 3 ] Lee T D, Yang C N. Phys. Rev. ,1957 ,105 :1671
- [ 4 ] Frampton P M, Vogel P. Phys. Rep. ,1982 ,8X(6) :339
- [ 5 ] Review of Particle Physics. Phys. D ,1996 ,54 :280
- [ 6 ] Review of Particle Physics. Euro. Phys. Jour. C ,2000 ,15 :350
- [ 7 ] Chodos A *et al.* Phys. Lett. B ,1985 ,150 :431 ;Ciborowski J, Rembielinski J. Europ. Phys. J ,1999 ,C8 :157

- [ 8 ] Chang T. J. Phys. A. ,1979 ,12 :1203 ;Gravitational Radiation and Relativity ,Proceedings of the Sir A Eddington Centenary Symposium ,1986 ,Vol 3 :Beyond relativity ,Preprint 2000
- [ 9 ] Blaniuk O M P *et al.* Am J. Phys. ,1962 ,30 :718 ;Feinberg G. Phys. Rev. ,1967 ,159 :1089 ;Sudarshan E C G. In proceedings of the VIII Nobel Symposium. Swartholm N ed. New York ,1970.335 ;Bandukwala J ,Shay D. Phys. Rev. ,1974 ,D9 :389 ;Shay D. Nuovo Cim ,1977 ,19 :333 ;Marx E. Int J. Theor Phys. ,1970 ,3 :299 ;Recami E *et al.* Tachyons ,Monopoles and Related Topics , North-Holland , 1978
- [ 10 ] Chang T ,Ni G J. An explanation on negative mass-square of neutrinos. Preprint , hep-ph/0009291
- [ 11 ] Ni G J ,Chang T. “ Is neutrino a superluminal particle ?” Preprint , hep-ph/0103051
- [ 12 ] 倪光炯. 陕西师范大学学报(自然科学版) ,2001 ,3 :1[ Ni G J. Journal of Shaanxi Normal University ( Natural Science ) ,2001 , 3 :1[ in Chinese ]]
- [ 13 ] Ni G J. Superluminal paradox and neutrino , Preprint , hep-ph/0203060
- [ 14 ] 戴长江 盛祥东 ,何会林. 物理 ,2000 ,1 :679[ Dai C J , Sheng X D , He H L. Wul( Physics ) ,2000 ,11 :679[ in Chinese ]]
- [ 15 ] Bionta R M *et al.* Phys. Rev. Lett. ,1987 ,58 :1494  
Hirata K *et al.* Phys. Rev. Lett. ,1987 ,58 :1490
- [ 16 ] 王较过. 物理 ,2000 ,11 :682[ Wang J G. Wul( Physics ) ,2000 , 11 :682[ in Chinese ]]
- [ 17 ] Schwarzschild B. Phys. Today 2001 8 :13
- [ 18 ] Ni G J , Lou S Y , Lu W F *et al.* Science in China( Series A ) , 1998 41( 11 ) :1206

## ·前沿和动态·

### 诺贝尔奖得主的新贡献

2001 年度的诺贝尔物理奖被授予在原子气玻色 - 爱因斯坦凝聚( BEC ) 领域作出贡献的三位科学家 Eric A. Cornell , Wolfgang Ketterle 和 Carl E. Wieman. 1995 年 , 他们先后在<sup>87</sup>Rb 蒸气和<sup>23</sup>Na 蒸气系统中实现了 BEC. 今天 , 全世界已有 30 多个研究小组开展了这一领域的实验研究 , 发表了 25000 多篇科学论文. 研究者们认为 , 通过实现 BEC 可以提高原子钟的精度 , 并使卫星导航系统的定位精度提高到 10 cm 左右. 此外 , 这项研究也与凝聚态物理的超导涡旋、超流涡旋密切相关 , 与宇宙中天体之间以及天体内部的相互作用密切相关.

最近 , Ketterle 所领导的小组完成了一个精巧的 BEC 涡旋实验. 实验者在<sup>23</sup>Na BEC 中 , 通过激光束搅动凝聚体的办法 , 产生了 100 根以上的涡旋线. 这些涡旋线构成了稳定的 Abrikosov 三角晶格 , 正如在第 II 类超导体中人们所见的磁通晶格. 被搅动的凝聚体具有圆柱对称性 , 搅动激光束与对称轴平行 , 搅动的圆频率为  $\Omega$  , 凝聚体的截面积是  $A$  . 于是 , 与超导体总磁通  $\Phi$  相对应的转动通量等于  $2\Omega A$  . 在 BEC 中 , 与超导磁通量子  $\Phi_0 \equiv h/2e$  相对应的环流量子  $\kappa = h/M$  , 其中  $h$  是普朗克常数除以  $2\pi$  . 理论上 , 总涡旋数  $N_v = 2\Omega A ( h/M )$  . 搅动作用减弱了磁势阱的捕获势 , 从而增加了凝聚体的转动惯量. 可以预期 , 在搅动激光关闭以后 , 涡旋晶格将转动更快. 测量表明 , 在长达 40 s 的涡旋寿命期间 , Abrikosov 晶格大约转动了 100 周 , 而每一根涡旋线周围的超流体大约完成了 500 000 周旋转.

与 Ketterle 小组的最新工作同步 , Wieman 和 Cornell 小组将注意力放在调整碱金属蒸气原子间相

互作用上. 对于已实现 BEC 的<sup>87</sup>Rb 蒸气 , 原子间的相互作用是微弱的排斥 , 但对于同位素<sup>85</sup>Rb 相互作用原本是吸引 , 它不利于 BEC 的实现.

表征原子间相互作用的微观参量是散射长度  $a$  .  $a > 0$  对应排斥 ,  $a < 0$  对应吸引. 在原子的碰撞散射过程中 , 散射波是球对称的 , 其波函数

$$\psi = \frac{-a}{r} e^{ik \cdot r} ,$$

其中  $k$  是波矢 ,  $r$  是观测点到散射核的距离. 排斥相互作用的散射过程将引入  $180^\circ$  的位相突变.

Wieman 和 Cornell 等通过外加磁场的办法 ( Feshbach 共振 ) , 令<sup>85</sup>Rb 原子气散射长度的符号 , 在  $a > 0$  和  $a < 0$  之间迅速切换 , 在 BEC 中观察到了因引力坍塌诱发的所谓“ Bose - nova ” 爆发. 巨大的恒星 , 当其聚变能量耗尽 , 核心自由电子动能所提供的“ 费米简并 ” 内压抵抗不住重力坍塌 , 结果导致超新星 ( Supernova ) 爆发. 此刻 , 中微子在 1 s 内即可带走星体内的绝大部分能量 , 冲击波将击碎星体 , 而幸存下来的物质则形成中子星. 在 BEC 中的 Bose - nova 爆发将有助于人们研究宇宙的演化.

### 参 考 文 献

- [ 1 ] The Royal Swedish Academy of Sciences. The official web site of the Nobel Foundation. <http://www.nobel.5e/Physics>
- [ 2 ] Donley E A *et al.* Nature 2001 412 :295
- [ 3 ] Abo-shaer J R *et al.* Science 2001 292 :476
- [ 4 ] Voss D. Science 2001 291 :2301
- [ 5 ] 王晓辉 , 李义民 , 王义道. 物理 , 1998 , 27 :3[ Wang X H , Li Y M , Wang Y Q. Wul( Physics ) , 1998 , 27 :3[ in Chinese ]]
- [ 6 ] 戴闻 , 高政祥. 自然杂志 2000 , 22 :332[ Dai W , Gao Z X. Ziran Zazhi 2000 , 22 :332[ in Chinese ]]