

早期工作,当时得到的印象是:这项工作需要高灵敏的探测设备,单个粒子的荧光探测即使是可能,也不是很快就能实现的。然而不久以后,在目前技术的基础上,就有人获得了单分子荧光漂亮的实验结果。它的发展,也许会像 Moerner 所说的那样,只受到我们的想象和测量系统信噪比的限制^[19]。新的概念,新的测量方法,甚至新的器件必将随着这项研究工作的深入而产生和发展。

- [1] H. Dehmelt, *Advances in Laser Spectroscopy*, eds. F. T. Arecchi et al., Plenum, New York, (1983), 153.
- [2] J. Bergquist et al., *Phys. Rev. Lett.*, **57** (1986), 1699.
- [3] F. Diedrich et al., *IEEE J. Quantum Electronics*, **QE-24** (1988), 1314.
- [4] R. A. Mathies, *OE Report*, No. 2 (1990), 10.
- [5] Th. Baschè et al., *Nature*, **355** (1992), 335.

- [6] W.M. Yen, *SPIE*, **1033** (1988), 183.
- [7] K. E. Süsse et al., *Opt. Commun.*, **28** (1979), 389.
- [8] M. Orrit et al., *Phys. Rev. Lett.*, **65**(1990), 2716.
- [9] L. Kador et al., *J. Phys. Chem.*, **94**(1990), 1237.
- [10] R. Lange et al., *Europhys. Lett.*, **6**(1988), 499.
- [11] W. E. Moerner et al., *Phys. Rev. Lett.*, **62** (1989), 2535.
- [12] W. E. Moerner et al., *Phys. Rev. Lett.*, **66** (1991), 1376.
- [13] W. P. Ambrose et al., *Nature*, **349**(1991), 225.
- [14] Th. Baschè et al., *Technical Digest on PHB: Science and Applications 1992, OSA*, (1992), 11.
- [15] M. Orrit et al., *Technical Digest on PHB: Science and Applications 1992, OSA*, (1992), 7.
- [16] Th. Baschè et al., *Phys. Rev. Lett.*, **69** (1992), 1516.
- [17] M. Orrit et al., *J. Lumin.*, **53** (1992), 165.
- [18] M. Orrit et al., *Technical Digest on PHB: Science and Applications 1991, OSA*, (1991), 312.
- [19] W. E. Moerner, *Technical Digest on PHB: Science and Applications 1992, OSA*, (1992), 5.

地下粒子物理与天体物理实验

况浩怀

(中国科学院高能物理研究所,北京 100039)

80年代以来在地下进行了研究质子衰变、寻找磁单极子、研究无中微子双 β 衰变及寻找暗物质等实验,得到的都是负结果;但记录到 SN1987A 中微子暴事例。太阳中微子的探测实验也有很大的进展。

众所周知,弱作用和电磁作用统一理论(即所谓标准模型)对当前的粒子物理实验结果基本上都能很好的解释,理论所预言的质量为 80—90GeV 的中间玻色子也在实验中证实,理论和实验先后获得了诺贝尔物理奖。标准模型可以说是非常成功。从标准模型再往前走,人们自然地尝试弱电强作用的大统一,并从理论上预期:大统一将发生在 $\geq 10^{14}$ GeV 能区。按照现在加速器原理,在地球上造这么高能量的加速器是不可能的。在大统一理论中,重子数不再守恒,质子不再是稳定粒子,可以发生 $p \rightarrow e^+ + \pi^0$ 等类型的衰变,因而可以通过研究质子衰变来检验大统一理论。但是,质子衰变的几

率很小,预期寿命大于 10^{30} 年,实验上观测质子衰变是很困难的。在一吨物质中含有 6×10^{26} 个核子,必须有灵敏重量超过百吨的探测器在几年的运行时间内才有可能对质子寿命进行测量。这样大规模的探测器会记录到大量宇宙线事例构成的本底计数。为了减少本底,实验都安排在能够吸收主要宇宙线成分的地下实验室进行。80年代以来世界各国相继建成十来个测量质子衰变的装置,其中以美国 IMB 组在地下 2000MWE¹⁾ 的 80m³ 和日本神岗 (Kamioka)

1) 1MWE = 100g/cm² 的吸收地层厚度,即 1m 水的等效吸收层,各地岩石成分不同,1m 地层对应于 2.6—3MWE。

在地下 2700MWE 的 3000m³ 水契仑科夫探测器规模最大。这些装置经过几年的运行并未发现质子衰变,质子寿命的下限已经测量到10³²年。

80年代,在意大利 Gran Sasso 建造了更大规模的地下实验室,旨在从事更多重要的粒子物理和天体物理的课题研究。Gran Sasso 实验室位于意大利中部山区一个公路隧道旁,覆盖地层厚度约 4000MWE,现已建成三个容积大于万立方米的实验大厅。1988年后,陆续有探测磁单极子为主、灵敏体积达 6km³的MACRO,含有 30吨 ⁷¹Ga 的太阳中微子探测器 GALLEX,含有 720吨液体闪烁体的 LVD 以及双β衰变实验、暗物质探测等一批实验装置开始运行。Gran Sasso 已经成了世界上一个重要的地下物理实验中心,我国也有 20多个科技工作者先后在那儿工作。具有类似目的的地下(或水下)实验也在其他国家展开。中国科学院高能物理研究所和理论物理研究所的学者在门头沟地下矿井就做了寻找 ⁴⁸Ca 的无中微子双β衰变实验,得出的寿命下限为 10²²年,把前人的实验结果提高了一个数量级。迄今为止,寻找磁单极子、寻找无中微子的双β衰变以及寻找暗物质粒子等实验所得到的都是负的结果。可庆幸的是,地下实验成功地探测到了 1987年大麦哲伦星云的超新星中微子暴;对太阳中微子的探测也取得了很大的进展。

关于超新星中微子暴的探测,早在 70年代苏联就布置了这种实验,以后他们与意大利合作在布朗峰下公路隧道旁建造了近 100吨液体闪烁体的 LSD 实验,实验室的地面覆盖层为 5200MWE。由于中微子只具有弱作用,因而与物质的作用几率很小,估计一个在银河系中心附近的超新爆发(离地球距离约 10kpc)在 LSD 探测器中十秒钟内可以探测到 10个以上的5—30MeV 中微子引起的脉冲计数。果然,1987年 2月 23日观测到南天大麦哲伦星云有一个超新星爆发,通常称为“SN1987A”事例。大麦哲伦星云在银河系外,距地球约 60kpc,由于地球上探测到的中微子数与到爆发源点的距离

成反比,也就是说其计数比上述估计约低一个量级。当时神岗和 IMB 两个千吨以上的质子衰变探测器正在运行,它们分别同时在约十秒的时间内得到 11个和八个计数(IMB 探测器虽比神岗的要大,但探测阈能高,效率低,故计数反而少)。LSD 也声称在几秒时间内得到 5个计数,但它与前两个探测器所测得的时间相差约四小时,所以有人怀疑 LSD 记录的可能是属于统计涨落或者其他现象。超新星中微子暴的成功记录意义重大,因为人类进行了长期的天文观测,从最初用肉眼观测星体发出的可见光起,发展到近代应用各种仪器进行从微波到 10¹²eV 以上的超高能γ射线的全波段的电磁辐射观测,不管多高能量的电磁辐射,它们都是从星体表面或外层空间发射出来的,只有中微子,由于它与物质作用的几率很小,才能从星体内部穿出,因而能直接提供星体内部的信息。这次超新星爆发的中微子暴的成功探测和下面将介绍的太阳中微子探测,预示着中微子天文学观测开始进入实用阶段。分析这次中微子暴的数据还可以估计中微子的质量上限和其他物理性质。这是一次长达 60kpc 的长距离粒子飞行实验,如果中微子质量为零,它们都以光速飞行;若质量不为零,则能量高的中微子飞行速度就快(更接近于光速),能量低的速度就慢。在大约 17万年的长时间飞行中就有可能造成到达时间分布的变化和展宽,分析测得中微子信号的能量时间分布及其关联就可以判断中微子质量上限,从这次实验数据分析得出中微子的质量上限为 10eV。

太阳中微子的探测是一个意义重大又十分困难的课题。30年代预言太阳核心是一个热核反应炉,解释了恒星长期稳定发光之谜。太阳里进行着燃烧氢的热核反应,反应包含 pp 链和 CNO 循环,pp 链又包含 ppI, ppII 和 ppIII 三个分支,它们有下述反应:

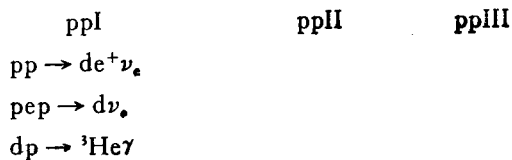
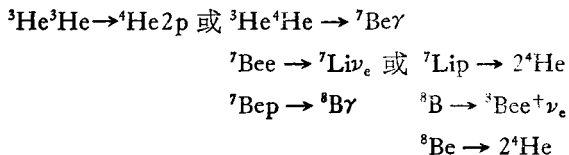
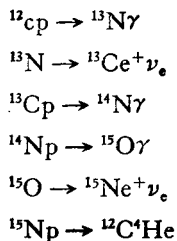


表 1 四组太阳中微子实验数据与两种理论模型的比较

理	循 环	作用或衰变	中微子能量 (MeV)	不同模型中微子流强 ($\text{cm}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$)		^{37}Cl 事例率 (SNU)		^{71}Ge 事例率 (SNU)	
				Bahcall	Turck-Chiez	Bahcall	Turck-Chiez	Bahcall	Turck-Chiez
论	ppI	$\text{pp} \rightarrow \text{de}^+\nu_e$	0—0.42	6.0×10^{10}	5.98×10^{10}	0	0	70.8(53.8%)	70.6(57%)
		$\text{pep} \rightarrow \text{dv}_e$	1.4	1.4×10^8	1.3×10^8	0.2(2.5%)	0.2(3.4%)	3.1(2.4%)	2.8(2.3%)
	ppII	$^7\text{Be} \rightarrow ^7\text{Li}\nu_e$	0.86(90%)	4.9×10^9	4.18×10^9	1.2(15.0%)	1.0(17.0%)	35.8(27.2%)	30.6(24.6%)
			0.38(10%)						
	ppIII	$^8\text{B} \rightarrow ^8\text{Be}^+\nu_e$	0—14	5.7×10^6	3.83×10^6	6.2(77.5%)	4.1(71.0%)	13.8(10.6%)	9.3(7.5%)
CNO		$^{13}\text{N} \rightarrow ^{13}\text{C}^+\nu_e$	0—1.2	4.9×10^8	6.27×10^8	0.1(16%)	0.1(1%)	3.0(2.3%)	3.9(3.1%)
		$^{15}\text{O} \rightarrow ^{15}\text{N}^+\nu_e$	0—1.73	5.6×10^8	4.81×10^8	0.3(4%)	0.4(6%)	4.9(3.7%)	6.5(5.2%)
合 计						8.0±1.0(1σ)	5.8±1.0(1σ)	131.5 $^{+7}_{-6}$ (1σ)	124±5(1σ)
实 验	Homestake (1990)						2.1±0.3		
	神冈(1988 相对于理论值之比率)			0.46±.05±.06	0.70±.08±.09				
	SAGE (1991)							20 $^{+15}_{-20}$ ±32	
	GALLEX (1992)							83±19±8	



CNO



这些过程总的结果都是四个氢核（质子 p）合成一个氦核，同时释放出氦核的结合能。各个过程有不同能量的中微子产生，中微子的产生率即各个过程的产生率与太阳核心区的温度、 ${}^4\text{He}$ 、CNO 成分的含量等密切相关，因而探测到中微子的流强就可以了解太阳核心区的状态。第一个探测太阳中微子的实验是在美国 Homestake 4000MWE 矿井下以 615 吨 C_2Cl_4 作探测器，利用 ${}^{37}\text{Cl}(\nu_e, e){}^{37}\text{Ar}$ 反应，借助于放射化学方法测量 ${}^{37}\text{Ar}$ 产额，从而推算出太阳中微子作用的事例率。实验从 60 年代末开始，到现在已积累有大约 20 年的实验数据，测得太阳中微子事例率的平均值为 $2.1 \pm 0.3\text{SNU}$ 。SNU 为太阳中微子单位，表示 10^{26} 个靶核每秒俘获一个太阳中微子。在理论方面，从 60 年代起 Bahcall 等就开始计算太阳热核反应产生中微子的流强，根据各种太阳内部有关参数的测量及核反应截面测量进展不断地修订他的模型。Bahcall 模型常被称为标准太阳模型 SSM。表 1 列出他的模型计算出各个循环产生中微子到达地球的流强并给出 ${}^{37}\text{Cl}$ 实验的事例率。 ${}^{37}\text{Cl}$ 实验的探测阈能为 0.814MeV，由表 1 看出，它不能探测流强最大的 pp 中微子，对事例率贡献最大的是 ppIII 的 ${}^8\text{B}$ 高能中微子，Bahcall 模型计算出各类中微子引起事例率的总和为 $8.0 \pm 1\text{SNU}$ ，比实验值高三倍以上。这就是著名的太阳中微子丢失之谜。对此，人们从理论模型的修改和实验验证两个方面去弄清这个疑案。表 1 列出了 Turck-Chiez 模型，它给出的

${}^8\text{B}$ 中微子流强明显地低于 Bahcall 模型，预言 ${}^{37}\text{Cl}$ 实验的事例率为 $5.8 \pm 1.0\text{SNU}$ 。第一个实验验证是神岗质子衰变探测器 1988 年发表的探测太阳中微子的结果。神岗水契仑科夫探测器可以探测由太阳中微子在水中弹性散射所产生的能量大于 7.5MeV 的电子，这种电子基本保持着太阳中微子的入射方向。由于中微子与物质的作用截面很小，在探测器灵敏区域内，每吨物质每年的太阳中微子计数还不到一个，而各种放射线形成的本底计数比它高两个数量级，但在事例的角分布图上对准太阳的方向呈现一个峰，峰内包含的事例就是太阳中微子计数。表 1 列出神岗探测实验结果与两种模型预期的比值，它虽然比理论模型预期值还低，但差别没有 ${}^{37}\text{Cl}$ 实验那样大。不过， ${}^{37}\text{Cl}$ 实验似乎显示太阳中微子的流强是变化的，它与太阳活动的 11 年周期有关联，而在神岗实验期间 ${}^{37}\text{Cl}$ 实验测到的事例率也偏高。但是，从最近几年神岗实验数据还看不出太阳中微子流强随时间有变化，所以还有待更长时间运行才能对此问题作出判断；而更重要的是进行其他类型实验，以便相互检验。近年来应用反应 ${}^{71}\text{Ga}(\nu_e, e){}^{71}\text{Ge}$ 的实验已经运行。这个反应探测太阳中微子的阈能为 0.233MeV，从表 1 看出，它能探测流强最大的 pp 中微子。前苏联和美国合作在 4700MWE 处的 Baksan 实验室进行 50 吨镓的 SAGE 实验于 1991 年发表了首批实验结果，太阳中微子的事例率仅为 $20.4 \pm 3.2\text{SNU}$ ，比理论模型预期的 $\sim 130\text{SNU}$ 低了很多。1992 年，Gran-Sasso 实验室的 GALLEX 国际合作组也发表了结果，太阳中微子的事例率为 $83 \pm 19 \pm 8\text{SNU}$ 。这四组实验数据的共同特点是都比理论预期值低，而偏低的程度差别很大，因此需要更多更精确的实验加以检验。在加拿大正在建造中心区为 1000 吨重水构成的契仑科夫太阳中微子探测器，神岗把探测器扩大到五万吨而且阈能降低到 5MeV 的实验计划已得到批准，在 Gran Sasso 还在进行采用 ${}^{11}\text{B}$ 和液态 ${}^{40}\text{Ar}$ 的大规模的太阳中微子探

(下转第 31 页)