

非重子冷暗物质粒子的研究进展*

盛祥东[†] 何会林 戴长江

(中国科学院高能物理研究所 宇宙线与高能天体物理重点实验室 北京 100039)

摘要 暗物质问题目前已受到物理学界的高度关注,因为这一课题的研究和进展,将直接影响到粒子物理、天体物理和宇宙学的发展方向.当前世界上已有一些大的实验组正在开展这方面的研究工作,并已取得了一定的结果.文章重点介绍两个重要的探测实验,即中意合作 DAMA 组(Dark Matter Group)100kg Na(Tl)探测器阵列实验和美国的 CDMS(Cold Dark Matter Search)实验组的低温探测器实验.详细介绍了 DAMA 实验的物理分析方法及其实验结果,并同 CDMS 实验结果进行了相应的比较.

关键词 暗物质,年调制效应,弱作用重粒子

PROGRESS OF NON-BARYONIC COLD DARK MATTER RESEARCH

SHENG Xiang-Dong[†] HE Hui-Lin DAI Chang-Jiang

(Key Laboratory of Cosmic Ray and High Energy Astrophysics, Institute of High Energy Physics, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100039, China)

Abstract Dark matter has attracted great attention in physics because any new research and progress in this subject will stimulate particle physics, astrophysics and cosmology. Some major experiments in progress around the world, has already obtained interesting results. Here we shall discuss two important experiments: the Sino-Italian Dark Matter (DAMA) Group with the 100kg Na(Tl) detector set-up and the US Cold Dark Matter Search (CDMS) Group with bolometer detectors. The physical analysis methods and the DAMA experimental results will be explained in detail and compared with the results of CDMS experiment.

Key words dark matter, annual modulation, WIMP (weakly interacting massive particles)

1 前言

宇宙中的暗物质问题由来已久.1937年,兹维基首先发现星系团中存在大量的不可视物质.以后,天文学中星系旋转曲线的测量结果也预示着漩涡星系中应存在巨大的暗物质晕.在理论上,人们结合宇宙动力学测量结果与大爆炸宇宙学核合成理论,人们推断宇宙中存在大量不发光的暗物质,它们最终决定了宇宙大尺度结构的发展、演化.

宇宙的质量密度 Ω 是宇宙学理论中的一个重要概念.通常,宇宙的质量密度 Ω 用临界密度 ρ_c 为单位来表示:

$$\Omega = \rho / \rho_c, \quad (1)$$

这里 ρ 为宇宙的物质密度, $\rho_c \approx 1.88 \times 10^{-29} h_0^2 \text{g/cm}^3$. h_0 是以 $100 \text{kms}^{-1} \text{Mpc}^{-1}$ 为单位的归一化哈勃常数,即 $h_0 = H_0 / (100 \text{kms}^{-1} \text{Mpc}^{-1})$, H_0 为哈勃常数.宇宙暴胀理论预言宇宙的质量密度约等于 1.

现在宇宙的密度模型最流行的有两类:即冷-热暗物质(CHDM)模型和真空能-冷暗物质(Λ CDM)模型.

在冷-热暗物质(CHDM)模型中,宇宙中的物质分为三类,即重子暗物质、非重子冷暗物质和非重子热暗物质,它们所占的份额分别为 0.05, 0.70, 0.25.而在真空能-冷暗物质(Λ CDM)模型中,真空能和冷暗物质成分比例为 0.7:0.3.

在上述两种模型中,冷暗物质成分都是宇宙质量密度的重要贡献.按照当前人们对宇宙学的了解,普遍认为中微子是热暗物质的候选者之一,而弱作用重粒子(WIMP)是冷暗物质最可能的候选者.

WIMP 的实验研究是当前物理学领域的一个新的热点.人们普遍认为这种粒子具有寿命长、质量大的特点,它只参与弱相互作用,因此它同其他物质的

* 国家自然科学基金(批准号:19875060)资助项目

2001-06-04 收到初稿,2002-02-25 修回

[†] 通讯联系人. E-mail: shengxd@astrosv1.ihep.ac.cn

作用截面很小,易于在宇宙的发展演化中存在下来;同时这种粒子的运动速度仅为光速的千分之一量级,在探测器中作用产生的能量损失一般只有几个keV到几十keV,加之在该能区本底信号通常很大,往往将真正的事例信号淹没,这也是目前实验上探测WIMP的难点之一。然而,令人感兴趣的是人们发现这种粒子并不存在于当前的粒子标准模型当中,对它的研究进展无疑将对宇宙学、天文学以及粒子物理学都有非常重要的意义。

2 DAMA组100kg NaI(Tl)实验^[1-7]

2.1 DAMA实验概况

中意合作DAMA(dark matter,DAMA)组的WIMP探测实验在意大利Gran Sasso国家低本底实验室进行。该实验室位于意大利Gran Sasso山脉Aquila峰(海拔2000m)的一条大隧道中,隧道的总长度为10.4km。实验室所在的位置深度约为1400m(相当于3800m的等效水深),这样岩石层很好地屏蔽了外部宇宙线的大部分成分,仅有中微子和能量超过2TeV的 μ 等才能到达实验室内部;同时,长久形成的沉积岩内部的放射性杂质含量已变得极低,所有这些都利于降低WIMP探测的实验本底。

DAMA组100kg探测器晶体阵列是用放射性纯度较高的NaI(Tl)晶体构成。阵列中的探测器分为两类:WIMP探测器和SIMP探测器。其中,WIMP探测器是由9个尺寸为 $10.2 \times 10.2 \times 25.4\text{cm}^3$ 的NaI(Tl)晶体组成,每块晶体的质量可达9.70kg,而SIMP探测器则由四个尺寸为 $8 \times 8 \times 30\text{cm}^3$ 的晶体组成,每块质量为7.05kg。所有这些NaI(Tl)晶体的总质量为115.5kg,因此该探测器又被称为100kg NaI(Tl)晶体(阵列)探测器。

DAMA实验的探测原理如下:WIMP与探测器阵列中的靶核(Na核与I核)发生弹性或非弹性散射,将自身的部分能量传递给靶核。靶核反冲在NaI(Tl)闪烁晶体中发生电离,从而使晶体发出荧光。探测器两端的光电倍增管收集荧光,并将光信号转换为电信号,后续的电子学系统记录该电信号并以文件的形式保存下来。在实验数据分析过程中,处理核反冲信息可以得到WIMP作用特点和规律。

由于WIMP引起的靶核反冲能仅为几千电子伏至几万电子伏,这样得到的实验信号非常小,因此这类实验要有低噪声、低阈能的特点。DAMA用的NaI(Tl)晶体中的放射性杂质含量很低($U/Th < 10^{-11}\text{g/}$

g),为消除周围环境的光子和中子等的影响,NaI(Tl)晶体阵列周围由里向外依次是10cm的铜、15cm的铅、1.5mm的镅和10cm的聚乙烯屏蔽层。同时,通过向晶体阵列内部连续充以纯度很高的氮气来驱除放射性氦的影响。DAMA实验通过符合技术排除了大部分的电子学噪声;同时利用脉冲波形分析的方法^[4]进一步实现了对有效事例信号的提取。

在实验数据的分析中,DAMA组对WIMP的年调制效应进行了相应的研究和分析。WIMP的年调制效应的原因是这样的:由于WIMP广泛存在于我们银河系的银晕中,其速度分布在银河系坐标系中服从玻尔兹曼-麦克斯韦分布。太阳系处在银河系的一条旋臂上,它在银河坐标系中的运动速度为 $232 \pm 20\text{km/s}$ 。在太阳系中,地球绕太阳的公转速度为 30km/s ,公转轨道平面法线方向与银河系中太阳的运动速度矢量夹角为 30.7° 。于是,地球在银河坐标系中的无量纲运动速度可表示为下面的时间函数:

$$\gamma(t) = \eta_0 + \Delta\eta \cdot \cos\omega(t - t_0), \quad (2)$$

其中, ω 为角速度, $\omega = 2\pi/\text{yr}$; $\eta_0 = 1.05$, $\Delta\eta = 0.07 \pm 0.01$;初相 t_0 对应于每年的6月2日。

根据银河系中WIMP与地球相对运动的这些特点,实验观测到的WIMP作用事例率将随时间呈余弦周期变化,周期为一年,并且事例率在每年的6月份达到极大值,在12月份达到极小值。

2.2 DAMA实验结果

DAMA实验从1996年到1999年底获得数据的总曝光量为 $57986\text{kg}\cdot\text{day}$,经历了四个循环周期。表1给出了每年的曝光量,图1显示了2—6keV能量间隔内的调制信号随时间的变化。

表1 DAMA的相关数据

周期	曝光量/kg·day
DAMA/NAI-1(1996)	4549
DAMA/NAI-2(1997)	14962
DAMA/NAI-3(1998)	22455
DAMA/NAI-4(1999)	16020
总曝光量	57986

对图1数据进行假设检验,它不符合周期性调制的概率为 4×10^{-4} 。用函数 $S(t) = S_m \cdot \cos\omega(t - t_0)$ 对图1数据拟合,取 $T = 2\pi/\omega = 1.00 \pm 0.01$ 年, $t_0 = 152.5$ 天(大约为每年的6月2日),得 $S_m = 0.022 \pm 0.005\text{cpd/kg/keV}$ (S_m 称为调制量)。

图2是对自旋无关耦合方式的候选者在 $\xi \cdot \sigma_p - M_w$ 平面内、在90%显著性下的允许域。图中 $\xi = \rho_w/\text{物理}$

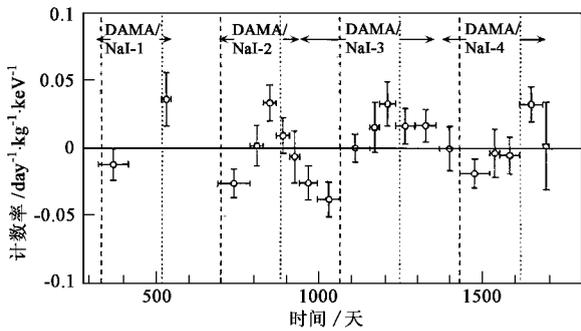


图1 DAMA 实验的调制信号随时间的变化

ρ_c, ρ_w 为 WIMP 的密度, $\rho_c = 0.3 \text{ GeV/cm}^3$, σ_p 是 WIMP-核子的标量散射截面, M_w 是 WIMP 的质量. $\xi \cdot \sigma_p$ 的单位为 pb, $1 \text{ pb} = 10^{-36} \text{ cm}^2$.

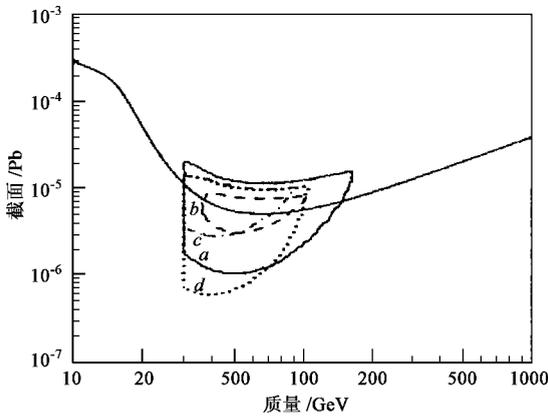


图2 自旋无关耦合方式的候选者在

$\xi \cdot \sigma_p - M_w$ 平面内的允许域 (90% 显著性下)

(a 为 DAMA/NaI-1; b 为 DAMA/NaI-2; c 为 DAMA/NaI-3; d 为 DAMA/NaI-4)

2.3 DAMA 实验中可能的系统效应^[2]

DAMA 实验以 4σ 显著性在 2—6keV 能量间隔内测到了 WIMP 信号的年调制效应. 一方面, 我们看到 DAMA 实验的数据量还不够大, 其显著性还有待继续提高; 另一方面, 就要考虑这个年调制效应是不是由系统的其他方面的原因引起的. 对于这一点, DAMA 合作组从以下六个方面对系统进行了分析: (1) 空气中的放射性氡 (2) 温度 (3) 噪声 (4) 能量标定因子 (5) 探测效率 (6) 背景等. 实验观测结果显示, 前五种因素的变化皆没有周期性. 而在对背景的考虑中, 主要包括低能康普顿电子, X 射线或俄歇电子以及 μ 子的影响, DAMA 组认为, 只有高能 μ 子具有某种可能性, 关于 μ 子流量具有周期性的实验结果迄今为止只有 MACRO 报道过^[12], 图 3 是其结果. μ 子流量的这种周期性是一种温度效应^[13]. DAMA 通过计算后认为, MACRO 的效应对 DAMA 年

调制量的影响小于 0.3%, 不足以影响 DAMA 实验结果.

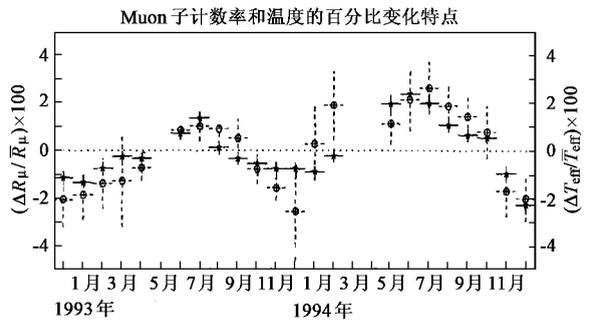


图3 MACRO 的结果

★为 μ 子计数率与平均计数率的比值;

○为每月的平均温度与一年内的月平均温度之比

2.4 DAMA 的现状

DAMA 实验 2000 年 (第五个年循环) 的数据正在处理的过程中. 第六个年循环的数据采集已开始进行. 相应的数据采集系统也进行了升级改造, 脉冲波形采样系统由原来的多个 PMT 波形相加后采集变成了对单个 PMT 波形采集, 大大提高了识别背景事例的能力. 探测器系统正在扩大, 最后将实现 250kg Na(Tl) 的探测规模. 新增加的晶体其放射性纯度会更高, U/Th 含量将小于 10^{-13} g/g , 探测阈能将由现在的 2keV 降到 1keV. 这两项指标已在新晶体初样检测的实验中达到.

3 CDMS 实验及与 DAMA 的比较^[5, 10]

CDMS (cryogenic dark matter search) 是在美国进行的采用低温技术的半导体 (硅, 锗) 暗物质探测实验. 其原理是 WIMP 粒子与靶核 (硅核或锗核) 发生碰撞, 靶核获得的反冲能沉积在半导体中产生声子和电子-空穴对. 由低温测量仪测量声子振动产生的热量, 而由电极收集测量电子-空穴对, 从而达到测量靶核反冲能的目的.

CDMS 在 10m 左右的地下实验室进行, 它的覆盖层相当于 16m 的等效水深. 探测器放在由铜制成的恒温箱中, 由特制的冰箱使恒温箱的温度保持在 20mK. 恒温箱的内外都有屏蔽, 最外面是一层塑料闪烁体反符合探测器, 对 μ 子的探测效率可达 99.9%, 可用于排除 μ 子. 塑料闪烁体内侧是 15cm 的铅, 用于减少光子, 其系数为 10^3 . 再往里是 25cm 的聚乙烯, 可以将小于 50MeV 的中子慢化. 恒温箱内侧有 1cm 厚的老铅. CDMS 探测器还可以从以下

两个方面进一步排除背景;第一,它可以区分核反冲事例和电子反冲事例;第二,可以记录粒子作用位置(x, y, z)的像,如 β 粒子、低能 γ 等背景其作用点只发生在探测器的表面。

CDMS-I 结果包括了两组数据:第一组是1998年4月至7月收集的,探测器为100g的硅探测器,有效观测时间为33天,可用曝光量为 $1.6\text{kg}\cdot\text{day}$;另一组数据是在1998年11月至1999年9月间收集的,用的探测器是3块165g锗探测器,有效观测时间为96天,曝光量为 $10.6\text{kg}\cdot\text{day}$ 。在 $1.6\text{kg}\cdot\text{day}$ 硅探测器数据中,找到了4个核反冲事例。在 $10.6\text{kg}\cdot\text{day}$ 锗探测器数据中,在10—100keV能量间隔内,找到了13个单次散射核反冲事例,4个多次散射事例。13个锗探测器单次散射事例在计数率上与DAMA的计数率是相近的,然而,CDMS对这13个事例进一步分析后认为,这些事例是由中子引起的。

表2 DAMA 和 CDMS 实验的一些数据

	DAMA	CDMS
曝光量	$57986\text{kg}\cdot\text{day}$	$10.6\text{kg}\cdot\text{day}(\text{Ge}) + 1.6\text{kg}\cdot\text{day}(\text{Si})$
实验室深度	4000m 等效水深	16m 等效水深
事例数	≈ 2000	$13(\text{Ge})/4(\text{Si})$

4 讨论

在以上两个实验中,DAMA 探测规模较大,观测时间比较长,有较大的数据统计量,来自周围宇宙线背景的干扰较小,在数据分析中,利用WIMP作用的年调制效应选取事例是一种有效的手段;CDMS 统计量相对较小,宇宙线干扰比较大,它可以有效地测

量计数率,对核反冲信号和电子反冲信号有很好的区分。

但是,DAMA 实验和 CDMS 实验结果还不能完全回答 WIMP 是否存在的问题。DAMA 实验结果只是表明 WIMP 存在的迹象,要确定这一结论还需要更多的实验数据的支持。而 CDMS 利用电离能与核反冲能的比率这个特征在排除电子、 γ 、 α 等背景方面是成功的,但对中子核反冲背景却不能排除,这一点仍需要新的实验研究。

致谢 感谢顾以藩与况浩怀研究员给予的支持和有益讨论

参 考 文 献

- [1] Bernabei R *et al.* Physics Letters B 2000 480 23
- [2] Bernabei R *et al.* Eur. Phys. J. C 2000 18 283
- [3] Bernabei R *et al.* ROM2F/2000-32
- [4] Belli P *et al.* Nuclear Physics B 1999 563 97
- [5] Abusaidi R *et al.* CWRU-P5-00/UCSB-HEP-00-01
- [6] Bernabei R *et al.* ROM2F/2000/35
- [7] Belli P *et al.* ROM2F/2001/08
- [8] Ellis J, Flores R A. Physics Letters B 1991 263 259
- [9] 戴长江,马基茂,张新民等.中国高能物理发展研讨会报告文集.2000.353 [Dai C J, Ma J M, Zhang X M *et al.* Proceedings of the symposium on the development strategy of Chinese high energy physics. 2000. 353 (in Chinese)]
- [10] <http://cdms.berkeley.edu>
- [11] 俞允强.热大爆炸宇宙学.北京:北京大学出版社,2001.4 [Yu Y Q. Big Bang Cosmology. Beijing: Beijing University Press, 2001. 4 (in Chinese)]
- [12] Ambrosio M *et al.* Astropart. Phys. 1997 7 :109
- [13] INFN-LNGS. Annual Report. 1996 62

·读者和编者·

读 者 来 信

物理编辑部并转阎守胜主编:

《物理》今年第7期刊登“《物理》创刊30年(1972—2002)大事记”一文,介绍了很多有价值的历史资料,但有显著不足之处,就是文革一段(1972—1976)的叙述并不完全符合历史事实。

《物理》创刊于文革时期,在宣传、普及物理学知识方面有很大成绩,但也不可避免留下时代的印迹。当时开辟了“把批林批孔运动普及、深入、持久地进行下去”、“沿着毛主席的革命道路前进”、“工农兵学员科学研究总结报告选登”等栏目,也刊登过一些“批判”相对论的文章。

当然,这些栏目下的文章,现在看来并不都是负面的,对具体问题的看法尚可见仁见智,但客观事实是不可抹杀的。向当代青年如实介绍历史是我们的责任,这段历史留给我们物理学界更多的深思,正视过去正是为了开辟未来。

此致

敬礼!

中国科学院物理研究所

王 龙

2002/7/24