

# 非重子冷暗物质粒子的观测及其进展\*

戴长江

(中国科学院高能物理研究所 北京 100039)

**摘要** 简述了宇宙中的暗物质分类、候选者及对其观测研究的意义。综述了冷暗物质粒子观测方法与结果,及其发展趋势。特别评述了 Beijing-Rome 合作组 DAMA 的有关实验与新成果。给出作用截面与冷暗物质粒子质量参数平面内目前世界上最低的排除域,以及首例的冷暗物质粒子年调制效应:其平均值  $\langle S_m \rangle = 0.037 \pm 0.008 \text{cpd} / \text{kg} \cdot \text{keV}$ ,参量估计其质量约为  $60 \text{GeV} / c^2$ ,这可能隐含着冷暗物质粒子的存在。为确认之,尚需更高统计量的验证和重复性的检验。

**关键词** 冷暗物质粒子 间接探测法 直接探测法 统计分析法 年调制效应

## 1 引言

现代天文观测和暴胀宇宙论的研究表明:如果不考虑真空能对宇宙密度的贡献,宇宙常数 $\Lambda$ 所表示的真空能密度 $\Omega_\Lambda = 0$ ,那么宇宙中物质的绝大多数是暗物质,暗物质中大多数是非重子暗物质,非重子暗物质中主要是冷暗物质粒子。若考虑真空能的贡献,并取 $\Omega_\Lambda = 0.7$ ,那么其余的部分仍然以冷暗物质为主。

宇宙相对密度 $\Omega = \rho / \rho_c$ ,  $\rho$ 是宇宙密度, $\rho_c$ 为临界密度, $\rho_c = 1.88 \times 10^{-29} h^2 \text{g} / \text{cm}^3$ 。 $h = H_0 / 100 \text{km} \cdot \text{s} \cdot \text{mpc}$ (取决于哈勃常数 $H_0$ ),其取值范围为 $0.45-0.65^{[1]}$ 。 $\Omega < 1$ 时,宇宙是无限的,为开放式; $\Omega > 1$ ,宇宙是有限的,为封闭式; $\Omega = 1$ ,宇宙为平坦式。宇宙属于何种模式,取决于 $\Omega$ 的观测。现代天文观测表明, $\Omega$ 值随观测范围的扩大而增大。在星系(如银河系)尺度内,由光学手段观测到可见物质的密度 $\Omega_v < 0.02^{[2]}$ 。在星系团和超星系团范围,通过其动力学观测,估计 $0.1 \leq \Omega \leq 0.3^{[3]}$ 。在大尺度结构,由红移天文观测,估计 $0.25 < \Omega < 2^{[4]}$ 。宇宙中的物质按是否可见分为可见物质和暗物质两类,前者如前述仅占百分之几,而后者则占绝大多数。暗物质存在的主要证据如下:

在所观测的螺旋星系(银河系, NGC3198, NGC6503等)中星云旋转速度几乎不随星系盘径向距离而改变,甚至在几倍于星系盘半径处星云速度仍然几乎为常数 $^{[5]}$ 。按离心力与引力平衡原理,必须承认在星系晕中存在着比可见物质多10倍的暗物质,才能解释

1998-05-18收稿,1998-09-24收修改稿

\* 国家自然科学基金资助

星云速度不变的现象. 星系晕中存在的暗物质可能是褐矮星、中子星、黑洞, 人们称之为重质量致密晕体 (MACHO). 近些年来 MACHO、EROS 和 OGLE 等合作组利用引力透镜效应对 MACHO 进行了观测<sup>[6]</sup>, 确定其质量在 0.1—1.2 倍的太阳质量之间, 占星晕总质量的 30%—50%, 那么晕中还有另一半左右应是非重子暗物质.

暗物质存在的另一些证据: 在星系空间气体辐射的 X 射线观测中, 气体的平均速度大于其逃逸速度. 在宇宙微波背景的观测中, 所测得分布很接近绝对黑体辐射分布<sup>[7]</sup>. 这些现象的解释, 必须承认宇宙空间中存在大量暗物质.

宇宙中的物质按其组成成份又可分为重子组成和非重子组成两种. 重子组成的物质包括可见物质 ( $\Omega_b$ ) 和暗物质中的 MACHO, 其相对密度记为  $\Omega_b$ . 基于大爆炸的核合成理论可计算出宇宙中由重子组成的轻元素丰度, 但要解释近来对远河星系 (红移  $Z = 3.3$ ) 轻元素  $^2\text{H}$ ,  $^3\text{He}$ ,  $^4\text{He}$ ,  $^7\text{Li}$  等丰度的观测结果,  $\Omega_b$  必须满足<sup>[8]</sup>:  $0.009 \leq \Omega_b h^2 \leq 0.02$ , 考虑到上述的  $h$  取值范围, 即可得到  $\Omega_b < 0.1$ . 显然, 暗物质中非重子暗物质占大多数. 非重子暗物质又分为热暗物质 (HDM) 和冷暗物质 (CDM). 如果  $\Omega_A = 0$ , 由宇宙大尺度结构形成的模拟计算指出<sup>[9]</sup>:  $\Omega = \Omega_b + \Omega_{\text{HDM}} + \Omega_{\text{CDM}} = 1, \Omega_{\text{CDM}} : \Omega_{\text{HDM}} : \Omega_b = 0.70 : 0.25 : 0.05$ . 可见, 非重子暗物质中冷暗物质占多数. 但另一种观点认为: 宇宙常数  $\Lambda$  所描述的真空能密度  $\Omega_\Lambda = \Lambda / (3H_0)^2$ ,  $\Omega_\Lambda = 0.7$ <sup>[10]</sup>,  $\Omega_{\text{CDM}}$  将小于 0.3. 后来, V. Berezhinsky 等人的研究表明<sup>[11]</sup>: 即使  $\Omega_\Lambda = 0.7$ , 热暗物质的贡献很少,  $\Omega_{\text{CDM}}$  仍为 0.3, 这并不影响寻找冷暗物质的信心.

热暗物质的候选者为中微子. 冷暗物质可能是轴子, 也可能是宇宙早期遗留下来的稳定的、弱作用的重粒子 (WIMP), 它可能是粒子物理的超对称 (SUSY) 模型所预言的  $\tilde{\nu}$  (neutralino). 还有人认为它可能是一种强作用的重粒子 (SIMP) 如超对称模型的  $\tilde{q}$  (scalar quark). 因此, 冷暗物质粒子的观测研究对粒子物理、天体物理和宇宙学的发展具有重要的意义.

关于热暗物质候选者中微子  $\nu$ , 据宇宙论的标准模型, 它对宇宙密度的贡献为<sup>[12]</sup>:

$$\Omega_{\text{HDM}} h^2 = \sum_i m_{\nu_i} / 94\text{eV}, \quad i \text{ 为中微子的味, 考虑到 } \sum_i m_{\nu_i} \text{ 为几 eV, 则 } \Omega_{\text{HDM}} \approx 0.2. \text{ 这似乎可解释}$$

宇宙的热暗物质问题. 但有人认为中微子是费米子, 应服从泡利不相容原理, 它们不可能过多地聚集在一起而构成热暗物质. 这也是为什么  $\Omega_\Lambda = 0.7$  时,  $\Omega_{\text{CDM}}$  仍为 0.3 的原因之一.

关于冷暗物质候选者之一的轴子  $a$ , 是为了解决强作用中 CP 破坏而引入的粒子. 从宇宙论来看, 它产生于宇宙的早期, 对宇宙密度的贡献为<sup>[13]</sup>  $\Omega_a h^2 = 2(m_a / 10^{-5}\text{eV})^{-1.18}$ . 为避免宇宙过于封闭, 限制轴子的质量下限约为  $10^{-6}\text{eV}$ <sup>[14]</sup>, 而由寻找轴子实验给出的排除域  $m_a > 10^{-3}\text{eV}$ <sup>[15]</sup>. 因此, 轴子质量的允许范围为  $10^{-6}\text{eV} < m_a < 10^{-3}\text{eV}$ . 如此之小的质量, 给实验探测带来很大困难. 通常寻找轴子的实验方法是借助于轴子在强磁场中转化为  $\gamma$  射线, 通过对  $\gamma$  的探测 (谐振腔的共振或激光的相干) 来确定轴子. 已进行的实验均得负结果<sup>[16]</sup>. 较大规模的实验<sup>[17]</sup> 还在进行. 人们期待着他们的结果.

令人更感兴趣的冷暗物质另一候选者 WIMP, 它对宇宙密度的贡献<sup>[18]</sup> 为:  $\Omega_w h^2 \approx 0.1\text{pb}c / \sigma_A \langle v \rangle$ ,  $\sigma_A$  为湮没截面,  $\langle v \rangle$  为 WIMP 的平均速度. 若取  $\Omega_w = \Omega_{\text{CDM}}$ ,  $\sigma_A$  等于弱作用截面, 而  $v$  为千分之一光速, 估计 WIMP 的质量范围为  $10\text{GeV} < M_w < 1000\text{GeV}$ , 这为 WIMP 的寻找提供依据.

如上述, WIMP 可能是超对称 (SUSY) 模型所预言的最轻粒子  $\tilde{\nu}$ . 寻找 SUSY 粒子实验有加速器物理实验, 也有非加速器实验. 不少加速器实验如在 LEP 的四个实验做了很多努力, 但都未能获得正结果, 仅给出 Higgs 粒子质量下限为  $48\text{GeV}/c^{2[19]}$ , 近来给出的下限约为  $90\text{GeV}/c^2$ . 关于非加速器实验方面, 将评述 WIMP 的探测方法及其获得的结果, 包括 DAMA (Beijing-Rome) 与 BPRS (Beijing-Paris-Rome-Saclay) 两合作组的工作 (北京组成员: 丁林垵、马基茂、况浩怀、戴长江), 然后讨论其发展趋势.

## 2 探测方法与实验结果

1985 年以来, WIMP 的观测研究在世界上逐渐成为非加速器物理最热门的课题之一. 其探测方法有二, 间接法和直接法. 两种方法及其结果综述如下, 其中直接探测法也用于寻找 SIMP.

### 2.1 间接探测法

WIMP 被太阳、地球或银晕俘获, 湮没产生次级粒子:  $\chi\bar{\chi} \rightarrow \nu\bar{\nu}$  或  $\gamma$  或  $p$  或  $e^+$ . 间接探测法即是通过探测次级粒子来确认 WIMP. 观测在空间湮没所产生  $\bar{p}, e^+, \gamma$  的实验有丁肇中领导的 AMS, 将于 2000 年后投入运行. 观测在太阳、地球中心湮没产生中微子  $\nu$  的则有大型中微子探测器, 为屏蔽宇宙线背景, 它们被安装在地下或山洞中, 主要基于探测由  $\nu$  产生的  $\mu$  来确认 WIMP. 此类  $\mu$  多为向上  $\mu$  事例, 称为  $\mu_{\text{up}}$ . 其事例率可表示为

$$\frac{d\mu_{\text{up}}}{dt} = f_w \sigma(\sigma_e, \sigma_p, \sigma_\mu) n_t V(E) F(E) I(E) \quad (1)$$

它正比于 WIMP 的流强  $f_w$  和靶核数密度  $n_t$ , 以及 WIMP 俘获、湮没、通过  $\nu$  产生  $\mu$  的截面  $\sigma(\sigma_e, \sigma_p, \sigma_\mu)$ .

表1 一些地下中微子探测器的性能及其所测和预期向上  $\mu$  的数据

$\nu$ 探测器	Superkamiokande <sup>[20]</sup>	Kamiokande <sup>[20]</sup>	IMB <sup>[21]</sup>	MACRO <sup>[22]</sup>	BAKSAN <sup>[23]</sup>
探测技术	水切仑柯夫	水切仑柯夫	水切仑柯夫	闪烁径迹量能器	闪烁量能器
探测器规模 ( $M^3$ )	$\pi 16.9^2 \times 36.2$	$\pi 7.8^2 \times 16.1$	$18 \times 17 \times 22.5$	$12 \times 77 \times 9$	$17 \times 17 \times 11$
地下深度 (等效水深M)	2700	2700	1570	3700	850
有效运行时间 (年)	0.63	~7	2.53	3.06	11.94
获取 $\mu$ 阈能 (GeV)	$\geq 6$	$> 3$	$\geq 1.8$	$> 1$	$> 1$
向上 $\mu$ 事例数	267	364	430	255	558
向上 $\mu$ 流强	$1.76 \pm 0.10$	$1.91 \pm 0.10$	$2.22 \pm 0.11$	$3.62 \pm 0.55$	$3.25 \pm 0.19$
大气 $\nu$ 产生向上 $\mu$ 流强的理论值	1.81	2.21	2.51	2.85	2.85
WIMP 产生向上 $\mu$ 流强的上限				$< 0.31$ (地球)	$< 0.21$ (地球)
				$< 0.66$ (太阳)	$< 0.35$ (太阳)

表中地球、太阳分别表示 WIMP 被地球、太阳俘获的情况. (流强单位:  $10^{-13}/\text{cm}^2 \cdot \text{s} \cdot \text{sr}$ )

$\sigma_p \sigma_\mu$ ), 速度分布  $V(E)$ 、形状因子  $F(E)$ 、耦合作用  $I(E)$  等的函数.  $E$  为 WIMP 的能量.

地下大型中微子探测器系统所观测到的向上  $\mu$  的事例数列于表 1.

基于 SUSY 模型, 预期 WIMP 被地球俘获所产生的  $\mu_{\text{up}}$  流强为  $10^{-14} - 10^{-17} / \text{cm}^2 \cdot \text{s} \cdot \text{sr}$ . 由表 1 可见, 地下中微子探测器所观测到向上  $\mu$  事例率主要是由大气中微子所产生的, 而由 WIMP 产生向上  $\mu$  事例率至少比它低一个量级. 显然, 期望测到 WIMP 信息尚需更大的探测器规模和更长的观测时间. 总之, 这类探测器规模大, 接收度高, 但有两个问题: 一是大气中微子等本底很高, 二是中间过程多 (如俘获、湮没、转换等), 待定参数也多, 而且难以算准. 因此, 间接观测法较难获得准确的观测结果.

## 2.2 直接探测法

### 2.2.1 寻找 WIMP

此法是通过探测 WIMP 与靶核的弹性散射与非弹性散射信号直接探测 WIMP.

对于非弹性散射, 是通过探测由 WIMP 激发靶核后其退激所发射的  $\gamma$  谱线来探测 WIMP 的. 具有靶核数  $N_t$  的探测器所测到的这类  $\gamma$  谱线的计数率  $R_t$  为

$$R_t = \frac{\rho_w \langle v \rangle}{m_w} \sigma_t N_t f F^2 \quad (2)$$

式中  $\rho_w$  为 WIMP 在银晕的密度, 一般取为  $0.3 \text{ GeV} / \text{cm}^3$ ,  $m_w$  是 WIMP 的质量,  $\langle v \rangle$  为 WIMP 相对于靶核的平均速度.  $F^2$  为靶核的形状因子.  $f$  是 WIMP 相对于靶核速度的分布函数. WIMP 与靶核的类点非弹性散射截面  $\sigma_t$  可表示为

$$\sigma_t = \frac{\eta^2}{\pi m_N} |\langle N^* | M | N \rangle|^2$$

式中  $m_N$  是靶核质量,  $\eta$  为约化质量.

$|\langle N^* | M | N \rangle|$  为非弹性作用矩阵元.

如果知道  $\rho_w$ ,  $\sigma_t$ , 由所测的  $R_t$ , 据 (2) 式即可获得 WIMP 的质量  $m_w$ . 由于当前探测技术的限制, 仅能给出参量  $\sigma_t$  (或  $\rho_w$ ) 的极限值. DAMA 组采用 6.5kg 的液氙, 通过测量由 WIMP 激发  $^{129}\text{Xe}$  退激所发射的 39.6keV  $\gamma$  谱线, 给出 WIMP 密度  $\rho_w$  与 WIMP 质量  $m_w$  参数平面内新的排除域<sup>[24]</sup> (见图 1). Osaka 组<sup>[25]</sup> 曾用 NaI (TI) 晶体, 由测量  $^{127}\text{I}$  被激发而发射的 57keV  $\gamma$  谱线, 给出  $\rho_w - m_w$  平面内的排除域. 为比较这两组的实验结果, 图 1 中给出 DAMA 组的  $^{129}\text{Xe}$  和 Osaka 组  $^{127}\text{I}$  分别对 WIMP 的候选者  $\tilde{\gamma}$  (photino),  $\tilde{h}$  (higgsino) 和  $\nu_M$  (massive majorana neutrino) 的上限曲线.

关于弹性散射, 是通过测量 WIMP 与靶核 (N) 的核反冲信号直接探测 WIMP 的.

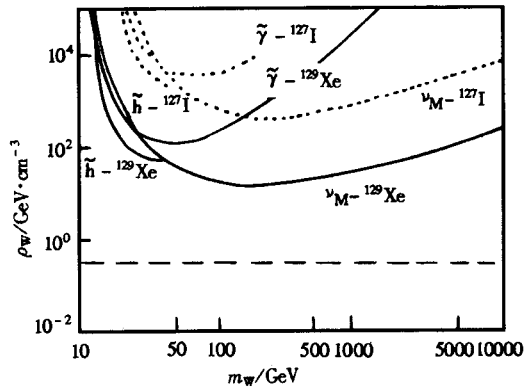


图1 银晕WIMP密度 $\rho_w$ 上限  
与WIMP质量 $m_w$ 的关系

WIMP-N 弹散的核反冲能为:  $E_r = m_N v^2 (1 - \cos\theta) \left( \frac{m_w}{m_N + m_w} \right)^2$ ;  $v$  为 WIMP 的速度,  $m_w, m_N$  分别为 WIMP 和靶核 N 的质量,  $\theta$  为质心系的散射角.

WIMP-N 核反冲事例的微分谱为

$$\frac{dR}{dE_r} = R_0 S(E_r) F^2(E_r) I \quad (3)$$

式中  $R_0 = \frac{2}{\sqrt{\pi}} \frac{N_0}{A} \frac{\rho_w}{m_w} \sigma_0 \langle v \rangle$ , 称为类点核的平均事例率,  $\sigma_0$  为类点核的弹性散射截面,  $A$  为靶核质量数,  $N_0$  为阿伏伽德罗常数;  $S(E_r)$  是速度  $v$  的分布函数,  $F^2(E_r)$  为核的形状因子,  $I$  为作用耦合因子, 为:

$$\begin{cases} C^2 \lambda^2 J(J+1) & \text{对于自旋相关耦合} \\ A^2 & \text{对于自旋无关耦合} \end{cases}$$

其中  $C\lambda$  为夸克与靶核自旋相关因子,  $J$  为核自旋.

弹性散射核反冲测量法是通过核反冲能谱  $\frac{dR}{dE_r}$  的测量来寻找 WIMP 并确定其质量的.

但目前仅能给出一些极限值. 即在设定天体物理参数  $\rho_w$  后, 给出  $\sigma_{w-N} - m_w$  关系极限曲线. 或设定核物理参数  $\sigma_{w-N}$  后, 给出  $\rho_w - m_w$  关系极限曲线. 用于测量核反冲信号的探测器有闪烁体 (NaI(Tl), CaF<sub>2</sub>(Eu), 液氙 LXe, ...), 半导体探测器 (Ge, Si) 和辐射热测量计 (Bolometer), 它们的观测结果 (自旋无关 (SI) 的作用截面上限) 分述如下.

### (1) 闪烁体

关于闪烁体实验的规模、性能及结果列于表 2.

表 2 闪烁体实验的规模、性能及观测结果

合作组	实验室	闪烁体 类型	规模 (kg)	放杂浓度		阈能 (keV)	实测本底 (在阈能处) (cpd/keV · kg)	$\sigma_{w-N}$ 上限 (pb) (SI) ( $m_w$ 在 60 GeV 处)
				U/Th	<sup>39</sup> K			
BPRS,	LNGS	NaI(Tl)	100	$2 \times 10^{-12}$ g/g	$50 \times 10^{-9}$ g/g	2	1	$5 \times 10^{-6}$
DAMA		CaF <sub>2</sub> (Eu)	0.4			4	15	
		LXe	6.5			10	3	$5 \times 10^{-5}$
Osaka	Kamiokande	NaI(Tl)	36	$0.3 \times 10^{-9}$ g/g	$0.5 \times 10^{-6}$ g/g	5	6	
UK	Bulby	NaI(Tl)	6	-	-	7	2	$2 \times 10^{-5}$

由表 2 可见, 与英、日组相比, BPRS 与 DAMA 组的 NaI(Tl) 晶体阵列规模最大, 放杂浓度、阈能、实测本底等都最低, 因而给出的  $\sigma_{w-N}$  上限也最低<sup>[26]</sup> (见图 2). BPRS & DAMA 组最先采用 CaF<sub>2</sub>(Eu)<sup>[27]</sup> 和 LXe<sup>[28]</sup> 探测 WIMP, 在世界上首次给出  $\sigma_{w-N}$  的上限. 对于自旋相关耦合面的上限分别为 4pb (CaF<sub>2</sub>) 和 1pb (Xe).

### (2) 半导体探测器

此类探测器如 Ge, Si 探测器是通过测量 WIMP 引起靶核反冲的电离信号 (电子-空穴对) 来探测 WIMP, UCSB/UCB/LBL 合作组<sup>[29]</sup> 最先采用 2kg 的 Ge 观测 WIMP, 给出自旋无关作用截面上限  $\sigma_{w-N} < 100$ pb.

近些年来, Heidelberg-Moscow<sup>[30]</sup> (HDM) 组采用富集 <sup>76</sup>Ge 半导体探测器 10kg, 在做双β

衰变实验的同时兼做 WIMP 实验. 给出自旋无关作用截面  $\sigma_{W-N} < 2 \times 10^{-5} \text{pb}$  ( $m_W$  在 60 GeV 处), 但不如 DAMA 组 NaI(Tl) 所给出的结果.

作为比较, 图 2 中给出 DAMA 组的 NaI(Tl), LXe, UCSB / UCB / LBL 组和 Heidelberg-Moscow 组的 Ge, UK 组的 NaI 及 Milano 组的  $\text{TeO}_2$  等所测到的 WIMP 自旋无关作用截面极值  $\sigma_{W-N}$  与 WIMP 质量  $m_W$  的关系曲线.

### (3) 辐射热测量计 (Bolometer)

Bolometer 工作于低温 (几十 mK), 它可测量由核反冲产生的温度变化, 具有低阈能、高能量分辨的特点, 是探测 WIMP 理想的探测器之一. 但目前尚处于研制阶段, 还未以较大规模投入观测实验. 表 3 简列了目前所研制的种类及性能.

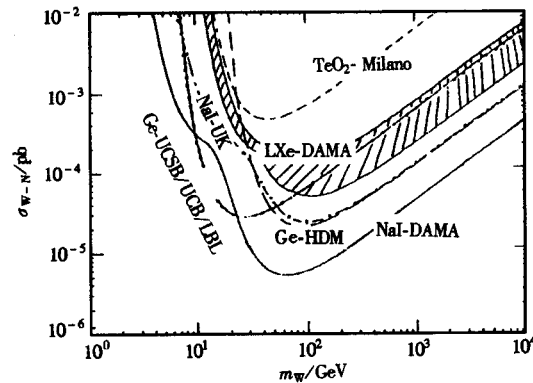


图2 自旋无关的作用截面上限  $\sigma_{W-N}$  与 WIMP 质量  $m_W$  的关系

表3 Bolometer 的类别与性能

合作组	种类	重量 (g)	工作温度 (mK)	能量分辨 ( $\sigma_E / E$ )	阈能 (keV)
Milano Univ <sup>[31]</sup>	$\text{TeO}_2$	334	25	1% (在 60 keV)	
CRESST <sup>[32]*</sup>	$\text{Al}_2\text{O}_3$	250	7	0.2 keV (在 1 keV)	0.5
TOKYO <sup>[33]</sup>	LiF	2.8	12	6% (在 60 keV)	4

\* CRESST 组在 Gran Sasso 正在筹建 1 kg 规模的  $\text{Al}_2\text{O}_3$  Bolometer, 并将投入 WIMP 的观测实验.

比较上述的 3 种探测器, 就现阶段而言, 闪烁体已达到低放射性、低阈能、低本底、大规模, 很适合于 WIMP 的直接观测.

### (4) 实验技术与方法的开发

直接法具有过程简单, 待定参数少等优点, 可望获得较准确的结果. 但由于 WIMP 是弱作用的, 其事例率很低 ( $10^{-1} - 10^{-4} \text{cpd} / \text{keV} \cdot \text{kg}$ ), WIMP 所引起的核反冲信号也很弱, 仅几 keV, 因此这类实验成功的关键在于研制相当规模、很低本底探测系统和开发相应的实验技术与方法. BPRS & DAMA 组所采用的主要措施如下:

(a) 探测器装在地下或山洞中, 利用厚岩层屏蔽宇宙线;

(b) 大幅度降低探测器件的放射性杂质 (如  $\text{U} / \text{Th} \sim 10^{-12} \text{g} / \text{g}$ ). 北京组在国家自然科学基金委支持下, 曾在北京建成低本底测量装置<sup>[34]</sup>, 为 BPRS 组挑选了所需的器件;

(c) 探测器的 n,  $\gamma$  屏蔽采用低放射性的屏蔽材料: 石蜡 (30 cm) + Cd (1.5 mm) + Pb (15 cm) + Cu (10 cm);

(d) 封闭探测器系统, 用  $\text{N}_2$  驱赶系统内部的氦气;

(e) 为降低本底提供依据, 为获得此屏蔽条件下的标准本底谱以备将来的剥谱处理, 北京组对此 NaI(Tl) 阵列及其屏蔽系统 (即对 (b—d) 条件) 进行本底谱的 Monte Carlo 模

拟,结果表明:本底主要来源于晶体本身的 U/Th, K, 而 (c), (d) 措施足以屏蔽掉环境中的中子、 $\gamma$  射线和氡气对本底的贡献。

(f) 采用低噪声低阈能的数据获取系统 (DAQ). 北京组设计了 12 路 multiplexers<sup>[35]</sup>, 使系统的阈能达到 2keV;

(g) 发展从本底中提取核反冲信号的有效方法. 根据 WIMP 在 NaI(Tl) 中产生核反冲信号脉冲波形与  $\gamma$  产生的波形的不同, 合作组内 Saclay, Paris 与 Rome 组采用参考脉冲 (reference pulse) 法扣除本底<sup>[36]</sup>, 北京组采用基于波形分析的统计分析法扣除本底<sup>[37]</sup>, 共同的努力使 DAMA 获得最好的结果;

(h) 核反冲动能的标定——猝灭因子标定 (“quenching” calibration). “quenching” 即核反冲信号幅度为同样能量的  $\gamma$  信号幅度的份额, 记为  $f_0$ .  $f$  的标定方法是用中子来标定核反冲信号幅度, 而用  $\gamma$  源测  $\gamma$  信号幅度. 其结果列于表 4

表 4

靶核	<sup>23</sup> Na	<sup>127</sup> I	<sup>19</sup> F	<sup>40</sup> Ca
$f$	0.25	0.07	0.07	0.05

#### (5) 年调制效应的观测

WIMP 年调制效应的观测是寻找 WIMP 的另一有效途径. 太阳对 WIMP 有一速度 (约 230km/s), 地球以速度 30km/s 绕太阳公转, 其公转平面与太阳速度的倾角为 60°. 这样, WIMP 对地球的速度  $v_x$  为

$$v_x = 230 + 15\cos\omega(t - t_0) \text{ km/s}$$

式中,  $\omega$  为角速度  $\omega = \frac{2\pi}{365}$ ,  $t_0$  为 6 月 2 日 (此日事例率  $S(t)$  达到极大值), 由  $v_x$  引起的

核反冲事例率  $S(t)$  为

$$S(t) = S_0 + S_m \cos\omega(t - t_0) \quad (4)$$

式中  $S_0$  为事例率  $S(t)$  的常量,  $S_m$  为 WIMP 的年调制量.

$S(t)$  随时间有周期变化 (周期为一年), 而现在 DAMA 组的 NaI(Tl) 晶体阵列的本底很低, 且没有周期变化, 其 100kg 的规模可获很高统计量的事例. DAMA 组于 1996 年 5 月开始对 WIMP 的年调制效应进行了观测, 初获结果为: 在能量为 2—12keV 范围内调制量的平均值  $\langle S_m \rangle = 0.037 \pm 0.008 \text{ cpd/kg} \cdot \text{keV}$ , 参数估计 WIMP 的质量约为  $60 \text{ GeV}/c^2$ . 图 3 给出 WIMP 在自旋无关截面与质量参数平面内实验结果及理论予期的存在域 (阴影区), 此结果首先在 TAUP'97 上公布, 后刊于 Phys. LettB<sup>[38]</sup>, 引起同行的密切关注, 因为这可能隐含着 WIMP 的存在. 当然尚需进行更高统计量的验证和重复性的检验.

#### 2.2.2 寻找 SIMP

D. Starkmen<sup>[39]</sup>等人综述了以往的实验结果及有关模型, 提出了 SIMP 在作用截面  $\sigma_{S-N}$  与 SIMP 质量  $m_s$  参数平面内可能存在的三个区域 (如图 4 的阴影区). BRPS 组期望在这些区域内寻找 SIMP, 并于 1993 年 (主要由北京组负责) 开始了此项实验. 银晕中的冷暗物质粒子的运动速度很慢, 可近似认为 SIMP 具有千分之一光速, 它又属于强作用性质, 当它穿行于有一定距离的两探测器时, 所产生的两个信号有一定的时间差, 因此可采用成对

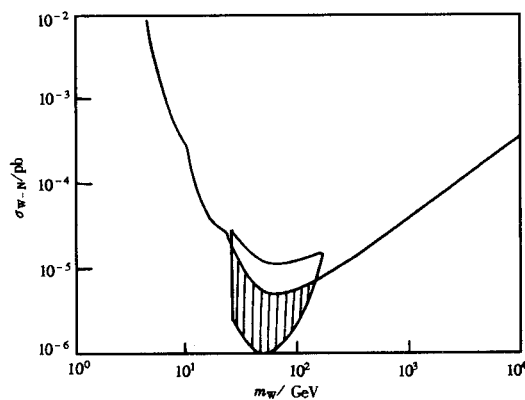


图3 自旋无关的作用截面 $\sigma_{W-N}$ 与WIMP质量 $m_W$ 的关系  
阴影区为预期的WIMP存在域.

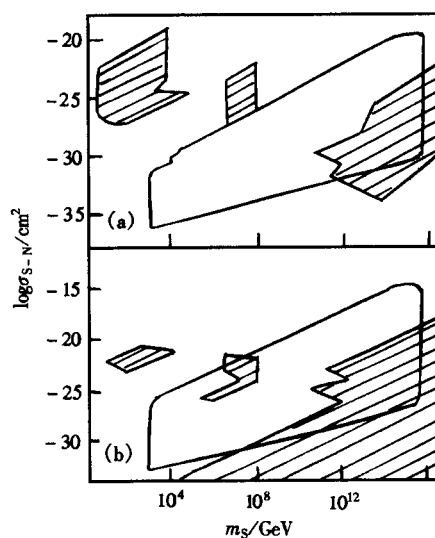


图4 作用截面 $\sigma_{S-N}$ 与SIMP质量 $m_S$ 参数平面内的排除域(实线框内)  
阴影区为SIMP可能存在域.  
(a) 为自旋无关; (b) 为自旋相关.

NaI(Tl)晶体作延迟符合测量获取 SIMP 事例. 实验采用了排除本底的有效措施:

- (a) 同时设置时间窗口(据 SIMP 的速度和每对晶体之间距离)和能量窗口(据  $m_S$  的范围)大量排除符合本底;<sup>[40]</sup>
- (b) 采用脉冲波形分析法排除本底、噪声;
- (c) 采用多路符合法再次降低符合本底.<sup>[41]</sup>

所获得的新排除域表明在图 4 中实线框内,在文献<sup>[39]</sup>所列的 SIMP 可能存在区域中给出新的排除域<sup>[42]</sup>.

### 3 展望

DAMA 合作组获得首例的 WIMP 年调制效应,并引起同行的密切关注. 为确认之, DAMA 组将扩大 NaI(Tl)晶体阵列规模(如 500kg 以上),北京组将负责扩展的 DAQ 系统和采用神经网络分析法更有效地从本底中提取核反冲信号,从而在更高统计量的水平上检验 WIMP 的年调制效应. 英国的 NaI(Tl)组也将扩大规模和降低本底,目的也在检验此效应. 正如 CERN COURIER(97 年 11 月)所报道的<sup>[43]</sup>: HDMS 组、CDMS 组和 GENIUS 组分别将在半导体探测器和 Bolometer 方面大规模(如吨级)地投入以及尽可能地提高其性能,期望在更低本底水平下寻找 WIMP,在更高统计量的范围内检验 WIMP 的年调制效应,进而确定 WIMP 的存在.

在间接观测 WIMP 方面, Super Kamiokande 组继续的长期运行可望获得新成果.



## 参 考 文 献

- 1 Schramm D D. Talk Presented at the DESCEU Symposium on Dark Matter in the Universe and its Direct Detection, Tokyo, Nov. 1996
- 2 Walker T P et al. *Astrophys J.*, 1991, **376**:51
- 3 Blome H J, Preister W. *Naturwissenschaften*, 1984, **71**:456, 515, 528; Schramm D N. Proc Int Symp on Weak and Electromagnetic Interactions in Nuclei, WEIN' 86 (Heldelberg). In: Klapdor H V ed. Berlin: Springer, 1986. 1033; Tonry J L. *Ann. NY Acad. Sci.*, 1993, **688**:113
- 4 Dekel A. *Ann. NY Acad. Sci.*, 1993, **688**:558; Dekel A et al. *Astrophys J.*, 1993, **412**:1
- 5 Auborg E. Preprint DAPNIA/SPP 92-22; Rubin V C, Ford W K. *Astrophys J.*, 1970, **159**; Rogstad D H, Shostak G S. *Astrophys J.*, 1972, **176**: 315; Rubin V C, Ford W K, Thonnard N. *Astrophys J.*, 1980, **238**: 471
- 6 Pratt M R et al. *Astro-ph/9606134*; Alcock C et al. *Nature*, 1993, **365**:621; Aubourg F et al. *Nature*, 1993, **365**: 623; Udalski A et al. *Acta. Astr.*, 1993, **43**:289
- 7 Taylor A N, Rowan-Robinson M. *Nature*, 1992, **359**:396
- 8 Sarkare S. *Rep. Prog. Phys.*, 1996, **59**: 1493; Ellis J. *Nuovo Cimento*, 1994, **A107**:1091; Copi C J et al. *Science*, 1995, **267**: 192
- 9 Primack J R, Holtzman J A. *Astrophys J.*, 1993, **405**:428
- 10 Kochantk C. *AP, J.*, 1993, **419**:12
- 11 Berezinsky V et al. Preprint CERN-TH96-42
- 12 Gershtein S S, Zeldovich Y B. *JETP Lett.*, 1966, **4**:120
- 13 Battye B A et al. *Nuclear Phys.*, 1994, **423**:260
- 14 Abbott L, Sikivie P. *Phys. Lett.*, 1983, **B120**:133
- 15 Kim J E. *Phys. Rep.*, 1987, **150**:1
- 16 Raftelt G G. *Phys. Rep.*, 1990, **198**:1; Turner M S. *Phys. Rep.*, 1990, **197**:67
- 17 Rosenberg L. RESCELI Symposium on Dark Matter in the Universe and its Direct Detection. Tokyo, 1996
- 18 Jungman G et al. *Phys. Rep.*, 1996, **267**: 195
- 19 Adeva B et al. *Phys. Lett.*, 1991, **B257**:450
- 20 Suzuki A et al. Proceedings of 7th International Workshop on Neutrino Telescopes. Venice, 1996, 263
- 21 Cardall C Y, Fuller G M. *Phys. Rev.*, 1996, **D53**: 4421
- 22 MACRO Colla, Ronga F et al. *Neutrino*. 1996, 529
- 23 Mikheyev S. Proceedings of the 8th Rencontres de Blois on Neutrinos, Dark Matter, and the Universe, Blois, France, 1996
- 24 DAMA Colla. *Phys. Lett.*, 1996, **B387**:222—226
- 25 Fushimi K et al. *Nucl. Phys.*, 1994, **B35**:400
- 26 DAMA Colla. *Phys. Lett.*, 1996, **B389**:757—766
- 27 BPRS Colla. *Astroparticle Phys.*, 1994, **2**:117—125; DAMA Colla. *Astroparticle Phys.*, 1997, **7**:73—76
- 28 DAMA Colla. *Nucl. Phys.*, 1996, **B48**:62—63
- 29 Caldwell D O et al. *Phys. Rev. Lett.*, 1988, **61**:510
- 30 Beck M et al. *Nucl. Phys.*, 1996, **B48**:68
- 31 Alessandrello A et al. *NIM.*, 1994, **A344**:243
- 32 Seidel W et al. *Nucl. Phys.*, 1996, **B48**:77
- 33 Minowa M et al. *NIM.*, 1993, **A327**:612
- 34 Dai Changjiang. A Study for Low Radioactive Background Experiment. Talk Presented at "Dark Matter in Universe" International Workshop, Beijing, 1992

- 35 Dai Changjiang. Development of Multiplexer and DAQ for WIMP Experiment. Internal Report of BPRS Colla. 1995, 1
- 36 DAMA Colla. Nucl. Phys., 1996, **B48**: 60—61
- 37 Dai Changjiang. Pulse Shape Analysis and its Discrimination for Na/ e. 1994, 12; Statistic Analysis for Na/ e. Internal Report of BPRS and DAMA Colla. 1996, 8
- 38 DAMA Colla. Phys. Lett., 1998, **B424**: 195
- 39 Starkmen D et al. Phys. Rev., 1990, **D41**(12)
- 40 Dai Changjiang. About Background of SIMP Experiment. Internal Report of BPRS Colla. 1993, 3
- 41 Dai Changjiang. WIMP & SIMP Experiment System. Internal Report of Bprs Colla. 1993, 6
- 42 BPRS Colla. Astroparticle Phys., 1994, **2**: 13—19; 1996, **4**: 195—198
- 43 CERN COURIER. 1997, (9): 37

## Progress in the Detection of Cold Dark Matter Particles\*

Dai Changjiang

(*Institute of High Energy Physics, The Chinese Academy of Science, Beijing 100039*)

**Abstract** The dark matter in Universe, its class and candidates, and the significance of observation are briefly described. The methods and results and its progress of detection for the cold dark matter particles are reviewed, in particular, the observation of DAMA collab. (Beijing-Rome) gives the new limit on WIMP search and the first annual modulation signature:  $\langle S_m \rangle = 0.037 \pm 0.008$  cpd / keV · kg, the estimated WIMP mass =  $60\text{GeV}/c^2$ . It is possibly the hint of the existence of WIMP.

**Key words** Particle of cold dark matter, indirect detection, direct detection, statistic analysis, annual modulation

---

Received 18 May 1998, Revised 24 September 1998

\* Supported by the National Natural Science Foundation of China