

DAMA 暗物质实验本底问题的研究

盛祥东 戴长江 何会林¹⁾

(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 文章介绍中意合作 DAMA 组 100kg NaI(Tl) 晶体阵列实验结果, 重点探讨了可能影响探测实验结果的多种因素. 通过蒙特卡罗模拟计算, 北京组得到了探测晶体阵列内部的放射性杂质的本底贡献, 它们与本底的实验结果一致. 另外, 模拟计算结果表明, 快中子、太阳中微子等对本底的贡献很小, 这样也排除了由它们引起 DAMA 实验结果的可能性.

关键词 弱作用重粒子 太阳中微子 核衰变

1 引言

DAMA 用 100kg NaI (Tl) 探测弱作用重粒子 (WIMP (Weakly Interacting Massive Particles)) 的实验是在意大利 Gran Sasso 国家低本底实验室进行的. 实验室所在的位置深度约为地表下 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, 仅有能量超过 2TeV 的 μ 和各类中微子才能到达实验室内部. 同时, 长期形成的沉积岩内部的放射性杂质含量已变得很低.

DAMA 组的 100kg NaI (Tl) 晶体阵列自 1996 年开始取数以来, 迄今已经积累了 57986kg day 的数据量. DAMA 组对实验数据进行年调制效应分析, 在低能区 (2—6keV) 得到与模型无关的年调制事例率的分析结果^[1], 可用 WIMP 存在来进行解释. 在显著性接近 4 倍标准偏差的条件下, 估计 WIMP 的质量约为 52_{-8}^{+10} GeV, WIMP 与质子的作用截面 $\xi_{\sigma p} = (7.2_{-0.9}^{+0.4}) \times 10^{-6}$ pb, 这是世界上首例 WIMP 可能存在的实验结果.

为增加 WIMP 观测实验数据的统计量, 以便在更高精度范围内确定 WIMP 的存在及其质量大小, DAMA 组已开始对现有 100kg 阵列的基础上继续扩大, 计划形成 250kg 的探测器规模. 北京组也将继续与意大利组合作, 参与 DAMA 实验探测阵列的升

级改造工程.

2 DAMA 探测器阵列及其特点

100kg NaI (Tl) 晶体阵列中的探测器分为 WIMP 探测器和 SIMP 探测器. 其中, WIMP 探测器是由 9 个尺寸为 $(10.2 \times 10.2 \times 25.4)$ cm³ 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 4 个尺寸为 $(8 \times 8 \times 30)$ cm³ 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. WIMP 探测器的每块晶体的两端各有一个 10cm 长的 Tetrasil-B 型光导; SIMP 探测器的 4 块晶体上都有一个 Tetrasil-B 窗, 其中一块两端接 Tetrasil-B 型光导, 其余 3 块用的是非紫外透射的有机玻璃光导. 整个探测器的实验装置如图 1 所示. 探测器外部屏蔽结构 (由内到外) 依次是: 10cm 厚的 OFHC 型低放射性铜砖、15cm 厚放置时间几年以上的铅 (老铅)、1.5mm 的镉和 30cm 的石蜡层. 这样的探测结构能够有效地对周围环境的放射性进行屏蔽. 同时, 为防止铜室内氧的积累, 采用不断充入高纯度氮气的方法来更新探测器内部气体.

表 1 给出实验上用到的各类探测材料的放射性杂质含量及氡的放射性活度的测试结果.

2003 - 03 - 14 收稿

1) E-mail: hehl@mail.ihep.ac.cn

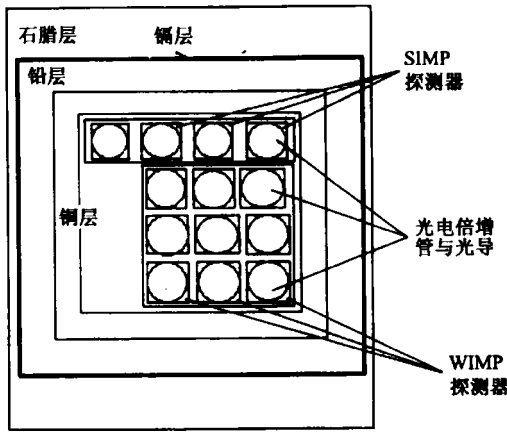


图 1 100kg NaI (Tl)晶体阵列的示意图

表 1 探测器中主要材料的放射性杂质含量的测试结果(95% C.L.)

探测器材料	放射性杂质	放射性杂质含量	
		极小值	极大值
NaI (Tl) 晶体	^{238}U , ^{235}U	2.0ppt	0.1ppb
	^{232}Th	2.0ppt	0.1ppb
	^{40}K	5.0ppt	10ppt
光电倍增管	^{238}U , ^{235}U	30. ppb	
	^{232}Th	30. ppb	
	^{40}K	0.5ppb	1.0ppb
光导	^{238}U , ^{235}U	< 1.0ppb	
	^{232}Th	< 2.0ppb	
	^{nat}K	< 1.3ppm	
铜室	^{238}U , ^{235}U	< 0.5ppb	
	^{232}Th	< 1.0ppb	
	^{nat}K	< 0.6ppm	
氮气	^{222}Rn	2.0Bq/cm ³	7.0Bq/cm ³

注: 1ppb = 10^{-9} g/g, 1ppm = 10^{-6} g/g, 1ppt = 10^{-12} g/g.

3 可能影响 DAMA 实验结果的几个因素的考虑

考虑到 DAMA 实验在长期的运行过程中, 必然受到来自探测器内外各种背景源的影响. 例如, 探测器内部放射性杂质的衰变将贡献较强的本底计数; 实验室周围的背景中子和 γ 等也都以一定的流强和能量存在, 它们对探测器的影响是怎样的呢? 太阳中微子与 WIMP 同样具有弱作用性质, DAMA 实验结果是否是由它们引起的呢? 所有这些问题都会影响到人们对 DAMA 组实验结果的认识. 因此, 对这些有可能影响 DAMA 实验的外界因素的深入

研究是必要的, 也是重要的.

3.1 DAMA 组 100kg NaI (Tl) 晶体阵列实验本底的模拟计算

尽管 DAMA 100kg NaI (Tl) 晶体阵列中用到的材料都经过严格提纯和筛选, 探测器内部的 NaI (Tl) 晶体、光导、光电倍增管、各种探测器屏蔽材料 (铜砖、铅砖等) 以及内部空间气体依然会含有一定浓度的放射性杂质 (^{238}U , ^{232}Th , ^{40}K 和 ^{222}Rn 等). 这些放射性杂质会不断发生衰变, 有的将形成相应的放射性系列, 如钍系 ($4n$)、铀系 ($4n+2$) 等. 由于这些放射性核素的半衰期一般较长, 所以它们可以长时间地对实验测量造成相应的本底计数.

在模拟计算过程中, 我们假定: (1) 经历了一个较长时间的衰变过程后, 各种探测材料内部的 ^{238}U , ^{232}Th , 以及 ^{222}Rn 的衰变系列已经达到平衡. 这时, 在模拟过程中, 跟踪不同介质中的每一个 ^{238}U , ^{232}Th , ^{222}Rn 核的衰变产物时, 认为伴随着衰变产生的新的核素也会在探测材料中衰变, 从而对探测器本底构成新的贡献; (2) 对应于每一种放射性核素按其某一个衰变道进行的衰变, 往往将有数量不等的若干个次级粒子同时产生. 而这些次级粒子在探测器中运动时, 将会分别与探测介质发生作用而损失能量. 探测器记录到的能量基本上是这些粒子沉积的能量之和.

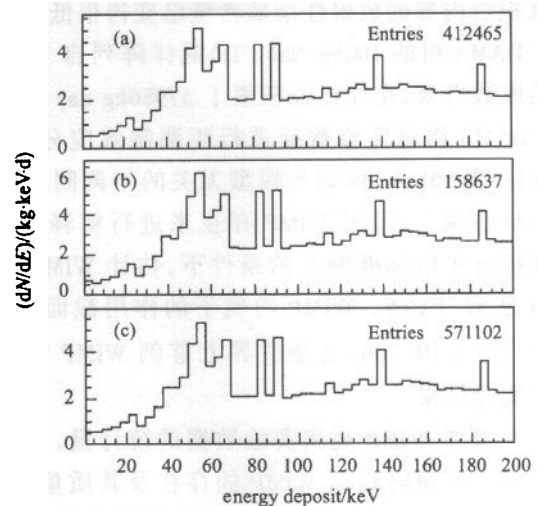


图 2 整个晶体阵列内的所有放射性杂质衰变在探测器中形成的能谱

(a) 在 WIMP 探测器中的能谱; (b) 在 SIMP 探测器中的能谱; (c) 在整个阵列中的平均能谱.

实验给出的各种探测材料内放射性杂质以及氦的含量见表 1. 对于有最高, 最低含量的材料, 在对

各类跟踪情况模拟过程中,我们将采用其平均值. 这样,模拟计算得到的放射性杂质在低能区(1—200keV)对本底的贡献如图 2 所示.

通过模拟计算结果,可以看出各类放射性杂质在(2—10keV)能区内贡献的本底计数约为 0.5cpd/kg·keV. 而 DAMA 组通过对实验数据进行处理,给出的低能区(2—10keV)的实验结果表明^[1],总计数率之和约为 1.2cpd/kg·keV. 而 WIMP 在能量段(2—6keV)的事例率约在 0.03—0.54cpd/kg·keV, 这样获得的本底计数率约在 0.7—1.2cpd/kg·keV 之间,因而模拟结果在数值上同实验结果是相近的.

3.2 探测器周围背景中子和 γ 的影响

实验室周围岩石层中的放射性杂质衰变以及高能宇宙线粒子在岩石层中的作用也会释放出背景中子、γ 等射线. 背景中子的流强及能谱见表 2. 对于能量较低的热中子,它们会被 NaI(Tl)探测器中的 ²³Na 核、¹²⁷I 核俘获^[3],形成的激发核(²⁴Na 或 ^{24m}Na, ¹²⁸I)在退激时,会释放出相应的次级粒子(β, γ, X 等),这些次级粒子会对实验的本底有相应的贡献. 热中子激发过程较复杂,需要深入全面的理解和分析,这里将不作探讨. 对于快中子的影响,它们可以通过弹性和非弹性碰撞的方式与 NaI(Tl)晶体阵列中的 ²³Na 核、¹²⁷I 核发生作用,在其中产生核反冲事例,从而对本底形成一定的贡献.

表 2 Gran Sasso 实验室的背景中子的流强及能谱^[2]

能 区	积分流强(10 ⁻⁶ cm ⁻² ·s ⁻¹)
0—50 × 10 ⁻³ eV	1.08
50 × 10 ⁻³ eV—1keV	1.84
1keV—2.5MeV	0.54
2.5—5MeV	0.27
5—10MeV	0.05

考虑快中子对 DAMA 实验的影响时,对不同能段内的中子能量的选取是按均匀分布进行的,这样得到的相应的模拟计算结果如图 3 所示.

模拟结果表明,快中子与 100kg NaI(Tl)晶体探测器发生作用,在低能区形成的计数率在 5 × 10⁻⁵—4 × 10⁻⁴cpd/kg·keV 之间. 这一结果同样远远小于 DAMA 组给出的 WIMP 的有效作用事例率,因此可以说,快中子对 DAMA 实验结果的影响是可以忽略的.

至于 DAMA 实验周围背景 γ 对实验观测本底的贡献^[4],尽管背景 γ 流强较大,但对 γ 进行一天的跟

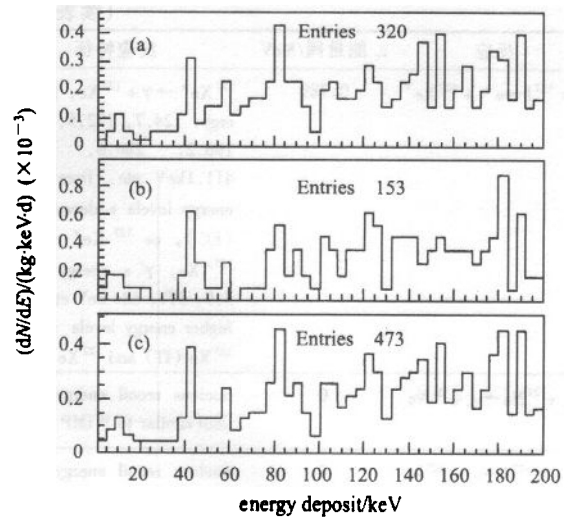


图 3 快中子在 100kg NaI(Tl)晶体阵列中的能量沉积谱 (a) 在 WIMP 探测器中的能谱;(b) 在 SIMP 探测器中的能谱; (c) 快中子在整个探测器内的平均沉积能谱.

踪模拟计算后,结果表明在 1—200keV 能量区域并没有发现事例计数. 这表明背景 γ 对 DAMA 实验的本底贡献极小,同时也证明了 DAMA 实验的外部屏蔽层能够很好地阻挡背景 γ.

3.3 太阳中微子对探测器阵列本底的贡献

太阳中微子(ν_e)源源不断到达地球,它们可能与各类探测器发生作用,产生能量沉积. 太阳中微子同 NaI(Tl)晶体阵列中的 ²³Na 核、¹²⁷I 核的主要作用模式见表 3. 由太阳标准模型(SSM)的中微子流强计算^[5]给出的 10t NaI(Tl)晶体探测器观测太阳中微子的年计数率可在文献中得到^[6].

表 3 太阳中微子在 NaI(Tl)探测器中可能引起的反应

反应	ν_e 能量阈/MeV	反应特征
$\nu_e + {}^{23}\text{Na} \rightarrow e^- + {}^{23}\text{Mg}$	4.06	${}^{23}\text{Mg} \rightarrow \beta^+ + {}^{23}\text{Na}$, $T_{1/2} = 11.3\text{s}$, 440keV γ (8.6%)
$\nu_e + {}^{23}\text{Na} \rightarrow e^- + {}^{23}\text{Mg}^*$	4.51	${}^{23}\text{Mg}^* \rightarrow \beta^+ + {}^{23}\text{Na}$, γ energy: 450.7, 2051, 2359 keV etc. from higher energy levels + decay ${}^{23}\text{Mg} \rightarrow \beta^+ + {}^{23}\text{Na}$
$\nu_e + {}^{127}\text{I} \rightarrow e^- + {}^{127}\text{Xe}$	0.664	${}^{127}\text{Xe} \rightarrow {}^{127}\text{I}(\text{EC})$; $T_{1/2} = 36.4\text{day}$, X ray and γ 's energy: 57.6, 145, 172, 202.8, 375.0 keV
$\nu_e + {}^{127}\text{I} \rightarrow e^- + {}^{127m}\text{Xe}$	0.961	${}^{127m}\text{Xe} \rightarrow {}^{127}\text{Xe}(\text{IT})$, $T_{1/2} = 69.2\text{s}$, γ 's energy: 124.6keV (68%), 172.5keV (37.4%) + decay of ${}^{127}\text{Xe}$ (Ec)

(续表 3)

反应	ν_e 能量阈/MeV	反应特征
$\nu_e + {}^{127}\text{I} \rightarrow e^- + {}^{127}\text{Xe}^*$	0.789	${}^{127}\text{Xe}^* \rightarrow \gamma + {}^{127}\text{Xe}$, γ 's energy: 124.7, 172.5, 174.9, 196.2, 286.6, 321.3, 411.1keV etc. from higher energy levels + decay ${}^{127}\text{Xe}$ (EC), or ${}^{127}\text{Xe}^* \rightarrow \gamma + {}^{127m}\text{Xe}$, γ 's energy: 483, 519, 577, 684 keV etc. from higher energy levels + decay ${}^{127}\text{Xe}$ (IT) and ${}^{127}\text{Xe}$ (EC)
$\nu_e + {}^{23}\text{Na} \rightarrow \nu_e + {}^{23}\text{Na}$	0	nucleus recoil energy detection (similar to WIMP case)
$\nu_e + {}^{127}\text{I} \rightarrow \nu_e + {}^{127}\text{I}$	0	nucleus recoil energy detection (similar to WIMP case)
$\nu_e + {}^{23}\text{Na} \rightarrow \nu_e + {}^{23}\text{Na}^*$	0.440	${}^{23}\text{Na}^* \rightarrow \gamma + {}^{23}\text{Na}$, γ 's energy: 440, 2076, 2391, 2640, 2704 keV etc. from higher energy levels
$\nu_e + {}^{127}\text{I} \rightarrow \nu_e + {}^{127}\text{I}^*$	0.058	${}^{127}\text{I}^* \rightarrow \gamma + {}^{127}\text{I}$, γ 's energy: 57.6, 145.22, 202.84, 215.1, 360.3, 417.9, 618.6 keV etc. from higher energy levels
$\nu_e + e^- \rightarrow \nu_e + e^-$	0	e^- recoil energy detection

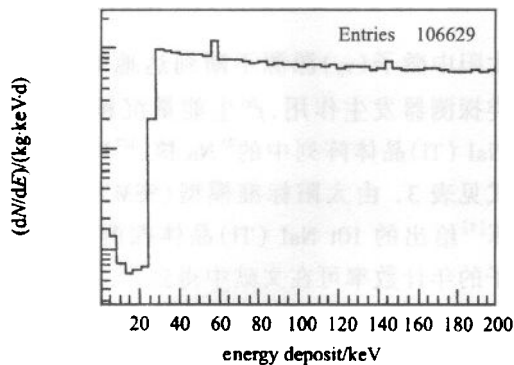


图 4 太阳中微子在探测器中作用产生的能量沉积在低能区的总能谱

根据太阳中微子与 NaI (Tl) 晶体探测器的作用特点, 并结合 DAMA 实验的晶体阵列规模, 对太阳

中微子在 100kg NaI (Tl) 晶体探测器中的能量沉积情况进行了模拟计算, 图 4 给出了在低能区由太阳中微子事例引起的本底计数率。

模拟结果显示, 在 DAMA 组 100kg NaI (Tl) 晶体阵列观测实验中, 由太阳中微子作用事例对低能区本底计数率的贡献很小, 在 1—20keV 能量区间范围内约为 10^{-8} — 10^{-7} cpd/kg·keV; 而在 20—200keV 能量区间范围内约为 10^{-5} cpd/kg·keV. 其中, 太阳中微子引起电子反冲的作用事例相对较多, 它们占太阳中微子事例引起的本底贡献的绝大部分. 由于来自太阳中微子的作用事例引起的低能区的本底计数率远小于 WIMP 在低能区 (2—6keV) 产生的事例率以及 WIMP 作用事例率的调制成分, 因此, 可以断定 DAMA 实验结果不可能是由太阳中微子与 NaI (Tl) 探测器的作用产生的, 太阳中微子事例也不会对 DAMA 实验目前获得的 WIMP 事例率的年调制效应造成较大的影响。

4 总结

考虑到影响 DAMA 实验结果的可能因素很多, 本文重点分析了 DAMA 实验的放射性本底形成情况, 以及快中子, 太阳中微子所形成的本底对 DAMA 实验结果的影响. 模拟计算结果表明, 在低能区 (1—20keV) 得到的本底计数率是可以与实验测量给出的本底值相比拟的, 这对于全面认识 DAMA 实验中本底的形成情况以及不同材料中放射性杂质衰变对本底的不同贡献是十分重要的. 快中子对 DAMA 实验结果的影响是可以忽略的, 在低能区, 它们与 NaI (Tl) 晶体阵列作用产生的本底计数率远小于 WIMP 在该能区的可能形成的作用事例率. 这一结论对太阳中微子也同样适用. 太阳中微子与 NaI (Tl) 晶体的作用主要来自中微子与核外电子的作用, 由它所产生的事例率并不足以影响 DAMA 实验结果。

参考文献 (References)

- 1 Bernabei R et al. Phys. Lett., 2000, **B430**:23
- 2 Belli P et al. IL NUOVO CIMENTO, 1989, **A101**:6
- 3 DAI Neng-Xiong, LI Ji-Zhou, GAO Liang-Jun. Sub-Atomic Physics Handbook. Beijing: Science Publishing House, 1995, 210 (in Chinese)
(戴能雄,李际周,高良俊.亚原子物理学手册.北京:科学出版社,1995,210)
- 4 YAO Zhi-Guo. The Study of Searching for Unknown Massive Particles in Cosmic Rays (Doctor Thesis). IHEP of Chinese Academy of Sciences, 1998 (in Chinese)
(姚志国.在宇宙线中寻找未知重粒子的实验研究(博士论文).中国科学院高能物理研究所,1998)
- 5 Bahcall J, Pinsonneault. Rev. Mod. Phys., 1992, **64**:885
- 6 Bernabei R et al. Astroparticle Physics, 1995, **4**:45

Studies on the Backgrounds of DAMA Experiments

SHENG Xiang-Dong DAI Chang-Jiang HE Hui-Lin¹⁾

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

Abstract Some results have been introduced on China-Italy DAMA cooperation——100kg NaI(Tl) crystal set-up experiments. There are lots of background problems need to be studied carefully, which would affect the results of DAMA experiments. Here, the radiation backgrounds in 100kg NaI(Tl) set-up have been studied by Beijing Group, and the Monte-Carlo simulation results are in good coincidence with the measurement of DAMA experiments. In addition, the contribution coming from fast neutrons' or solar neutrinos' interactions have been obtained through the simulation, which made very small effects on the experiments.

Key words weakly interacting massive particles, solar neutrinos, nuclear decay

Received 14 March 2003

1) E-mail: hehl@mail.ihep.ac.cn