

# 用羊八井太阳宇宙线探测装置对 太阳耀斑中子的初步探测\*

张吉龙<sup>1</sup> 鲍克智<sup>6</sup> 丁林恺<sup>1</sup> 才东<sup>5</sup> 丹增罗布<sup>5</sup>  
戴本忠<sup>3</sup> 冯振勇<sup>4</sup> 傅宇<sup>2</sup> 郭宏伟<sup>5</sup> 何瑁<sup>2</sup>  
黄庆<sup>4</sup> 霍安祥<sup>1</sup> 贾焕玉<sup>4</sup> 李金玉<sup>2</sup> 卢红<sup>1</sup>  
陆穗玲<sup>1</sup> 罗光宣<sup>1</sup> 孟宪茹<sup>5</sup> 木钧<sup>3</sup> 彭朝然<sup>1</sup>  
任敬儒<sup>1</sup> 施志政<sup>1</sup> 谭有恒<sup>1</sup> 王承瑞<sup>2</sup> 王辉<sup>1</sup>  
许贤武<sup>1</sup> 余光策<sup>4</sup> 袁爱芳<sup>5</sup> 张春生<sup>1</sup> 张慧敏<sup>1</sup>  
张乃健<sup>2</sup> 张学尧<sup>2</sup> 扎西桑珠<sup>5</sup> 扎西次仁<sup>5</sup>

1 (中国科学院高能物理研究所宇宙线和高能天体物理开放实验室 北京 100039)

2 (山东大学高能物理研究室 济南 250100)

3 (云南大学物理研究室 昆明 650091)

4 (西南交通大学物理系 成都 610031)

5 (西藏大学数理系 拉萨 850000)

6 (郑州大学物理系 郑州 450052)

**摘要** 羊八井的地理优势特别适合于对太阳耀斑中子的观测. 中日双方合作在羊八井建造了太阳中子望远镜和中子监测器, 准备在第23太阳活动周的峰年到来之际, 对太阳耀斑中子进行观测. 设备于1998年10月开始采集数据, 并在1998年11月28日观察到伴随一次X3.3级耀斑的计数超出. 本文报道初步的探测结果

**关键词** 宇宙线 太阳耀斑 太阳中子 中子望远镜 中子监测器

## 1 引言

西藏羊八井宇宙线观测站已进行了一系列观测实验<sup>[1-3]</sup>. 太阳耀斑是发生在太阳表面的一种最剧烈的爆发现象. 已知太阳耀斑可将质子加速到几十 GeV 能区, 但对这一加速机制的了解还不完全清楚. 一般认为粒子的加速可能是脉冲加速(10s 左右), 或者是连续加速(几分钟到几十分钟左右). 电场加速、激波加速以及二级随机加速等机制可能在

2000-01-19 收稿, 2000-03-29 收修改稿

\* 国家自然科学基金(19635030)和中国科学院资助

1081—1087

不同阶段发挥作用<sup>[4,5]</sup>. 被加速的高能质子在太阳大气相互作用时,将会产生中子,中子不带电荷,不受太阳磁场和日地间磁场影响,是直接来自太阳耀斑处的粒子,携带着太阳耀斑加速粒子的大量信息,对研究太阳耀斑加速粒子的机制有重要意义. 太阳耀斑中子的到达时间、持续时间以及能谱的研究,能了解太阳耀斑加速粒子的具体过程提供最关键的线索.

第 23 太阳活动周的峰年即将到来,太阳在峰年期间的剧烈活动将会出现许多比较强的太阳耀斑,伴随这些强耀斑可能产生在地面能观测到的太阳中子. 然而,对太阳中子的观测极为困难,迄今在地面利用中子监测器和中子望远镜观测并得到普遍承认的太阳中子事件只有少数几例<sup>[6-10]</sup>. 1998 年 9 月,我们与日本东京大学、名古屋大学等合作建成了一台  $9\text{m}^2$  太阳中子望远镜,专门用来记录来自太阳的中子. 同时,我们与日本理化所合作在羊八井建成的由 28 支 NM-64 组成的中子监测器,是目前世界上海拔最高的中子监测器. 中子监测器虽然主要是监测初级宇宙线质子及带电离子的强度随时间的变化,但是在某些特殊条件下,也可以用于区分出由太阳中子引起的事例.

中子监测器的计数率与它所处的地磁纬度和海拔高度有关. 较高的地磁纬度对应较低的垂直截止磁刚度,有较多的宇宙线粒子到达. 羊八井的地磁纬度是  $19.6^\circ\text{N}$ ,相应的垂直截止磁刚度为  $14.1\text{GV}$ . 但是羊八井的海拔高度是  $4300\text{m}$ ,核作用粒子经历较小的衰减,其强度可比海平面强大约 100 倍. 除此,地处低地磁纬度的中子监测器对于探测太阳中子事例有以下独到的优势:(1) 太阳在低纬度地区处于较高天空位置的时期较长,观测点与太阳之间的空气厚度相对较小,从而减小了太阳中子受到衰减的程度.(2) 低地磁纬度排除了许多低能的太阳质子而不影响太阳中子,可以在很大程度上减小太阳质子事件与太阳中子事件的混淆. 因此,羊八井所处地理位置特别适合太阳中子的探测.

## 2 实验装置

羊八井中子望远镜的结构见图 1,它由塑料闪烁体和正比计数管两种探测器组成. 每块闪烁体面积为  $1\text{m}\times 1\text{m}$ ,厚  $40\text{cm}$ ,正比管直径为  $10\text{cm}$ ,长  $3.3\text{m}$ ,管内充 PR 气体 ( $\text{Ar}$ ;  $90\%$ ,  $\text{CH}_4$ ;  $10\%$ ). 中子望远镜可分为三部分:用于排除带电粒子的反符合正比计数管、测量入射中子能量的闪烁体探测器及确定入射中子方向的由多层正比计数管组成的望远镜. 用于排除带电粒子的反符合正比计数管放置在中子望远镜的最上层及周围. 确定入射中子方向的望远镜部分由 4 层正比管和两层分别厚  $10\text{cm}$ ,比重  $0.8$  的木吸收层组成. 只有能量高于  $240\text{MeV}$  的中子其在闪烁体内产生的次级质子才能够既穿过剩余的闪烁体又穿过两层木吸收层,所以它探测的中子能量大于  $240\text{MeV}$ .

沿东-西方向( $x$ 轴)放置的上下两排正比管,根据上下分别被触发正比管的位置,能定出 5 个平面,同样的道理,沿南-北方向( $y$ 轴)放置的上下两排正比管,也能定出另外 5 个平面. 这些平面的交线定出共  $5\times 5$  个方向.(图 2)

中子望远镜探测太阳耀斑中子的原理是:它不带电并且可以鉴别出不是光子;它在  $40\text{cm}$  厚的塑料闪烁体内发生核反应产生反冲质子,反冲质子触发下部多层正比计数管,并且径迹的方向近似为太阳当时的方向.

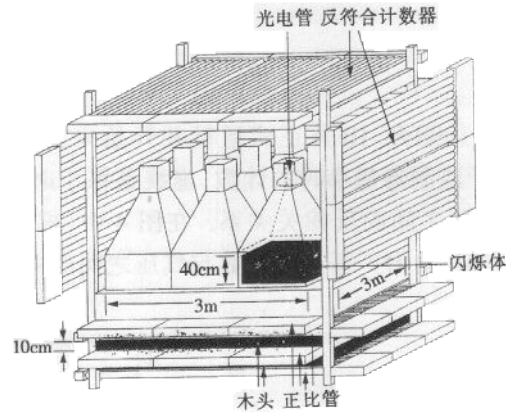


图 1 中子望远镜结构图

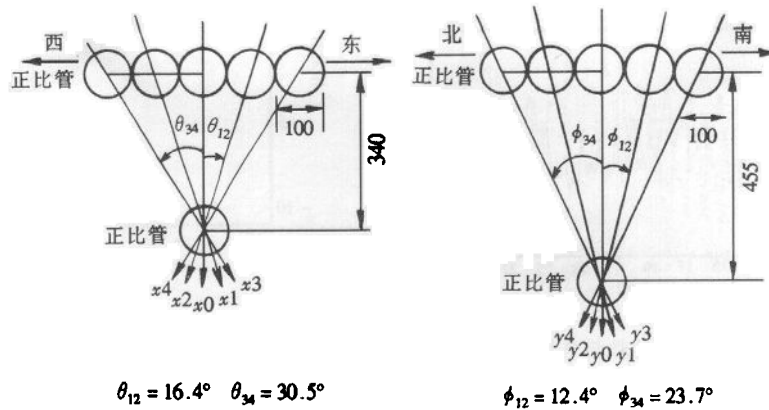
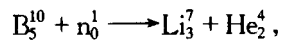


图 2 中子望远镜定向原理

羊八井中子监测器为 NM-64 型,主要探测 500MeV—20GeV 能量范围的原初宇宙线粒子. 羊八井中子监测器由 28 个中子计数管组成.

当初级宇宙线(主要是质子和氦核,在太阳耀斑中子事件出现时,也包括初级中子),进入大气层,与大气核作用产生次级粒子,其中一部分可到达地面. 它们在中子监测器的铅层中发生核作用,产生荷电核碎片及中子,其中的中子进入正比管时,与 B 核发生反应



其中高电离能量损失的 He 核能被预置高记录阈的正比计数管记录,从而实现次级中子的计数.

要判断中子监测器记录的是由太阳耀斑中子引起的次级中子,必要条件是:它是在白天记录到的,而其它位于黑夜的中子监测器没有记录;事例的到达时间与 X 射线以及  $\gamma$  射线的耀斑事件的到达时间比较接近,而比一般质子事件的到达时间要早;如果有其它专门记录太阳中子的探测仪器同时运行,在时间上应该符合.

### 3 实验结果

羊八井中子监测器于 1998 年 10 月正式运行并开始采集数据,计数率达到  $1.06 \times 10^7/h$ . 图 3 中,实线是中子监测器每小时的计数 虚线是每小时气压的平均值,比较这两条曲线可看出计数率与气压之间的反相关关系. 在图 4 中,根据中子监测器 1998 年 10 月 9 日到 12 月 31 日的数据,给出了每小时计数与气压之间的关联,拟合得到气压修正系数为  $-0.63\%/(hPa)$ .

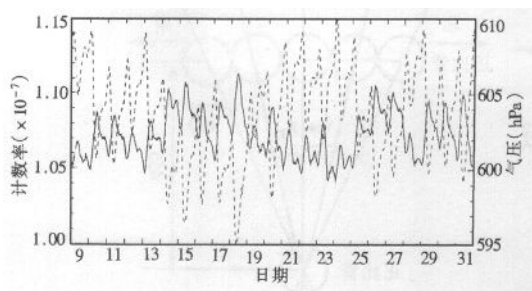


图 3 中子监测器计数与气压的反相关  
——计数率,-----气压.

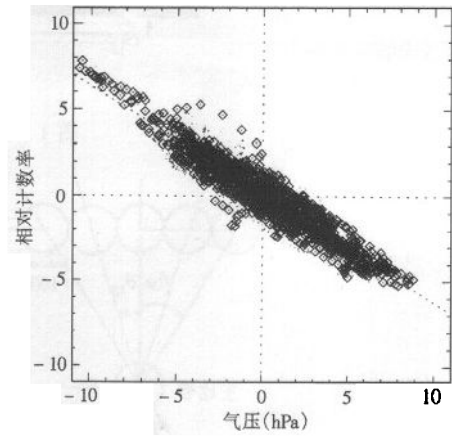


图 4 中子监测器计数率与气压之间的关联  
横轴:气压 - 平均气压,  
纵轴:(计数率/平均计数率 - 1) × 100.

图 5 是西藏羊八井中子监测器 1998 年 11 月的每小时计数与基尔、罗马、北京观测站相应数据的对比,羊八井数据反映了 11 月 8 日的福布斯下降,与基尔、罗马、北京观测站

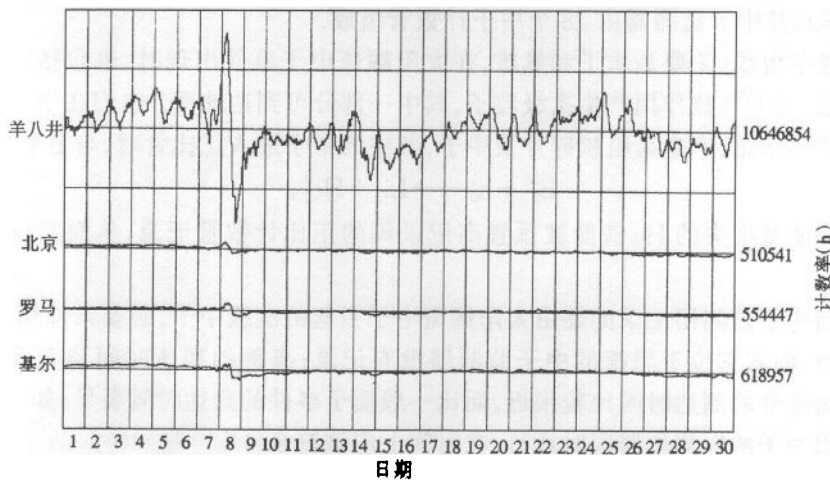


图 5 羊八井中子监测器 1998 年 11 月的数据与基尔、罗马、北京观测站的对比

的下降完全一致,这说明羊八井中子监测器运转正常,数据可靠,能够用于宇宙线强度变化的监测及太阳中子事件的捕捉。

第 23 太阳活动峰年正在到来,从 1998 年 8 月开始,太阳活动似乎渡过了它的宁静期,8 月份共出现了 5 次 X 级的 X 射线耀斑,其中 8 月 18 日的那次耀斑达到 4.9 级,在 9 月、10 月暂时平静一段时期后,11 月再次加剧并出现了 5 次 X 级的 X 射线耀斑,其中两次较大的是 11 月 22 日的 X3.7 级和 11 月 28 日的 X3.3 级耀斑。较大的这两次耀斑正好出现在羊八井的中午时分,对观测非常有利。对中子望远镜在 11 月 28 日的观测数据,统计了当时最靠近太阳的 3 个方向  $x_0y_4$ ,  $x_1y_4$  和  $x_2y_4$ (见图 2)每 3min 的总计数,发现在北京时间 13:38:20(相应世界时 5:38:20(UT)),计数有一个持续 3min 的突增。对这个 3min 间隔,取它前后 30min 的计数作为背景,用二次函数进行拟合求出这一间隔对应的背景计数,它的超出达到  $4.9\sigma$ (图 6(a))。不用二次函数进行拟合,用算术平均求背景计数,它的超出为  $4.5\sigma$ <sup>[11]</sup>。图 6(b)给出了在 1998 年 11 月 28 日 X 耀斑期间,羊八井中子监测器计数以 5min 为间隔统计的结果,取前后 30min 的平均计数作为背景,发现在 5:38(UT)一个  $3.8$  倍  $\sigma$  超出。只从羊八井中子监测器计数率的超出,虽然并不能断定这就是太阳耀斑中子事件,但它的出现与中子望远镜事例的时间完全一致,支持它是一个中子事件,至少它是一个与太阳耀斑中子事件相关的事件。

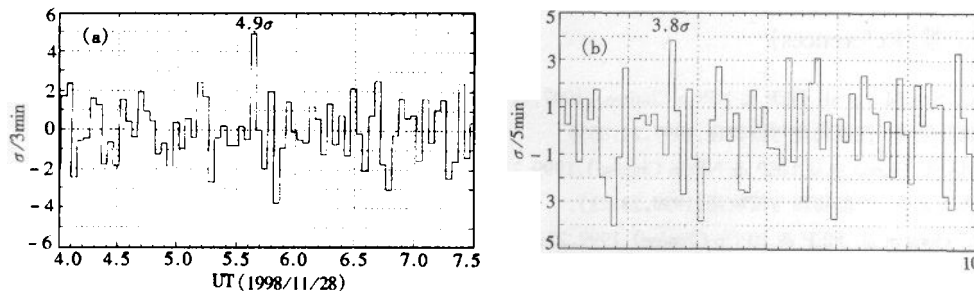


图 6 1998 年 11 月 28 日羊八井观测到的一个可能的太阳中子事件

(a) 中子望远镜观测结果;(b) 中子监测器观测结果。

同时,美国国家海洋大气管理局 NOAA 的空间环境监测卫星 GOES(1.5keV—12.4keV)观测到开始时间为 4:54(UT),峰值时间为 5:52(UT),X3.3 级的 X 射线耀斑,美国宇航局 NASA 的 CGRO 卫星上装备的 BATSE 探测器记录到开始于 5:31:36(UT),5:40:46(UT)达到最大,持续了 2834s 的 X 射线发射<sup>1)</sup>。在某些情况下,太阳中子在光球层上被氢原子俘获产生 2.22MeV 的  $\gamma$  射线发射,据 CGRO 的 OSSE 的观测,11 月 28 日没有观测到 2.22MeV  $\gamma$  射线发射,其它各方面也都没有 2.22MeV  $\gamma$  射线发射的报道。Debrunner<sup>[12]</sup>分析了几次能量大于 200MeV 的太阳中子事例,认为 2.22MeV  $\gamma$  射线发射可能只是存在低能太阳中子的指证,而不是高能太阳中子的指证。太阳中子不是一定伴随有 2.22MeV  $\gamma$  射线发射。而 11 月 28 日由羊八井中子望远镜观测到的超出,能量在 240MeV 以上,没有发现 2.22MeV  $\gamma$  射线发射不能否定太阳中子的产生。

1) 数据来自:<http://www.ngdc.noaa.gov> 和 <http://www.nasa.gov>

11月28日事例,虽然当时是中午,太阳正处于上中天(5:46(UT),38.27(Alt)),但由于正值冬季,太阳在上中天时的位置较低,即天顶距较大,中子望远镜正比计数管最大能测量的天顶角只有 $23.7^\circ$ ,不能正对太阳方向进行观测,进入望远镜的只可能是在大气层经过核散射后偏离原有方向的部分中子.太阳中子位于这样的大天顶角下将遭受较大的衰减.上述情况以及11月28日耀斑只有X3.3级,可以解释11月28日事例的显著性不是太高的原因.

综合以上结果,在1998年11月28日的一次太阳耀斑期间,羊八井中子望远镜的计数率有比较明显的超出,而且与卫星数据BATSE和GOES的时间吻合较好;中子监测器超出比较小,但是与中子望远镜数据时间完全吻合,从而支持了中子望远镜的结果.因此可以认为,羊八井中子观测设备探测到了一个伴随1998年11月28日X射线耀斑的可能的太阳中子事件.

感谢日本东京大学宇宙线所的汤田利典教授等日方合作组成员的合作.NASA天文数据中心和世界数据中心提供了世界中子监测网和太阳观测的数据.空间中心的叶宗海研究员给予了大量的帮助,在此表示由衷的感谢.

### 参考文献(References)

- 1 LIU ShaoMin et al. HEP & NP(in Chinese),1997,21:865  
(刘绍敏等. 高能物理与核物理,1997,21:865)
- 2 ZHANG JiLong et al. HEP & NP(in Chinese),1999,23:22  
(张吉龙等. 高能物理与核物理,1999,23:22)
- 3 LU Hong et al. HEP & NP(in Chinese),1999,23:313  
(卢红等. 高能物理与核物理,1999,23:313)
- 4 Ramaty R et al. Proc. 23th ICRC, Calgary,1993,3:99
- 5 Ryan J M et al. Astrophys. J.,1991,368:316
- 6 Chupp E L et al. Astrophys. J.,1987,318:913
- 7 Shea M A et al. Geophys. Res. Letters,1991,18:1655
- 8 Pyle K R et al. Proc. 22th ICRC,Dublin,1991,3:315
- 9 Muraki Y et al. Astrophys. J.,1992,400:L75
- 10 Debrunner H et al. Astrophys. J.,1993,409:822
- 11 Hoshida T et al. Proc. 26th ICRC,Salt Lake City,1999,6:38
- 12 Debrunner H et al. Proc. 24th ICRC,Roma,1995,4:167

## An Observation of Solar Flare Neutrons Using Yangbajing Solar Cosmic Ray Detector

ZHANG JiLong<sup>1</sup> BAO KeZhi<sup>6</sup> DING LinKai<sup>1</sup> CaiDong<sup>2</sup> Danzengluobu  
DAI BenZhong<sup>3</sup> FENG ZhenYong<sup>4</sup> FU Yu<sup>2</sup> GUO HongWei<sup>5</sup> HE Mao<sup>2</sup>  
HUANG Qing<sup>4</sup> HUO AnXiang<sup>1</sup> JIA HuanYu<sup>4</sup> LI JinYu<sup>2</sup> LU Hong<sup>1</sup>  
LU SuiLing<sup>1</sup> LUO GuangXuan<sup>1</sup> MENG XianRu<sup>5</sup> MU Jun<sup>3</sup>  
PENG ZhaoRan<sup>1</sup> REN JingRu<sup>1</sup> SHI ZhiZheng<sup>1</sup> TAN YouHeng<sup>1</sup>  
WANG ChengRui<sup>2</sup> WANG Hui<sup>1</sup> XU XianWu<sup>1</sup> YU GuangCe<sup>4</sup>  
YUAN AiFang<sup>5</sup> ZHANG ChunSheng<sup>1</sup> ZHANG HuiMin<sup>1</sup> ZHANG NaiJian<sup>2</sup>  
ZHANG XueYao<sup>2</sup> Zhaxisangzhu<sup>5</sup> Zhaxiciren<sup>5</sup>

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

2 (Department of Physics, Shandong University, Ji'nan 250100, China)

3 (Department of Physics, Yunnan University, Kunming 650091, China)

4 (Department of Physics, South West Jiaotong University, Chengdu 610031, China)

5 (Department of Mathematics and Physics, Tibet University, Lhasa 850000, China)

6 (Department of Physics, Zhengzhou University, Zhengzhou 650091, China)

**Abstract** The Geographical location of Yangbajing is suitable for the direct detection of the solar flare neutron events. The Yangbajing neutron telescope (NT) and Neutron Monitor (NM) were established in 1998 October to provide the observation of solar neutrons during the 23rd solar cycle. An unusual large enhancement of the NT and NM count rates over background was observed from 05:38 UT to 05:40 UT at Yangbajing on 1998 November 28.

**Key words** cosmic ray, solar flare, solar neutron, neutron monitor, neutron telescope

Received 19 January 2000, Revised 29 March 2000

\* Supported by National Natural Science Foundation of China(19635030) and The Chinese Academy of Sciences