科学通报 2008 年 第 53 卷 第 14 期: 1617 ~ 1631
评 述
《中国科学》杂志社
SCIENCE IN CHINA PRESS

太阳中子事件的观测特征与中子能谱的计算

于晓霞[①], 卢红[①②③], 石峰[①], 郭义庆[①]

① 中国科学院高能物理研究所粒子天体物理中心, 北京 100049;
② 广西民族大学物理与电子工程学院, 南宁 530006;
③ 百色学院物理与电信工程系, 百色 533000
E-mail: xxyu@ihep.ac.cn

2008-04-15 收稿, 2008-05-30 接受
国家重点基础研究发展计划资助项目(编号: 1J2003CS71670001101)

摘要 太阳中子事件是与耀斑活动相关的偶发性即刻粒子事件, 主要表现为地面宇宙线探测装置的计数瞬时突增. 太阳中子携带着爆发源区的物理信息: 耀斑大气的元素组成、大气高度、磁场的会聚程度以及磁流体湍动等. 相对于其他带电粒子, 中子能够不受太阳磁场和行星际磁场的束缚而直达地面. 目前, 对太阳中子事件的理论研究, 主要是通过蒙特卡罗模拟, 考虑太阳耀斑环中磁场的螺旋角散射作用和磁镜效应, 计算耀斑磁环模型里各向异性中子的产生与太阳大气高度、时间、角度和能量间的关系, 计算逃逸中子的角分布和能谱, 以及逃逸到地球附近中子的能谱. 观测方面, 主要是结合地面中子监测器记录的超出时间与空间探测到的γ射线核谱线发射峰值的时间差, 利用飞行时间方法(Time of Flight Method), 考虑中子监测器的探测效率和中子在地球大气中的衰减因素, 反演日面处的中子能谱. 本文依据已确定的 10 例太阳中子事件, 评述基本的观测特征, 介绍相应的观测仪器, 探讨太阳中子能谱计算的两种方法(观测法和模型法), 比较不同方法获得的计算结果; 并依托羊八井太阳宇宙线探测装置(中子监测器、太阳中子望远镜), 报道对太阳中子的初步交叉探测特征(1998 年 11 月 28 日 GLE 事件和 2005 年 1 月 20 日 GLE 事件), 指出目前亟待解决的问题.

关键词
太阳中子事件
耀斑
探测器
中子
能谱

太阳活动产生的高能粒子流, 主要包括太阳质子和电子, 以及少量的中子, 其中太阳中子是直接由加速质子和重离子与周围大气相互作用产生的(包括质子-质子反应、α粒子-α粒子反应、质子-α粒子反应、质子、α粒子与周围重核相互作用以及它们的逆反应, 见表 1). 研究太阳中子和γ射线可以直接获得如下信息: 加速粒子的总数和时间演化、角分布以及在耀斑大气中的传输[1,2].

在理论方面, 对中子产生、逃逸以及最终传输到地球表面的研究最初由Lingenfelter等人[3]提出. 此后, Hua等人[4]利用蒙特卡罗模拟来追踪中子, 直至中子衰变被太阳大气中的氢原子俘获形成 2.223 MeV的中子俘获线, 或者从太阳表面逃逸. 在此基础之上, Hua等人[2]利用新的中子产生截面以及动能值, 考虑磁场的螺旋角散射作用和磁镜效应, 对耀斑磁环模型里各向异性中子的产生与大气高度、时间、角度和能量间的关系, 对日面逃逸中子的角分布和能谱, 以及逃逸到地球附近中子的能谱进行了计算. 公式(1)和(2)分别表示中子产生的角分布和能量分布:

$$\frac{\mathrm{d}^2\sigma}{\mathrm{d}E_n\mathrm{d}\Omega_n} \propto \exp[-(1-\mu_n)E_n/T_0], \quad E_n < E_{\max}, \qquad (1)$$

表 1 耀斑大气产生中子的主要反应[5]a)

中子的能量范围	$\alpha/p=0.5$	$\alpha/p=0.1$
高能中子(>1 GeV/核子)	$\alpha+\mathrm{H}$	p+H, p+He
几十兆电子伏特/核子	$\alpha+\mathrm{H}$, 且 E_α >10 MeV/核子	
低能中子(<10 MeV/核子)	$\alpha+\mathrm{He}$, α+重核	$p+\mathrm{He}$

a) $\alpha/p=0.5$ 和 $\alpha/p=0.1$ 分别表示耀斑大气中α粒子与质子的元素丰度之比

其中 E_n 为中子的能量, μ_n 为发射的中子相对于入射质子夹角的余弦值, $E_{\max}$ 为中子的最大能量.

$$\mathrm{d}\sigma/\mathrm{d}E_n^* \propto (E_n^*)^{\gamma} \exp^{-E_n^*/T_{\mathrm{evap}}}, \qquad (2)$$

其中 E_n^* 为在质心处的中子能量, T_{evap} 为蒸发的温度, 值为 2.5 MeV, γ=5/11.

此外, 理论研究也表明[2], 当能量E_n=100 MeV的逃逸中子离开太阳表面到达地球附近时, 能被探测到的典型时标大约为 1166 s. 在中子的静止参考系中, 从太阳传输到地球的时间大约为 1054 s, 而中子衰减的平均寿命τ=918 s, 这就意味着从太阳表面到达地球附近的过程中, 该能量处的中子大约有 70%在衰变. 高能中子更有可能在1 AU处存留, 对应的角分布(能量范围为 100~1000 MeV)实质上并没有变化.

观测方面, 探测太阳中子的途径大体上分为两类[5]: 直接观测和间接观测. 直接观测: (ⅰ) 逃逸出太阳大气的中子到达地球, 可以直接由地球轨道上的探测器捕获到; (ⅱ) 大于 200 MeV的高能中子, 可由地面中子监测网探测到. 间接观测: (ⅰ) 逃逸出来的中子衰变成为质子, 可以在空间探测到[6]; (ⅱ) 留在太阳表面的中子, 其中一部分被太阳光球中的氢原子俘获发出 2.223 MeV的γ射线, 在空间可以由γ射线分光仪探测到. 由于能量低于 100 MeV的中子在地球大气传输过程中会严重衰减, 而无法到达地球表面, 因此只能借助空间探测; 对于能量高于 100 MeV的中子, 可同时由空间和地面探测器探测到. 本文依据已确定的10例太阳中子事件, 评述基本的观测特征, 探讨太阳中子能谱的计算方法, 并对不同方法得到的计算结果进行比较. 最后, 报道羊八井宇宙线探测装置对太阳中子的初步探测结果, 指出目前亟待解决的问题.

1 太阳中子事件的观测特征

由于中子在地球大气传输过程中极易衰减, 捕获太阳中子事件的几率较低, 因此, 对太阳中子事件的确认成为必要的前提[7]. 一般而言, 如果中子监测器记录到的计数超出发生在白天, 而处于黑夜状态的其他台站没有计数超出的记录, 可以排除来自高能离子的干扰; 地面探测装置计数超出的时刻与对应耀斑活动的硬X射线、γ射线发射的时刻接近, 而且早于GOES卫星观测到的太阳质子事件到达的时间, 或者全球中子监测网的其他台站没有中子监测器计数超出的记录, 可以完全排除太阳高能质子的干扰; 此外, 其他太阳中子探测仪器(如太阳中子望远镜、μ子望远镜)计数超出的时刻彼此符合. 满足上述 3 个条件并与太阳耀斑活动相关的地面增强事件(GLE), 就认为它是一个太阳中子事件.

表 2 是已确定的10例太阳中子事件的观测特征(1 例发生在太阳活动第 21 周、4 例发生在太阳活动第 22 周、5 例发生在太阳活动第 23 周). 其观测特征具体表现为: (1) 由耀斑爆发的软X射线级别来看, 在太阳活动的第 21 和 22 周内, 对应太阳中子事件耀斑的软 X 射线级别均大于 X8 级, 而在太阳活动的第 23 周内, 对应太阳中子事件耀斑的软X射线级别可以为 X2.3 级(2000-11-24 事件)、X5.3 级(2001-08-25 事件). 这说明耀斑软X射线级别与捕获太阳中子事件的几率, 不存在明显的相关性和阈值. 中子的能谱指数与对应的耀斑事件中软X射线的级别, 也无相关性. 日面处中子的流量和耀斑软 X 射线流量的相关系数为 0.46, 仅具有较弱的相关性[8]; 此外, γ射线的产生时间与太阳中子产生时间存在较好的相关性. 当然, 以上观测结论并不排除在太阳活动的第 23 周内, 不断提高的空间探测器的分辨率与地面宇宙线探测装置的探测效率, 以及对应的太阳中子事件流量较大等因素[9]. (2) 从耀斑活动区黑子的位置来看, 日面耀斑和边缘耀斑在触发太阳中子事件的几率方面几乎是等同的(6∶4), 这与 Hua 和 Murphy 等人[2,4,5,10]认为的边缘耀斑要比日面耀斑诱发的太阳中子事件更容易观测到的结论有所不同. 当然, 10 例太阳中子事件的数量过少, 还不足以做出统计方面的结论, 尚需更多的太阳中子事例进一步验证. (3) 从地面宇宙线探测装置所处的地理位置看[11], 捕获太阳中子事件的站址在北半球占优(美国 4 例, 日本 2 例, 瑞士 1 例, 墨西哥 1 例, 纳米比亚 1 例, 含同时观测事例); 而南半球仅玻利维亚观测到 3 例; 当然, 该观测特征应将政府科研财政投入比例及数据处理能力等人为因素考虑在内. 海拔高度方面, 捕获太阳中子事件的地面观测站绝大多数位于 2200 m 以上(除 2003-10-28 事件, 对应的纳米比亚地面观测站高度为 1240 m, 其耀斑的软X射线级别为X17.2). 在地磁截止刚度方面, 对于 IGY 型中子监测器, 捕获太阳中子事件的地磁截止刚度较低(如 1982-06-03 事件、1990-05-24 事件); 一般而言, 地磁截止刚度越高, 越容易排除低能离子的干扰[7]. 此外, 在计数的统计显著性

表 2　已确定的 10 例太阳中子事件 [a)]

序号	爆发时间	耀斑级别及黑子位置	太阳天顶角/(°)	地面探测仪器						空间探测器	观测特征	太阳活动周	参考文献
				位置	经度/纬度	仪器类型	高度/m	截止刚度/GV	计数超出				
1	1982-06-03 11∶43 UT	X8/2B S09E72	25	Jungfraujoch (瑞士)	8°/47°	IGY	3475	4.61	6.7σ	SMM/GRS	11∶43~11∶44 UT 的脉冲, 显示光子特性; 11∶44~11∶47 UT 的脉冲, 显示γ射线和中子的混合特性; 11∶47~12∶06 UT 的延迟发射, 显示高能中子与 GRS 闪烁体相互作用的特性; 中子能谱可由谱指数为–2.4 的幂律谱来拟合	21 周	[12~14]
2	1990-05-24 20∶48 UT	X9.3/1B N36W76	29	Climax (美国)	254°/39°	IGY	3400	2.99	9σ	Granat/PHEBUS	20∶47∶40 UT~20∶47∶50 UT, Moreton 波出现; 20∶48∶12 UT, 出现第一个 75~95 MeV γ射线峰值; 20∶48∶18 UT, 日面高能中子产生; 20∶48∶28 UT, 2.223 MeV 和γ射线分立谱线发射达到峰值; 20∶48∶36 UT, 出现第二个 75~95 MeV γ射线峰值	22 周	[15~19]
3	1991-03-22 22∶44 UT	X9.4/3B S26E28*	21	Haleakala (美国)	204°/21°	NM64	3030	4.38	2%~3%	Granat/PHEBUS	22∶43 UT, X 射线暴开始; 22∶44 UT, 2.7 GHz 与 8.8 GHz 射电流量达到极大; 22∶45 UT, $H\alpha$ 强度达到极大	22 周	[20,21]
4	1991-06-04 (F)03∶37 UT (N)03∶41 UT	X12/3B N30E70	18.9 15	Mt.Norikura (日本)	138°/36°	NM64 SNT μT	2770	11.5	5.1σ 4.4σ 3.3σ	CGRO/OSSE NoBE	03∶40∶44 UT, 伴随IV型米波暴的CME出现; 03∶42 UT, γ射线发射达到峰值; 04∶25 UT, 17 GHz 射电流量达到次极大	22 周	[5,22,23]
5	1991-06-06 00∶58 UT	X12/4B N33E44*	26 44.5	Mt.Norikura (日本) Haleakala (美国)	138°/36° 204°/21°	NM64 NM64	2770 3030	11.5 4.38	5.2σ 4.3σ	CGRO/BATSE NoRP	01∶05 UT 和 01∶06 UT 分别出现两个γ射线(1~10 MeV)的尖峰; 01∶09 UT, 出现γ射线的小尖峰; 01∶06 UT, 出现 80 GHz 毫米波尖峰	22 周	[24,25]
6	2000-11-24 (F)14∶51 UT (N)15∶08 UT	X2.3/2B N22W07*	17.4	Mt.Chacaltaya (玻利维亚)	292°/−16°	NM64	5200	12.5	5.5σ	GOES8 (0.5–4Å) Yohkoh/SXT Yohkoh/HXT Yohkoh/GRS	软 X 射线流量轮廓有 3 个隆起, 且 E_P > 100 MeV 的质子滞后 1 h 到达地面; 出现软 X 射线环, 并逐渐变亮; 当软 X 射线源出现时，硬 X 射线源在软 X 射线耀斑环的足点处出现; 2.223 MeV 的中子俘获线叠加在轫致辐射的成分之上，且其发射的持续时间要比 C(4.438 MeV)和O(6.129 MeV) γ射线的发射时间长	23 周	[26]

表 2(续)

序号	爆发时间	耀斑级别及黑子位置	太阳天顶角/(°)	地面探测仪器						空间探测器	观测特征	太阳活动周	参考文献
				位置	经度/纬度	仪器类型	高度/m	截止刚度/GV	计数超出				
7	2001-08-25 (F)16:23 UT (N)16:32 UT	X5.3/3B S17E34*	26.5	Mt.Chacaltaya (玻利维亚)	292°/ −16°	NM64	5200	12.5	4.7σ	GOES Yohkoh/SXT Yohkoh/HXT Yohkoh/GRS	16∶45 UT, 软 X 射线流量达到极大; 16∶45 UT 以后, 软 X 射线环开始出现, 并持续增亮; 16∶32 UT，硬 X 射线的能谱最硬; 较弱的 2.223 MeV 中子俘获线叠加在韧致辐射的成分之上, 但没有明显的 4~7 MeV 的γ射线发射	23 周	[27]
8	2003-10-28 (F)09:51 UT (N)11:04 UT	X17.2/4B S16E08*	9.5	Tsumeb (纳米比亚)	17°/19°	NM64	1240	9.21	6.4σ	GOES RHESSI INTEGRAL	11∶00 UT, 软 X 射线流量达到极大; 11∶06 UT, 显示出较强的粒子加速特征; 11∶04∶15 UT, O(6.129 MeV)谱线达到峰值; 11∶06 UT, 2.223 MeV 中子俘获线发射达到峰值	23 周	[28]
9	2003-11-02 (F)17:03 UT (N)17:17 UT	X8.3/2B S14W56*	11.5	Mt.Chacaltaya (玻利维亚)	292°/ −16°	NM64	5200	12.5	4.7σ	GOES RHESSI (800~7000 keV)	17∶25 UT, 软 X 射线流量达到极大; 17∶17 UT, 4~7 MeV 的γ射线发射达到峰值, 但未观测到退激发离子的γ射线分立谱线; 17∶40 UT, 2.223 MeV 中子俘获线达到峰值	23 周	[29]
10	2003-11-04 (F)19:29 UT (N)19:45 UT	X28/3B S19W83	50.5 40.5	Haleakala (美国) Mexico City (墨西哥)	204°/21° 261°/19°	NM64 NM64	3030 2274	4.38 8.61	7.5σ 5.2σ	GOES Geotail INTEGRAL	19∶53 UT, 软 X 射线流量达到饱和; 19∶44 UT, 出现硬 X 射线类尖峰的超出; 19∶45 UT, 高能γ射线的韧致成分发射达到峰值; 19∶47 UT, 较弱的2.223 MeV 中子俘获线的发射达到峰值	23 周	[28]

a) 1) IGY 和 NM64 是中子监测器的两种类型; 2) NM 表示中子监测器, SNT 表示太阳中子望远镜, μT 表示 μ 子望远镜; 3) 除标记*为日面耀斑外, 其余的耀斑均为边缘耀斑; 4) 爆发时间一列中, (F)表示耀斑爆发时间, (N)表示太阳中子产生时间; 5) SMM/GRS, solar maximum mission/gamma ray spectrometer; CGRO/BATSE, compton gamma ray observatory/burst and transient source experiment; NoRP, Nobeyama radio polarimeters; GOES, geostationary operational environmental satellites; Yohkoh/SXT, Yohkoh/soft X-ray telescope; Yohkoh/HXT, Yohkoh/hard X-ray telescope; Yohkoh/GRS, Yohkoh/gamma ray spectrometer; CGRO/OSSE, compton gamma ray observatory/oriented scintillation spectrometer experiment; CGRO/COMPTEL, compton gamma ray observatory/imaging compton telescope; RHESSI, Reuven Ramaty high energy solar spectroscopic imager; Geotail, 地面磁场探测卫星; INTEGRAL, International Gamma Ray Astrophysics Laboratory

方面，地面宇宙线探测装置记录到的计数超出一般在 4σ 以上. (4) 比对空间γ射线探测结果与中子监测器的观测数据发现，太阳中子事件往往伴随着强电磁辐射(硬X射线和γ射线)，且太阳中子产生的时间与硬X射线和γ射线产生时间的相关性，要优于软X射线的产生时间[11]. 计算中子能谱时，一般认为高能中子的产生时间与核退激发的γ射线(4~7 MeV)产生时间相同，但其中 2.223 MeV γ射线的产生时间通常比高能中子的产生时间要滞后 100 s左右，这是由于中子需要一定的热化时间被氢原子俘获.

2 太阳中子的探测仪器

逃逸出太阳大气的中子到达地球，可以直接由地球轨道上的探测器捕获到；能量大于 200 MeV 的高能中子，可由地面中子监测网观测到；而留在太阳表面的中子，一部分为太阳光球中的氢原子俘获放出 2.223 MeV 的γ射线，也可以由γ射线分光仪在空间探测到.

2.1 地面探测仪器

覆盖全球的中子监测网和太阳中子望远镜配合同步运行的 μ 子望远镜，可以对太阳进行 24 h 不间断地跟踪观测，其主要结构与特点详见表3，其中海拔高度在 2000 m 以上且地处南北纬 40°之间的中子监测器，全球共有 11 个；海拔高度在 3000 m 以上且地处南北纬 40°之间的中子监测器，全球共有 9 个；海拔高度在 2000 m 以上且地处南北纬 50°之间的太阳中子望远镜，全球共有 7 个.

由表3可以看到，尽管地面宇宙线探测装置(中子监测器、太阳中子望远镜和 μ 子望远镜)各有利弊，但它们在实地观测中相辅相成，一定程度上可以提供太阳中子事件的交叉观测特征.

2.2 空间探测仪器

到目前为止，还没有专门设计用于太阳中子探测的卫星，但探测太阳辐射的空间卫星间接提供了太阳中子的观测资料(如表 4 所示). 从表 4 可以看到，太阳中子事件的空间观测特征反映了全波段的电磁辐射和粒子辐射等方面，仅由单一的地面或空间观测数据不足以分析这一复杂的物理过程.

3 太阳中子能谱的计算

对于太阳中子事件里中子能谱的计算，必须考虑 4 种相关的情况[5]：(1) 源区的中子能谱；(2) 日面处的中子能谱；(3) 地球大气顶部的中子能谱；(4) 地面探测器上部的中子能谱. 这里主要讨论前 3 种中子能谱的计算方法.

3.1 源区产生的中子能谱

源区产生的中子的角分布和能量分布参见公式(1)和(2)，其能谱如图 1 中实线所示. 当入射粒子分别采取(1)典型的贝塞尔谱($\alpha T = 0.03$)和(2)典型的幂律谱(谱指数 $S = 3.5$)的形式，从计算出的中子能谱(实线)[2]可以看到，由于中子产额增加的缘故，这里计算出的谱线(实线所示)[2]要高于以前的计算结果(虚线所示)[4].

在此基础之上，Murphy等人[5]引入包括粒子加速、传输以及相互作用的耀斑磁环模型，并尝试探讨了高能耀斑的观测量与磁环模型中的加速参量和物理参量的关系，如表 5 和 6 所示. 研究表明，对相关的物理参量和加速参量选取合理的数值，在环传输和相互作用模型的框架下可以对观测量进行自洽的预测，其中耀斑的日心角($\theta_{\rm obs}$)由 NOAA/SEC 根据光学像而确定.

3.2 日面处的中子能谱与到达地球大气顶部的中子能谱

不同于源区产生的中子能谱，日面处中子的强度与地球大气顶部的中子流量存在如下的关系[23]：

表 3 宇宙线的地面探测仪器(探测中子的能量范围>200 MeV)[7,30]

仪器名称	科学目标	主要结构	优势	劣势
中子监测器(NM)	监测初级质子及带电离子的强度随时间的变化	铅反射器、发生器、调解器、计数器	结构较简单、适宜大面积制作、操作稳定、较高探测效率，实现在线发布数据	不能直接探测中子能量及方向，无法区分中子、π介子和光子
太阳中子望远镜(SNT)	测量太阳中子能量及入射方向	正比计数器、塑料闪烁体	可确定太阳中子能量及入射方向	只对有限能量范围和速度范围的中子敏感，导致捕获事例较少
μ 子望远镜	记录宇宙线强度与各向异性	多层闪烁体	空间天气预警服务，如CME、行星际激波、地磁暴预报	尚未形成全天候、全天区的监测网

表 4 间接提供太阳中子观测资料的空间探测仪器 a)

仪器名称	科学目标	能量范围	寿命	参考文献
SMM/GRS	太阳γ射线、中子	γ 射线: 300 keV~20 MeV 中子: >20 MeV	1980~1989 年	[14,31]
CGRO/BATSE	γ射线暴	20~600 keV	1991 年至今	[11]
CGRO/OSSE	耀斑核谱线能谱	γ射线: 0.05~150 MeV 中子: >10 MeV	同上	[5]
CGRO/COMPTEL	太阳γ射线、中子	0.8~30 MeV	同上	[11]
Yohkoh/SXT	软 X 射线成像、日冕气体温度分布和磁场结构	0.25~4 keV	1991~2001 年	[32]
Yohkoh/HXT	硬 X 射线成像	L: 14~24 keV M1: 24~35 keV M2: 35~57 keV H: 57~100 keV	同上	[33]
Yohkoh/GRS	高能电子、离子的加速	1.4~62 MeV	同上	[11]
RHESSI	X 射线、γ射线成像、耀斑粒子加速和能量释放的基本过程	3 keV~20 MeV	2002 年至今	[34]
CORONAS-F/SONG	γ射线、X 射线	X 射线: 0.05~100 MeV 中子: >20 MeV 电子: 12~100 MeV 质子: >75 MeV	2001 年至今	[11]
INTEGRAL/SPI	γ射线	20 keV~8 MeV	2002 年至今	[11]

a) 1) SMM/GRS, 不足以区分光子和中子; 2) CGRO/BATSE, 探测到γ射线发射的时刻作为太阳表面粒子加速开始的时间; 3) RHESSI, γ射线像可提供粒子加速和中子产生的位置; 4) 由于中子需要一定的热化时间被氢原子俘获[35], 因此 2.223 MeV γ射线的产生时间通常比高能中子的产生时间要滞后 100 s 左右

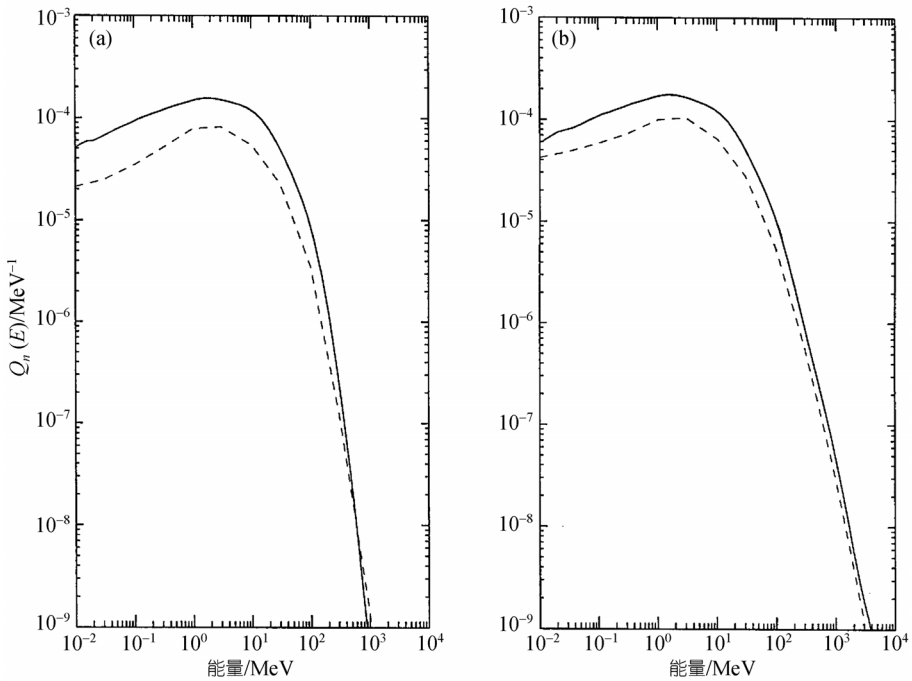

图 1 入射粒子分别采取贝塞尔谱(αT=0.03)(a)和幂律谱(谱指数S = 3.5)(b)的形式下, 计算出的中子能谱(实线)与Hua等人[4]计算结果(虚线)的比较

$$I_{\odot n}=\frac{L^2}{\omega(E_n)}F_{E-n}, \tag{3}$$

其中 $I_{\odot n}$ 为日面处中子的强度, 单位为中子数·MeV^{-1}·sr^{-1}; F_{E-n} 为地球大气顶部中子的流量, 单位为中子

表 5　太阳耀斑磁环模型中的加速参量和物理参量[5]

参量类型	参量名称
加速参量	1) 幂律谱指数 s
	2) 加速粒子释放的时间演化 $a_{\rm ion}(t)$
	3) 加速粒子的化学元素组成
物理参量	1) 环长 L
	2) 螺旋角散射的程度 λ
	3) 磁环中双足会聚的程度 δ
	4) 耀斑的日心角 $\theta_{\rm obs}$
	5) 耀斑大气的数密度、温度的模型，$n(h)$和$T(h)$

表 6　高能耀斑的观测量与磁环模型中加速参量、物理参量的对应关系[5]

高能耀斑的观测量	加速参量	物理参量
窄激发谱线的能流及其比	$\alpha/p, S$	周围大气的元素丰度
窄激发谱线的移动和形状	$\alpha/p, S$	$\delta,\lambda,\theta_{\rm obs},n(h)$
窄激发谱线的时间演化	$a_{\rm ion}(t)$	$\delta,\lambda,L,n(h)$
电子韧致辐射的时间演化	$a_e(t)$	L
中子俘获线的时间演化	$a_{\rm ion}(t)$, $\alpha/p, S$	$\delta,\lambda,\theta_{\rm obs},n(h)$, L
在地球附近中子的能流	$\alpha/p, S$	$\delta,\lambda,\theta_{\rm obs},n(h)$
到达地球的中子计数的时间演化	$a_{\rm ion}(t)$, $\alpha/p, S$	$\delta,\lambda,\theta_{\rm obs},n(h)$, L

数$\cdot\mathrm{MeV}^{-1}\cdot\mathrm{m}^{-2}$；$\omega(E_n)=\exp(-t/\gamma\tau)$为太阳中子在衰变前到达地球表面的存活率，与中子的能量E_n有关，其中τ为中子衰减的时标，其值为 886 s，$\gamma=\dfrac{1}{\sqrt{1-\beta^2}}$；$L$为一个天文单位，值为 1.5×10^{11} m.

计算日面处太阳中子能谱的方法，大体上分为观测法和模型法(δ模型和γ模型)两类.

(1) 观测法.　如图 2 所示，假定太阳高能中子的产生时间与γ射线退激发核谱线的产生时间相同，结合空间与地面探测的结果，由γ射线退激发核谱线与中子监测器探测到的中子信号超出的时间差 Δt，根据飞行时间方法(Time of Flight Method)，由下式得到该时刻探测到的太阳中子的能量 E_n：

$$\frac{E_n^2+2E_nM_n+M_n^2}{M_n^2}=\frac{c^2\Delta t^2+L^2+2c\Delta tL}{c^2\Delta t^2+2c\Delta tL}, \tag{4}$$

其中 M_n 是中子的静止能量 940 MeV; L 是日地距离，值为 1.5×10^{11} m; c 是光速.

同理，自洽地选定一个时间范围作为太阳中子事件作用的时间，则可得到在该时间段内探测到的太阳中子的能量范围 ΔE_n. 依据地面中子监测器计数的时间轮廓，由(5)式[23,26]可以获得地球大气顶部太阳中子的流量 F_{E-n}：

$$F_{E-n}=\frac{\Delta N}{\Delta E_n\cdot\varepsilon(E_n)\cdot Att(E_n)\cdot S}, \tag{5}$$

其中 ΔN 为中子监测器对应时间段内计数的超出个数; ΔE_n 为由TOF方法得到对应时间段内中子的能量范围; $\varepsilon(E_n)$ 为中子监测器的探测效率，与中子能量 E_n 有关[36,37](由蒙特-卡罗模拟获得); $Att(E_n)$ 为太阳中子在站址处的衰减数(由蒙特-卡罗模拟获得)，也与中子能量 E_n 有关[38,39]; S 为中子监测器的有效探测面积.

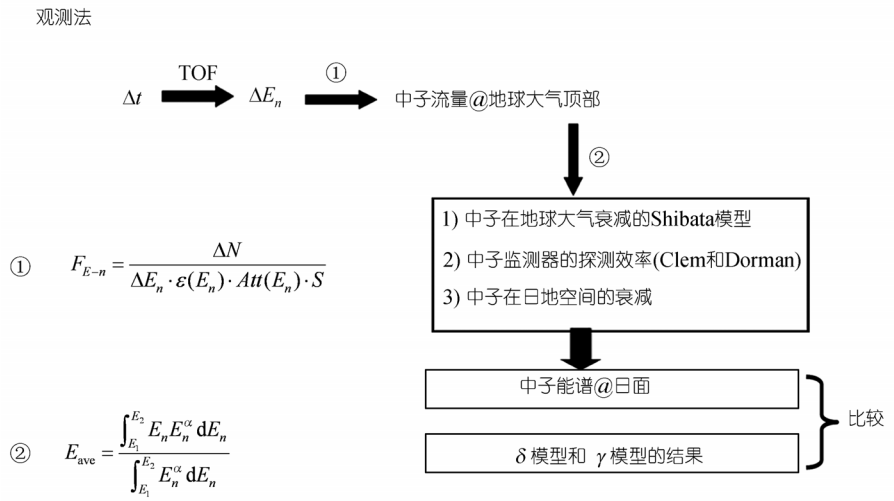

图 2　由观测法计算日面处太阳中子能谱的主要思路

太阳中子在地球大气传输过程中的衰减模型[11]主要有Debrunner模型[38]和Shibata模型[39]，其中Debrunner模型既包括中子在大气中的传输，也包含中子监测器的探测效率. 因此，就其准确性而言，两者无可比性，但日本RCNP加速器上的实验结果[40]更倾向于支持Shibata模型.

由地球大气顶部太阳中子的流量 F_{E-n} 可以推导日面处的中子能谱[11]. 假设太阳中子的能谱以幂律谱 (E_n^{α}) 来表达，其中 E_n 为中子的动能，α 为幂律谱指数，E_{ave} 为所取时间段内中子的平均能量，可由(6)式求得

$$E_{\text{ave}}=\frac{\int_{E_1}^{E_2}E_nE_n^{\alpha}\mathrm{d}E_n}{\int_{E_1}^{E_2}E_n^{\alpha}\mathrm{d}E_n}, \tag{6}$$

其中 E_1 和 E_2 分别是所取时间段内的能量下限和能量上限. 考虑太阳中子在地球大气的衰减和中子监测器在 E_{ave} 处的探测效率因素，直至迭代得到最优化的 α 值为止.

(2) 模型法. 依据对太阳中子产生方式的不同假设，模型法大体上可以分为两类：δ 模型和 γ 模型. δ 模型认为太阳中子是脉冲产生的，在时间t日面处中子的流量可以由(7)式得到[14]:

$$F_{\odot n}(t)=L^{-2}q'(E_n,t_s)\frac{\mathrm{d}E_n}{\mathrm{d}t_n}\omega(E_n), \tag{7}$$

其中 $F_{\odot n}(t)$ 为日面处中子的流量，单位为中子数·$\text{cm}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$; L 为一个天文单位，值为 1.5×10^{11} m; t_s 为太阳中子在日地间的飞行时间; E_n 为由飞行时间方法(TOF)计算得到的中子动能; $q'(E_n,t_s)$ 为在 t_s 时刻日面中子的微分发射谱，单位为中子数·$\text{MeV}^{-1}\cdot\text{sr}^{-1}$. 可以取如下 3 种形式:

① $q'(E_n)\propto E_n^{-s}$, $E_n\leqslant E_c$; $q'(E_n)\equiv0$, $E_n\geqslant E_c$;

② $q'(E_n)\propto E_n^{3/8}\exp[-(E_n/3.26\Phi^2)^{1/4}]$;

③ $q'(E_n)\propto\exp(-E_n/E_0)$;

$\frac{\mathrm{d}E_n}{\mathrm{d}t_n}$ 为中子能量-时间的色散关系[41]，只与中子能量有关. $\omega(E_n)=\exp\left(-\frac{t}{\gamma\tau}\right)$ 为太阳中子在衰变前到达地球表面的存活率，与中子能量 E_n 有关.

计算结果与空间、地面的观测数据比较表明[14]，仅由 δ 函数模型无法得到最优的拟合结果，主要表现为: (1) 在捕获的太阳中子事件中，存在地面中子监测器记录的计数超出长达十几分钟的事例，而且在脉冲发射期间，第一个光子到达后 5 min之内地面中子监测器的计数显著涨高，这不可以仅由δ函数模型来解释; (2) 此外，空间探测结果也表明，γ射线是缓变产生的; (3) 观测表明，高能中子的能谱是随时间变化的，而非单一的形式，在脉冲发射和缓变发射期间，高能中子谱具有不同的形式是必要的. 因此，对于中子能谱的计算，往往采取缓变型(γ 模型)或者混合型(脉冲 δ 模型和缓变 γ 模型)，并与观测法的计算结果进行比较.

γ 模型认为，假定太阳中子的产生与γ射线的核退激发谱线具有相同的时间轮廓[11](如果核退激发谱线不明显，可以由韧致辐射谱线的时间轮廓来取代). 事实上，假设太阳中子在某个确定的时间内连续地产生更为合理，这是由于 4~7 MeV γ射线的发射是太阳中子产生时间的最优指示器. 因此，如果 4~7 MeV γ射线分立谱线的时间轮廓显示出延迟的特性，则应依据 γ 模型推导日面处中子的能谱. 那么，相应的(7)式中 $q'(E_n,t_s)$ 采取如下形式[14]:

$$q'(E_n,t_s)=\sum_{t_s}q'(E_n,t_s)=K\sum_{t_s}f(t_s)q(E_n), \tag{8}$$

其中 $q'(E_n,t_s)$ 为日面中子能谱函数，单位为中子数·$\text{MeV}^{-1}\cdot\text{sr}^{-1}$; K 为归一化常数; $f(t_s)$ 与π介子γ射线发射的时间轮廓成正比; $q(E_n)$ 为中子谱的函数形式，同(7)式中的①~③三种形式.

γ 模型的计算结果表明[14]，尽管空间探测(GRS)和地面中子监测器的观测数据可以对中子能谱的形式给予较强的限制，但是拟合结果仍有不足之处，表现为: (1) 当中子能谱采用幂律谱的形式，需要引入一个高能截断能量E_c，用以解释中子监测器在事件开始时记录到的计数超出; 虽然可以通过减小谱指数S或增加截断能量 E_c 调整峰值时刻谱的形式，进而来拟合中子监测器记录的计数超出，但有些太阳中子事件并非事件开始之时中子计数就达到峰值; (2) 采用幂律谱来拟合中子监测器的数据无法体现其复杂的时间结构，不能解释精细的时间演化过程; (3) 混合模型的计算结果表明，80%的中子发射来源于缓变发射阶段，这与 δ 模型认为 100%的太阳中子是在脉冲发射期间产生的结论相抵触.

上述研究结果均表明，对太阳中子能谱的计算，

尚需进一步考虑中子能谱随时间变化的发射模型.

3.3 计算结果的比较

根据上述太阳中子能谱的两种计算方法(观测法和模型法), 对10例太阳中子事件的中子能流及谱指数的计算结果进行了比较[8,11](详见表 7~9).

从表 7~9 的计算结果可以看到, 虽然在一定程度上观测法与模型法均可以自洽地解释太阳中子事件中的观测参量, 但仍需要考虑影响中子能谱的一些其他因素.

(1) 地面观测仪器的地理位置. 在太阳活动的第 23 周内捕获的太阳中子事件, 其中子能谱指数比第 21 周和 22 周的能谱指数要软. 由表 2 可以看到, 探测到其中 3 例太阳中子事件的中子监测器位于 Mt.Chacaltaya(玻利维亚), 该处的垂直大气质量仅为 540 g/cm^2, 致使即使是能谱指数较软的弱信号, 仍然可以探测到.

(2) 耀斑软 X 射线的流量. 太阳中子事件中, 日面处中子的流量绝大多数在 10^{25} erg/sr 的数量级上, 而 2003-11-04 事例中的流量为 10^{26} erg/sr 的数量级, 这与该事件对应的耀斑其软 X 射线流量为 X28 级有关. 此外, 到达地面探测器上方的中子计数, 在 10 例太阳中子事件里却几乎相同, 这在某种程度上反映了由模型法计算太阳中子能谱的不自洽性.

(3) 拟合所选取的模型. 2003-10-28 太阳中子事件中, γ 模型的幂律谱指数要比 δ 模型硬得多, 这与选取模型的原则相悖, 尚需理论进一步的解释.

此外, 由计算结果可知, 当地面探测器上方有 10^3 个量级的中子入射时, 地面中子监测器的计数将会有大于 4σ 的超出.

太阳中子事件爆发过程中伴随有高能中子、质

表 7 太阳活动第 21 周和 22 周内的中子事件由观测法获得的中子流量比较[8,9,11,15]

序号	爆发时间	观测法		
		幂律谱指数	日面中子发射/$\times10^{28}$ sr^{-1}	地球大气顶部的中子个数
1	1982-06-03	-4.0 ± 0.2[11] -3.7 ± 0.2[9]	690[11] 8[15]	4×10^4[15]
2	1990-05-24	-2.9 ± 0.1[11] -2.6 ± 0.1[9]	840[11] 560[15]	4×10^5[15]
3	1991-03-22	-2.7 ± 0.01[11] -2.4 ± 0.1[9]	11[11]	–
4	1991-06-04	-4.9 ± 1.3[11] -4.9 ± 1.7[9]	73[11]	10^4[15]
5	1991-06-06	$-4.6^{+0.4}_{-0.3}$[11]	140 ± 20[11] 210 ± 20[11]	–

表 8 太阳活动第 23 周内的中子事件由观测法获得的中子流量比较[8,11]

序号	爆发时间	中子能量范围/MeV	观测法			
			幂律谱指数	日面中子流量/$\times10^{28}$ sr^{-1}	地球大气顶部/个·m^{-2}	探测器上方/个·m^{-2}
6	2000-11-24	56~700	-4.2 ± 0.5	8.0	9.4×10^5	3.6×10^3
7	2001-08-25	54~600	-3.1 ± 0.4	4.1	5.2×10^5	2.5×10^3
8	2003-10-28	104~1400	-3.8 ± 0.4	12	2.0×10^6	1.2×10^3
9	2003-11-02	51~180	-7.0 ± 1.3	28	2.7×10^6	3.5×10^3
10	2003-11-04	59~913	-3.9 ± 0.5	240	3.0×10^7	3.5×10^3

表 9 太阳活动第 23 周内的中子事件由模型法获得的中子流量比较[8,11]

序号	爆发时间	δ 模型		γ 模型	
		幂律谱指数	日面中子流量/$\times10^{28}$ sr^{-1}	幂律谱指数	日面中子流量/$\times10^{28}$ sr^{-1}
6	2000-11-24	-4.3 ± 0.2	16^{-1}_{+1}	$-4.2^{+0.3}_{-0.2}$	15^{+1}_{-2}
7	2001-08-25	$-3.0^{+0.2}_{-0.4}$	$5.8^{+0.8}_{-0.6}$	-3.1 ± 0.3	$6.6^{+0.9}_{-0.8}$
8	2003-10-28	$-4.0^{+0.4}_{-0.2}$	130^{+10}_{-10}	-2.9 ± 0.2	37^{+3}_{-4}
9	2003-11-02	$-7.9^{+0.8}_{-1.0}$	33^{-5}_{+5}	$-6.1^{+0.6}_{-0.8}$	24^{+5}_{-3}
10	2003-11-04	$-3.9^{+0.1}_{-0.2}$	550^{+40}_{-30}	$-3.6^{+0.1}_{-0.2}$	420^{+30}_{-30}

子和γ射线产生. 对 1990 年 5 月 24 日中子事件的研究[17], 将该事件过程分为中子与γ射线产生的脉冲相阶段、中子和基本的高能γ射线发射阶段, 以及太阳质子进入近日行星际空间阶段, 并认为行星际空间的太阳质子并非来自于产生中子和γ射线发射的粒子群, 而是上述粒子在行星际空间不断被加速的产物.

一般而言, 太阳中子事件往往伴随有太阳质子事件, 反之则不然. 由离子产生的逃逸中子谱可以计算耀斑中的加速离子谱[2,4]以及能量大于 30 MeV的质子个数, 两者的谱指数之间存在如下关系[11]:

$$\alpha_n = (0.89 \pm 0.17) \times \alpha_p + (0.44 \pm 0.47), \quad (9)$$

其中 α_n 为逃逸的中子谱指数, α_p 为加速质子的谱指数, 并假设加速质子谱采取激波加速下的幂律谱形式. 由(9)式可以看出, 离子的谱指数要比中子的能谱指数软, 具体计算结果见表 10.

表 10 10 例太阳中子事件中, 中子谱指数、质子谱指数以及质子个数的比较(>30 MeV)[8,11]

序号	爆发时间	中子谱指数	质子谱指数	质子个数 (>30 MeV)/sr
1	1982-06-03	–4.0	–5.0	10^{33}
2	1990-05-24	–2.9	–3.8	10^{33}
3	1991-03-22	–2.7	–3.5	10^{31}
4	1991-06-04	–4.9	–6.0	10^{32}
5	1991-06-06	–4.6	–5.7	10^{31}~10^{32}
6	2000-11-24	–4.2	–5.2	10^{31}~10^{32}
7	2001-08-25	–3.1	–4.0	10^{31}
8	2003-10-28	–3.8	–4.8	10^{31}~10^{32}
9	2003-11-02	–7.0	–8.4	10^{30}~10^{31}
10	2003-11-04	–3.9	–4.9	10^{33}

从表 10 可以看出[8], 太阳中子谱指数一般在–3 ~ –4 之间(2003 年 11 月 2 日事件除外), 对应的质子谱指数与中子谱指数之差约为–1, 即质子谱指数比中子谱指数要软, 由此计算得到的能量大于 30 MeV的质子个数约为日面处中子流量的 100~1000 倍(见表 7~9). 由于依据中子谱来推导质子能谱, 与中子的能量范围、谱指数以及太阳大气的离子丰度等因素有关, 因此以上计算结果在某种程度上具有一定的局限性, 尚需更多的太阳中子事件的观测实例来进一步印证.

4 羊八井地面宇宙线探测装置对太阳中子的初步探测结果

西藏羊八井国际宇宙线观测站, 位于较低地磁纬度(19.6°N)和较高地磁截止刚度(14.1 GV)处, 既排除了许多低能质子的干扰, 又不影响高能太阳中子到达地面. 此外, 站址地处 4300 m 的海拔高度, 对应的大气深度为 603 g/cm^2, 地面观测点与太阳之间的空气厚度较小, 极大减小了中子在地球大气中传输时的衰减(约为同等条件下海平面处站址衰减的 1/100), 并且有条件实现同一地点处多种探测器(中子监测器、太阳中子望远镜、 μ 子望远镜)对太阳中子事件的交叉观测, 其地理参数如表 11 所示.

表 11 西藏羊八井宇宙线探测装置的地理参数[42]

海拔	纬度/经度	地磁纬度	地磁截止刚度	大气深度
4300 m	30.1°N/90.5°E	19.6°N	14.1 GV	603 g/cm^2

基于以上条件, 自 1998 年 10 月投入运行并开始数据采集以来, 中子监测器(28支NM-64型)和太阳中子望远镜(有效探测面积为 9 m^2)已经成功探测到一系列 GLE 事件, 并预言了其中可能的太阳中子事件(1998 年 11 月 28 日事件和 2005 年 1 月 20 日事件).

1998 年 11 月 28 日爆发的X3.3 级太阳耀斑, 使羊八井太阳中子望远镜最南向 3 个通道的计数明显超出. 期间, 空间与地面探测仪器的联合观测提供了丰富的数据资料, 并据此绘制了太阳耀斑环示意图[43](如图3 所示), 相应的多波段观测特征见表 12 和 13, 中子监测器和太阳中子望远镜的观测结果见图4. 在该事件的空间探测中, CGRO/OSSE并未观测到



图 3 1998 年 11 月 28 日事件的太阳耀斑环示意图[43]

表 12　西藏羊八井观测到的可能的太阳中子事件[7,43]

爆发时间	耀斑级别及黑子位置	太阳天顶角/(°)	地面探测仪器				
			经度/纬度	仪器类型	高度/m	截止刚度/GV	计数超出
1998-11-28 (N)05∶38 UT	X3.3/3N N17E32	18.9 15	138°/36°	NM64 SNT	4300 同上	14.1 同上	3.8σ 4.9σ

表 13　1998 年 11 月 28 日事件的探测特征[7,43]a)

探测仪器名称	观测特征
GOES	软 X 射线发射始于 04∶54 UT, 05∶52 UT 达到峰值, 06∶13 UT 结束
CGRO/BATSE	X 射线发射始于 05∶31∶36 UT, 05∶40∶46 UT 达到峰值，持续时间为 2834 s
Yohkoh/SXT	在 05∶04∶07 UT 至 05∶43∶29 UT 期间，观测到耀斑环移动的时间序列像
Yohkoh/HXT	叠加在软 X 射线像上的硬 X 射线等值线图表明, A 点的硬 X 射线显示出较强的发射, B 点的硬 X 射线发射较弱，而在 T2 点处未观测到硬 X 射线发射
Nobeyama(17 GHz)	观测到的双足点并不对应于同一个耀斑环的双足
Mitaka/ $H\alpha$	在 05∶30 UT, C 区域 $H\alpha$ 强度开始增亮, A, B 和 E 区域 $H\alpha$ 强度的时间轮廓，与硬 X 射线发射的时间轮廓相似
YBJ-NM	显示出 3.8σ 的计数超出，并且由 05∶38 UT 开始持续 3 min
YBJ-SNT	显示出 4.9σ 的计数超出，并且由 05∶38∶20 UT 开始持续 3 min

a) 1) Nobeyama(17 GHz)，日本 Nobeyama 射电望远镜(17 GHz); 2) Mitaka/$H\alpha$，日本 Mitaka 太阳照相仪; 3) YBJ-NM，羊八井中子监测器; 4) YBJ-SNT，羊八井太阳中子望远镜

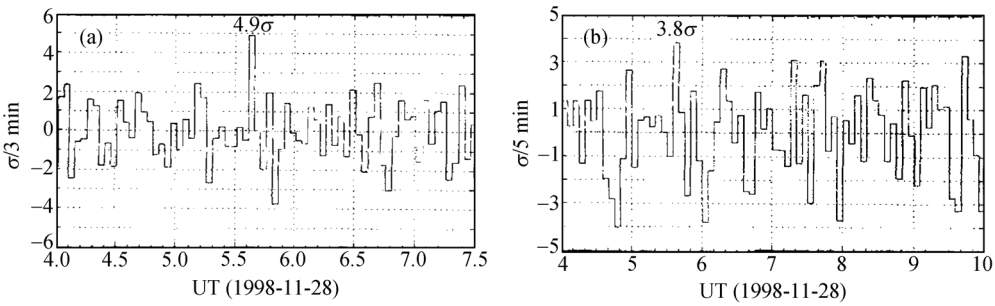

图 4　1998 年 11 月 28 日羊八井观测到的一个可能的太阳中子事件[7]

(a) 太阳中子望远镜的观测结果，其计数超出达到 4.9σ; (b) 中子监测器的观测结果，其计数超出达到 3.8σ

2.223 MeV的γ射线发射，但羊八井太阳中子望远镜观测的阈值能量在 240 MeV以上，因此，即使空间探测器没有 2.223 MeV γ射线发射的观测证据，也不能完全否定太阳中子事件存在的可能性[7].

综合以上多波段观测资料，初步认为[43]热等离子体注入环A-B中(见图 3)，并在足点处沉积能量，可能的加速位置在T2 点；在大约 05:19 UT时刻，A-B和F-G等系列环在T1 点处碰撞，相应的邻近磁环进行连续的磁重联，并由T1 点向T2 点逐步扩展开来. 硬X射线的观测数据表明，一些加速粒子在足点A处已经进入太阳大气，那里极有可能就是γ射线和中子发射的位置. 此外，在该耀斑事件中，两个邻近的耀斑磁环经历重复的碰撞过程，其中使粒子加速到高能状态大致可以分为三步：首先，源于G-F和G-T1 两环之间碰撞的某种跳跃；其次，环A-B和环G-F在T1 点处的碰撞；最后，粒子在T2 点处碰撞激发到高能状态. 热的等离子体应该在 05:06 UT到 05:37 UT时刻出现，并在 05:37 UT以后，电子和离子被激波加速长达 3 min之久，这与羊八井中子监测器、太阳中子望远镜记录到的长达 3 min的计数超出相一致.

此外，2005 年 1 月 20 日伴随着X7.1 级的耀斑和CME(日冕物质抛射)，产生了太阳活动第 23 周内最强的质子事件. 该GLE事件开始时间为 06:49 UT，羊八井中子监测器和太阳中子望远镜分别在 06:34 UT和 06:43 UT记录到明显的计数超出. 考虑到地面探测器记录到计数超出的时间提前于GLE事件的开始时间，此情况认为是由相对论的太阳中子产生的[44]. 但是在该期间，由于RHESSI卫星并没有任何有关离子加速的直接观测证据，而在其他时间段(06:44 UT和 07:00 UT)观测到核退激发谱线流量增强，因此，即使存在太阳中子事件，也有可能湮灭在较强的GLE信号之中. 图 5 是利用蒙特-卡罗模拟计算在中

子入射角为 51°时羊八井 28 支NM64 型中子监测器的产额函数、中子监测器的响应函数以及中子在日地间的传输时间与能量的关系[44]. 图 6 是 2005 年 1 月 20 日羊八井中子监测器 3 min计数的平均强度, 灰色曲线对应假定太阳中子在 06:36 时刻产生时的拟合结果[44]. 尽管拟合结果可以较好地再生中子监测器起始时刻观测到的计数轮廓, 但是处于同一地点的太阳中子望远镜并未在该时刻记录到明显的计数超出. 因此, 有关该事件中相对论中子的进一步认证, 尚需综合利用多波段和行星际的观测资料来研究与高能粒子伴生的相关特征.

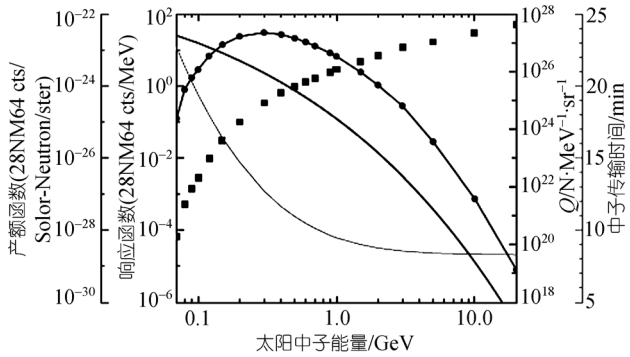

图 5 中子入射角为 51°时, 羊八井 28 支NM64 型中子监测器的产额函数(方块)、羊八井中子监测器的响应函数(圆点)及中子在日地间的传输时间与能量的关系(细线)[44]

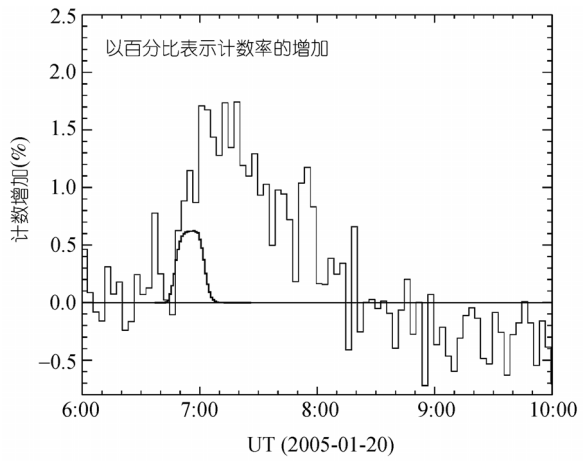

图 6 2005 年 1 月 20 日羊八井中子监测器 3 min计数的平均强度[44]

灰色曲线对应假定太阳中子在 06:36 时刻产生时的拟合结果

5 讨论与展望

综合利用多波段和行星际的观测资料, 研究与高能粒子伴生的太阳中子事件的观测特征, 分析高能γ射线峰值时刻与地面探测到的计数显著性突增时刻之间的延迟, 对于诊断与探究离子的加速机制, 认识耀斑的大气结构和演化, 自洽地给出耀斑环加速参量和物理参量的取值范围, 以及研究日地空间环境和近地空间辐射爆发的预警, 均是有益的补充. 但是, 目前研究中仍存在如下问题.

(1) 对于中子谱指数的大小与耀斑加速机制必然联系的研究方面, 停留在由模型计算来拟合观测结果之上.

(2) 采用单一的幂律谱来解释地面探测器记录到计数的时间轮廓, 很难体现其复杂的时间演化结构.

(3) 事实上, 仅从中子监测器获得的信息无法直接确定太阳中子的产生时间和能量. 虽然太阳中子望远镜可以直接测量太阳中子的能量和方向, 但其对于中子的能量范围和速度范围的敏感度有限, 导致中子望远镜捕获太阳中子事件的几率较低. 此外, 与之形成互补的 μ 子望远镜尚未形成全天候、全天区的监测网. 基于以上限制条件, 均无法对太阳中子的产生是脉冲型还是缓变型做出定论, 只有当能够直接测量中子能量时, 该问题或许可以有望解决.

(4) 对于个别事件(如 1990-05-24 太阳中子事件), 也可以由假设太阳中子的产生时间与耀斑中电子的加速时间相同来拟合观测结果[45], 而RHESSI卫星对于γ射线的成像观测却表明, 离子和电子具有不同的加速机制[46], 这客观上要求进一步发展有关太阳中子发射谱的理论模型.

(5) 在计算中子能谱时, 假设太阳中子在某个确定的时间内连续地产生更为合理. 由于 4~7 MeV γ射线的时间轮廓是中子产生时间的指示器, 所以, 如果 4~7 MeV γ射线分立谱线的时间轮廓显示出延迟的特性, 则依据该时间轮廓推导中子的能谱更为自洽一些. 如果未能明显地观测到γ射线发射谱, 则可由韧致辐射的γ射线来代替分立核谱线的作用.

(6) 2.223 MeV中子俘获线的发射与太阳中子事件的探测无必然联系[47], 即使空间探测器没有 2.223 MeV γ射线发射的直接观测证据, 也不能完全否定太阳中子事件存在的可能性[7].

(7) 中子监测器的探测效率和太阳中子在地球大气中的衰减, 均与中子的能量有关. 中子能谱计算中采用的Clem等人[36]有关中子监测器探测效率的结果, 与Shibata等人[37]在加速器实验中直接测量的结果偏差可达±5%, 这客观上对中子能谱计算的自洽性

提出了质疑.

(8) 太阳中子事件中, 日面处中子的流量绝大多数均在 10^{25} erg/sr 的数量级上, 而 2003-11-04 事例中的流量为 10^{26} erg/sr 的数量级, 这与该事件对应的耀斑软 X 射线流量为 X28 级有关. 而到达地面探测器上方的中子计数在 10 例太阳中子事件里却几乎相同, 这在某种程度上也反映了由模型法计算太阳中子能谱的不自洽性;

(9) 对暗条观测资料的研究表明, 高纬度太阳活动的纬度漂移除已知的由中纬度(40°)向太阳两极的纬度漂移以外, 还有由太阳两极向中纬度的纬度漂移过程[48]; 但与 10 例太阳中子事件对应的耀斑活动, 均发生在日面南北纬 30°左右之间(由表 2 可得), 并未表现出明显的纬度分布特征. 目前, 对于太阳中子事件对应耀斑位置的研究, 主要是针对在日面处的经度分布而展开[2,4,11], 并认为太阳中子更易在边缘耀斑中观测到[4,11]. 但由已确认的 10 例太阳中子事件可以看到(详见表 2), 对应耀斑活动区的经度分布与探测到太阳中子事件的可能性之间, 并无必然的联系. 这客观上需要建立的太阳耀斑模型能够兼顾太阳中子在太阳大气中释放的方向、对应太阳耀斑活动发生的位置, 以及耀斑环具体的几何结构等方面.

(10) 探测中, NM-64 型的中子监测器无法区分π介子、光子和中子在闪烁体中产生的电子和正电子. 在未来的仪器维护与改进中, 期望通过安装薄铅板以区分光子和中子, 安装双层的反比计数器系统以阻止μ子穿透反符合装置, 从而进一步提高探测太阳中子的效率.

(11) 对于地面中子探测装置在排除统计涨落的因素以外, 所采取的强噪声背景下弱信号提取的不同数据处理方法, 也会影响到太阳中子事件的认证.

(12) 将蒙特-卡罗模拟对中子的跟踪直至中子衰变, 或者从太阳表面逃逸的过程, 与空间探测器获得的有关太阳耀斑环磁重联的观测证据有机地结合起来, 有助于明晰耀斑离子的加速过程, 但这尚需仪器的时间、空间和谱分辨率的不断提高才能得以实现.

基于上述存在的问题, 可以尝试从以下几个方面开展进一步的研究.

(1) 由于已确定的太阳中子事件仅10例, 与太阳活动的甚长周期性变化相比, 尚不足以做出统计方面的论断. 但相对频繁爆发的太阳质子事件会使地面的中子数骤增数倍, 可以借助高能质子通量与地面宇宙线通量之间的相关性, 以及太阳质子事件相对成熟的长、中、短期预报理论, 使太阳活动预报的模式多元化, 研究的方式系统化. 此外, 太阳质子事件的爆发也导致大气中的 ^{14}C同位素增加, 结合Solanki等人[49]利用树木年轮中 ^{14}C同位素含量变化的数据资料所重建的太阳黑子数序列, 可以对探究太阳活动甚长周期变化的时间尺度[50]做进一步的补充.

(2) 地面中子监测器获得的计数包含太阳宇宙线中的原初中子, 以及与大气核子作用产生的次级粒子再同探测器的铅层反应而得到的中子. 对于前者(即原初中子), 日地空间传播的距离可以认为是 1 AU(不考虑散射); 对于后者(即太阳高能粒子与地球大气作用产生的次级中子), 由于带电高能粒子在日地空间传播距离的选取标准不同[51], 导致对粒子日冕逃逸时间的计算结果的不确定性. 结合原初中子产生时间的判定结果, 以及对应时刻耀斑环移动的时间序列像, 可以进一步限制γ射线和中子发射在耀斑环中的可能位置, 为推测太阳高能粒子的日冕加速源提供理论依据.

(3) 尽管Morlet小波分析方法可以聚焦到研究对象(如宇宙线计数[52]、太阳活动指数[53]等)的任意细节, 可以对各种不同尺度成分采用相应粗细的时域或空域进行分析, 但计算机仿真表明, 改进的Morlet小波变换[54]对信号特征的提取性能要优于Morlet小波变换方法, 并显示出较好的突变点诊断和抗干扰能力, 可以尝试采用该方法对地面宇宙线计数率进行多时间尺度周期变化特征的研究.

(4) 由于地震前高空电离层的高能带电粒子会出现沉降异常情况, 可以尝试初步探究地面中子监测器的计数率在震前异常扰动所隐含的物理机制.

(5) 此外, 研究也表明宇宙线流强与全球覆盖云量间具有强相关性[55], 可以借助更详细的高、中、低层云量数据探讨宇宙线计数骤变期间(如福布什下降或GLE事件)羊八井上空云量长期变化的规律性.

综上所述, 太阳中子事件的观测特征反映了全波段的电磁辐射和粒子辐射等方面, 对其研究是一个涉及多学科(粒子物理、太阳物理、地球物理、行星际物理、大气物理等)的交叉领域, 仅凭单一的地面或空间观测数据不足以分析这一复杂的物理过程. 因此, 应开展基于空间、地面的多手段综合监测, 包括γ射线、X 射线、光学、射电频谱等的实测, 以实现对太阳中子事件的时间、空间精细结构的深入研究. 此外, 太阳中子能谱的计算需要建立与观测结果更为

自洽的动力学模型，这有赖于粒子物理探测技术的提高与太阳高能粒子加速机制过程的进一步明晰.

致谢 诚挚感谢审稿专家的评审意见，以及持之以恒奋战在羊八井宇宙线观测站的研究人员和管理人员.

参考文献

1 甘为群，王德煦. 太阳高能物理. 北京：科学出版社, 2002. 149—152, 161—170
2 Hua X M, Kozlovsky B, Lingenfelter R E, et al. Angular and energy-dependent neutron emission from solar flare magnetic loops. Astrophys J Lett, 2002, 140: 563—579
3 Lingenfelter R E, Flamm E J, Canfield E H, et al. High energy solar neutrons. 1, Production in flares. 2, Flux at the Earth. J Geophys Res, 1965, 70: 4077—4086, 4087—4095
4 Hua X M, Lingenfelter R E. Solar flare neutron and accelerated ion angular distributions. Astrophys J, 1987, 323: 779—794[DOI]
5 Murphy R J, Kozlovsky B, Share G H, et al. Using gamma-ray and neutron emission to determine solar flare accelerated particle spectra and composition and the conditions within the flare magnetic loop. Astrophys J Lett, 2007, 168: 167—194
6 Evenson P, Meyer P, Pyle K R. Protons from the decay of solar flare neutrons. Astrophys J, 1983, 274: 875—882[DOI]
7 张吉龙，鲍克智，丁林恺，等. 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. 高能物理与核物理, 2000, 24: 1081—1087
8 Watanabe K, Muraki Y, Matsubara Y, et al. Soalr neutron events associated with large solar flares in solar cycle 23. In: Proceedings of the 29th International Cosmic Ray Conference, 2005. 101—104
9 Shibata S, Murakami K, Muraki Y. Solar neutron events observed in cycle 22. Proceedings of the 23th International Cosmic Ray Conference, 1993, 3: 95—98
10 Hua X M, Lingenfelter R E. Solar flare neutron production and the angular dependence of the capture gamma-ray emission. Solar Phys, 1987, 107: 351—383[DOI]
11 Watanabe K. Solar neutron events associated with large solar flares in Solar Cycle 23. Nagoya: University of Nagoya, 2005
12 Chupp E L, Forrest D J, Share G H, et al. Solar neutrons from the impulsive flare on 1982 June 3 at 1143 UT. Proceedings of the 18th International cosmic ray conference, 1983, 10: 334—337
13 Debrunner H, Flückiger E, Chupp E L, et al. The solar cosmic ray neutron event on June 3, 1982. Proceedings of the 18th International cosmic ray conference, 1983, 4: 75—78
14 Chupp E L, Debrunner H, Flückiger E, et al. Solar neutron emissivity during the large flare on 1982 June 3. Astrophys J, 1987, 318: 913—925 [DOI]
15 Debrunner H, Lockwood J A, Ryan J M, et al. Solar neutron and proton production during the 1990 May 24 cosmic-ray flare increases. Astrophys J, 1993, 409: 822—829[DOI]
16 Smart D F, Shea M A, O'Brien K. Comment on the minimum mass path of a uni-directional solar neutron particle beam through the Earth atmosphere. Proceedings of the 24th International cosmic ray conference, 1995, 4: 171—174
17 Debrunner H, Lockwood J A, Barat C, et al. Energetic neutrons, protons, and Gamma Rays during the 1990 May 24 solar cosmic-ray event. Astrophys J, 1997, 479: 997—1011[DOI]
18 Terekhov O V, Syunyaev R A, Kuznetsov A V, et al. Deuterium synthesis in the solar flare on 24 May 1990: Observations of delayed emission in the 2.2 MeV γ-ray line by the GRANAT satellite. Astron Lett, 1993, 19: 65—68
19 Vilmer N, MacKinnon A L, Trottet G, et al. High energy particles accelerated during the large solar flare of 1990 May 24: X/γ-ray observations. Astron Astrophys, 2003, 412: 865—874[DOI]
20 Pyle K R, Simpson J A. Observation of a direct solar neutron event on 22 March 1991 with the Haleakala, Haiwaii, Neutron Monitor. Proceedings of the 22th International cosmic ray conference, 1991, 3: 53—56
21 Terekhov O V, Sunyaev R A, Tkachenko A Y, et al. Deuterium synthesis during the solar flare of March 22, 1991 (Granat Data). Astronomy Lett, 1996, 22: 143—147
22 Struminsky A, Matsuoka M, Takahashi K. Evidence of additional production of high-energy neutrons during the solar flare on 1991 June 4. Astrophys J, 1994, 429: 400—405[DOI]
23 Muraki Y, Murakami K, Miyazaki M, et al. Observation of solar neutrons associated with the large flare on 1991 June 4. Astrophys J, 1992, 400: L75—L78[DOI]

24 Watanabe K, Muraki Y, Murakami K, et al. Simultaneous observations of Solar Neutrons in association with a large solar flare on June 6, 1991. In: Proceedings of the 28th International Cosmic Ray Conference, 2003. 3211—3214

25 Muraki Y, Sakakibara S, Shibata S, et al. Simultaneous observations of Solar neutrons on June 6,1991 at Mt. Haleakala and Mt. Norikura. Proceedings of the 24th International Cosmic Ray Conference, 1995, 4: 175—178

26 Watanabe K, Muraki Y, Matsubara Y, et al. Solar Neutron Event in association with a large solar flare on 2000 November 24. Astrophys J, 2003, 592: 590—596[DOI]

27 Watanabe K, Muraki Y, Matsubara Y, et al. Solar neutron event in association with a large solar flare on August 25, 2001. Proceedings of the 28th International Cosmic Ray Conference, 2003, 6: 3179—3182

28 Watanabe K, Gros M, Stoker P H, et al. Solar neutron events of 2003 October—November. Astrophys J, 2006, 636: 1135—1144[DOI]

29 Watanabe K, Muraki Y, Matsubara Y, et al. Solar neutron events in association with large solar flares in November 2003. Adv Space Res, 2006, 38: 425—430[DOI]

30 Jansen F, Munakata K, Duldig M L, et al. Muon detectors－the real-time, ground based forecast of geomagnetic storms in Europe. http://www.esa-spaceweather.net/spweather/workshops/SPW_W3/PROCEEDINGS_W3/Greifswald_muon.pdf

31 Forrest D J, Chupp E L, Ryan J M, et al. The gamma ray spectrometer for the Solar Maximum Mission. Solar Phys, 1980, 65: 15—23[DOI]

32 Tsuneta S, Acton L, Bruner M, et al. The soft X-ray telescope for the solar-A mission. Solar Phys, 1991, 136: 37—67[DOI]

33 Kosugi T, Makishima K, Murakami T, et al. The hard X-ray telescope (HXT) for the Solar-A mission. Solar Phys, 1991, 136: 17—36[DOI]

34 Lin R P, Dennis B R, Hurford G J, et al. The Reuven Ramaty high-energy solar spectroscopic imager. Solar Phys, 2002, 210: 3—32[DOI]

35 Wang H T, Ramaty R. Neutron propagation and 2.2 MeV gamma-ray line production in the solar atmosphere. Solar Phys, 1974, 36: 129—137

36 Clem J M, Dorman L I. Neutron monitor response functions. Space Sci Rev, 2000, 93: 335—359[DOI]

37 Shibata S, Munakata Y, Tatsuoka R, et al. Detection efficiency of a neutron monitor calibrated by an accelerator neutron beam. Nucl Instr Meth Phys Res A, 2001, 463: 316—320 [DOI]

38 Debrunner H, Flückiger E Q, Stein P. On the sensitivity of neutron monitors to solar neutrons. Nucl Instr Meth Phys Res A, 1989, 278: 573—575[DOI]

39 Shibata S. Propagation of solar neutrons through the atmosphere of the Earth. J Geophys Res, 1994, 99: 6651—6665[DOI]

40 Koi T, Muraki Y, Masuda K, et al. Attenuation of neutrons in the atmosphere and a thick carbon target. Nucl Instr Meth Phys Res A ,2001, 469: 63—69

41 Lingenfelter R E, Ramaty R. High energy nuclear reactions in solar flares. In: Shen B S P, ed. High-Energy Nuclear Reaction in Astrophysics—A Collection of Articles. New York: Amsterdam, Benjamin, 1967. 99

42 张吉龙, 卢红, 谭有恒, 等. 羊八井太阳中子望远镜. 核电子学与探测技术, 2003, 23: 397—400

43 Muraki Y, Tsuchiya H, Fujiki K, et al. A solar neutron telescope in Tibet and its capability examined by the 1998 November 28th event. Astropart Phys, 2007, 28: 119—131[DOI]

44 Miyasaka H, Takahashi E, Shimoda S, et al. The solar event on 20 January 2005 observed with the Tibet YBJ neutron monitor observatory. Proceedings of the 29th International cosmic ray conference, 2005, 1: 241—244

45 Muraki K, Shibata S. Solar Neutrons on May 24th, 1990. AIP Conf Proc, 1996, 374: 256—264[DOI]

46 Hurford G J, Schwartz R A, Krucker S, et al. First gamma-ray images of a solar flare. Astrophys J, 2003, 595: L77—L80[DOI]

47 Debrunner H, Lockwook J A, Ryan J M. The relationship between the timing of solar flare γ-ray emission and high-energy neutron production. Proceedings of the 24th International Cosmic Ray Conference, 1995, 4: 167—170

48 高朋鑫, 李可军, 李启秀. 高纬度太阳活动的纬度漂移. 科学通报, 2007, 52(15): 1725—1727

49 Solanki S K, Usoskin I G, Kromer B, et al. Unusual activity of the Sun during recent decades compared to the previous 11,000 years. Nature, 2004, 431: 1084—1087[DOI]

50 尹志强, 马利华, 韩延本, 等. 太阳活动的甚长周期性变化. 科学通报, 2007, 52(16): 1859—1863

51 乐贵明, 唐玉华, 韩延本. 太阳高能粒子的日冕逃逸时间与日冕加速源. 科学通报, 2007, 52(21): 2461—2467

52 Le G M, Ye Z H, Gong J H, et al. Wavelet analysis of 27-day variation in cosmic ray intensities observed at Beijing Neutron Monitor. Proceedings of the 28th International Cosmic Ray Conference, 2003. 3743—3746

53 马瑞平, 纪巧, 徐寄遥. 太阳 $F_{10.7}$ 指数准 27 天振荡的小波分析. 空间科学学报, 2007, 27(2): 89—95

54 任春辉, 魏平, 肖先赐. 改进的 Morlet 小波在信号特征提取中的应用. 电波科学学报, 2003, 18(6): 633—637

55 王敏杰, 何丽萍, 贾焕玉. 宇宙线福布什下降期间羊八井云量的变化. 高能物理与核物理, 2006, 30(1): 75—78