

文章编号: 1007-4627(2004)01-0038-05

基于小波变换的 1—10 TeV 宇宙线周期变化研究*

刘 璐, 贾焕玉, 黄 庆

(西南交通大学理学院, 四川 成都 610031)

摘 要: 利用小波变换, 结合折叠周期分析方法, 对羊八井宇宙线观测站 Tibet AS γ 阵列 1998 年 4—6 月的实验记录数据进行了周期分析, 发现 TeV 和 10 TeV 宇宙线流强观测数据中包含 0.5 和 1 d 周期变化, 其信噪比分别达到 10 和 6. TeV 宇宙线 0.5 和 1 d 周期变化的最大变化幅度分别约为 0.3% 和 0.5%, 10 TeV 宇宙线约为 0.4% 和 0.7%.

关键词: 宇宙线; 周期变化; 小波分析

中图分类号: O571; P14 **文献标识码:** A

1 引言

宇宙线变化, 是指观测到的宇宙线强度随时间的变化, 是宇宙线物理、太阳地球物理和天体物理等交叉学科中的重要问题之一. 通过宇宙线变化可以研究宇宙线的起源、传播以及受太阳的调制等. 研究宇宙线变化需要对宇宙线流强进行长期连续地观测, 特别是对甚高能以上能量的宇宙线变化的研究需要采用大面积和高记数率的地面探测器. 能量小于 TeV 的宇宙线流强, 通常使用地下 μ 子望远镜^[1], 能量超过 10 TeV, 则利用广延空气簇射阵列进行观测^[2], 而对 1—10 TeV 能区宇宙线变化的研究尚处于空白. 羊八井宇宙线观测站 Tibet AS γ 阵列自 1990 年建成运行以来, 取得了许多成果^[3-6], 并逐年有所发展: 从最初的观测阈能 10 TeV 和宇宙线事例触发率 20 Hz, 经过几次改进, 到 1999 年完成的三期阵列, 观测阈能为 1.5 TeV、触发率高达 680 Hz. 羊八井宇宙线观测站 Tibet AS γ 阵列由于其高记数率和观测的低阈能, 特别适合于研究 1—10 TeV 能区的宇宙线变化. 1998 年上半年观测站二期和二期高密阵列同时稳定运行, 即在这个时期, 实验记录 10 TeV 能量宇宙线事例的同时, 也记录下了 TeV 能量宇宙线的流强, 因此可以用这部分数据来研究 1—10 TeV 能区的宇宙线变化.

宇宙线变化研究最主要的是寻找其中的周期变化. 经典的周期分析方法是傅里叶分析和统计折

叠, 但当分析的数据中包含几个周期信号或周期信号不是正弦信号或信噪比很小时, 上述方法存在难以克服的困难. 在需要分析的宇宙线流强数据中, 通常包含许多周期信号, 比如日周期变化、半日周期变化或 7 日周期变化等. 这些周期信号也并不一定按正弦形式变化, 且总是和很强的背景噪声混在一起, 因此需要一种新的信号分析方法来提取宇宙线实验数据中的周期. 小波变换(WT)是一种信号的时间-尺度(时间-频率)分析方法, 它具有多分辨率分析的特点, 可以由粗及精逐步观察分析信号, 克服了傅里叶变化在时域上无任何定位性的不足, 在时、频两域都具有表征信号局部特征的能力^[7]. 因此只要先利用小波变换将被分析数据按不同频率(周期)区间进行分解, 再利用传统的折叠法对分解后的信号进行处理, 就可以很好地解决宇宙线变化中多个弱周期信号的提取问题^[8,9].

本文基于小波变换, 结合统计折叠周期法对羊八井宇宙线观测站 1998 年的部分数据进行分析, 来研究 1—10 TeV 宇宙线的周期变化.

2 小波分析

信号 $f(t)$ 的小波变换定义为

$$WT_{a,b}(f) = \int f(t) \bar{\psi}_{\omega}(t) dt, \quad (1)$$

收稿日期: 2003 - 09 - 10; 修改日期: 2004 - 01 - 05

* 基金项目: 西南交通大学基础科学研究基金资助项目

作者简介: 刘 璐(1967—), 女(汉族), 河南商丘人, 研究生, 从事宇宙线物理研究.

其中 $\psi_a(t) = \frac{1}{\sqrt{a}}\psi\left(\frac{t-b}{a}\right)$ 是母小波 $\psi(t)$ 的位移与尺度伸缩; $a > 0$ 是尺度因子, 其作用是将母小波作伸缩; b 反映位移, 其值可正可负.

小波变换是多分辨率分析. 所谓多分辨率分析指的是: 当尺度 a 较大时, $\psi(t/a)$ 变得较宽, 此时分析频率低、视野宽, 可以作概貌观察; 当尺度 a 较小时, 视野窄而分辨率高, 可以作细节的观察. 但不同 a 值下分析的品质因数(中心频率与带宽的比值)却保持不变. 从频域上看, 用不同尺度作小波变换大致相当于用一组带通滤波器对信号进行滤波处理. 带通的目的既可能是分解, 也可能是检测.

任何变换都必须存在反变换才有实际意义. 对小波变换而言, 反变换要存在, 所用小波必须满足

$$\int_0^{\infty} \frac{|\Psi(\omega)|^2}{\omega} d\omega < \infty,$$

其中 $\Psi(\omega)$ 是 $\psi(t)$ 的傅里叶变换, 也称为母小波的容许条件. 由容许条件可以推论出: 能用作母小波 $\psi(t)$ 的函数至少必须满足 $\Psi(\omega=0)=0$. 也就是说, $\Psi(\omega)$ 必须具有带通性质, 且 $\psi(t)$ 必是有正负交替的振荡波形, 使得其平均值等于零. 这便是称为“小波”的原因. “小”就是局域有限, 离开该局域迅速衰减, “波”指的是振荡性.

由于 $\psi(t)$ 的局域有限, 则小波变换便具有表征被分析信号 $f(t)$ 时域上局部性质的能力. $\Psi(\omega)$ 是幅频特性比较集中的带通函数, 这使小波变换又具有了表征待分析信号频域上局部性质的能力.

上面给出的是连续小波变换. 在实际运用中, 特别是在计算机上实现时, 连续小波变换必须离散化. 这一离散化是对连续的尺度参数 a 和平移参数 b 进行的. 通常 a 和 b 的离散化公式分别取作: $a = a_0^j$, $b = kb_0$, 其中 j 和 k 是整数, 对应的离散小波函数 $\psi_{jk}(t)$ 可写作

$$\psi_{jk}(t) = a_0^{-j/2} \psi\left(\frac{t - kb_0}{a_0^j}\right), \quad (2)$$

而离散小波变换可表示为

$$WT_{jk}(f) = \int f(t) \psi_{jk}^*(t) dt. \quad (3)$$

当取 $a_0 = 2$ 时, 式(2)和(3)分别称为二进小波和二进小波变换.

实际的实验数据都是离散采样获取的数字信号, 通过定义可用于离散小波变换快速算法的小波

函数. 引入计算小波变换的算法, 可以将被分析信号按树形结构进行分解分析. 比如, Mallat 于 1989 年提出了著名的 Mallat 算法^[4], 其本质是建立只有有限个不为零(设为 $2k$, $k = 2^{M-1}$)的紧支集上正交小波基低通滤波系数 $h(0), h(1), \dots, h(2k-1)$ 与高通滤波系数 $g(0), g(1), \dots, g(2k-1)$. 由于 $g(k) = (-1)^k h(1-k)$, 所以只需要知道 $h(k)$ 就行了. 通过 $h(k), g(k)$ 与待分析信号的卷积实施对信号的分解和重构. 具体的信号分解过程如下:

设被分析信号为 $x(t) = x(n\Delta t) = x_n^{(0)}$, $t = n\Delta t$, Δt 是数据采样间隔, 第 1 层分解:

近似平滑逼近:

$$x_n^{(1)} = \sum_k h(k-2n)x_k^{(0)}, \quad (4)$$

细节(小波变换):

$$d_n^{(1)} = \sum_k g(k-2n)x_k^{(0)}; \quad (5)$$

大于 1 的各层分解按如下递推公式给出:

近似平滑逼近:

$$x_n^{(j+1)} = \sum_k h(k-2n)x_k^{(j)}, \quad (6)$$

细节(小波变换):

$$d_n^{(j+1)} = \sum_k g(k-2n)x_k^{(j)}. \quad (7)$$

从上述分解过程中得到的信号近似和细节部分可以提取被分析信号的各种性质, 如近似部分反映的是信号的长周期、趋势部分, 而细节部分反映的是信号中包含的较短周期(高频)和较长周期性质, 而且不同的尺度对应不同的频率区间, 利用统计折叠周期分析法对不同尺度下的细节或近似部分进行处理, 就可以提取原始信号中的各种周期信号.

3 计算结果和讨论

3.1 实验数据

为了研究 1—10 TeV 能区宇宙线的周期变化, 我们选取羊八井宇宙线观测站 Tibet AS γ 阵列二期和二期高密阵列 1998 年 4—6 月观测记录的宇宙线流强实验数据. 这个时期的实验设备及其运行情况 and 阵列性能在文献[10]和[11]中已给出了详细介绍, 我们利用的是二期(观测的宇宙线能量为 10 TeV)和高密度阵列(观测的宇宙线能量为 TeV)每 20 min 的宇宙线事例记录率, 这些记录率代表观测到 1—10 TeV 能区的宇宙线流强的大小. 这些数据

中包含着某些周期变化. 传统上对周期信号的分析, 有效且应用最广泛的是傅里叶分析. 通过对上述数据进行傅里叶分析发现, 此很难确定数据中的周期信号, 如 0.5 和 1 d 周期. 另外, 折叠周期分析方法^[12]对从数据中提取单一的周期信号比较有效, 而对上述观测实验数据中的多周期, 特别是其中一个周期是另一个周期的整数倍时, 这种方法失效. 总之, 单一的傅里叶分析或折叠周期分析方法不适合用来提取上述流强数据的周期信号.

3.2 小波分解和周期分析

下面根据小波分析的特点, 利用小波变换对实验数据在不同的周期区间进行分解, 再利用折叠周期分析法对分解结果进行周期提取.

对上述阵列记录的宇宙线事例率进行小波分解, 图 1 所示为 1998 年 6 月二期阵列数据的分解结果. 其中(a—c)是数据中的高频噪声部分, (d—f)是数据中包含的较长周期信号结果, 这些是我们感兴趣的信号. 从图中可以看出, (d)中主要是周期为半日的信号, (f)中是一日信号, 因此为了将有意义的周期信号提取出来, 我们可以分别对第 4 层

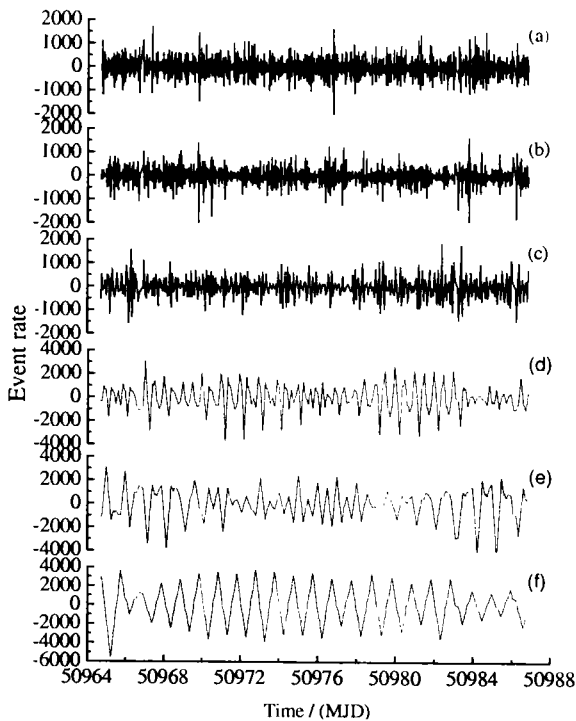


图 1 1998 年 6 月二期阵列记录的宇宙线事例率的小波分解结果

MJD(约简儒略日)表示时间; (a), (b), (c), (d), (e)和 (f) 分别对应尺度 $j=1, 2, 3, 4, 5, 6$.

(图 1(d))和第 6 层(图 1(f))的分解结果进行折叠周期分析. 折叠周期分析方法见文献^[12].

对 1998 年 4—6 月的二期阵列数据分解第 4 层和第 6 层细节部分进行折叠周期分析, 结果示于图 2 和图 3 中. 根据图 2(a)所示的周期图 $\eta(T)$ 的分布, 发现记录的事例率有 0.5 d 周期变化, 这种周期变化的信噪比为 10.9; 图 2(b)给出这种 0.5 d 周期变化的幅度约为 0.4 %, 最大变化处的相位约为 0.9(时间 11 h). 图 3 表明实验数据中有 1 d 周期变化, 信噪比为 6.6, 变化幅度约为 0.7 %, 最大变化处的相位约为 0.8(18 h). 这些是 10 TeV 宇宙线流强的周期分析结果.

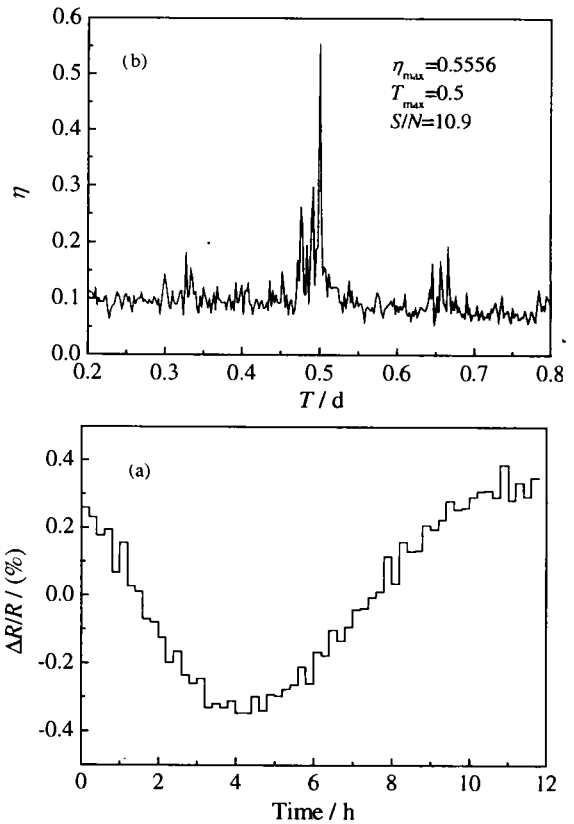


图 2 1998 年 4—6 月二期阵列记录的宇宙线事例率小波分解第 4 层的周期分析结果
(a)周期图, (b) $T=0.5$ d 事例率变化的相位分布.

再对 1998 年 4—6 月的二期高密度阵列 TeV 宇宙线流强数据分解第 4 层和第 6 层细节部分进行折叠周期分析, 发现二期高密度阵列记录的事例率也有 0.5 d 周期变化, 这种周期变化的信噪比为 10.3 变化幅度约为 0.3 %, 最大变化处的相位约为 0.9(11h). 实验数据中同样包含 1d 周期变化, 其

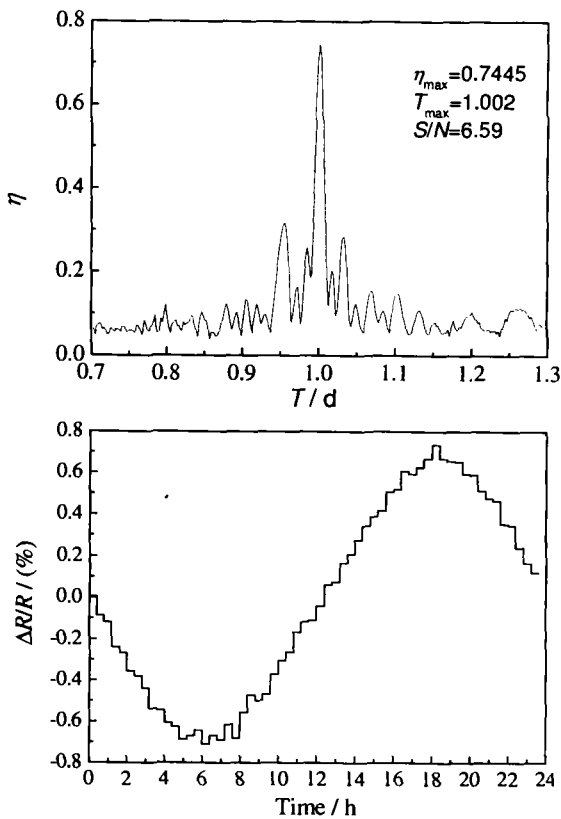


图 3 1998 年 4—6 月二期阵列记录的宇宙线事例率小波分解第 6 层的周期分析结果

(a) 周期图, (b) $T=1.0$ d 事例率变化的相位分布。

参 考 文 献:

- [1] Nagashima K, Mori S. Galactic and Heliotail-in Anisotropies of Cosmic Rays as the Origin of Sidereal Daily Variation in the Energy Region $<10^4$ GeV[A]. Proc of the Int Cosmic Ray Sym on High Energy Cosmic Ray Modulation[C]. Tokyo, 1976, 326.
- [2] Fichtel C E, Linsley J. High-energy and Ultra-high-energy Cosmic Rays[J]. Astrophys J, 1986, 300: 474.
- [3] Amenomori M, Cao Z, Ding L K, et al. Search for Steady Emission of 10 TeV Gamma Ray from the Crab Nebula, Cyg X-3 and Her X-1 Using the Tibet Air Shower Array[J]. Phys Rev Lett, 1992, 69: 2 468.
- [4] Amenomori M, Cao Z, Dai B Z, et al. The Cosmic-ray Energy Spectrum between $10^{14.5}$ and $10^{16.3}$ eV Covering the "Knee" Region[J]. Astrophys J, 1996, 461: 408.
- [5] Amenomori M, Ayabe S, Cao P Y, et al. Detection of Multi-TeV Gamma Rays from Markarian 501 during an Unforeseen Flaring State in 1997 with the Tibet Air Shower Array[J]. Astrophys J, 2000, 532: 302.
- [6] Amenomori M, Ayabe S, Cui S W, et al. Observation of Multi-TeV Diffuse Gamma Rays from the Galactic Plane with the Tibet Air Shower Array[J]. Astrophys J, 2002, 580: 887.
- [7] 杨福生. 小波变换的工程分析与应用[M]. 北京: 科学出版社, 1999, 6.
- [8] Otazu X, Ribo M, Peracaula M. Detection of Superimposed Periodic Signals Using Wavelets [Z]. arXiv: astro-ph/0202107.
- [9] Lewis M J, Freese K. A Wavelet Analysis of Solar Climate Forcing: I) Solar Cycle Timescales [Z]. arXiv: astro-ph/0203497.
- [10] Amenomori M, Ayabe S, Cao P Y, et al. Observation of Multi-TeV Gamma Rays from the Crab Nebula Using the Tibet Air Shower Array[J]. Astrophys J, 1999, 525: L93.
- [11] 徐贤武, 丁林垠, 曹培圆等. Tibet II/HD 阵列寻找来自蟹状星云的 TeV γ 射线[J]. 高能物理与核物理, 2000, 24: 473.
- [12] 贾焕玉, 王顺金. 10 TeV 宇宙线时间变化研究[J]. 高能物理与核物理, 2001, 25: 277.
- [13] Nagashima K, Fujimoto K, Sakakibara S, et al. Galactic Cos-

信噪比为 6.3, 变化幅度约为 0.5%, 最大变化处的相位约为 0.8(18 h)。

4 结 论

利用小波分析和折叠周期分析相结合的方法, 对 1998 年 4—6 月羊八井宇宙线观测站 Tibet AS γ 二期和二期高密度阵列记录的宇宙线事例率随时间的变化进行了分析计算, 发现 TeV 和 10 TeV 宇宙线数据中存在 0.5 和 1 d 周期变化, 其信噪比分别达到 10 和 6, 并分析得到了这些周期变化的相位分布。周期变化相位分布结果与 10 TeV—PeV EAS 的实验结果相同^[13]。

由于实验记录的是宇宙线在大气层形成的 EAS 次级粒子, 其中大气的结构变化会引起宇宙线事例率的变化, 这就是气象效应。上述实验数据中的周期变化可能是由气象效应引起的。除此之外, 地球的自身运动、太阳对宇宙线的调制、银河宇宙线流强变化都可能是上述周期变化的原因, 这还有待进一步分析研究。

致谢 感谢所有参与西藏宇宙线观测实验的中外合作者。

mic-ray Anisotropy and Its Modulation in the Heliomagneto-
sphere, Inferred from Air Shower Observation at Mt. Noriku-

ra[J]. *Il Nuovo Cimento*, 1989, **12**: 695.

Detection of Superimposed Periodic Variation of 1—10 TeV Cosmic Ray Using Wavelets

LIU Jun, JIA Huan-yu, HUANG Qing

(College of Science, Southwest Jiaotong University, Chengdu 610031, China)

Abstract: We use the technique of wavelet analysis and epoch folding methods to search for the superimposed periodic signals of 1—10 TeV cosmic ray in the data obtained with Tibet II/HD AS Array for April to June of 1998. Solar time semi-diurnal and diurnal variations have been detected with about signal-noise ratio 10 and 6 for the 1 TeV and 10 TeV cosmic ray flux respectively. The semi-diurnal variations are of an amplitude 0.3%, a phase 0.9 for 1 TeV cosmic ray and 0.4%, 0.9 for 10 TeV. The diurnal variations are of amplitude 0.5%, 0.7%, and phase 0.8 for 1 TeV and 10 TeV cosmic ray respectively.

Key words: cosmic ray; periodic variation; wavelet analysis