

# 羊八井 460 GHz 大气不透明度的测量\*

周明峰<sup>1,2†</sup> 姚骑均<sup>1</sup> 李 升<sup>1</sup> 罗志全<sup>2</sup> 杨 戟<sup>1</sup>

(1 中国科学院紫金山天文台 南京 210008)

(2 西华师范大学物理电子与信息学院 南充 637000)

**摘要** 为了解羊八井观测站的亚毫米波观测条件,使用移动式亚毫米波望远镜 (Portable Submillimeter Telescope, POST) 测量了羊八井观测站 460 GHz 波段天顶方向大气不透明度. 观测结果表明,羊八井观测站的 460 GHz 波段天顶方向大气不透明度的四分位数为 1.25、1.42、1.63,观测时间段内大气不透明度  $\tau_0 \leq 1.0$  的时间比例约占 3.4%. 将此次观测结果与国际现有优秀亚毫米波台址比较,分析了影响亚毫米波不透明度的可能原因.

**关键词** 地球, 行星与卫星: 大气, 不透明度, 亚毫米波, 选址

**中图分类号:** P 112; **文献标识码:** A

## 1 引言

亚毫米波射电天文观测在现代天文学发展中起着重要的作用. 影响星际介质冷却的重要谱线辐射如 CI 谱线、CO、CS 等分子高能级跃迁谱线以及冷尘埃 (温度约为 10 K) 的连续谱峰值均落在亚毫米波段,使得亚毫米波观测在研究恒星和原始行星系统的形成、星系的形成和演化、活动星系核等各类天体的观测研究中都有重要作用<sup>[1-2]</sup>. 但是在亚毫米波段地球大气只有一些特定的窗口是部分透明的,并且其不透明度强烈依赖于地球大气中的可降水汽含量 (PWV). 因此与毫米波天文台相比,亚毫米波天文台选址对大气中的 PWV 测量有非常严格的要求, PWV 小而稳定是衡量亚毫米波天文台观测条件的一个重要指标. 目前世界上优秀的亚毫米波台址主要分布在智利的 Atacama 高原、夏威夷的 Mauna Kea 山等地. 此外,人们对日本的富士山、南极的 South Pole 和 Dome C 等也做过一定的亚毫米波天文台址参数测量和观测<sup>[3-8]</sup>,而国内亚毫米波台址的测量和选定工作相对缺乏.

我们对德令哈观测站曾开展过 492 GHz 亚毫米波段大气不透明度的测量<sup>[9-11]</sup>,其余地区只有间接的气象资料以及有限的毫米波段观测结果. 通过对德令哈观测站的实测数据和气象资料的分析,人们推测在青藏高原地区可能存在优秀的亚毫米波台址,其中羊八井地区是既存的宇宙线观测站,可以提供良好的观测支撑.

羊八井位于西藏拉萨市西北,北纬 30.05°,东经 90.30°,海拔高度为 4 205 m,年平均气温 1.7°C,最高温度 26.5°C,最低温度 -32.5°C,年平均风速 2.4 m/s. 根据羊八井观测站

2010-04-09 收到原稿, 2010-05-14 收到修改稿

\* 国家自然科学基金项目 (10303003) 资助

† mingfengzhou@163.com

2005 年 12 月、2006 年 2~3 月间的气象资料推测, 该时段  $PWV \leq 1.0$  的比率占到同时段总时间的 32% 左右<sup>[12]</sup>. 文献 [12] 推测这个数值要优于德令哈在 2000 年 12 月、2001 年 2~3 月得到的  $PWV \leq 1.0$  占比时间为 20% 的结果. 为确切了解该台址的亚毫米波观测条件, 在本工作中我们对该地进行了 460 GHz 波段大气不透明度的测量.

## 2 观测

### 2.1 观测设备

本观测使用了由中国科学院紫金山天文台与日本国立天文台共同研制的 POST<sup>[12-13]</sup>. POST 天线采用双反射离轴式卡塞格林结构, 主反射面有效口径 30 cm, 加工精度 7.3  $\mu\text{m}$ , 波束宽度为  $8.5'$  (工作频率 492 GHz). 接收机采用了 0.5 THz 频段 NbN/AlN/NbN 隧道结的超导 SIS (Superconductor-Insulator-Superconductor) 接收机, 由一台小型闭环氦致冷机提供超导致冷工作环境, 接收机噪声温度约为 150 K<sup>[14]</sup>. 望远镜控制和数据采集由一台 PXI (PCI Extensions for Instrumentation) 总线计算机完成. 此外, 我们集成了一套 9 要素气象参数 (包括温度、气压、相对湿度、风速、风向、辐照等) 的环境参数采集系统, 与望远镜协同工作. 温度、气压的定标精度分别为 0.2  $^{\circ}\text{C}$  和 0.3 mbar, 相对湿度的测量精度为 1%.

POST 于 2008 年 10 月移设羊八井观测站. 该望远镜被安装在一个户外集装箱顶部, 观测时向北天方向扫描. 本测量将接收机频率调谐在 460 GHz 处. 混频后的中频信号中心频率位于 1.4 GHz, 带宽为 600 MHz. 设备控制、观测数据和环境参数采集由一台 PXI 总线工业控制计算机自动完成.

### 2.2 观测和数据概述

羊八井亚毫米波不透明度测量在 2008 年 11~12 月进行, 共用时 14 d, 合计 257 h, 获得 2 084 组有效数据. 测量采用 Sky-dip 扫描方式, 望远镜沿俯仰方向扫描. 扫描过程选取了 14 个角度做数据采样, 俯仰角依次为  $87^{\circ}$ 、 $75^{\circ}$ 、 $67.5^{\circ}$ 、 $60^{\circ}$ 、 $50^{\circ}$ 、 $45^{\circ}$ 、 $40^{\circ}$ 、 $35^{\circ}$ 、 $30^{\circ}$ 、 $26^{\circ}$ 、 $22^{\circ}$ 、 $18^{\circ}$ 、 $14^{\circ}$ 、 $10^{\circ}$ , 每个采样点的积分时间为 1 s, 一组数据采集时间约 2 min, 一组数据采集完成后天线俯仰角回到初始位置, 整个过程周期约为 6.5 min. 观测的同时, 通过环境监测设备记录望远镜周围的大气温度  $T_{\text{atm}}$  (单位为 K)、大气压强  $P$  (单位为 mbar)、地表相对湿度  $RH(\%)$  等环境参数. 本文中温度与压强的单位分别为 K 和 mbar.

每组数据包括第 1 次黑体定标电压输出、14 组俯仰位置的大气辐射数据 (电压)、第 2 次黑体定标电压输出、环境温度、大气压强、地表相对湿度, 以及该组数据所对应时刻等. 同时, 计算并记录包含大气贡献的系统温度  $T_{\text{sys}}$ 、接收机噪声温度  $T_{\text{rx}}$ 、增益  $G$  (单位为  $\text{V}\cdot\text{K}^{-1}$ ) 等参数.

## 3 数据处理

对得到的 460 GHz 大气不透明度的观测数据, 用典型的大气辐射转移方程<sup>[15]</sup> 拟合

大气天顶方向的不透明度. 大气辐射转移方程为

$$T_A(z) = T_{rx} + T_{atm}\eta(1 - e^{\tau_0 \sec(z)}) + T_{amb}(1 - \eta), \quad (1)$$

其中  $z$  为天顶角 (入射光线与天顶方向的夹角),  $T_A(z)$  为指向  $z$  方向的天线温度,  $T_{amb}$  为环境温度,  $\eta$ 、 $\tau_0$  和  $\sec(z)$  分别为天线前向效率、天顶方向大气不透明度和大气质量. 对于小口径天线, 重力形变可以忽略, 同时因为镜面加工精度高, 所以取  $\eta \approx 1$ . 在用常温黑体校准时可以假设  $T_{atm} = T_{amb}$ , Hirota 等<sup>[7]</sup> 推算若两者温度相差 10 K 则误差在 10% 以内, 并且结合公式

$$T_{abs} = T_{rx} + T_{amb}, \quad (2)$$

$T_{abs}$  是总输出温度, 所以最终得到拟合公式为

$$T_A(z) = T_{abs} - T_{atm}e^{-\tau_0 \sec(z)}. \quad (3)$$

由 (3) 式运用 Gauss-Newton 法进行非线性最小二乘拟合. 图 1 是两不同时刻大气不透明度拟合情况, 其中横坐标是天顶角的正割值, 纵坐标为接收机输出电压 (单位为 V). 本文中电压单位统一为 V.

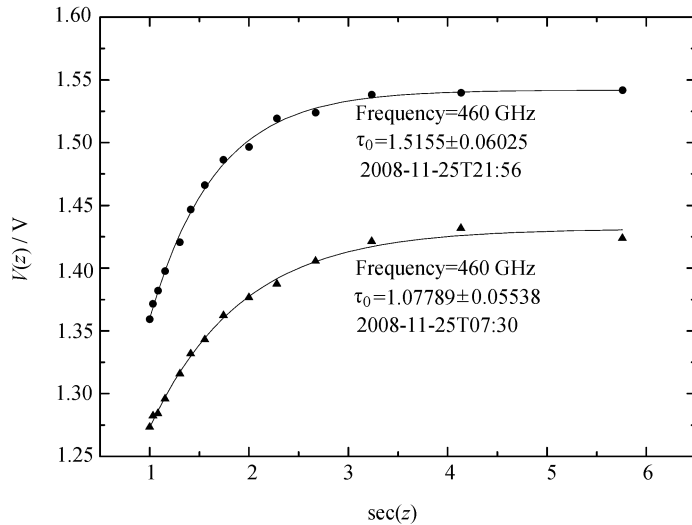


图 1 两不同时刻大气不透明度拟合曲线情况

Fig. 1 The fitting results of zenith atmospheric opacities at different times

需要指出, 在  $\tau_0$  较小时,  $T_A(z)$  与  $\sec(z)$  近似呈线性关系, 而  $\tau_0$  较大时,  $T_A(z)$  变化过快, 所以就系统灵敏度而言,  $\tau_0$  范围为  $0.01 < \tau_0 < 10$ .

在拟合出所有的  $\tau_0$  值及获得拟合误差后通过以下几个步骤重整数据, 剔除掉不可用的  $\tau_0$  数据:

(1) 初步整合 Sky-dip 中记录的接收机温度和增益, 剔除一部分接收机系统噪声温度明显过大或者过小的数据;

(2) 重新整理接收机系统噪声温度和增益, 求出接收机噪声温度和增益的标准偏差, 以  $3\sigma$  为判据对数据进行进一步筛选;

(3) 记录筛选掉的数据对应的时间, 剔除该时间所对应的  $\tau_0$  值.

图 2 是原始数据经过上述步骤筛选后接收机系统噪声温度和增益的分布情况, 以此作为  $\tau_0$  值是否可用的主要筛选依据. 这里  $T_{rx, Mean} = 240.73 \text{ K}$ ,  $\sigma_{T_{rx}} = 104.04 \text{ K}$ ,  $G_{Mean} = 2.99 \times 10^{-3} \text{ V} \cdot \text{K}^{-1}$ ,  $\sigma_G = 6.29 \times 10^{-4} \text{ V} \cdot \text{K}^{-1}$ .

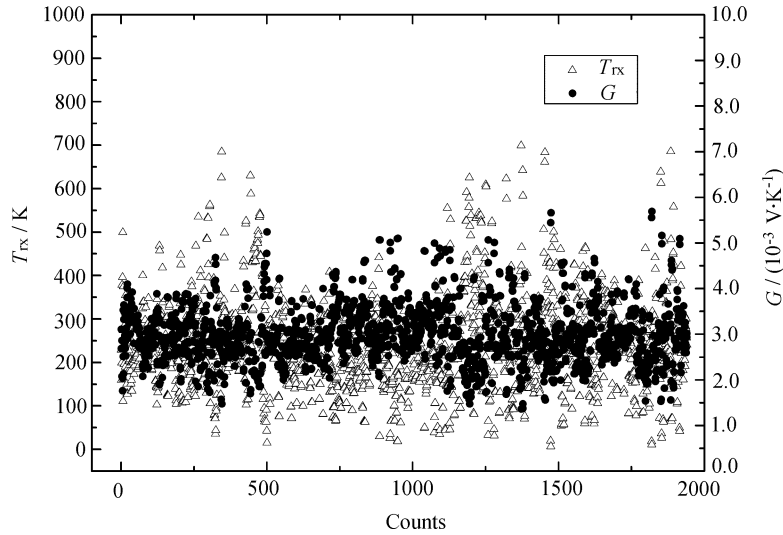


图 2 接收机温度 ( $T_{rx}$ ) 和增益 ( $G$ ) 的分布图

Fig. 2 Distributions of receiver temperature and gain

## 4 结果

此次观测共记录 2 248 组原始数据, 其中因接收机系统噪声温度或增益偏差较大剔除数据 164 组, 最后获得有效数据 2 084 组, 总数据有效率为 92.7%.

对天顶方向大气不透明度按时间分布作图, 得到图 3. 该图显示,  $\tau_0$  分布为 0.5~3.0, 均值为 1.46.

进一步定量考察  $\tau_0$  分布, 我们随后又统计了  $\tau_0$  在 0.5~3.0 间的具体分布情况, 用柱状图表示, 得到图 4. 图 4 显示  $\tau_0$  值大部分分布在 1.0~2.0 之间 (占 91.0%).

再看大气不透明度与绝对湿度  $\rho_w$  (单位  $\text{g} \cdot \text{cm}^{-3}$ ) 的相关关系. 由测量到的温度  $T$  和相对湿度  $RH$ , 根据饱和水汽压  $P_{vs}$  与  $T$  的经验公式<sup>[16]</sup>

$$P_{vs} = 6.105 \times \left(\frac{273}{T}\right)^{5.31} e^{25.22(T-273)/T}, \quad (4)$$

结合相对湿度定义

$$RH = \frac{P_v}{P_{vs}}, \quad (5)$$

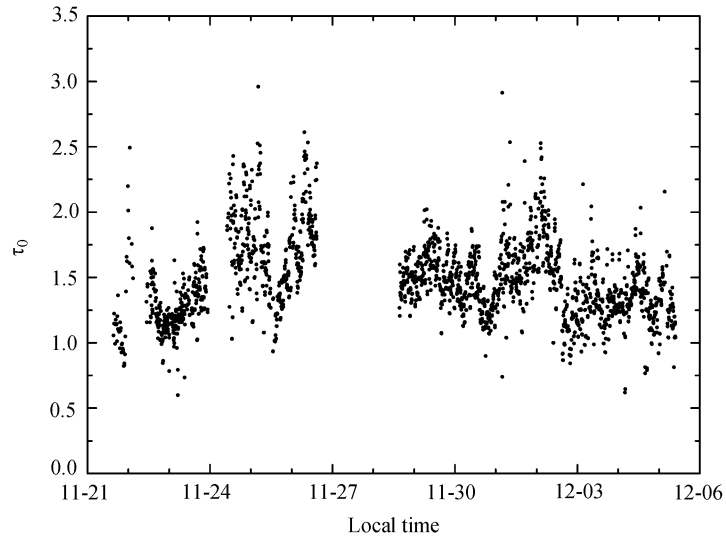


图 3 羊八井地区 2008 年 11 月 21 日到 12 月 6 日 460 GHz 天顶方向大气不透明度随时间分布图  
 Fig.3 Variation of zenith opacity at 460 GHz at Yangbajin station with time from 2008 November 21 to  
 2008 December 6

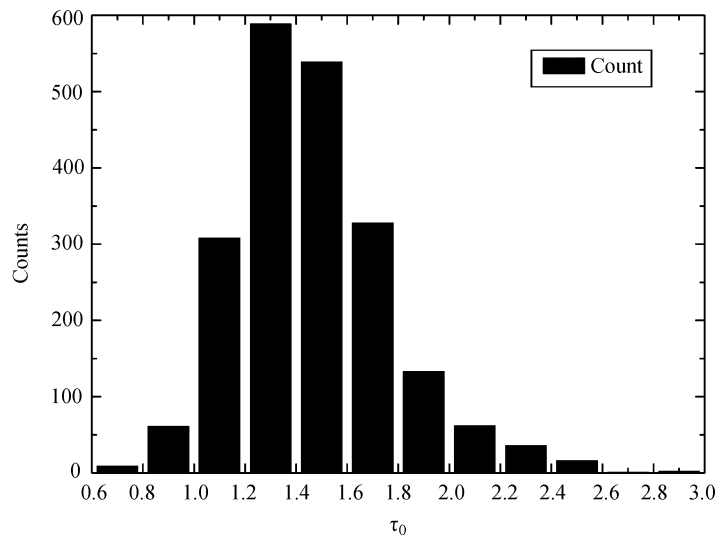


图 4 天顶方向大气不透明度分布情况柱状图  
 Fig.4 Histogram of zenith atmospheric opacity

以及  $\rho_\omega$  与湿分压  $P_v$  满足的理想气体状态方程

$$\rho_\omega = 2.17 \times 10^{-4} \frac{P_v}{T}, \quad (6)$$

可以计算出地表附近绝对湿度. 根据推算结果, 我们作绝对湿度与不透明度相关图, 如图 5. 图 5 显示绝对湿度与不透明度呈现一定的相关性.

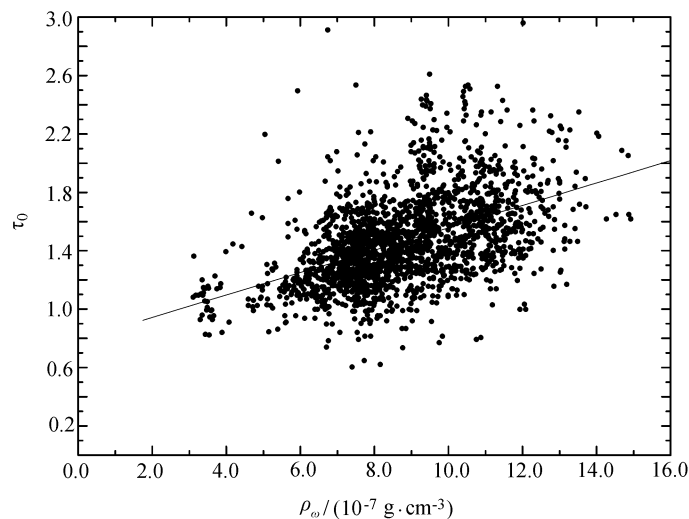


图 5 大气不透明度与绝对湿度关系图

Fig. 5 Relation between zenith opacity and absolute humidity

随后我们统计了大气不透明度、相对湿度、绝对湿度和环境温度的周日分布, 考察大气不透明度周日的变化规律以及和温度、湿度的关系, 见图 6. 图 6 显示温度和相对湿度呈明显的反比相关趋势, 并且两者分别在 8:30 和 15:45 前后达到极值.

比较  $\tau_0$  统计平均值与  $\rho_\omega$  统计平均值的周日分布情况. 图 6 中显示两者呈一定的相关趋势.  $\tau_0$  统计平均值的分布表现为午后 16:00 前后最小, 而凌晨和上午均比较大. 我们认为这可能是由于该地区河流汇聚使得大气水汽含量较高, 并且地区为盆地地形, 在午后温度较高时空气强对流作用使得水汽扩散严重, 水汽层等效厚度减小, 从而  $\rho_\omega$  和  $\tau_0$  值均减小. 然后我们对观测时间段内所有拟合的天顶方向  $\tau_0$  作不透明度累计分布图, 得到图 7. 图 7 表明, 大气 460 GHz 亚毫米波  $\tau_0$  值 3.4% 的时间分布在 1.0 以下, 同时其四分位数为 1.25、1.42 和 1.63.

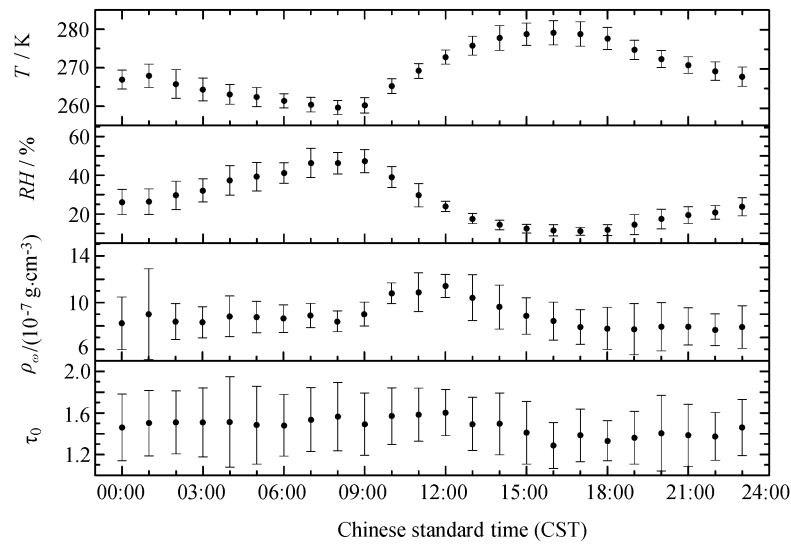


图 6 大气不透明度、绝对湿度、相对湿度和温度周日分布

Fig. 6 Diurnal distributions of zenith atmospheric opacity, absolute humidity, relative humidity and temperature

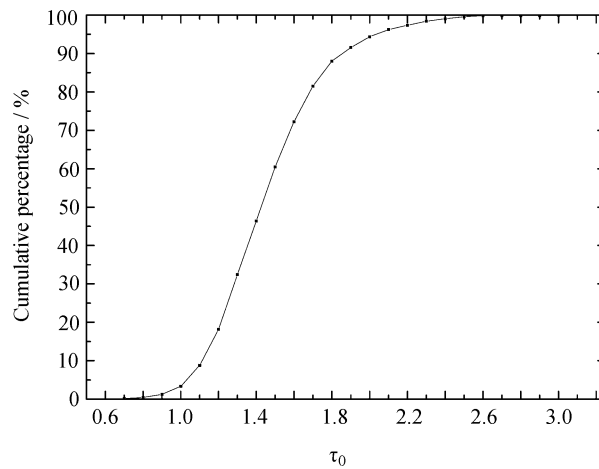


图 7 2008 年 11~12 月观测时间段内不透明度累计分布图

Fig. 7 Cumulative percentage distribution of zenith opacity from November 2008 to December 2008

## 5 分析讨论

### 5.1 误差分析

#### 5.1.1 绝对湿度误差

由(4)~(6)式, 结合误差传导公式, 绝对湿度计算传导误差为

$$\sigma_{\rho_{\omega}} = \sqrt{\left(\frac{\partial \rho_{\omega}}{\partial T}\right)^2 \sigma_T^2 + \left(\frac{\partial \rho_{\omega}}{\partial RH}\right)^2 \sigma_{RH}^2},$$

结果为  $\sigma_{\rho_{\omega}} = 1.4 \times 10^{-6} \text{ g} \cdot \text{cm}^{-3}$ , 这里的  $\sigma_T$  和  $\sigma_{RH}(\%)$  为来自仪器的误差.

#### 5.1.2 不透明度 $\tau_0$ 误差

在拟合  $\tau_0$  时我们采用了拟合公式  $V_A = V_{\text{abs}} - V_{\text{atm}} \exp(-\tau_0 \sec(z))$ , 其中  $V_A$  为大气辐射的入射信号转化为电压输出,  $V_{\text{abs}}$  为天线指向黑体时的电压总输出,  $V_{\text{atm}}$  为大气温度的电压输出, 假设与常温黑体相同. 此拟合公式的获得我们先后作了如下近似:

(1) 大气平面平行层结构近似. 大气质量  $M(z)$  表示为

$$M(z) = -0.0045 + 1.00627 \sec(z) - 0.002234 \sec^2(z) + \dots$$

因  $\sec(z)$  取足够小, 这里我们取  $\sec(z) = M(z)$ . 此种近似带来的误差在  $\sec(z) \leq 6$  情况下不超过 0.5%.

(2) 天线效率  $\eta \approx 1$ .

(3) 假设  $V_{\text{atm}} = V_{\text{amb}}$ , 即大气温度和校准用黑体温度相同.

在忽略以上 3 个假设所带来的误差后, 我们对拟合公式进行非线性最小二乘拟合, 拟合误差详细数值均在拟合数据中给出.

### 5.2 台址分析比较

我们尝试比较羊八井与国际主要亚毫米波台址的不透明度情况, 其结果可以作为考察羊八井亚毫米波观测质量条件的参考依据.

表 1 列出了各个台址相应波段的大气不透明度的四分位数. 同时在表 2 中给出了各个台址的海拔、年平均气温、风速和大气压强情况<sup>[3,17-19]</sup>. 比较表 1 中 South Pole、Atacama、Mauna Kea、德令哈、羊八井台址, 虽然观测月份和频率有所不同, 但因选取各自观测条件较好的月份以及频率接近, 所以仍具一定可比性.

比较结果, South Pole 的亚毫米波大气不透明度四分位数值在以上 5 个台址中最小, Atacama、Mauna Kea、羊八井、德令哈亚毫米波大气不透明度逐个增加.

结合表 1~2 我们发现, 优质的亚毫米波台址一般具有海拔高, 气温、风速、大气压强均较低等特点. 根据 Holdaway 等<sup>[20]</sup>1996 年的研究, 低平均风速会降低测量时因风速影响带来的误差, 从而提高数据可用率. 而较低的温度和压强使得大气饱和和水汽压低, 从而影响大气不透明度.

表 1 各站点不透明度的比较

Table 1 Comparison of zenith opacity for various stations

Quartile of zenith opacity (%)	South Pole 1995 (492 GHz)	Atacama 1995~2000 (492 GHz)	Mauna Kea 1989~1991 (492 GHz)	Delingha 1999~2001 (492 GHz)	Yangbajin 2008 (460 GHz)
25	0.55	0.52	0.84	1.67	1.25
50	0.70	1.02	1.32	2.17	1.42
75	0.81	2.10	2.52	2.67	1.63

表 2 各站点海拔、年平均温度、风速和平均大气压强比较

Table 2 Comparison of elevation, annual average temperature, wind speed and average atmospheric pressure for various stations

Item	South Pole	Atacama	Mauna Kea	Delingha	Yangbajin
Elevation(m)	2836	5050	4080	3200	4205
Average temperature( $^{\circ}$ C)	-49.0	17.3	3.4	3.8	1.7
Median wind speed(m/s)	3.6	6.0	4.5	1.5	2.4
Average atmospheric pressure(hpa)	682	550	650	702	596

下面分析德令哈、Mauna Kea、Atacama 等台址的海拔高度与大气亚毫米波不透明度小于 1.0 的时间占比之间的关系. 图 8 显示, Mauna Kea、Atacama 以及德令哈台址的大气亚毫米波不透明度小于 1.0 的时间占比与海拔高度呈较好的线性关系, 而羊八井台址明显偏离图中直线, 处于直线的右下方. 羊八井观测站海拔高度为 4 205 m, 大气亚毫米波不透明度小于 1.0 的时间占比为 3.4% 左右, 相对于上述台址羊八井海拔较高而不透明度偏大. 当然, 需要指出的是, 此次测量的时间跨度还很有限, 不能排除结果受到统计起伏影响的可能性.

我们认为, 影响羊八井大气亚毫米波透过率的原因可能与羊八井的地理环境有关系. 羊八井台址所处地区呈局部的盆地地形, 是河谷汇聚地, 其北部为雪山和纳木措湖, 此外羊八井地热资源丰富, 这些因素都在一定程度上增加了局部大气中的水汽含量, 使得羊八井明显偏离上述台址的海拔高度与时间占比规律. 另外需要提到的是, 观测时间段的气温约在 256 ~ 285 K 范围, 与同期德令哈台址相比, 大气温度较高, 在同样的相对湿度指标下, 大气绝对湿度也相应偏高.

通过对各亚毫米波台址的比较及定性分析, 我们认为海拔高度、本地温度、湿度以及局部地理形态等因素影响着一个台址局部大气绝对水汽含量的多寡, 从而决定局部大气亚毫米波的不透明度. 因此, 在选择亚毫米波台址时, 需要综合考虑以上要素. 从我国西部大范围来看, 存在很多海拔高、平均气温低、局部隆起(突起)的地形区域. 因此, 有可能存在优良的亚毫米波台址. 根据卫星提供的大气 PWV 分布资料, 可以从大范围内搜寻、提供候选台址, 并利用小型望远镜在现场进行实测确认.

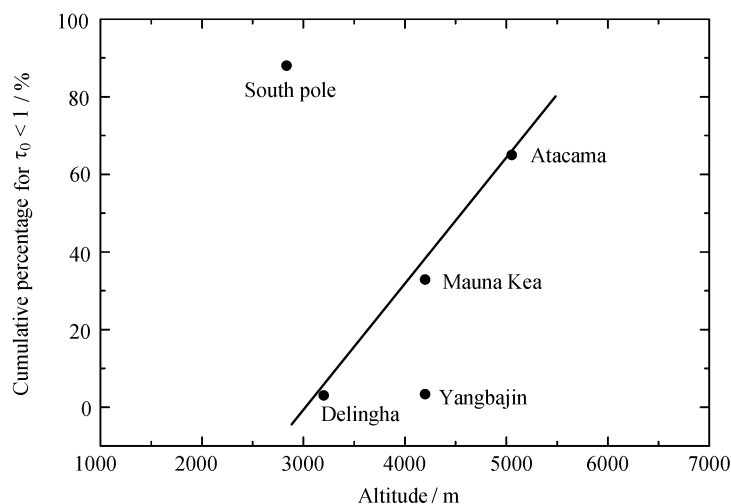


图 8 各台址海拔高度与大气亚毫米波不透明度小于 1.0 的时间占比关系图

Fig. 8 Relation between the height above sea level and the time proportion of submillimeter atmospheric opacity less than 1.0 for various stations

## 6 结论

通过测量羊八井观测站 460 GHz 天顶方向大气不透明度, 得到以下结论: 在观测时间段羊八井台址 460 GHz 大气天顶方向不透明度的四分位数为 1.25、1.42、1.63, 天顶方向不透明度小于 1.0 的时间占比为 3.4% 左右. 分析比较羊八井、德令哈以及国际上主要的亚毫米波台址参数后我们认为, 影响亚毫米波大气不透明度的主要原因有海拔高度、温度、湿度以及地理形态等. 在选择亚毫米波台址时, 需要综合考虑上述各个因素. 数据和分析显示, 羊八井台址亚毫米波不透明度偏大的可能原因是该台址呈盆地地形, 地处河流交叉处同时受到地热等水汽源的影响, 空气中水汽含量较高. 从满足亚毫米波台址基本条件的角度看, 在我国广阔的青藏高原有可能存在优秀的亚毫米波台址.

**致谢** 在接收机系统改进、望远镜现场安装和运行等过程中得到紫金山天文台毫米波与亚毫米波技术实验室和青海观测站、高能物理研究所羊八井宇宙线观测站等方面的大力协助. 数据获取得到黄庆根、许健、张吉龙等同志的大力帮助, 在此表示由衷的感谢.

## 参 考 文 献

- [1] Wilson T L. arXiv:0903.0562
- [2] Robson I. ExA, 2009, 26: 65
- [3] Calisse P G, Ashley M C B, Burton M G, et al. PASA, 2004, 21: 256
- [4] Chamberlin R A, Lane A P, Stark A A. ApJ, 1997, 476: 428

- [5] Parod J R, Serabyn E, Cernicharo J. JQSRT, 2001, 68: 419
- [6] Gusten R, Nyman L A, Schilke P, et al. A&A, 2006, 454: L13
- [7] Hirota T, Yamamoto S, Sekimoto Y, et al. PASJ, 1998, 50: 155
- [8] Sekimoto Y, Yoshida H, Hirota T, et al. IJIMW, 1996, 17: 1263
- [9] 杨戟, 孙成华, 黄树频, 等. 天文学报, 2004, 45: 79
- [10] Yang J, Sun C H, Huang S P, et al. ChA&A, 2004, 28: 367
- [11] 杨戟, 曹逸庭, 黄树频. 天文学报, 1998, 39: 332
- [12] 黄树频. 500 GHz 小型低功耗超导 SIS 接收机系统的研制. 紫金山天文台, 2006
- [13] 程景全. 天文望远镜原理和设计. 第 1 版. 北京: 中国科学技术出版社, 2003: 260-281
- [14] Li J, Takeda M, Wang Z, et al. ApPhL, 2008, 92: 222504
- [15] Kutner M L, Ulich B L. ApJ, 1981, 250: 341
- [16] Crane R K. Astrophysics. Part B: Radio Telescopes, 1976: 186
- [17] Valenziano L, dall'Oglio G. PASA, 1999, 16: 167
- [18] Ho Paul T P, Moran James M, Lo K Y, et al. A&A, 2004, 616: L1
- [19] Lane A P. Astrophysics from Antarctica. ASP Conference Series, 1998, 141: 289
- [20] Holdaway M A, Foster S M, Emerson D, et al. MMA Memo, 1996, 159

## Measurement of 460 GHz Atmospheric Opacity at Yangbajin Observing Station

ZHOU Ming-feng<sup>1,2</sup> YAO Qi-jun<sup>1</sup> LI Sheng<sup>1</sup> LUO Zhi-quan<sup>2</sup> YANG Ji<sup>1</sup>

(1 Purple Mountain Observatory, Chinese Academy of Sciences, Nanjing 210008)

(2 School of Physics and Electronic Information, China West Normal University, Nanchong 637000)

**ABSTRACT** To assess the observational condition of Yangbajin, the Portable Submillimeter Telescope (POST) is used to measure the atmospheric opacity at 460 GHz from November 2008 to December 2008. The result shows that the quartile of atmospheric opacity during the observing time at 460 GHz at Yangbajin Observatory is 1.25, 1.42 and 1.63 and the time proportion of atmospheric opacity less than 1 is about 3.4%. At last, we compare the submillimeter site conditions of Yangbajin with those of other submillimeter observatories in the world, and try to explore the possible causes that may influence the submillimeter atmospheric opacity.

**Key words** earth, planets and satellites: atmospheres, opacity, submillimeter, site testing