

CMB 的最主要的特征是具有黑体辐射谱，在 0.3-75cm (100GHz-0.4GHz) 厘米波段，可以在地面上直接观测到；在大于 100 厘米 (小于 0.4GHz) 的射电波段，银河系本身的超高频辐射掩盖了来自河外空间的辐射 (见图 1)，因而不能直接观测到；在小于 0.3 厘米 (大于 100GHz) 波段，由于地球大气辐射的干扰 (见图 2，猜测因为大气对小于 0.3cm 的波段不透明度太高)，要依靠气球、火箭或卫星等空间探测手段才能测到。

图 1. 宇宙噪声

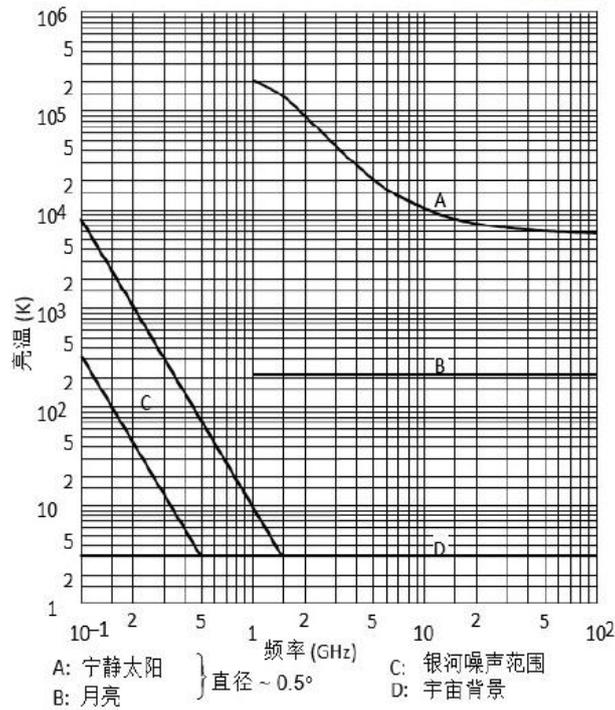
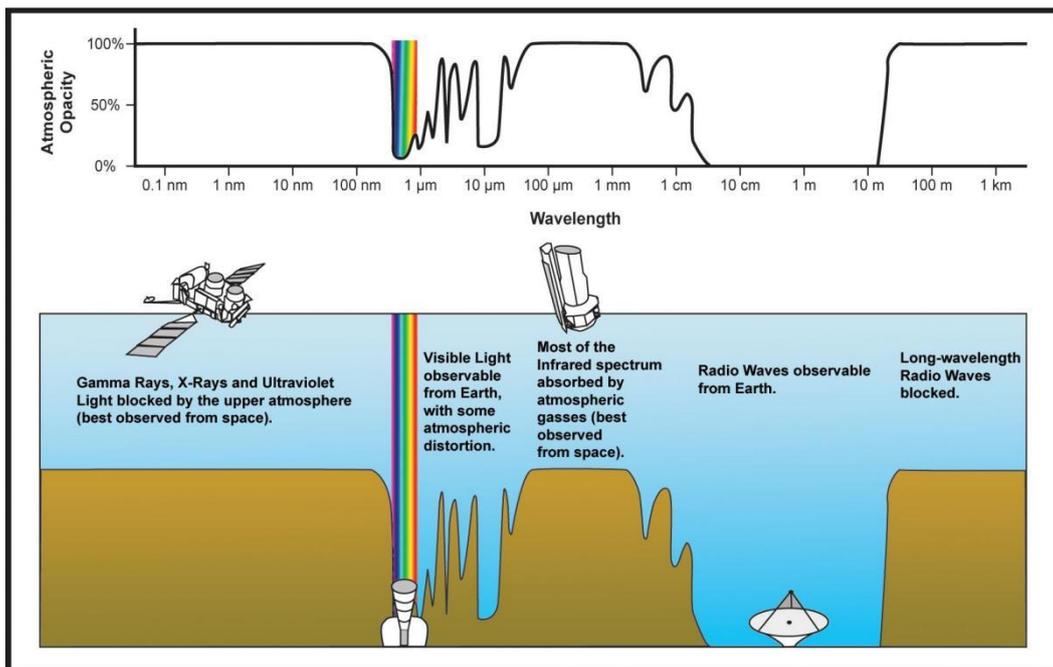


图 2. 地球大气窗口



由于我们的天线分析仪只能工作在 2GHz 以下，而 CMB 在 0.3-75cm (100GHz—0.4GHz) 厘米波段，可以在地面上直接观测到，所以要在 0.4GHz 到 2GHz 寻找一个发射干扰较少的频段。根据《2018 中华人民共和国无线电频率划分规定》(如图 3)，我认为 1.420GHz (21cm) 左右比较合适。(贝尔实验室在波长 7.35cm (4GHz) 观测到 CMB)

图 3. 2018 中国无线电频率划分规定 (截图)

1 400—1 427	卫星地球探测 (无源)
	射电天文
	空间研究 (无源)
5.340	5.341

中国内地	
1 427—1 429	空间操作 (地对空)
	固定
	移动 (航空移动除外)
	[无线电定位]
5.338A	5.341

天线对向空白天空时，感受到的温度主要是大气热辐射温度 T_{sky} 、地表辐射温度 T_{gro} 、系统本身温度 T_{sys} 、宇宙微波背景温度 T_{cmb} ，其中 T_{cmb} 即为我们所求温度。

我们所要做的工作仅分两步：

- 1、使地表辐射远离天线反射面，以阻止它们到达反射面焦点处的 LNB。
- 2、接收器适当地进行流量定标

一、隔离地表辐射

可以通过做一个与抛物面天线口径相同的纸制圆筒（圆筒长度大概 1.5m 左右，没有上下底面），圆筒内外表面都贴满（锡箔）铝箔，然后把这个圆筒套在抛物面式的天线上，如图 4

图 4. 用圆筒套住的抛物式天线



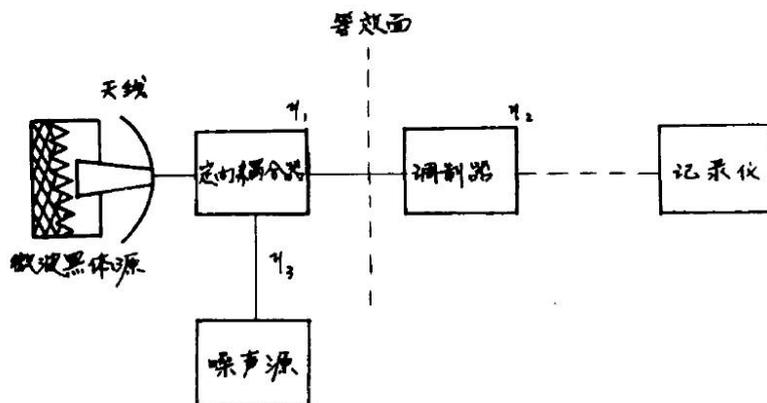
圆筒外表面的锡箔用来反射地表辐射，使之不能到达圆筒内天线反射面，从而消除了地表辐射温度 T_{gro} ；圆筒内表面的锡箔起了波导作用，当对向空白天空时，大气热辐射可以通过内部锡箔的反射，“弹来弹去”，弹到天线反射面上去。

二、流量定标

通过第一步消除地表辐射温度 T_{gro} 之后，天线能感受到温度仅剩大气热辐射温度 T_{sky} 、系统本身温度 T_{sys} 、宇宙微波背景温度 T_{cmb} 。

流量定标，即所谓的天线温度定标。我建议采用口面温度定标，即用二种不同的温度黑体辐射交替地复盖馈源喇叭口面（如图 5），进行温度定标。

图 5. 天线口面温度定标示意图



当用处理后的天线指向空白天空进行观测时（在 1.420GHz 进行），射电辐射计（我不清楚这个器件）的输出电平为（天线输出电平对物体温度响应为线性关系）

$$\Delta P = P_{sky} + P_{sys} = B (T_{sky} + T_{sys}) \quad (1)$$

其中 P_{sky} 、 T_{sky} 为空白天空热辐射对应的电平和温度， P_{sys} 、 T_{sys} 为系统噪声对应的电平和温度， B 为比例系数。

常用的口面温度定标源有室温黑体标准源（微波黑体处于室温下，简称 T_o 黑体源）和液氮沸点温度黑体标准源（微波黑体浸渍在液氮中，简称 T_n 黑体源）二种。

当用 T_o 黑体源和 T_n 黑体源交替地复盖喇叭口面时，辐射计的输出电平为：

$$\Delta P_n = P_n - P_o = B (T_n + T_{sys} - T_o - T_{sys}) = B (T_n - T_o)$$

$$P_n = T_n + T_{sys}$$

$$P_o = T_o + T_{sys} \quad (2)$$

式中 P_n 和 P_o 分别为 T_n 黑体源和 T_o 黑体源复盖喇叭口面时的辐射计输出电平， T_n 和 T_o 为相应源的辐射温度。

由（1）和（2）式比较得

$$T_{sky} + T_{sys} = \Delta P / B = \Delta P / [\Delta P_n / (T_n - T_o)] \quad (3)$$

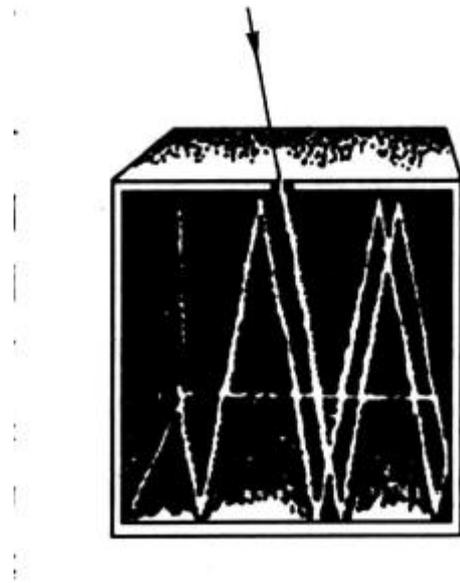
由此可见，我们定标所求实为比例系数 B 。

然而液氮和微波黑体源的价格有些贵，我们根据现实情况，应该采取更为经济的方案，而且我们所用定标物体应该能近似视为黑体。

黑体定义：若一物体对什么光都吸收而无反射，我们就称这种物体为“绝对黑体”，简称“黑体”。事实上当然不存在“绝对黑体”，不过有些物体可以近似地视作“黑体”来处理，如图 6 所示。一束光一旦从狭缝射入空腔后，就很难

再通过狭缝反射出来，这个空腔的开头就可以被看作是黑体。

图 6. 绝对黑体的模拟



我们日常所用的较厚的毛巾或者浴巾由于上面密布着许多透气小孔，用水浸渍后，一束电磁波从湿毛巾的透气小孔进入，水会吸收掉大部分电磁波（我猜测水对 1.420GHz 左右的电磁波应该有较好的吸收），所以电磁波便很难再从湿毛巾中出来。根据黑体的定义可知，该湿毛巾可以视为黑体。而我打算就用湿毛巾（黑体）来给天线温度进行定标，所用公式如上（1）、（2）、（3）式。

把锡纸圆筒包围的抛物面天线面向天空，然后把四根木棍钉在地上，把锡纸圆筒给围起来，然后在四根木棍顶端放上一大块正方形塑料板（猜测塑料应该对电磁波基本上没有吸收作用吧），把圆筒上方完全遮盖，如图 7。

图 7. 塑料板下的望远镜



在正方形塑料板上放两层较大的湿毛巾，湿毛巾中间夹有用来加热用的金属箔式加热器，用以改变湿毛巾（黑体）的温度，同时含有一个电子测温计，用以了解湿毛巾的温度。之后再在湿毛巾上盖上几层薄木板，用以隔热，加快湿毛巾的加热过程，减缓湿毛巾的散热过程。如此我们便能够通过改变湿毛巾这个黑体的温度来给天线温度进行定标了，从而得到式（3）中的比例系数 B。

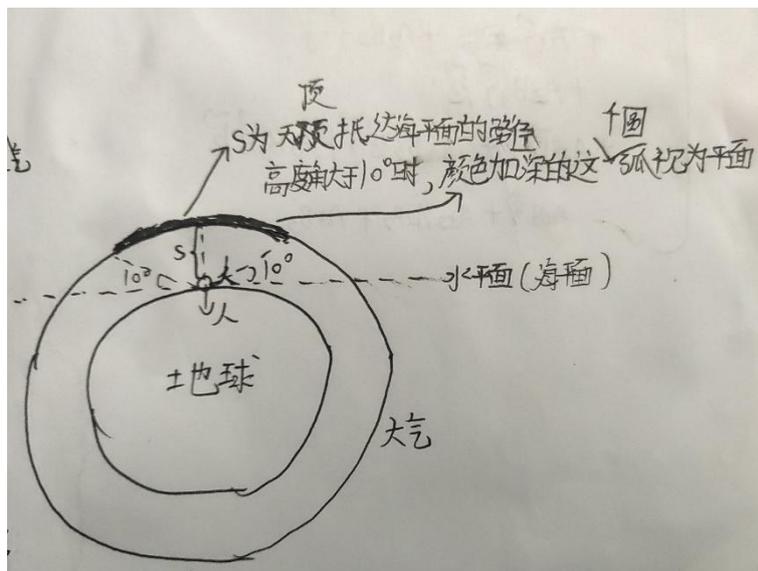
三、数据分析

我们需要确定天空热辐射温度 T_{sky} 和高度角 ϵ 的关系

引入“Air Mass 空气质量”这个定义，即天体的光穿过大气层的路径长度，通常以相对于天顶抵达海平面的路径做比较的“相对空气质量”来表示。

简陋的大气模型如下图 8， S_0 表示天顶抵达海平面的路径，当高度角 ϵ 大于 10° 时，颜色加深的那个圆弧可以视为一条直线，即此时的大气层可以视为平面。

图 8. 简陋大气模型图



令相对空气质量用 A 表示，天体的光穿过大气层的路径长度用 S 表示，天顶抵达海平面的路径用 S_0 表示，则其与高度角 ϵ 的关系：

$$A = S/S_0 = (S_0/\sin \epsilon) / S_0 = 1/\sin \epsilon \quad (10^\circ < \epsilon < 90^\circ) \quad (4)$$

设大气的平均温度为 T ，对于 1.420GHz 左右的电磁波，大气可视为光学薄 ($\tau \ll 1$)，即天空中的大气热辐射温度 T_{sky} 表示如下（推导过程见于《射电天文工具》公式（1.36））

$$T_{sky} = \tau T \quad (5)$$

猜想大气的吸收系数 k 为常数，则光学厚度 $\tau = k * S$ ，其中 S 为天体的光穿过大气层的路径长度，从而

$$T_{sky} = \tau T = (k \cdot S) \cdot T$$

结合式 (4)，得

$$T_{sky} = k \cdot (A \cdot S_0) \cdot T = (k \cdot S_0 \cdot T) \cdot A$$

令高度角 $\epsilon = 90^\circ$ ，则 $A = 1/\sin \epsilon = 1$ ，故天线对向天顶时，感受到的大气热辐射温度 T_{zenith} 为

$$T_{zenith} = (k \cdot S_0 \cdot T) \cdot 1 = (k \cdot S_0 \cdot T)$$

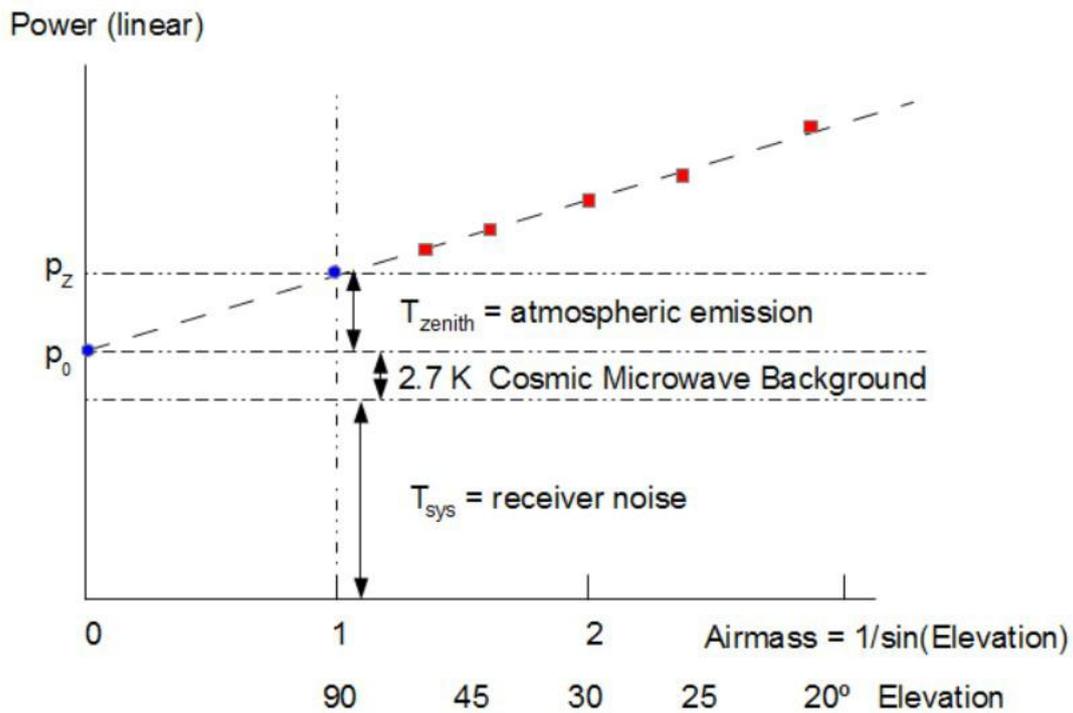
故式 (5) 可表示为

$$T_{sky} = (k \cdot S_0 \cdot T) \cdot A = T_{zenith} \cdot A \quad (6)$$

此式即为大气热辐射温度 T_{sky} 和高度角 ϵ 的关系式

系统本身温度 T_{sys} 、宇宙微波背景温度 T_{cmb} ，都不依赖于高度角 ϵ 。因此，在几个高度角进行的测量，可以用（线性）“接收器输出电平 P ”和“相对空气质量 A ”之间的直线来建模（如图 9）。

图 9. “接收器输出电平 P ”、“相对空气质量 A ”关系图



用直线拟合测量值，得到斜率 m 和截距 P_0 。因此 P_0 是相对空气质量 A 为 0 时的输出电平，即没有地球大气热辐射时的输出电平。

$$P(\epsilon) = P_0 + m \cdot A \quad (7)$$

如图 9 所示，红点为实测量，蓝点为推测量， P_z 是天顶的推测值 ($A=1$)。同时由图 9 容易看出：在不同高度角 ϵ 接收器的输出电平 $P(\epsilon)$ 正比于天线所感

受到的温度总和，即：

$$P(\epsilon) = B[T_{\text{sys}} + T_{\text{cmb}} + T_{\text{sky}}(\epsilon)]$$

$$P(A) = B[T_{\text{sys}} + T_{\text{cmb}} + T_{\text{sky}}(A)]$$

结合式(6)，得

$$P(A) = B[T_{\text{sys}} + T_{\text{cmb}} + T_{\text{zenith}} * A] \quad (8)$$

其中B为由(2)式定标得到的比例系数。

让式(8)和式(7)进行比较得

$$m * A = B * T_{\text{zenith}} * A$$

$$T_{\text{zenith}} = m / B$$

由式(1)(2)(3)式得

$$\text{定标冷黑体温度: } P_n = B(T_n + T_{\text{sys}}) \quad (9)$$

$$\text{定标热黑体温度: } P_o = B(T_o + T_{\text{sys}}) \quad (10)$$

$$\text{比例系数: } B = (P_n - P_o) / (T_n - T_o) \quad (11)$$

由(10)(11)式知

$$\text{系统噪声温度 } T_{\text{sys}} = P_o / B - T_o = P_o / [(P_n - P_o) / (T_n - T_o)] - T_o \quad (12)$$

用(8)式减去(10)式，得

$$P(A) - P_o = B[T_{\text{cmb}} + T_{\text{zenith}} * A - T_o]$$

$$T_{\text{cmb}} = [P(A) - P_o] / B - T_{\text{zenith}} * A + T_o \quad (13)$$

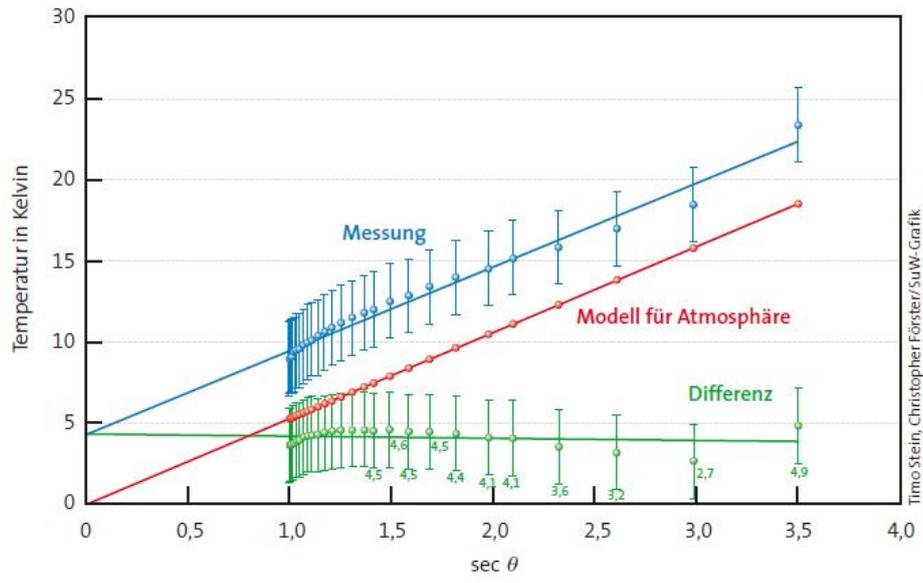
由(13)式知，宇宙微波背景温度 T_{cmb} 能在每一个高度角估算出来，特别是在 $A=0$ 和 $A=1$ 处：

$$A=0 \text{ 时, } T_{\text{cmb}} = [P(A) - P_o] / B + T_o$$

$$A=1 \text{ 时, } T_{\text{cmb}} = [P(A) - P_o] / B - T_{\text{zenith}} + T_o \quad (14)$$

最后只需把测量以及计算所得数据用曲线表示出来(如下图10)，其中蓝线代表大气热辐射 T_{sky} 与宇宙微波背景辐射 T_{cmb} 总和(系统噪声由式(12)可得，所以可以去除)，红线代表大气热辐射的温度，即图9中的倾斜虚线。两条线相减即得宇宙微波背景 T_{cmb} 的曲线。

图 10. 数据曲线



Timo Stein, Christopher Förster/SuW-Grafik