如何估算行星的表面溫度

高國鈞

早在太空時代來臨之前，天文學家便已經能利用當時所能獲得的很少的資訊，對太陽系中的行星的表面溫度做估算。以下我們就來看一看當時的天文學家是怎麼做的。

在日常生活中，我們對於溫度的概念多半來自於每天的氣象報告，或是來自於家中的溫度計。但在天文上，我們知道星與星之間的距離近的也有幾個光年之遠。就連我們的鄰居月球，它和地球的平均距離也有大約 38 萬公里之遙。假若我們想要知道月球表面的溫度，我們是否要大費周章地發射太空船登陸月球，放一個溫度計在上面？事實上，我們大可不必這樣做。早在人類進入太空時代之前，天文學家們就已經能利用當時所能得到的很少的資訊，來估計太陽系中行星的表面溫度。現在，就讓我們回到過去，看看早期的天文學家是如何來估算行星的表面溫度。然後，我們再將這些估計值和現代的觀測值做比較，並試著解釋兩者之間的差異。

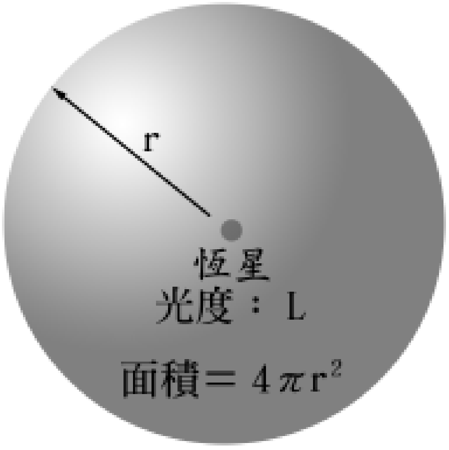
估算行星的表面溫度

我們都知道，太陽是一顆恆星。它利用內部的核融合反應來產生能量，放出光芒。太陽光照射在行星表面上，一部分會被行星吸收，另一部分則被反射回太空中。我們在夜晚看到的行星的光芒，就是行星反射太陽光所造成的。因此我們可以推想，假若一顆行星吸收太陽光的能力比較強，它的表面溫度就會比較高。除此之外，行星的表面溫度還與行星和太陽之間的距離有關。行星距離太陽越近，行星的溫度就越高；反之，行星距離太陽越遠，行星的溫度就越低。有了以上簡單的概念之後，現在我們就來看看早期的天文學家如何估算行星的表面溫度。

我們用 L 代表太陽的光度（$L=3.862\times10^{33}$ 耳格・秒$^{-1}$）（1 耳格 $=10^{-7}$ 焦耳 $=2.39\times10^{-8}$ 卡），亦即其每秒鐘所放射出的能量，則在距離太陽 r 之處的光通量（即單位面積所截獲的能量）F 為

$$F=\frac{L}{4\pi r^2}\quad（耳格・秒^{-1}公分^{-2}）\quad (1)$$

（單位為耳格・秒$^{-1}$公分$^{-2}$）。如果在距離太陽 r 之處有一個半徑為 R 的球型行星，則被這顆行星所截獲的光通量為（假設 R<<r）



$$\pi R^2 F=\pi R^2\frac{L}{4\pi r^2}=\frac{L}{4}\left[\frac{R}{r}\right]^2\ (耳格・秒^{-1})\quad (2)$$

（單位為耳格・秒$^{-1}$）。若這顆行星的反照率(albedo；反射光所佔入射光的比率）為 A，則被行星吸收的能量為

$$P_a=\left[\frac{L}{4}\right]\left[\frac{R}{r}\right]^2(1\text{-}A)\quad (耳格・秒^{-1})\quad (3)$$

（單位為耳格・秒$^{-1}$）。在熱平衡的情況下，我們知道行星將會放出和吸收同樣多的能量。假設這顆行星始終以同一面向著太陽，則行星放出輻射的面積為$2\pi R^2$，即半個行星的表面積。假設行星為理想的輻射體，由史帝芬－波茲曼定律(Stefan-Boltzmann Law；一個理想的輻射體在單位時間單位面積內所放射出的輻射能量正比於溫度的四次方)可知，行星所放射出的輻射能量為

$$P_e=2\pi R^2\sigma T^4\quad (耳格・秒^{-1})\quad (4)$$

（單位為耳格・秒$^{-1}$）。其中σ為史帝芬－波茲曼常數（耳格・秒$^{-1}$公分$^{-2}$度$^{-4}$）。假若這顆行星的自轉比較快，而且行星的自轉軸和公轉軌道面是垂直的，那麼我們可以假設整個行星表面被太陽光均勻地加熱，也就是說，在自轉較快的情形下，行星吸收和放出輻射的面積為$4\pi R^2$，即整個行星表面積。此時，行星放出的輻射能量為

$$P_e=4\pi R^2\sigma T^4\quad (耳格・秒^{-1})\quad (5)$$

（單位為耳格・秒$^{-1}$）。

在實際的計算中，我們把太陽系中的行星簡單地分為兩類：第一類是那些自轉比較慢的行星，例如金星（金星的公轉週期約為 225 天，而自轉週期則長達 243 天）；第二類是自轉比較快的行星，例如地球。我們將分別用（4）和（5）式來描述這兩類行星。因為在熱平衡下，行星在單位時間內放出的能量和吸收的能量是相等的，因此在自轉慢和自轉快的

兩種極限情形下，（3）式要分別等於（4）和（5）式。化簡之後我們就得到行星的表面溫度為

（i）在自轉慢的情形下

$$T_s = \left[\frac{L}{8\pi\sigma}\frac{(1-A)}{r^2}\right]^{1/4} \quad \text{（絕對溫度K）} \qquad (6)$$

（單位為絕對溫度 K），

（ii）在自轉快的情形下

$$T_r = \left[\frac{L}{16\pi\sigma}\frac{(1-A)}{r^2}\right]^{1/4} \quad \text{（絕對溫度K）} \qquad (7)$$

。比較（6）和（7）式可知

$$T_s = 2^{1/4}\, T_r = 1.189 T_r$$

。亦即在距離太陽一樣遠的情形下，自轉慢的行星的表面溫度將比自轉快的要高出將近20％。此外，由（6）和（7）式中，我們可以看到行星的表面溫度和行星的大小（半徑 R）無關。

估計值和觀測值的比較

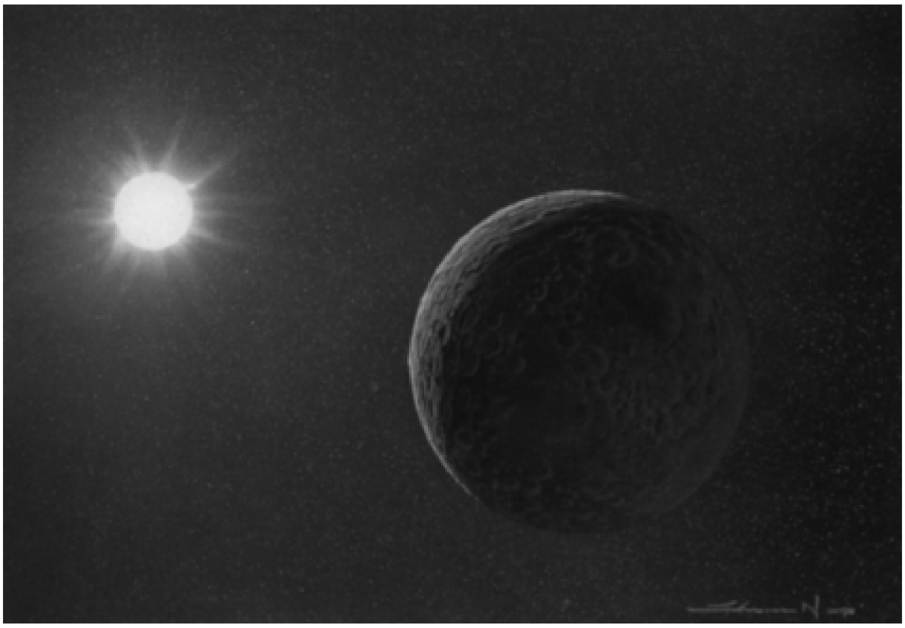
茲將估計的結果和觀測值列在表一中。由表一我們發現，一般說來，觀測值都比估算值高。這主要是因為

（i）太陽並不是行星唯一的熱源。舉例來說，行星內部所含的放射性元

行星	公轉週期（年）	自轉週期（日）	軌道半長軸r（AU）	軌道離心率e	反照率A	估算溫度（K）	觀測溫度（K）
水星	0.24	58.65	0.387	0.206	0.106	517s	700a
金星	0.62	243.01	0.723	0.007	0.65	299s	740a
地球	1.00	1.00	1	0.017	0.367	248r	288
月球			1		0.12	320s	384a
火星	1.88	1.03	1.524	0.093	0.15	216r	210
木星	11.86	0.41	5.203	0.048	0.52	102r	134± 4
土星	29.46	0.44	9.528	0.054	0.47	77r	97± 4
天王星	84.01	0.72	19.18	0.046	0.51	53r	59± 2
海王星	164.80	0.67	30.1	0.006	0.41	44r	57± 2
冥王星	247.71	6.39	39.3	0.246	0.3	40.6r	40 to 60

表一：行星的表面溫度及一些基本數據（取自參考資料1,2,3）。在「估算溫度」欄中出現的s或r分別表示利用（6）或（7）式而得的溫度。在「觀測溫度」欄中出現的a表示此值為觀測所得的最大值。

素（例如鈾元素）在衰變時所放出的能量亦能加熱行星。此外，像木星這樣巨大的行星，仍然保有部分剛形成時所殘餘的熱，因此木星的實測溫度會比估算溫度來得高。



藝術家筆下的太陽與水星

由於水星的軌道離心率很大，因此表面溫度的估計值與實際的觀測結果有相當大的差距。

（ii）多數的行星具有大氣。如果在大氣中含有較多的水蒸氣和二氧化碳（例如金星），那麼由行星表面放出的輻射將有部分會被大氣反射回地面或吸收，使得行星表面再度被加熱。此即所謂的溫室效應。

從表一我們發現，水星的估計值和觀測值有著相當大的差異，估算值比觀測值低了將近200K。部分原因是水星的軌道離心率很大（約為0.2），我們在計算中所用的距離是軌道半長軸（約為0.387AU）（$1AU=1.496\times 10^{13}$公分），而在表一中的觀測值是取最大值，即水星在近日點（約為0.31AU）附近的溫度。由水手十號（Mariner 10）太空船探測水星所得的資料顯示，在水星上，夜晚的時候（也就是在背對太陽的那一面）溫度可以低到只有100K左右！因此我們可知，在水星上，白天和夜晚的溫差可以大到600K！在表一中，觀測值和估計值相差最大的就是金星。這主要是因為金星的大氣中含有許多的二氧化碳，使得金星的表面有著相當強的溫室效應。對火星而言，我們發現觀測值和估計值十分接近。這主要是因為火星沒有厚的大氣層。

從以上的討論和計算中我們知道，早期的天文學家不需要到太空中就可以得到有關行星溫度的訊息。儘管我們在計算中做了許多的簡化與假設，所得到的估算值仍然十分具有參考價值。在天文學的發展過程中，類似這樣先有估計值，等到科技進步之後才得到觀測值的例子比比皆是。由此可知，理論和觀測真是缺一不可！

參考資料：

1.Schlosser,W.,Schmidt-Kaler,T.,andMilone,E.F.1991."ChallengesofAstronomy".(Springer-Verlag New York Inc.)
2.Morrison,D.and Owen,T.1987."The Planetary System".(Addison-Wesley PublishingCompany)

作者：原任職於台北市立天文科學教育館