

星球質量年齡與光譜關係之探討

高中組地球科學科第一名

台南一中

作者：盧鏡臣、趙柏堯

指 唐作銘、黃嘉隆

指導教師：黃芳男、吳永和

一、研究動機

在無垠蒼穹中發亮的星星，有如一顆顆晶瑩的寶石，鑲嵌在深黝的夜空中，自古以來便為人們所感興趣。從小，我們亦對那些閃閃發光的星星充滿了好奇心，常常想要探索其中的奧秘，到了高中一年時，「基礎地球科學」教科書中曾經提到「質量愈大的星球，為了抵抗較大的重力，故熱壓力較大，溫度較高。」；而我們也在國外的雜誌及國內若干書籍中看到「星球年齡愈輕，溫度愈高；年齡愈老，溫度愈低」的記載。因此，引發我們想要進一步探討星球質量、年齡和光譜間相互關係的興趣。

二、研究目的

- 1.設計拍攝星球光譜的方法。
- 2.將拍得的星球光譜加以分類。
- 3.設計電腦程式計算星球的物理性質。
- 4.分析星球質量、年齡和光譜之相互關係。

三、研究器材設備

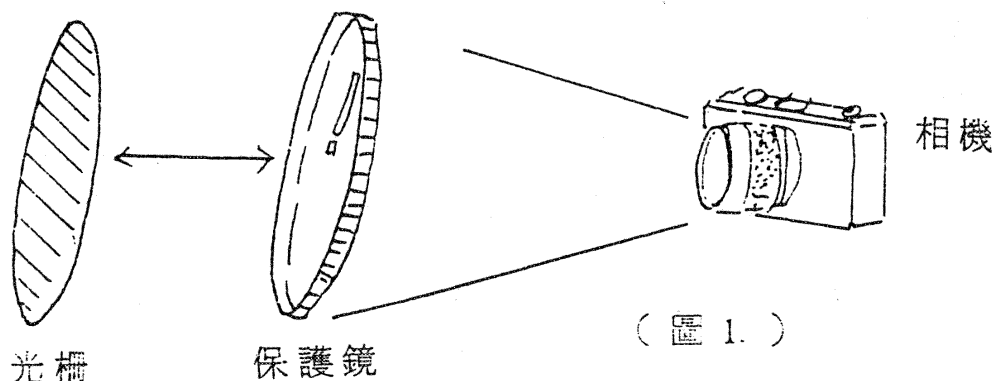
1. Vixen SP - 100 S (鏡筒：牛頓式反射 望遠鏡 $D = 100 \text{ mm}$ $f = 600 \text{ mm}$ 赤道儀：超北極星赤道儀)。
2. 自製分光器 (將三稜鏡置於紙筒內)。
3. 相機、快門線、三腳架等攝影器材。

4. Kodak T-max 400 高感度黑白負片，Fuji ASA 1600 高感度彩色負片，Konica (Sakura) ASA 3200 超高感度彩色負片。
5. 電腦 (16位元) ，列表機。

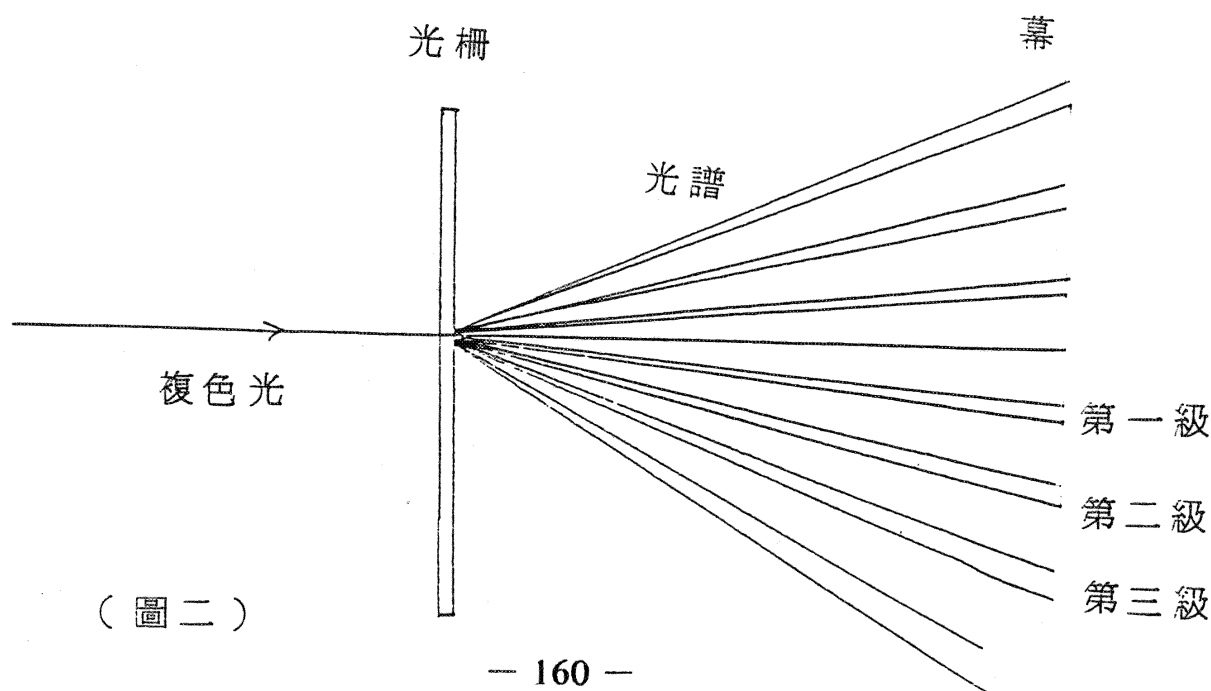
四、研究方法

(一) 利用光柵 (diffraction grating) 拍攝的方法：

將買來的光柵剪成圓形，替代相機保護鏡的鏡片。去拍攝星球光譜 (若拍攝太陽、月亮、星雲等具有“面積”的天體則須製造狹縫) 。結果我們發現此種方法解析力很高，如：拍攝得的太陽光譜影像十分細膩，暗線非常明顯。但是由於材料吸光率偏高，而且光色散後又分成好幾級 (order) ，故實際拍得的光量尚不及原來的 1% ，連月亮光譜曝光了 8 秒，仍感不足，更不必說一般的星星了，所以此法不適用。

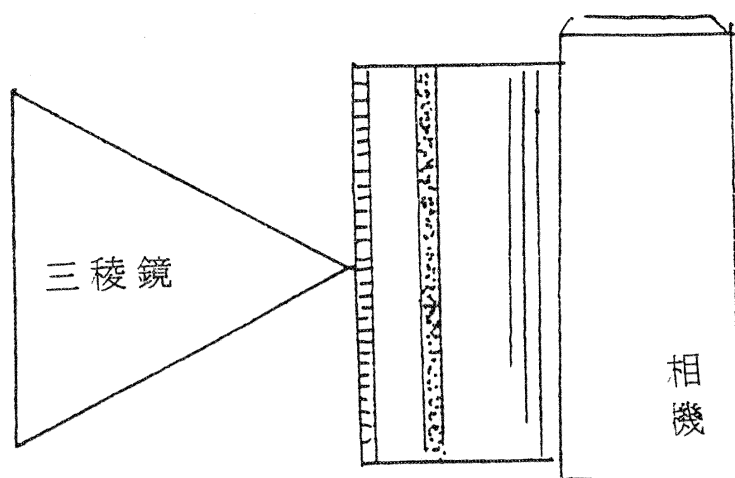


圖一 將保護鏡取下換上光柵



(二)利用三稜鏡拍攝的方法：

把三稜鏡置於相機前即可拍攝星球光譜（圖三）



圖三

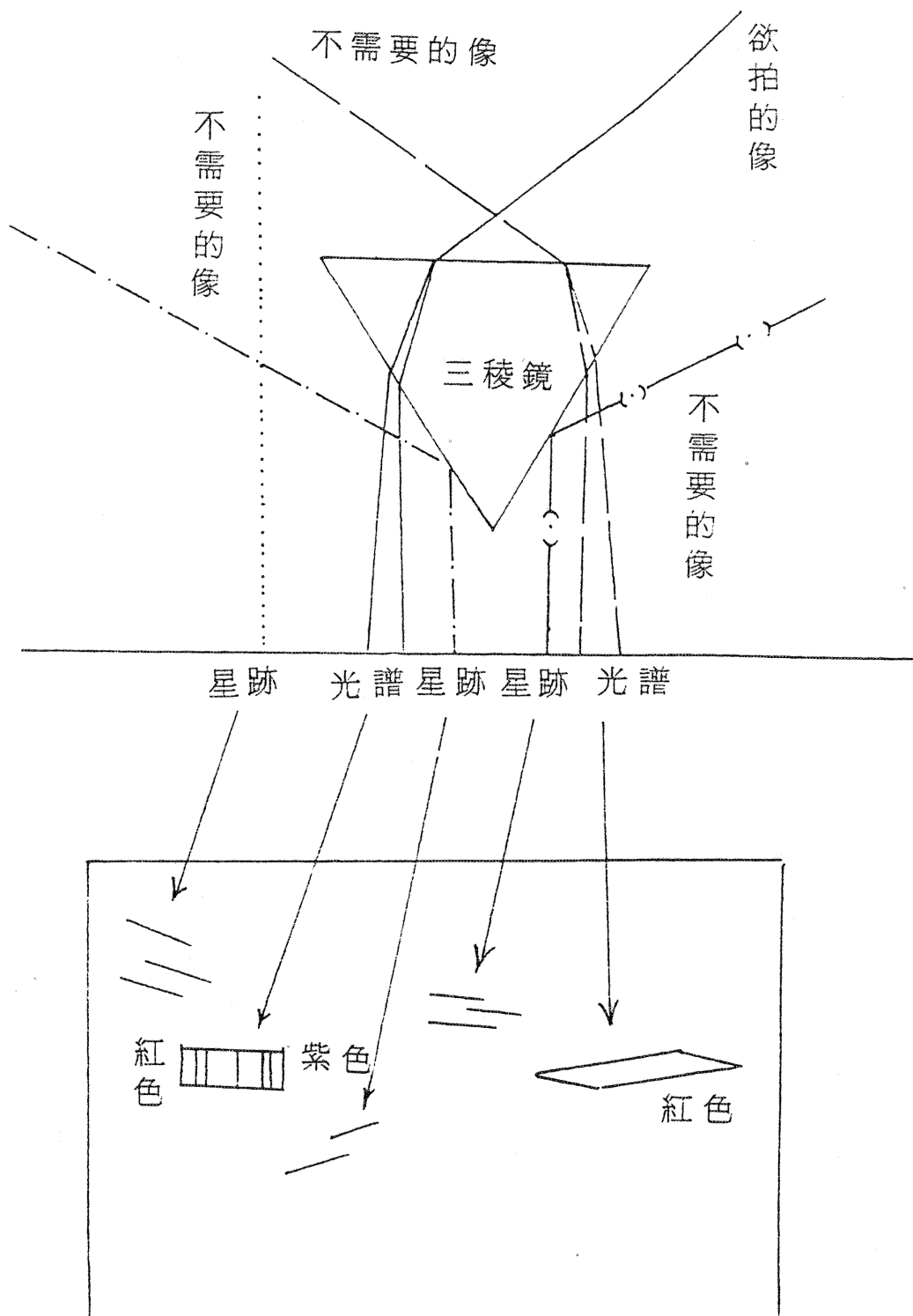
經我們拍攝後，發現三稜鏡雖然解析力不及光柵，但可拍得六等以上星球的光譜，且可將三等以上的星球光譜加以分類，已符合本研究需要，故我們決定以三稜鏡來拍攝星球光譜。然而，因為三稜鏡本身的反射、折射，會出現一些不相干的影像。因此，我們便將三稜鏡置於一紙筒內，僅留所欲獲得的光譜之光線通路，阻隔不相干影像的來源，如此，便可消除干擾的現象。（如圖四、圖五）

(三)利用光譜中吸收線的波長和其到紅色端的距離 P，去推算光譜中其他吸收線之波長所屬的元素，以分類光譜。

1.由於 H 的吸收線在 A₀ 型恒星的光譜中最強（由光譜分類表查得，表 2），而 A₀ 型中又以 H_β、H_γ、H_δ 較明顯。根據物理學研究的理論，H 的巴爾麥（Balmer）吸收線波長可利用公式

$$C/\lambda = 3.289 \times 10^{15} \times \left(\frac{1}{n_i^2} - \frac{1}{n_f^2} \right), \text{ 其中 } n_f = 2, \text{ 所得之 } \lambda$$

（負值）即為吸收譜線的波長，求得 H_α = 6563 Å、H_β = 4861 Å、H_γ = 4340 Å、H_δ = 4102 Å…；我們從光譜中量出 H_β、H_γ、H_δ 吸收線到紅色端的長度 P，代入哈特曼（Hartmann）



圖四

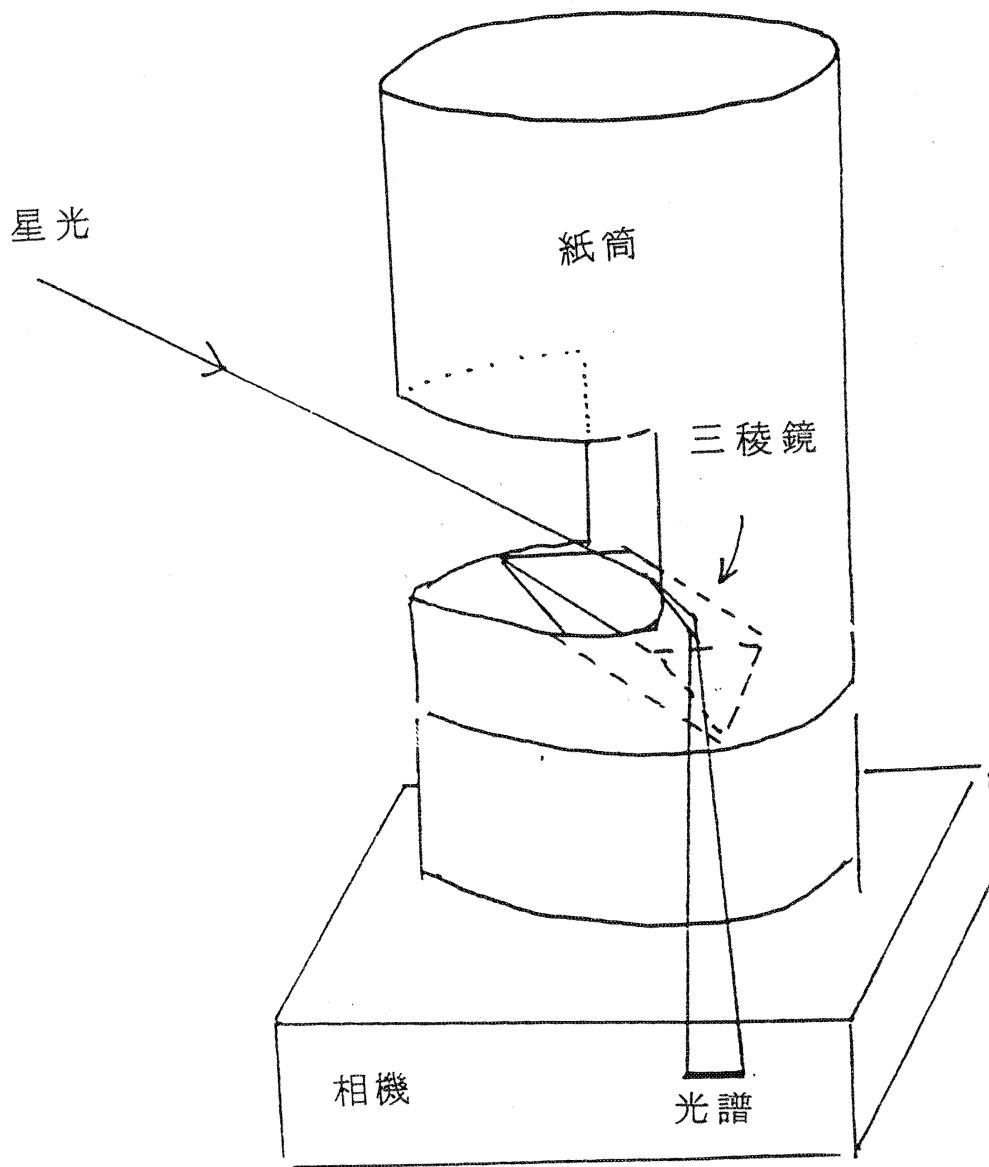


圖 五

公式： $\lambda = a + b / (P - C)$ 後，便可解出 a 、 b 、 c 三個常數。如再將光譜中其他吸收線之 P 量出，代入上式便可求得其波長，再進而判定屬於何種元素之吸收線（表 1）。

故我們先從星表中查知屬於 A_0 型的天狼星、織女星等恒星，再拍攝其光譜，量出 $H\beta$ 、 $H\gamma$ 、 $H\delta$ 之 P ，計算出 a 、 b 、 c 三個常數，並進而計算其他吸收線波長，以判定為何種元素之吸收線。

2. 吸收線所代表的元素種類既已求出，則對照星球光譜分類表（表 2），便可查出星球的光譜類型。

(四) 設計電腦程式計算星球的絕對星等，質量、密度、發光本領等資料：

1. 以往星球的質量除雙星外，無法十分精確地計算出。本世紀初愛丁頓（Eddington A.S.）發現星球的亮度 L 和星球質量（ $Mass$ ）的 3.5 次方成正比。所以我們利用這個性質，只要知道 L ，便可求得質量，若太陽的 L 定為 $1 \odot$ （ \odot 代表太陽），則只要知道其他星球的絕對星等 M ，則星星的 $L = (\sqrt[5]{100})^{(4.8 - M)} \odot$ （因為太陽的絕對星等為 4.8，則絕對星等的差距為 $4.8 - M$ 個星等，又一個星等亮度差為 $\sqrt[5]{100} \div 2.512$ 倍，故 $L = (\sqrt[5]{100})^{(4.8 - M)}$ ，而 M 又可由 $M = m + 5 - 5 \times \log(d/3.26)$ （ m ：視星等 d ：距離）求出；故利用

$$M = m + 5 - 5 \times \log(d/3.26)$$

$$L = (\sqrt[5]{100})^{(4.8 - M)}$$

$$Mass = L^{3.5} \times C \quad (C: \text{常數})$$

三個關係式，後由唐山所譯之「星座」及天文日曆等書查出 Ori ζ 、CMA α 、Cyg α ……等共 241 個樣本的亮度和距離資料，代入上列關係式便可求得星球的質量。

2. 利用 BASIC 語言依上列三個關係式計算星球的物理資料（絕對星等、質量、密度、發光本領的程式）

(五) 分析星球質量、年齡和光譜型的相互關係：

1. 以研究方法(四)所得的星球質量 $Mass$ 之資料作 y 軸，以研究方

法(三)所分析得的光譜 S 當 x 軸，描點繪圖分析星球質量和光譜型的關係 (圖 6)，再將 $Mass$ 取對數 (因 $S - Mass$ 圖形和指數函數圖形類似，故再取對數 \log 看看有何結果)，畫出 $S - \log Mass$ 的圖形，以分析質量和光譜型的關係 (圖 7)。

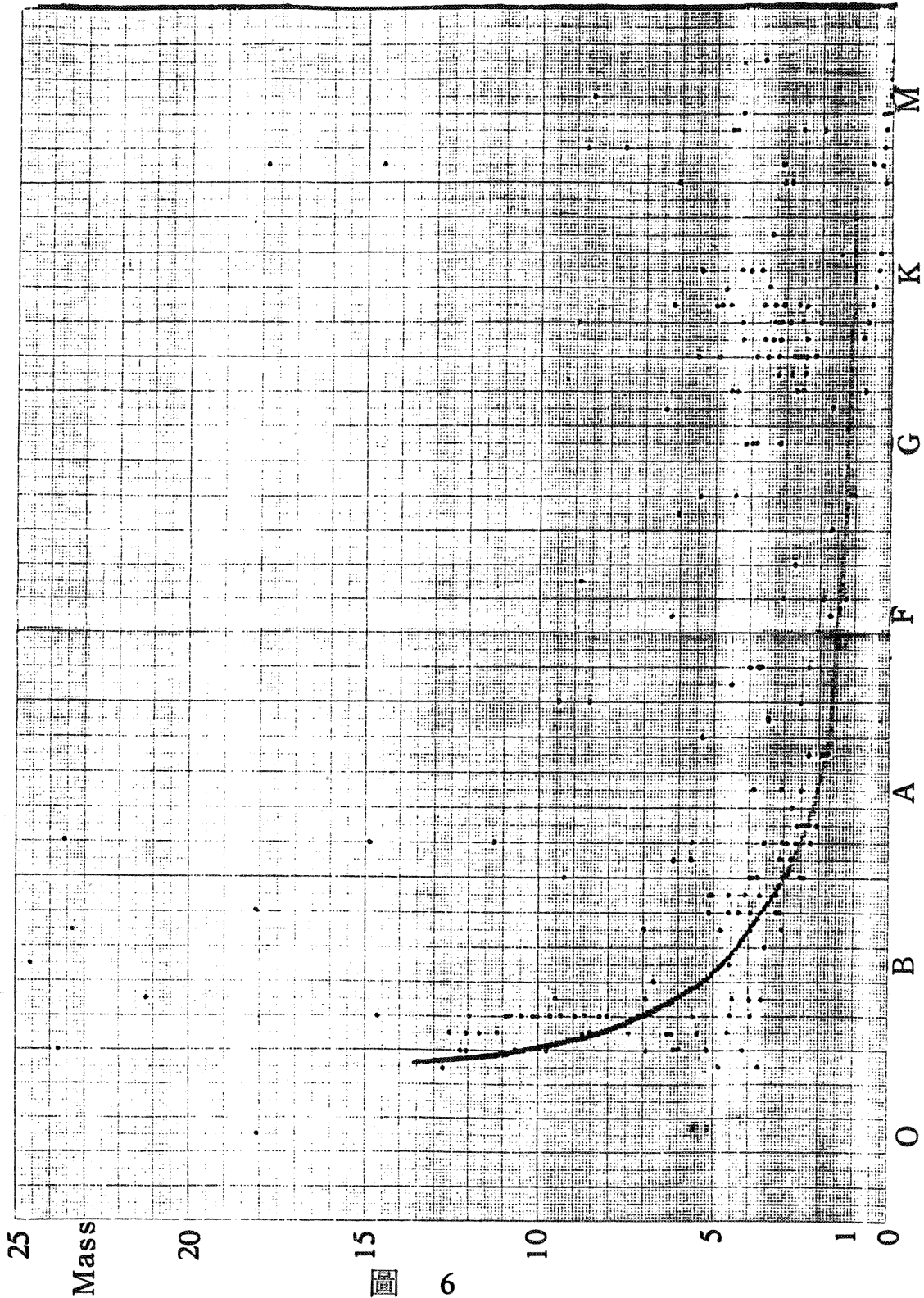
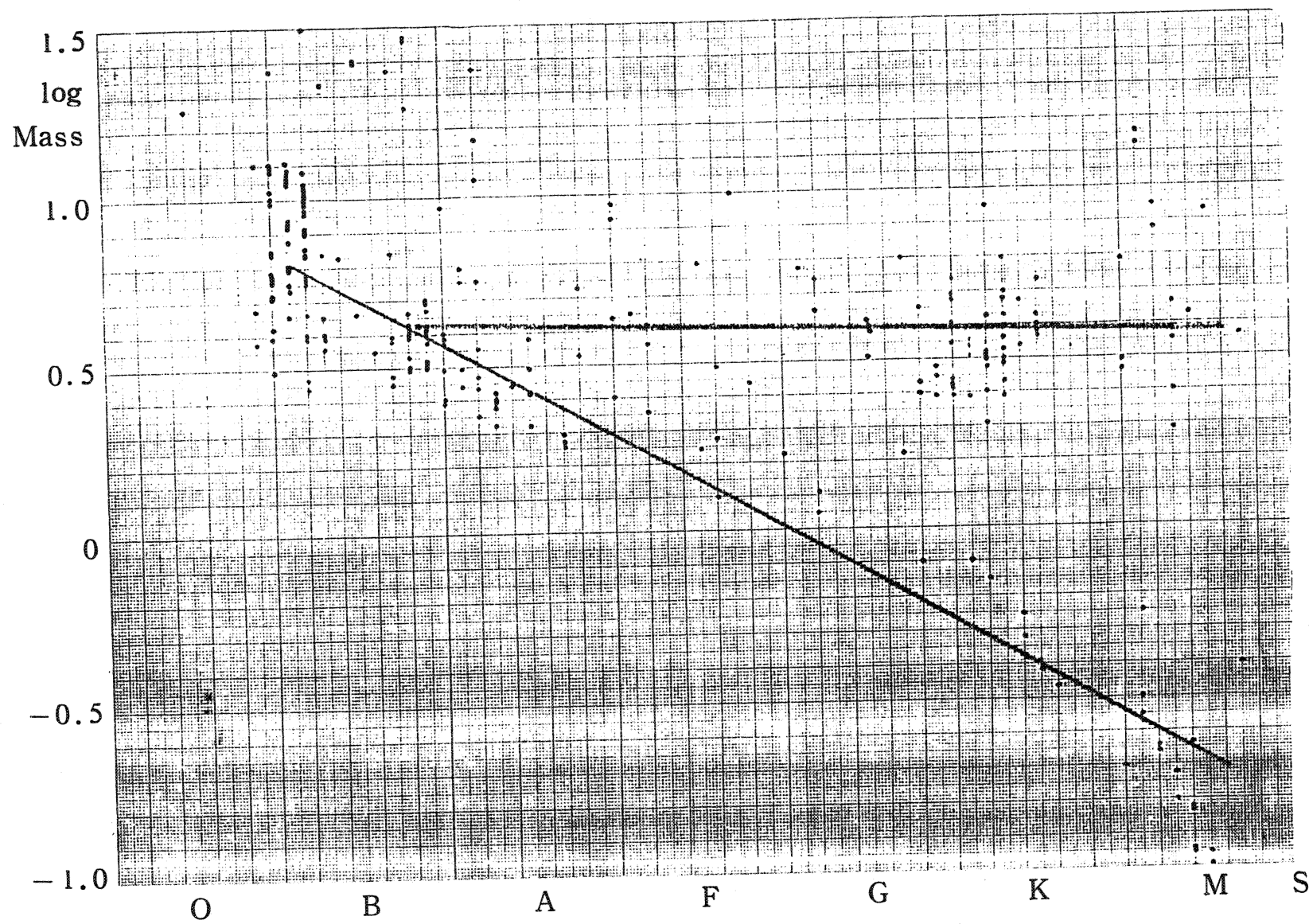
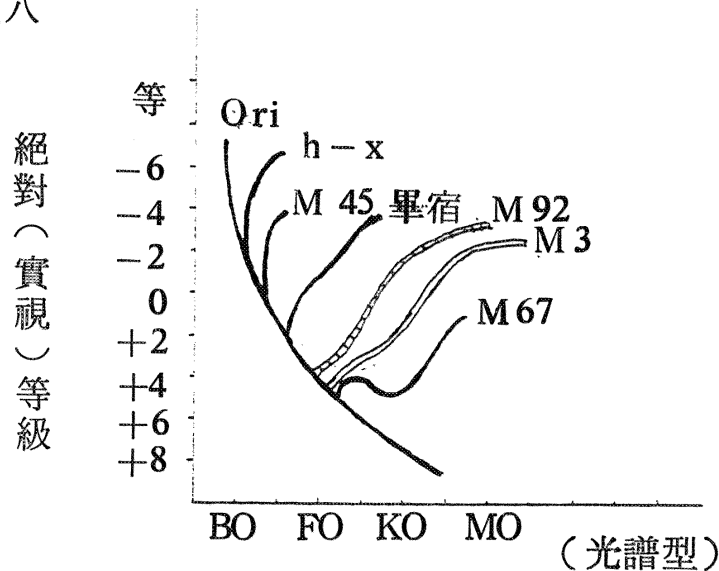


圖 6



2. 由於星團內星球的年齡相近，故研究星球的年齡和光譜的關係可利用不同星團的 H-R 圖比較之。然限於本身儀器粗陋，沒有能力畫出星團的 H-R 圖，故參考王安石先生所著之天文知識叢書第四冊中的星團 H-R 圖（Ori I，h-x，M 45，M 3，M 92，M 67，畢宿），分析年齡和光譜型的關係。

圖八



3. 比較質量—光譜型圖形及年齡—光譜型圖形，分析星球質量、年齡和光譜型的關係。

五、研究結果

- (一) 為提高解析度，所以我們選擇阿里山祝山觀日樓、牡丹園和梨山天地為拍攝場所；於 77 年 2 月及 78 年 2 月前往阿里山拍攝天狼、織女……等星光譜，於 77 年 11 月前往梨山拍攝畢宿五、木星……等星光譜。
- (二) 由上述拍得的光譜加以分類，得知天狼星為 A₀ 型，河鼓二（牛郎星）為 A₇ 型……。
- (三) 利用電腦計算，得到的星球物理資料（絕對星等、質量、半徑、密度、發光本領）。
- (四) 1. 根據上述(二)和(三)的資料，以質量為縱坐標，以光譜類型為橫坐標去描繪 S-Mass 的圖形，得到星星的分佈趨勢和指數（ e^a ， $e > 1$ ， $0 < a < 1$ ）函數圖形十分相像，而縱坐標的質量

表一

游離元素符號	可見光區主要波長 (單位 : 10^{-8} cm)
	6563
H	4861, 434, 4102
C	4771
N	4151, 4640-9
O	4368, 4959, 5007
Na	5893
* Mg	5183
Al	4711, 4740, 5557
Si	3905
Ca	3934
Sc	4743
Ti	5210
V	4460
Mn	4041
Fe	4658, 5270
Co	4867
Mi	5017
Cr	4351
Zn	4810
Sr	4607
Ba	4131
Pb	4057
G Band	4300
TiO	4808, 4918
Ne	3869, 3967, 4716
He	4026, 4713, 4471, 5047
S	4069-76

表 2 星球光譜的分類

類別	溫度	光 譜 現 象
O	50,000°	高度離化原子線：He II, Si IV, N III 等；氫弱； 一些 He III 和 N III 線的有時微弱的發射。
B ₀	25,000°	He II 無；He I 強（最大在 B ₂ ）Si III 和 O II 有； H 較強。
B ₅	15,000°	He I 強；H 較弱；Si II 和 Mg II 均有發現。
A ₀	11,000°	H 最大時，He I 無；Mg II 和 Si II 強；Fe II， Ti II 弱；Ca II 弱。
A ₅	8,700°	H 仍強；Mg II, Si II, Fe II, Ti II 接近最大； Ca II 較強；Fe I 和其他中性金屬弱，但有發現。
F ₀	7,600°	H 較弱；Ca II 強；Fe II, Cr II 等約等於 Fe I， Cr I 等。
F ₅	6,600°	Ca II 很強；Fe I 和其他中性元素多於那些單離化 元素線。
G ₀	6,000°	類似太陽；Ca II 最大。因有大量 Fe I 線，和其他 中性元素，故原子光譜極為豐富。CH 的分子帶有 發現。
G ₅	5,500°	Ca II 和中性金屬線甚強。CH 帶較強；CN 強，尤 其在巨星內。
K ₀	5,100°	H 相當弱；所有中性原子線均甚強；分子帶較強。
M ₀	3,600°	中性線甚強；Ti ₀ 帶有發現但較弱。
M ₅	3,000°	類似 M ₀ ，但 Ca I λ 4226 甚強；TiO 帶仍較強。

如改取對數值，則畫出的 $S - \log \text{Mass}$ 圖，主序星的排列呈一次函數圖形，而巨星、超巨星約呈零次函數排列。

2. 根據天文知識叢書中所記載的星團 $H - R$ 圖的重合圖（見圖 8），我們可以看出，如由年輕至年老，依序照排 Ori I（年齡 300 萬年）， $h - x$ 疏散星團（年齡 450 萬年），M 45 昴宿星團（年齡 8000 萬年），畢宿星團（年齡 3 億年），M 67 球狀星團（年齡 45 億年），M 3 球狀星團（年齡 55 億年），M 92 球狀星團（年齡 55 億年），可發現一個趨勢：巨星、超巨星在年輕時為 O、B 型，隨年齡之增長逐漸在 $H - R$ 圖上右移，而到年老時便為 M 型，溫度隨年齡之增加而降低；而主序星位置則看不出明顯的移動。
3. 由(四) — 1.，(四) — 2. 所得的結果可確定一個事實：對巨星來說，年齡對光譜型比質量對光譜型的影響大了許多：巨星的質量對光譜型並沒有顯著的影響，因不同的光譜類型中，可以找到許多質量相近的星球，然在不同年齡中，並沒有光譜型相同的星球，年齡愈大，其光譜型便愈接近 M 型（右端），故巨星的光譜型和年齡有絕對的關係。主序星部份，可由 $S - \text{Mass}$ 圖形得知質量愈大的星球分布的位置便愈靠左端（O 型、B 型），反之則愈靠右端（K 型、M 型），而年齡的增長對主序星的光譜型來講並沒有多大的變化，故主序星的質量對光譜型的影響遠比年齡對光譜型的影響來得大。

六、結 論

根據我們的研究，星球質量、年齡對光譜型的關係，我們得到的結論是：對巨星而言，年齡對光譜型的影響較大；對主序星而言，質量對光譜型的影響較大。在我們所涉獵的書籍中，均無對此現象做完整的說明，故本篇研究有助於天文同好者對此一問題得到更進一步的認識。

就巨星來講，因為它們的質量大，能量的消耗相對的也比較大，演化較迅速，停留在主序星的時間較短。隨著年齡的增長，由藍巨星

(B型)逐漸向右水平移動，而邁入星球的老年期——紅巨星(M型)，整個生命期間光譜型和年齡的關係密不可分。當然，質量的大小控制了星球演化過程，只有質量大的星球(超過100， \odot 表示對太陽的比值)才能變成巨星(星球晚期——紅巨星例外)，不過，巨星的光譜型的控制變因主要還是年齡。

就主序星來講，其停留在主序帶的時間較長，質量的大小控制星球在主序帶上的位置，亦即控制了星球的光譜型。而主序星年老後即演化為紅巨星，其停留在紅巨星的時間和其一生比較，則短了許多，故主序星的光譜型主要控制在質量。又我們從各星團的H-R圖可以看出質量愈大者，離開主序帶的時間愈早，其原因是質量大的星球，演化較快，而當其變成紅巨星之後，質量小的星球仍留在主序帶上穩定的發光，故造成此一現象。

七、檢討與創新

- 1.自行拍攝的光譜分析結果和星表比較誤差可控制在5%以下，且方法十分簡便，十分適合學生。
- 2.拍光譜時星星之排列會產生形變，但不影響光譜準確度。
- 3.由於樣本多採較亮的星，故巨星個數對主序星個數的比例較實際上高出許多。
- 4.G、K型之巨星因所採之樣本只有III型恒星，我們所求得的平均質量較實際的平均質量為小。
- 5.K、M型恒星因明亮之矮星樣本少，又國內有現成的資料，故斟酌採用之。
- 6.在拍攝過程中發現：物鏡焦距越長，或稜鏡受光面積越大，所得光譜解析力越高；又相機須和目標夾一 θ 角始能拍得光譜，故再設計一分光儀如下(圖9)，不但能提高精密度，又可追蹤，惜無法獲得稜鏡而不能實際用於本作品。
- 7.由 $\log \text{Mass} - S$ 圖可知主序星之函數圖型為一次函數，而巨星之函數圖形為零次函數。就主序星而言只要知道星球的光譜型，將其化為一參數，令 O_0 為1， O_1 為2……，M9為70。因為太陽

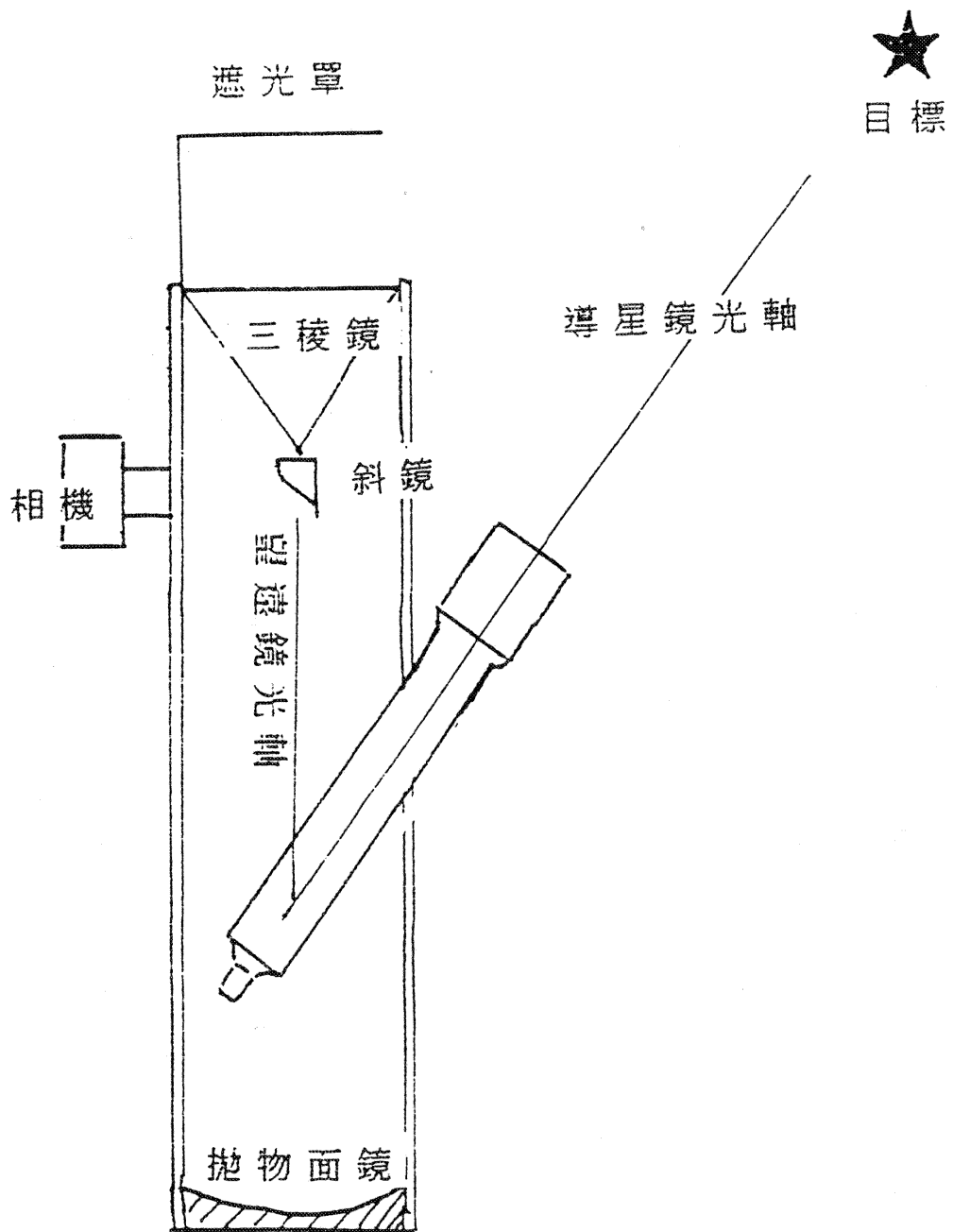


圖 9

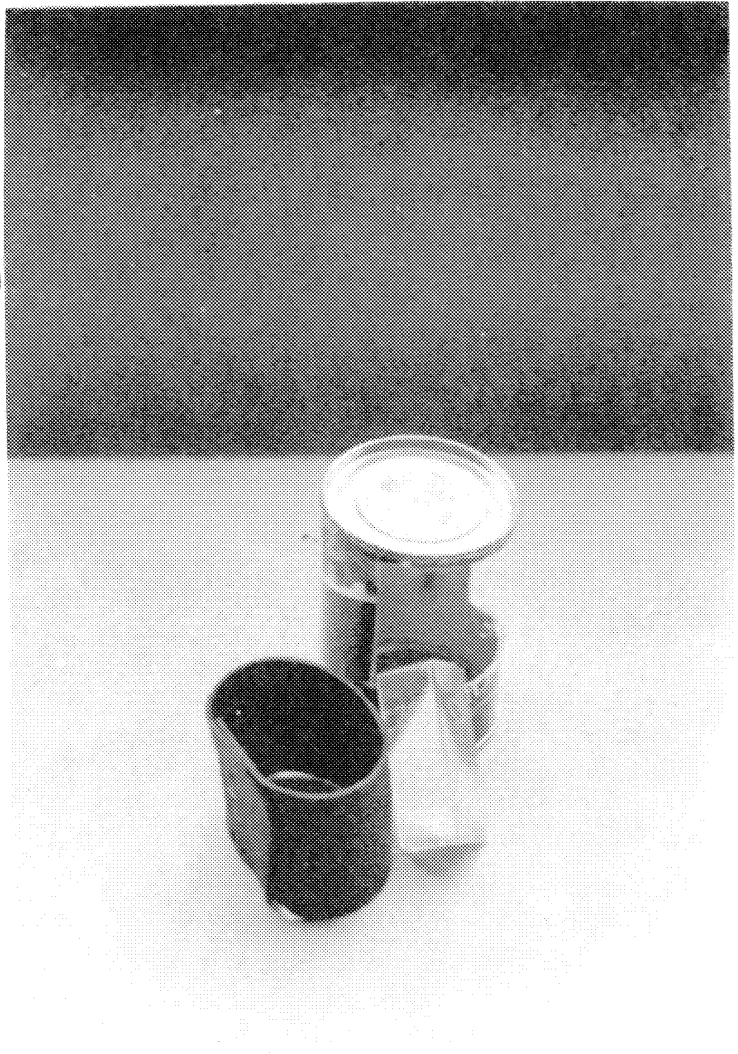
的光譜型參數為 42，又其他星球的質量的對數和光譜有著 0.025 : 1 的關係，利用公式 $\log \text{Mass} = 0.025 (S - 42)$ 便可算出星球質量，不必再繞許多圈子，輸入許多數據再間接算出。此規律在國內之天文書籍均未陳述，為自行發現之規則。

評 語

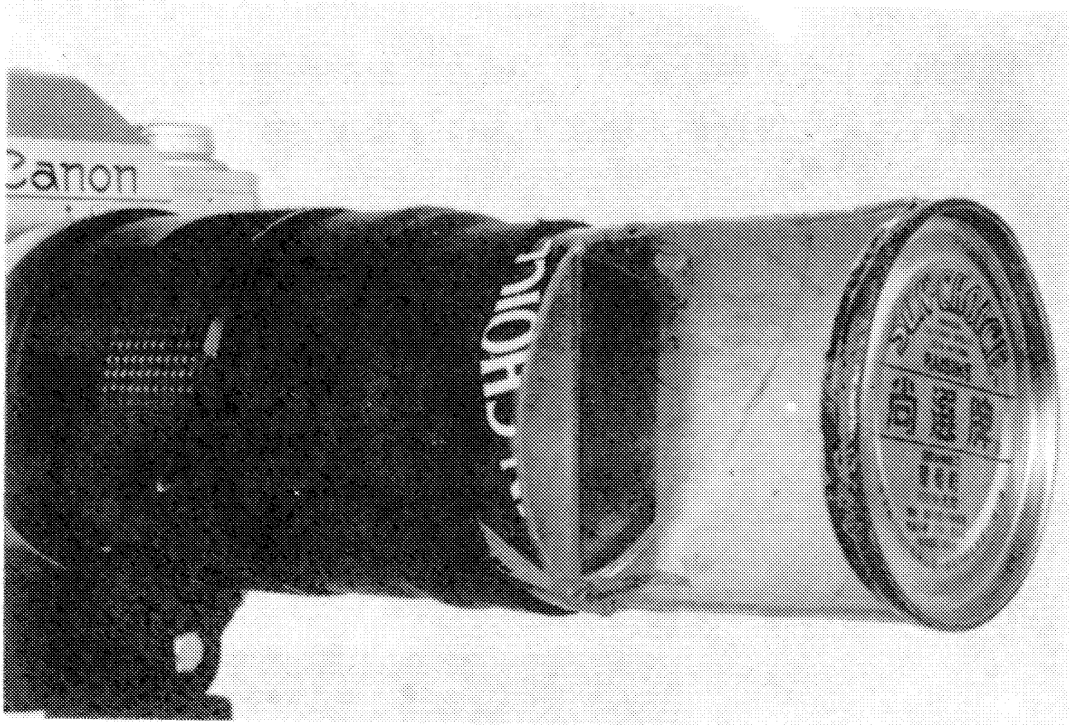
- (1) 利用自行設計的簡單工具，作出有意義的觀測成果令人激賞。
- (2) 充分使用現有智識去分析所得觀測結果。
- (3) 研究者具有很好的天文智識，有獨立思考能力。
- (4) 分析解釋所得資料，推導合適的數學公式時，雖然未能使用較嚴謹的數學方式，但基本觀念正確，結果合理。
- (5) 所得公式須再進一步驗證。

附 錄

1. 簡易分光器的製作(1)



2.簡易分光器的製作(2)



3.簡易分光器的製作(3)

