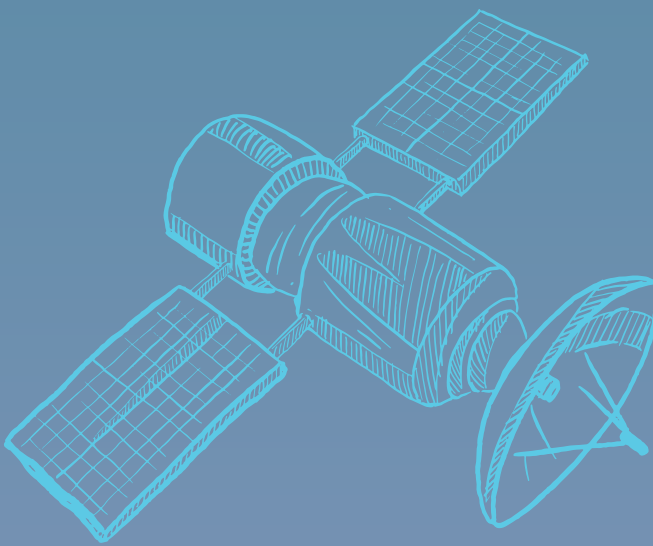
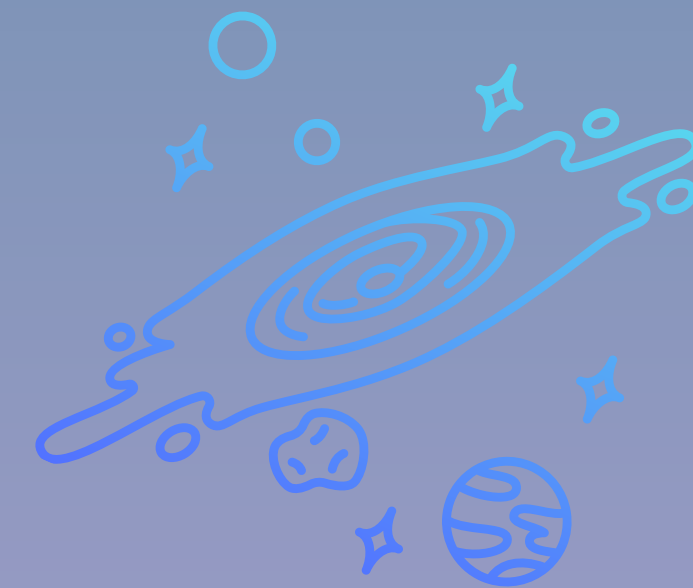




變星物理特性分群應用於球狀星團演化分析



摘要

本研究應用 K-means 分群技術，分析球狀星團內變星的週期、振幅與亮度等物理特性，探討其與星團演化的關聯。選取 M3、M13、M15、M92、NGC 5139 等星團，從 Gaia、VizieR、SIMBAD 資料庫擷取變星數據。結果顯示：低金屬星團 ([Fe/H] < -1.7) 含較多 RR Lyrae 變星，且脈動週期較長；高金屬星團則多為中、長週期變星。核心塌縮星團中變星集中於核心，可能與質量分離效應有關。K-means 分群成功辨識變星類型與分布特徵，並顯示其與星團結構和演化之間的內在關聯。未來可結合光譜與動力學資料，深化對球狀星團形成歷程的理解。

研究動機

過往球狀星團的研究多聚焦於整體光度曲線與化學組成，較少專注於變星物理特性與星團整體性質的關聯性。在查閱 2024 台灣國際科展專題時發現，RR Lyrae 型變星在球狀星團中出現頻率最高。實際以程式擷取資料後也驗證此結果，同時也觀察到變星類型下還細分出多個子類別，且這些分類與其物理參數、甚至與星團本身的金屬量與結構有明顯關聯。由此產生本研究動機：探討變星特性是否反映球狀星團的形成與演化狀態。

研究目的

探討球狀星團整體的物理性質

以非監督學習分群球狀星團內的變星

研究星團內部變星分類的成因

結合主成份分析檢視分群穩健性

由變星反推星團的特性與演化歷程

驗證機器學習技術對天文數據分類的可行性

研究設備及器材

一、資料庫



二、電腦軟體



研究過程與方法

文獻探討

根據 2024 年台灣國際科展專題，影響球狀星團中 RR Lyrae 型變星組成的關鍵因素依序為：年齡 > 星團半徑 > 金屬豐度。其中，星團半徑與變星比例 (RRppm) 呈正相關，可能與星雲說、偶發生成或潮汐作用有關。RRppm 也被視為可輔助推估星團基本參數的指標。

本研究進一步運用 K-means 演算對星團中變星進行聚類，分析不同群組是否對應特定的演化特性，並探討分群結果與星團年齡、半徑、金屬豐度之間的關聯性。

研究過程

一、以資料庫選定球狀星團和篩選內部變星

本研究參考前人的研究成果，選取具有代表性且具特殊特性的球狀星團，並排除處於星族過渡階段的星團，以避免變星數據受干擾。選用皆為星族 II 星團，其恆星多為銀河早期形成的古老族群（年齡超過 100 億年），金屬量低，主要分布於銀暈或銀河凸起區域。最終選定 10 個球狀星團，並參考 SIMBAD 資料庫與公開資料，蒐集其名稱、NGC 編號、金屬豐度 ([Fe/H])、赤經赤緯 (J2000)、年齡與視直徑等資訊。

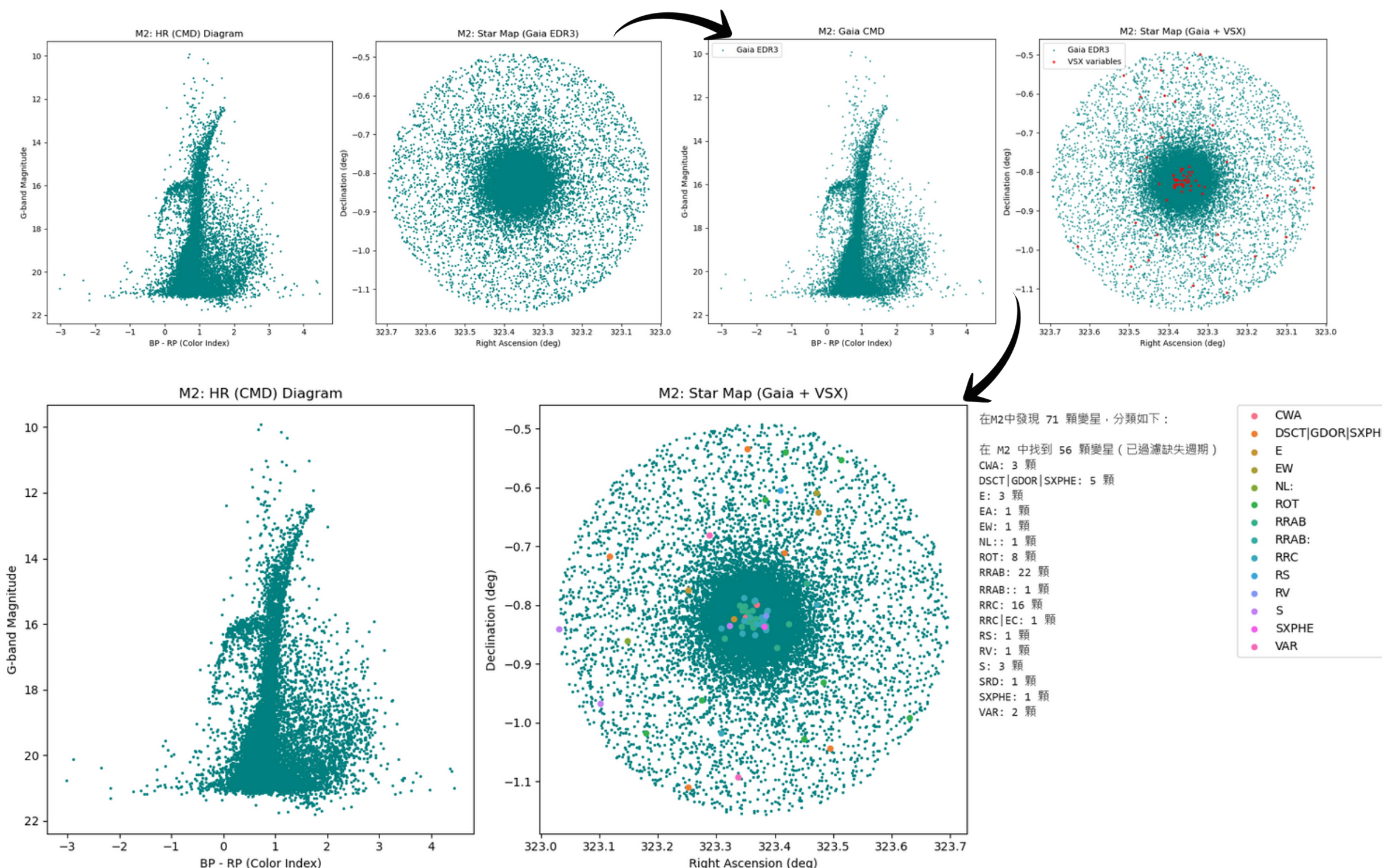
星團名稱	NGC 編號	[Fe/H]	赤經 (J2000)	赤緯 (J2000)	年齡 (Gyr)	視直徑 (角分)
M15	NGC 7078	-2.37	21h 29m 58.3s	+12° 10' 01"	12.0	18.0
M92	NGC 6341	-2.32	17h 17m 07.4s	+43° 08' 09"	13.0	14.0
M53	NGC 5024	-2.10	13h 12m 55.3s	+18° 10' 09"	12.7	13.0
M22	NGC 6656	-1.70	18h 36m 24.0s	-23° 54' 17"	12.0	32.0
M2	NGC 7089	-1.65	21h 33m 27.0s	-00° 49' 23"	13.0	16.0
ω Centauri	NGC 5139	-1.62	13h 26m 47.3s	-47° 28' 46"	12.0	36.3
NGC 6752	NGC 6752	-1.54	19h 10m 52.1s	-59° 59' 04"	11.78	20.4
M13	NGC 6205	-1.53	16h 41m 41.5s	+36° 27' 37"	11.65	20.0
M3	NGC 5272	-1.50	13h 42m 11.3s	+28° 22' 38"	11.39	18.6
M12	NGC 6218	-1.37	16h 47m 14.1s	-01° 56' 54"	12.6	16.0

二、查找星團內裡變星並進行篩選過濾及視覺化

(一) 根據上表取得的天球座標，結合 VizieR 資料庫中的 B/vsx/vsx 變星總表，查詢 M2 星團內的變星資料。查詢半徑設定為 20 角分（大於星團視直徑），以涵蓋完整星團範圍。擷取欄位包括名稱、類型、赤經赤緯、週期、最大/最小星等、振幅與平均亮度。過濾掉缺乏週期資訊的變星，並依據最大與最小星等計算振幅與平均亮度，完成後續分類與統計分析。



(二)收集到變星數據後，合併Vizier資料庫裡的 I/355/gaiadr3 目錄表獲得球狀星團在資料庫裡的赤經赤緯、平均星等和BP-RP顏色指數。並將B/vsx/vsx 變星總表的資料，與步驟一查找到的數據結合進行疊圖。以獲得變星在選定星團裡的分佈圖（以下以M2球狀星團為例，查詢半徑以20角分進行）

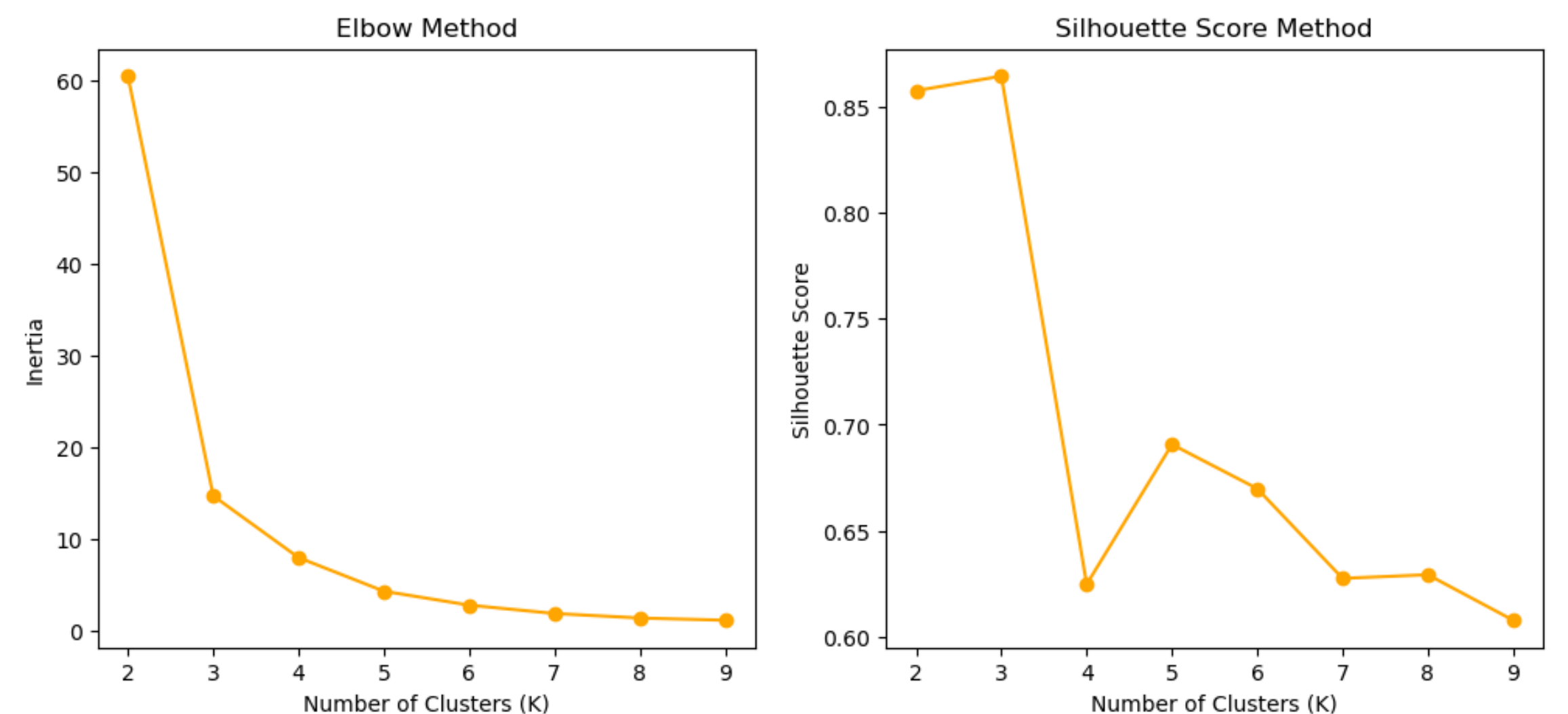


三、對球狀星團中變星物理性質做非監督學習(K-means分群)

(一)為合理劃分變星群組，先對 M2 星團中 56 顆變星的週期、振幅與平均亮度進行最佳 K 值判斷。

- 使用 肘部法則 (Elbow Method) 觀察不同 K 值下的誤差變化，找出聚類效果最佳的分群數。
- 再透過 輪廓係數 (Silhouette Score) 驗證分群結果的一致性與清晰度。

最終確認 M2 星團的最佳 K 值為 3，代表變星可合理分為三類。

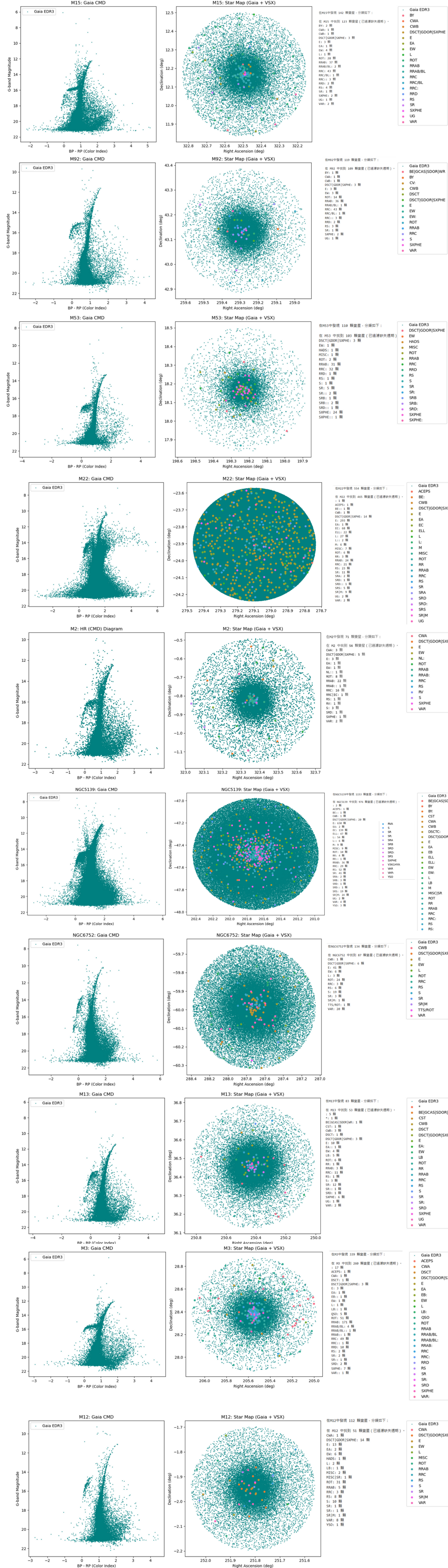


(二)執行K-means分群

- 以 K-means 對變星的週期與振幅進行三維分群，根據最佳 K 值 (K=3) 將變星分為三群，並以顏色區分。X 軸為週期 (天)，Y 軸為振幅，Z 軸為 G 波段平均亮度 (數值越大表示星體越暗)，進一步觀察三維空間中的群聚結構。
- 完成分群後，統計每一群的變星特性，檢視是否存在具代表性的物理性質差異，對應變星分類的可能性。

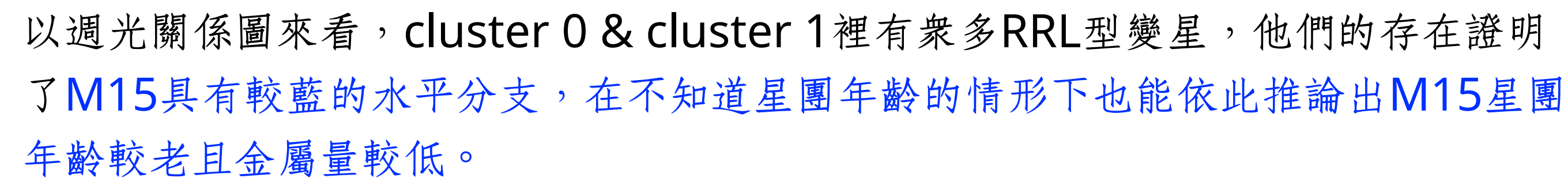
一、球狀星團裡的變星分布分析星團演化狀態

M15~M12球狀星團之變星分部與水平分支圖



5.特殊案例：NGC 5139 (Omega Centauri)：金屬豐度變異大，可能混合不同世代恆星，導致RR Lyrae分布多樣。

K-means Clustering: 3D View 3D PCA Clustering of Variable Stars



The figure consists of two 3D scatter plots side-by-side, illustrating the clustering of variable stars based on different features.

Left Plot: K-means Clustering: 3D View

- Axes:** The x-axis is "Period (days)" ranging from 0 to 250. The y-axis is "Amplitude" ranging from 0 to 20. The z-axis is "Mean_Mag" ranging from 0.00 to 2.00.
- Clustering:** The data points are clustered into three groups, represented by different colors: purple (Cluster 0), teal (Cluster 1), and yellow (Cluster 2).
- Legend:** A color bar on the right indicates the "Mean_Mag" values, ranging from 0.00 (purple) to 2.00 (yellow).

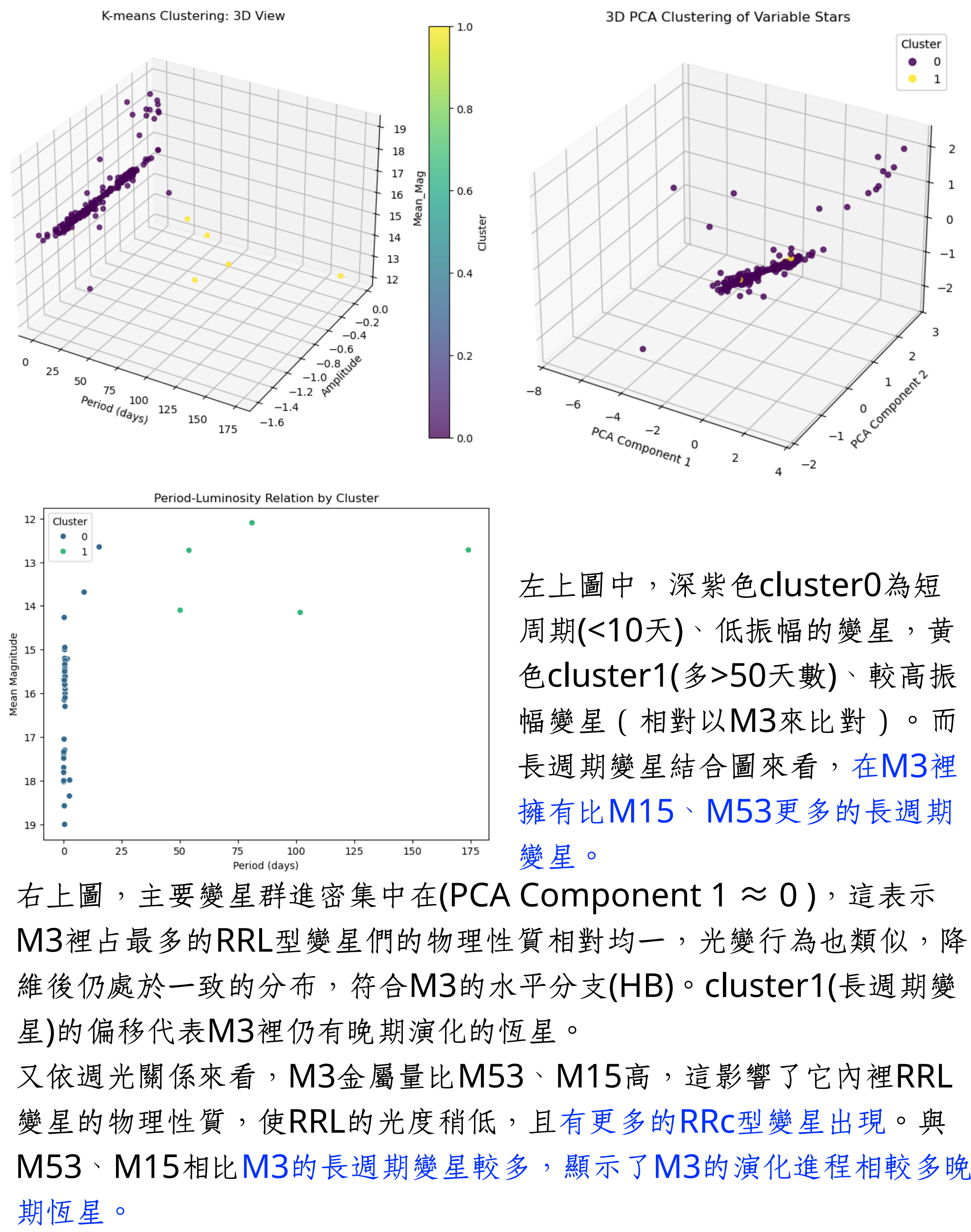
Right Plot: 3D PCA Clustering of Variable Stars

- Axes:** The x-axis is "PCA Component 1" ranging from -7 to 4. The y-axis is "PCA Component 2" ranging from -2 to 4. The z-axis is "PCA Component 3" ranging from -1.5 to 1.0.
- Clustering:** The data points are clustered into three groups, represented by different colors: purple (Cluster 0), teal (Cluster 1), and yellow (Cluster 2).
- Legend:** A legend in the top right corner identifies the clusters: Cluster 0 (purple), Cluster 1 (teal), and Cluster 2 (yellow).

左上圖中cluster0(紫色)為短周期變星，振幅低至中等，這些可能是分類表中的(RRab、RRc型變星)。中等週期變星cluster1(綠色)振幅較高，可能包含了M53變星分類表中的半規則變星(SR)或長週期變星的早期演化階段。長週期變星cluster2(黃色)，週期超過100天，振幅較高且本身具高亮度。

右上圖有**部分數據點偏離主要集群PCA Component 1<-3**，這是因為**星團中有變光行為與RRL不同的半規則SR類變星**所致，因此在投影空間中表現出不同的分布。PCA降維後仍緊密聚集，代表排除較大變異態的cluster2的長週期變星後，星團裡的大部分變星即使有不同的類型仍有相似的週期、振幅與亮度特徵。週光關係顯示，M53擁有與M15類似的RRL變星分布，但長週期的變星M53比M15多，這能呼應前段論述M15比M53經歷了更劇烈的動力學演化(核心塌縮)，以至於失去了部分晚期演化的恆星，而M53還沒有。M53的RRL變星分布也與M3類似，但金屬量較M3低，所以M53裡的RRL變星的光度會高於M3。

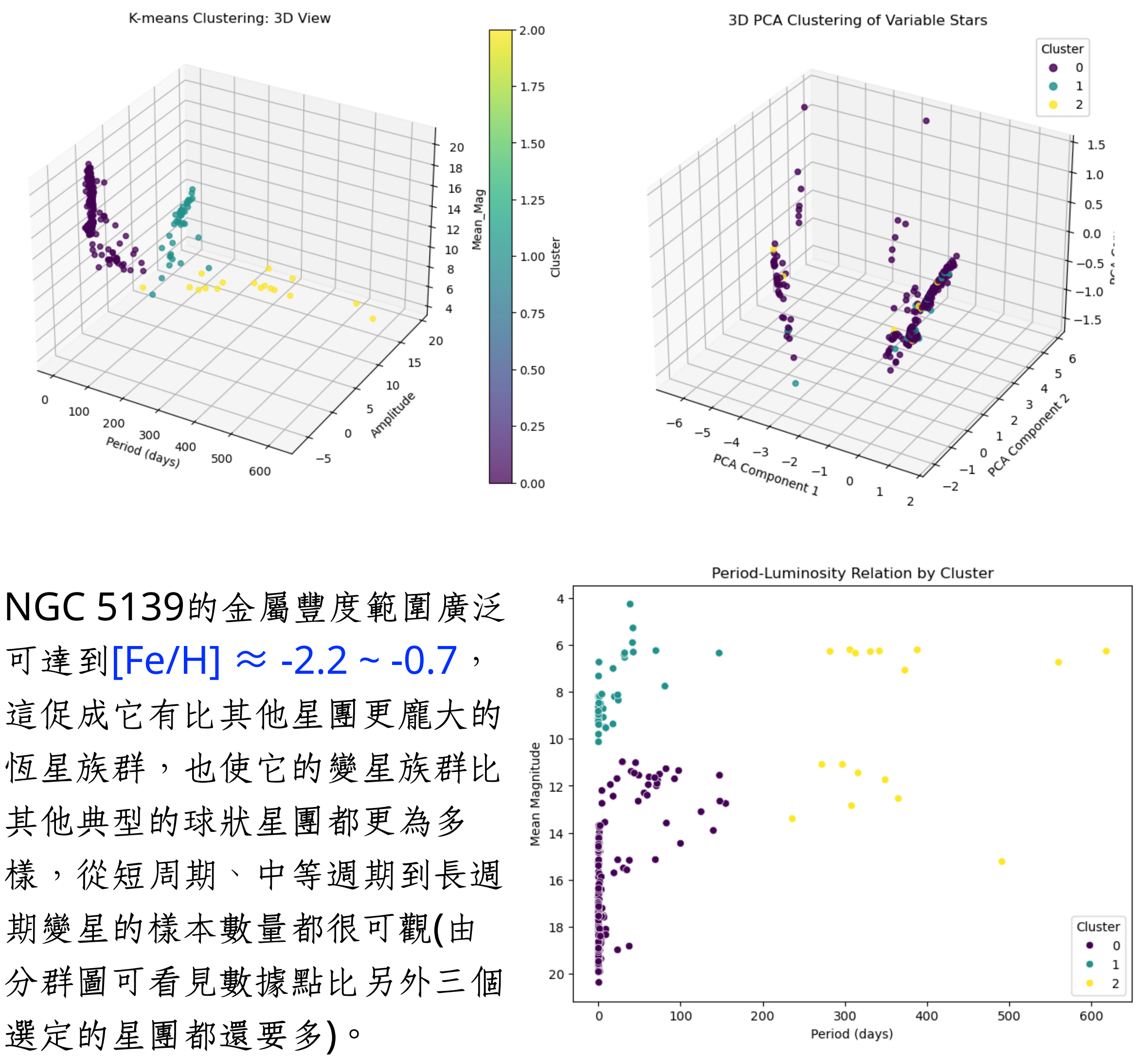
高金屬豐度-M3



左上圖中，深紫色cluster0為短周期(<10天)、低振幅的變星，黃色cluster1(多>50天數)、較高振幅變星（相對以M3來比對）。而長週期變星結合圖來看，在M3裡擁有比M15、M53更多的長週期變星。

右上圖，主要變星群進密集中在(PCA Component 1 $\approx$ 0)，這表示M3裡占最多的RRL型變星們的物理性質相對均一，光變行為也類似，降維後仍處於一致的分布，符合M3的水平分支(HB)。cluster1(長週期變星)的偏移代表M3裡仍有晚期演化的恆星。又依週光關係來看，M3金屬量比M53、M15高，這影響了它內裡RRL變星的物理性質，使RRL的光度稍低，且有更多的RRc型變星出現。與M53、M15相比M3的長週期變星較多，顯示了M3的演化進程相較多晚期恆星。

特異星團-NGC 5139 (ω Centauri)



NGC 5139的金屬豐度範圍廣泛可達到 $[Fe/H] \approx -2.2 \sim -0.7$ ，這促成它有比其他星團更龐大的恆星族群，也使它的變星族群比其他典型的球狀星團都更為多樣，從短周期、中等週期到長週期變星的樣本數量都很可觀(由分群圖可看見數據點比另外三個選定的星團都還要多)。

其中，RRL主要來自較低金屬量的族群，較長週期的變星來自較高金屬量的族群。這兩者的特性，支持了NGC 5139是被潮汐剝離的矮星系核心的理論。PCA降維後，Component 1 約在 -3 與 1 處出現兩個明顯聚集，三個K-means 群皆有分布，顯示變星本身具有自然分群結構。此現象可解釋為 NGC 5139 (ω Centauri) 內部存在高、低金屬量的多族群恆星：Component 1 $\approx$ -3 為古老、低金屬量變星（如光度較暗的 RR Lyrae）；Component 1 $\approx$ 1 為年輕、高金屬量的長週期或半規則變星。這些差異源自變星的物理特徵，在 PCA 中被保留下來，與 K-means 聚類結果無直接關聯。NGC 5139 擁有更多長週期變星，反映其歷經多次恆星形成事件，為非典型的多族群球狀星團。

分群結果總結

星團	主要變星類型	金屬量範圍 ([Fe/H])	變星數量	短週期變星 (RR Lyrae)	中等週期變星 (SR)	長週期變星 (Mira)
M15	RR Lyrae 星團	-2.3	多	幾乎全部是 RR Lyrae	幾乎沒有	幾乎沒有
M53	貧金屬量變星族群	-2.1	中等	以 RR Lyrae 為主	少量 SR 變星	極少
M3	多變星類型	-1.5	多	以 RR Lyrae 為主，但有較多 RRc	SR 變星較多	長週期變星較多
NGC 5139	多族群融合	-2.2 ~ -0.7	極多	RR Lyrae 為主，但有較多 RRc	SR 變星較多	Mira 變星數量最多

討論

1. K-means 分群的侷限

K-means 假設資料為球形分布，對變星間的非線性關係較難掌握，RRab 與 RRc 的特徵可能重疊。可考慮導入 DBSCAN 或 PCA 降維後分群以提升準確性。

2. 資料完整性與分類標準影響

Gaia 與 VizieR 資料可能有選擇偏差或分類不一致（如 RR Lyrae 與 Delta Scuti 易混淆），可能影響變星分布的判讀結果。

3. 核心塌縮與變星分布

如 M15、M92 顯示變星向核心集中，支持質量分離理論。但仍需釐清是否為選擇效應或核心塌縮造成的遷移或演化變化。

4. 金屬豐度與變星類型關聯

低金屬星團以 RR Lyrae 為主，高金屬星團多見長週期變星，但類型分布也可能與恆星世代與年齡有關，非單一金屬量可決定。

5. NGC 5139 (ω Cen) 的特殊性

變星與金屬豐度分布廣，可能為矮星系核心殘骸。需更多光譜與運動學資料以確認多世代族群與演化歷史。

6. M22 的分布特例

M22 星團中恆星與 RRL 變星分布較分散，未呈現典型核心聚集，可能與結構鬆散、背景星干擾或資料解析度限制有關。

結論

本研究顯示，不同金屬豐度的球狀星團內變星類型與數量存在明顯差異：低金屬星團（ $[Fe/H] < -1.7$ ）含較多 RR Lyrae 變星，週期較長；高金屬星團則多為長週期變星，驗證金屬豐度對變星分布的影響。此外，核心塌縮星團中 RR Lyrae 變星分布集中，符合質量分離理論，反映核心塌縮對變星演化具影響力。

透過 K-means 分群，研究成功辨識變星族群並探索其物理特性與星團參數的關聯，證實機器學習在天文分類上的可行性。此方法可作為分析球狀星團演化的新工具，未來可應用於更大規模資料，結合光譜與動力學模擬，進一步加深對星團內恆星演化的理解。

參考文獻

1.Ou, Jia-Yu(2023) Photometric Investigation of Mira: From classification to Distance-scale Application

2.Fernando Bação, Victor Lobo , and Marco Painho (2005) Self-organizing Maps as Substitutes for K-Means Clustering

3.Annisa Uswatun Khasanah (2016) A Comparison Study: Clustering using Self-Organizing Map and K-means Algorithm

4.S Rahmani, H Teimoorinia, P Barmby(2018)Classifying galaxy spectra at $0.5 < z < 1$ with self-organizing maps

5.2024年臺灣國際科學展覽會作品專輯－何承祐(2024)使用蓋亞資料庫探討球狀星團中天琴座RR型變星的組成