

Palomar 14 Küresel Kümesindeki Yıldızlar:İlk Bolluk Analizi Sonuçları

Şeyma Çalışkan^{1,2}, Norbert Christlieb² ve Berahitdin Albayrak¹

¹ Ankara Üniversitesi, Astronomi ve Uzay Bilimleri Bölümü, Ankara

² Zentrum für Astronomie der Universität Heidelberg, Heidelberg

Özet. Küresel Küme üyesi yıldızlara yönelik kimyasal bolluk analizleri yıldızların kökeninin araştırılmasında önemli bir yer işgal etmektedir. Öyle ki, bu türden yıldızların kimyasal bolluk analizi, erken evrendeki yıldız oluşumu ve nükleosentez süreçleri, ilk yıldızların doğası ve galaksilerin oluşumu ve kimyasal evrimleri hakkındaki sahip olduğumuz bilgilerin geliştirilmesine öncülük etmektedir. Bu çalışmada, galaksimizin dış halosunda bulunan ve bilinen en uzak altı küresel kümeden biri olan Palomar 14 küresel kümesine ait dokuz yıldızın, 476-577 nm ile 584-648 nm dalgaboyu aralığını kapsayan ve VLT/UVES ile alınmış, yüksek çözünürlüklü tayfları ışığında elde edilen element bolluklarına dair ilk sonuçlar tartışılmaktadır.

1 Giriş

Evrendeki en yaşlı yıldız toplulukları olan küresel kümeler, Samanyolu Sisteminin evrim başlangıcını ve erken oluşumunun izlerini taşır. Örneğin, bu kümelerin metal bollukları Galaktik Haloda metal gradyentinin varlığını belirlemede güçlü bir rol oynar. Metal bolluğu değişiminin (gradyentinin) varlığı ya da yokluğu galaksinin o bölgesinin oluşumu hakkında bilgiler sunar (Armandroff ve ark. (1992)). Özellikle, dış haloda metal bolluğu gradyentinin olmaması durumu bir kaç milyar yıl içinde genişlemiş galaktik halo için bir birikme başlangıcı fikrine yol açmaktadır (Searle ve Zinn (1978)). İç ve dış halo popülasyonundaki ayrım hem alan yıldızları hem de küresel kümeler için şimdilerde belirlendi (Hartwick (1987), Norris ve Ryan (1989), Kinman ve ark. (1994), Carney ve ark. (1996), Chiba ve Beers (2000), (Carollo ve ark. 2007)). Bu ayrım, dış haloda bulunan ve bu popülasyonda geniş bir yaş aralığını işaret eden küresel kümeler için telaffuz edilen ikinci parametre probleminin varlığıyla desteklenmektedir (Catelan ve ark. (2001)). Dış halo küresel kümeleri, küresel kümeler ile halodaki birikmeyle oluştuğu düşünülen cüce küresel galaksileri (dSph) birbiriyle karşılaştırma, iç ve dış küresel kümeler arasındaki homojenlikleri ya da heterojenlikleri test etme olanağı sağlayan önemli gözlemsel olgulardır (Koch ve ark. 2009). Özetle, halo alan yıldızlarının ve küresel küme yıldızlarının kimyasal bolluk sonuçları galaktik evrimin anlaşılabilmesi açısından çok önemlidir (Pritzl ve ark. 2005).

Palomar 14 (Pal 14), galaksimizin dış halosunda bulunan ($R_{GC} \approx 70$ kpc) yaygın bir küresel kümedir. Palomar 14 küresel kümesinin bugüne değin en

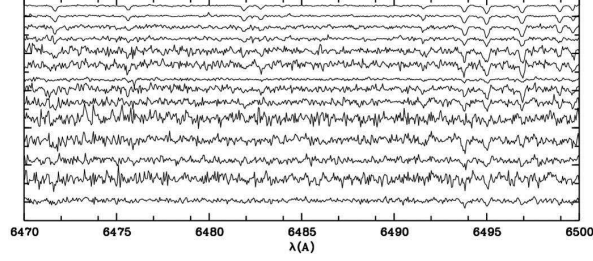
kapsamlı Renk-Parlaklık diyagramını Sarajedini (1997) tarafından yayınlandı. Sarajedini (1997), bu kümenin benzer metal bolluğuna sahip iç halo küresel kümelerinden 3-4 milyar yıl daha genç olduğu sonucuna vardı. Bu sonuç Hilker (2006), Dotter ve ark. (2008) ve Jordi ve ark. (2009) tarafından da onaylandı.

Pal 14'ün yaygınlığı, sönüklüğü ve Güneş'ten olan uzaklığı onu gözlenmesi zor bir cisim haline getirmektedir. Bu yüzden, bugüne değin çok fazla rağbet görmemiştir. Pal 14 üyesi bir yıldızın ilk radyal hızı Hartwick and Sargent (1978) tarafından 81 ± 3 km/s olarak ölçüldü. Armandroff ve ark. (1992), küme üyesi iki yıldız için radyal hız ölçümlerini kullanarak 72 ± 3 km/s değerinde bir sistemik hız (kümenin uzay hızı) değeri yayınladı. Ayrıca Jordi ve ark. (2009) tarafından küme üyesi onyediy yıldızın radyal hızlarını ölçerek, 72.28 ± 0.12 km/s değerinde bir sistemik hız ve 0.38 ± 0.12 km/s bir hız dispersiyonu belirlediler.

Kümenin ilk tayfsal metal bolluğu Armandroff ve ark. (1992) tarafından, Ca II triplet bölgesini içeren tayflar kullanılarak, $[\text{Fe}/\text{H}] = -1.6 \pm 0.18$ dex olarak belirlendi. Bulunan bu bolluk değeri Da Costa ve ark. (1982) tarafından kümenin (B-V) değerinden yola çıkarak elde edilen bolluk değeriyle uyumludur. Bu çalışma dış Palomar 14 küresel kümesinin, yüksek çözünürlüklü tayflar ışığında gerçekleştirilen ilk detaylı bolluk analizidir.

2 Gözlemler

Analizlerde kullanılan tayflar, VLT/UVES (Very Large Telescope/Ultraviolet-Visual Echelle Spectrograph) ile 30 Mayıs 2006 ve 27 Mart 2007 tarihleri arasında, iki gözlem döneminde ve servis modunda elde edildi. UVES, 476-577 nm ile 584-648 nm dalgaboyu aralığında ve 580 nm kırmızı ayarında kullanıldı. Böylece elde edilen tayfların çözme gücü (R) yaklaşık 60000 dir. Etkin S/N oranı elde edebilmek için, hedef yıldızlar parlaklıklarına göre üç gruba ayrıldı ve her bir grup için farklı poz süreleri belirlendi. Buna göre, $m_v = 17.37-18.52$ kadir aralığında en parlak üç yıldız içeren en parlak gruptaki yıldızların her biri için 60 dk poz süresi verilerek dörder adet, $m_v = 18.56-19.05$ kadir aralığında bulunan orta derecede parlak beş yıldızdan her biri için 60 dk poz süresi verilerek altışar adet ve son olarak parlaklığı $m_v = 19.41$ kadir olan en sönük yıldız için ise yine 60 dk poz süresi verilerek onbir adet tayf alındı. Bu tayflar co-add algoritmaları ile birleştirildi. Veriler UVES pipeline'ı kullanılarak indirildi (detaylar için bkz. Jordi ve ark. (2009)). Mevcut tayfların S/N oranını arttırmak için 3 faktörüyle binning yapıldı. Şekil 1'de her bir yıldızın ait 6470-6500 Å dalgaboyu aralığını içeren tayflar gösterilmektedir. Bu yolla elde edilen S/N oranları, hedef yıldızların parlaklıkları ve radyal hızları Tablo 1'de verilmektedir. YA^a ve YA^b sırasıyla, Hilker (2006) ve Holland ve ark. (1992)'nin yaptıkları yıldız adlandırmalarını göstermektedir.



Şek. 1. Hedef yıldızların 6470-6500Å dalgaboyu aralığındaki tayfları.

Çizelge 1. Hedef yıldızların özellikleri.

YA ^a	YA ^b	m_v (mag)	v (km/s)	S/N (@6626 Å)
1		17.37	72.53±0.07	36
2	HV025	17.77	72.76±0.09	29
3		18.23	71.75±0.14	16
5	HV007	18.52	71.68±0.18	11
6	HH244	18.56	72.58±0.18	9
7	HH201	18.70	72.62±0.18	10
8	HV043	18.84	71.56±0.21	11
9	HV104	19.05	73.49±0.21	10
12	HV074	19.41	71.83±0.23	8

3 Bolluk Analizi

3.1 Atmosfer Parametreleri

Yıldızların her biri için, atmosfer parametreleri T_{et} , $\log g$, $[Fe/H]$ ve ξ aynı yöntemle belirlendi. T_{et} belirlemede Alonso ve ark. (1999) tarafından elde edilen renk-sıcaklık ilişkileri, $\log g$ belirlemede 11 Gyr, $[Fe/H]=-1.5$ ve $[\alpha/Fe]=0.3$ değerlerine sahip Yale–Yonsei yaş çizgisi (Kim ve ark. (2002)) kullanıldı. $[Fe/H]$ ve ξ belirlemek için ise hedef yıldızlarımızın tayflarında en fazla sayıda bulunan çizgiler olan Fe çizgileri kullanıldı. Elde edilen değerler Tablo 2’de verilmektedir.

3.2 Eşdeğer Genişlik Analizi

Analizde kullandığımız çizgi listesi Vienna Atomic Database (VALD) ’den derlendi. Ayrıca Koch ve ark. (2009) tarafından yayınlanan çizgi listelerinde dikkate alındı. Eşdeğer genişlik ölçümleri Gauss profil fiti ile yapıldı ve ardından ATLAS9 model atmosferleri temelinde, WIDTH9 kodu (Kurucz (2005)) yardımıyla bolluklara dönüştürüldü. Analizlerimizde, eşdeğer genişliği 185 mÅ’den büyük olan çizgiler, bolluk analizinde güvenilir olmadıkları için kullanılmadı.

Çizelge 2. Hedef yıldızlara ait atmosfer parametreleri.

YA ^a	YA ^b	T _{et} (K)	log g (cgs)	ξ (km/s)	[Fe I/H] (dex)
1		4104	0.66	2.10	-1.53
2	HV025	4157	0.76	2.45	-1.58
3		4601	1.56	2.55	-1.37
5	HV007	4524	1.41	2.60	-1.55
6	HH244	4398	1.18	2.50	-1.53
7	HH201	4441	1.26	2.60	-1.44
8	HV043	4625	1.59	2.40	-1.67
9	HV104	4655	1.66	2.55	-1.38
12	HV074	4728	1.78	2.65	-1.55

4 Tartışma

4.1 Na–O Antikorelasyonu

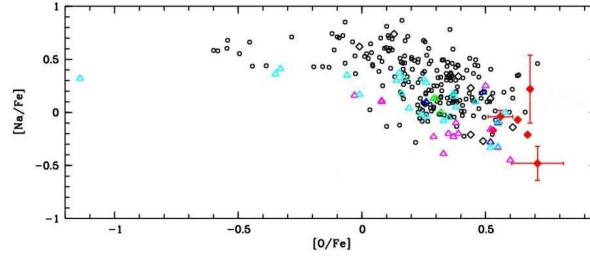
Küresel kümelerin basit yıldız toplulukları olmadıkları ve farklı jenerasyonlardan yıldızlar içerdiklerine dair deliller artmaya devam etmektedir. O, Na, Al, Mg ve Si gibi elementler küresel kümelerde farklı jenerasyonlardan yıldızların bulunup bulunmadığını anlamada kilit elementlerdir. Küresel küme yıldızları arasında, en bilinen antikorelasyonlardan biri Na–O antikorelasyonudur. Carretta ve ark. (2009)'nın onyedici küresel kümeyi içeren çalışmalarında bu antikorelasyonlardan hareketle galaktik küresel kümelerde birden fazla jenerasyondan yıldızlar bulunduğu vurgulanmaktadır. Buna göre, bir kümenin üyesi yıldızlar arasındaki minimum Na ve maksimum O bolluğuna sahip yıldızlar birinci jenerasyon ile diğer yıldızlar ise ikinci jenerasyonla ilişkilendirilmektedir. Palomar 14'e ait yıldızların sahip oldukları Na ve O bolluk oranlarını dikkate alındığında, analizi yapılan yıldız sayısı yeterli olmadığından, bu korelasyonun varolduğunu net bir şekilde söyleyebilmek mümkün gözükmesine de, belirsiz bir şekilde varolduğu söylenebilir (bkz. Şekil 2).

4.2 α element bolluk oranı

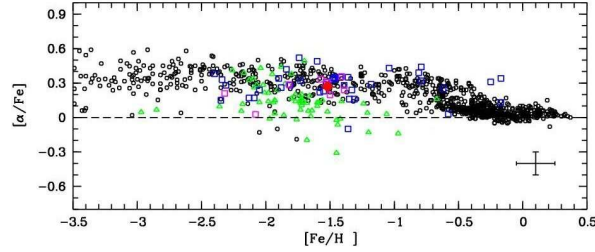
Palomar 14 küresel kümesinin α element bolluk oranı, (Mg+Ca+Ti)/3 ilişkisi kullanılarak 0.27 ± 0.17 dex olarak bulundu. Şekil 3'de görüldüğü gibi, bu değer galaktik halo alan yıldızları, iç halo ve dış halo küresel oldukça uyumludur. Çüce küresel galaksilere bakıldığında, daha düşük yıldız oluşum oranıyla ilişkilendirilen düşük $[\alpha/\text{Fe}]$ oranına sahip oldukları görülmektedir. Bu anlamda, Palomar 14'ü sahip olduğu $[\alpha/\text{Fe}]$ oranı bakımından incelediğinde, galaksi ötesi kökenine dair net bir delil görülmemiştir.

4.3 Demir grubu elementleri

Demir grubu elementlerinden Sc, V, Cr, Mn, Co ve Ni bolluklarını belirledi. Ölçümlerimiz, genel anlamda benzer metal bolluğuna sahip galaktik halo alan

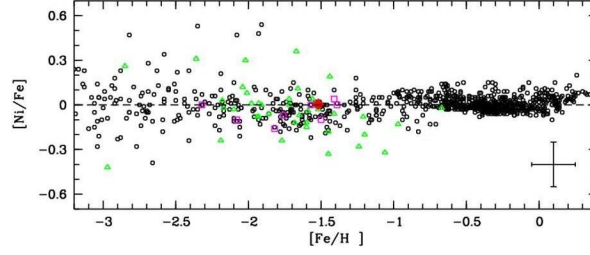


Şek. 2. Na–O antikorelasyonu. Kırmızı içi dolu eşkenar dörtgenler Palomar14, fuşya ve açık mavi içi boş üçgenler sırasıyla, M 3 ve M 13 (Cohen ve ark. (2005)), yeşil içi boş üçgenler Palomar 3 (Koch ve ark. (2009)), mavi içi boş üçgenler NGC 7492 (Cohen ve ark. (2005)) ve siyah içi boş altıgenler galaktik küresel küme (Carretta ve ark. (2009)) yıldızlarını göstermektedir.



Şek. 3. Pal 14'ün $[\alpha/\text{Fe}]$ oranının diğer cisimlerle karşılaştırılması. Kırmızı içi dolu eşkenar dörtgenler Palomar14, fuşya içi boş kareler şekil 2'deki küresel kümeler, mavi içi boş kareler şekil 2'deki galaktik küresel kümeleri, yeşil içi boş üçgenler cüce küreselleri (Shetrone ve ark. (2001), Venn ve ark. (2004)) ve içi boş altıgenler galaktik disk ve halo alan (Johnson ve ark. (2002), Ishigaki ve ark. (2010), Cayrel ve ark. (2004)) yıldızlarını göstermektedir.

yıldızları ve diğer küresel kümelerle uyumludur. Bu elementlerden ortalama $[Ni/Fe]$ bolluk oranının sıfır olduğunu görmekteyiz (bkz. Şekil 4). Bunun beklenen bir sonuç olduğunu söyleyebiliriz, çünkü hem nikelin hemde demirin Tip Ia süpernovalarındaki aynı üretim mekanizmasının ürünleri olduğuna inanılmaktadır.



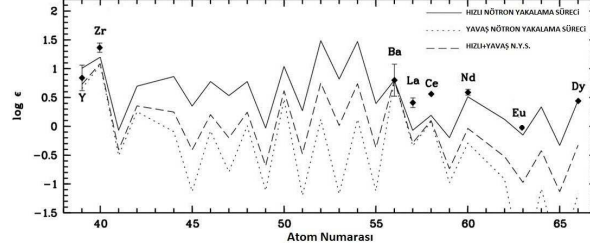
Şek. 4. Pal 14'ün $[Ni/Fe]$ oranının diğer küresel kümelerin yanısıra galaktik disk ve halo alan yıldızlarıyla karşılaştırılması. Semboller ve referanslar Şekil 3'deki gibidir.

4.4 Nötron yakalama elementleri

Nötron yakalama elementlerinden Y, Zr, Ba, La, Ce, Nd, Eu ve Dy bolluklarını belirlendi. Y ve Ba bollukları güneşe göre düşükken, diğer elementler Zr, Ce, Nd, Eu ve Dy yüksek bolluk değerlerine sahiptirler. Ölçtüğümüz bollukları güneş skalasındaki bolluklarla karşılaştırdığımızda, bu elementlerin üretiminde baskın olan sürecin hızlı nötron yakalama süreci olduğunu görülmektedir (bkz. Şekil 5). Bu sonuç, bu yıldızların Tip II süpernovaları tarafından ortama atılan materyalden oluştuğunu göstermektedir. Palomar 14'ün ortalama bir değer olan demir bolluğunu, ve görece genç yaşımı dikkate aldığımızda bu sonuç şaşırtıcıdır. Çünkü, bu tür bolluklar kümenin erken safhalarında varolan tip II süpernovalarının, onun kimyasal zenginleştirilmesinde katkısı olduğuna işaret etmektedir. Palomar 14 bu tür nötron yakalama elementleri bollukları gösteren, M 15 ve Palomar 3'ten sonra bilinen üçüncü küresel kümedir.

5 Sonuç

Palomar 14' e ait yıldızlar için elde edilen bollukların genel anlamda halo alan yıldızları ve diğer küresel kümelerle uyumlu iken diğer bir dış halo küresel kümesi olan Palomar 3'e ait bolluklarla gösterdiği uyum dikkat çekicidir. Palomar 3'te olduğu gibi, Palomar 14'te de ağır element oluşumu hızlı nötron yakalama süreci nükleosentezi ile yönetilirken, galaksi ötesi kökenine dair güçlü bir delil elde edilememiştir. Elde ettiğimiz bolluklara dair belirsizlik sınırlarımızın büyük olmasından dolayı, bu kümede yıldızdan yıldıza bolluk değişimi hakkında kesin



Şek. 5. Pal 14'ün Baryum'a normalize edilmiş nötron yakalama element bollukları. Güneş bollukları, Burris ve ark. (2000) çalışmasından alındı.

bir şey söylemenin zor olmasına rağmen, mevcut Na–O antikorelasyonuna dair izler, bu kümenin birden fazla jenerasyondan yıldız içerdiğine dair ipuçları vermektedir. Galaksimizin en uzak noktalarında bulunan altı küresel kümeden biri olan Palomar 14 için bu sonucun netleşmesi, küresel kümelerin geçmişini anlamamızda çok büyük bir ipucu sağlayacaktır.

References

- Alonso, A. and Arribas, S. and Martínez-Roger, C.: The effective temperature scale of giant stars (F0-K5). II. Empirical calibration of T_{eff} versus colours and $[Fe/H]$. *A&AS*. **140** (1999) 261–277
- Armandroff, T.E., Da Costa, G.S., Zinn, R.: Metallicities for the outer-halo globular clusters PAL 3, 4, and 14. *AJ*. **104** (1992) 164
- Burris, D.L. and Pilachowski, C.A. and Armandroff, T.E. and Snenen, C. and Cowan, J.J. and Roe, H., Neutron-Capture Elements in the Early Galaxy: Insights from a Large Sample of Metal-poor Giants. *ApJ* **544** (2000) 302-319
- Carney, B. W., Laird, J. B., Latham, D. W., & Aguilar, L. A.: A Survey of Proper Motion Stars. XIII. The Halo Population. *AJ* **112** (1996) 668
- Carollo, D. and Beers, T. C. and Lee, Y.S. and Chiba, M. and Norris, J.E. and Wilhelm, R. and Sivarani, T. and Marsteller, B. and Munn, J.A. and Bailer-Jones, C.A.L. and Fiorentin, P.R. and York, D.G.: Two stellar components in the halo of the Milky Way. *Nature*. **450** (2007) 1020
- Carretta, E. and Bragaglia, A. and Gratton, R. and Lucatello, S.: Na–O anticorrelation and HB. VIII. Proton-capture elements and metallicities in 17 globular clusters from UVES spectra. *A&A* **505** (2009) 139-155
- Catelan, M., Ferraro, F. R., & Rood, R. T.: Horizontal-Branch Models and the Second-Parameter Effect. IV. The Case of M3 and Palomar 3. *ApJ* **560** (2001) 970
- Cayrel, R. and Depagne, E. and Spite, M. and Hill, V. and Spite, F. and François, P. and Plez, B. and Beers, T. and Primas, F. and Andersen, J. and Barbuy, B. and Bonifacio, P. and Molaro, P. and Nordström, B.: First stars V - Abundance patterns from C to Zn and supernova yields in the early Galaxy. *A&A* **416** (2004) 1117–1138
- Chiba, M., & Beers, T. C.: Kinematics of Metal-poor Stars in the Galaxy. III. Formation of the Stellar Halo and Thick Disk as Revealed from a Large Sample of Nonkinematically Selected Stars. *AJ* **119** (2000) 2843

- Cohen, J.G. and Meléndez, J.: Abundances in a Large Sample of Stars in M3 and M13. *AJ* **129** (2005) 303–329
- Cohen, J.G. and Meléndez, J.: Outer Versus Inner Halo Globular Clusters: NGC 7492 Abundances. *AJ* **129** (2005) 1607–1615
- Da Costa, G.S., Ortolani, S. & Mould, J.: PAL 14 - an intermediate metal abundance globular cluster in the outer galactic halo. *ApJ*. **257** (1982) 633
- Dotter, A. and Sarajedini, A. and Yang, S.C.: Globular Clusters in the Outer Galactic Halo: AM-1 and Palomar 14. *AJ* **136** (2008) 1407–1414
- Harris, W. E., van den Bergh, S.: The distant globular clusters Palomar 14 and Palomar 15. *AJ* **89** (1984) 1816
- Hartwick, F. D. A.: The structure of the Galactic halo. *NATO ASIC Proc.* **207** (1987) 281
- Hilker, M.: Probable member stars of the gravitational theory-testing globular clusters AM 1, Pal 3 and Pal 14. *A&A* **448** (2006) 171
- Holland, S. and Harris, W.E.: A photometric study of the second parameter globular cluster Palomar 14. *AJ* **103** (1992) 131–141
- Ishigaki, M. and Chiba, M. and Aoki, W.: Chemical Abundances of Outer Halo Stars in the Milky Way. *PASJ* **62** (2010) 143
- Johnson, J.A.: Abundances of 30 Elements in 23 Metal-Poor Stars. *ApJS* **139** (2002) 219–247
- Jordi, K. and Grebel, E.K. and Hilker, M. and Baumgardt, H. and Frank, M. and Kroupa, P. and Haghi, H. and Côté, P. and Djorgovski, S.G.: Testing Fundamental Physics with Distant Star Clusters: Analysis of Observational Data on Palomar 14. *AJ*. **137** (2009) 4586–4596
- Kim, Y.C. and Demarque, P. and Yi, S.K. and Alexander, D.R.: The Y^2 Isochrones for α -Element Enhanced Mixtures. *ApJS*. **143** (2002) 499–511
- Kinman, T. D., Suntzeff, N. B., & Kraft, R. P.: The structure of the galactic halo outside the solar circle as traced by the blue horizontal branch stars. *AJ* **108** (1994) 1722
- Koch, A., Côté, P., & McWilliam, A.: All quiet in the outer halo: chemical abundances in the globular cluster Pal 3. *A&A* **506** (2009) 729–743
- Kurucz, R.L.: ATLAS12, SYNTH9, ATLAS9, WIDTH9, et cetera. *MSAIS* **8** (2005) 14
- Norris, J. E., & Ryan, S. G.: Population studies - Evidence for accretion of the galactic halo. *ApJ* **336L** (1989) L17
- Pritzl, B. J., Venn, K. A., & Irwin, M.: A Comparison of Elemental Abundance Ratios in Globular Clusters, Field Stars, and Dwarf Spheroidal Galaxies. *AJ* **130** (2005) 2140
- Reddy, B.E. and Tomkin, J. and Lambert, D.L. and Allende Prieto, C.: The chemical compositions of Galactic disc F and G dwarfs. *MNRAS* **340** (2003) 304–340
- Sarajedini, A.: Palomar 14: A Young Globular Cluster in the Outer Galactic Halo. *AJ* **113** (1997) 682–687
- Searle, L., Zinn, R.: Compositions of halo clusters and the formation of the galactic halo. *ApJ*. **225** (1978) 357–379
- Shetrone, M.D. and Côté, P. and Sargent, W.L.W.: Abundance Patterns in the Draco, Sextans, and Ursa Minor Dwarf Spheroidal Galaxies. *ApJ* **548** (2001) 592–608
- Venn, K.A. and Irwin, M. and Shetrone, M.D. and Tout, C.A. and Hill, V. and Tolstoy, E.: Stellar Chemical Signatures and Hierarchical Galaxy Formation. *AJ* **128** (2004) 1177–1195