

Düşük Kütleli X-ışını Çiftlerinden Aşırı Parlak X-ışını Kaynaklarına: Nötron Yıldızlarından Gözlenen Yarı Periyodik Salınımlar

M. Hakan Erkut^{1*}, K. Yavuz Ekşi¹

¹ İstanbul Teknik Üniversitesi, Fen-Edebiyat Fakültesi, Fizik Mühendisliği Bölümü, 34469 Maslak, İstanbul

Özet

Aşırı parlak X-ışını kaynakları (ULX) Hz/mHz yarı periyodik salınımlar göstermektedir. ULX popülasyonu içinde atım gösteren kaynakların sayısındaki artış ULX'lerin Eddington üstü hızlarda kütle yığıştıran nötron yıldızlarını içerebileceğini göstermiştir. Bu çalışmada düşük kütleli X-ışın çiftlerinde (LMXB) Eddington altı hızlarda kütle yığıştıran nötron yıldızları ile yüksek kütleli X-ışın çiftlerinde (HMXB) Eddington üstü hızlarda kütle yığıştıran nötron yıldızlarından gözlenen yarı periyodik salınımlar ortak bir manyetosfer disk etkileşimi modeli altında yorumlanmaktadır. Frekansları kHz civarında yarı periyodik salınım gösteren LMXB kaynakları ile frekansları birkaç Hz/mHz civarında yarı periyodik salınım gösteren HMXB kaynakları arasındaki en önemli farkın kütle aktarım hızına ek olarak nötron yıldızının yüzeyindeki dipol manyetik alanın yoğunluğu olduğu sonucuna varılmaktadır.

Anahtar Kelimeler: yığışma diskleri, nötron yıldızları, salınımlar, X-ışın çiftleri, ULX

1 Giriş

X-ışın çiftlerindeki nötron yıldızı ve karadeliklerden gözlenen yüksek enerjili ışınımın kaynağı, genellikle, yoğun cisme madde aktarımı sırasında açığa çıkan kütleçekimsel potansiyel enerjidir. Düşük kütleli X-ışın çiftleri (LMXB), Güneş kütleli veya daha düşük kütleli bir yıldızdan (geç tip normal bir yıldız ya da beyaz cüce gibi bir dejenere bileşen) Roche lob taşması sonucu madde yığıştıran nötron yıldızları ya da karadelikler içerir. Bir LMXB'de kütle aktarımı, yeterli açısal momentuma sahip maddenin yoğun cisim çevresinde yığışma diski oluşturması sonucu gerçekleşir.

İster karadelik ister nötron yıldızı barındırsın, LMXB'lerin X-ışın güç tayfında farklı zaman ölçeklerine karşılık gelen değişkenliklerin (periyodik olan/olmayan), yoğun cismin doğasına doğrudan bağlı olmayan süreçlerden kaynaklanması olasıdır. Özellikle, yarı periyodik salınım (QPO) ve periyodik olmayan genişbant yapılar gibi zamansal değişkenliklerin frekansları, nötron yıldızı ya da karadelik çevresinde yığışan akışkandaki karakteristik zaman ölçekleri ile belirleniyor olabilir. Hem nötron yıldızı hem de karadelik kaynaklarından gözlenen yüksek ve alçak frekanslı QPO'lar arasındaki frekans ilişkileri bu savı desteklemektedir (Psaltis et al. 1999).

Nötron yıldızı içeren LMXB'lerin güç tayflarında saptanan QPO'lar için frekans aralığı oldukça geniş olup $\nu_{\text{QPO}} \simeq 0.04 - 1300 \text{ Hz}$ olarak yazılabilir. Tayfsal sınıfları Z olarak da bilinen kaynaklarda $\sim 1 - 70 \text{ Hz}$ aralığında ortaya çıkan alçak frekanslı QPO'lara ek olarak yüksek frekanslı QPO'lar $\sim 200 - 1300 \text{ Hz}$ aralığında genellikle çiftler halinde keşfedilmiştir. X-ışın akısı ile kHz QPO frekansları kısa dönemde (\sim saatler) ilişkiliyken, uzun dönemde ($>$ gün) frekans-akı ilişkisi bozulur ve paralel olarak ortaya çıkar (van der Klis 2000). LMXB'lerdeki nötron yıldızlarının hemen hemen hepsinin zayıf manyetik alana ($B < 10^{10} \text{ G}$) sahip oldukları düşüncesi, bu kaynaklardan gözlenen QPO'ların kHz mertebesinde yüksek frekanslara ulaşması ile tutarlı gözlenmektedir. Çok alçak frekansta ($\sim 0.04 \text{ Hz}$) QPO gösteren 4U 1626–67 gibi bir LMXB'de ise nötron yıldızının

yüzeyindeki dipol manyetik alan yoğunluğu, ayrıklı olarak, yeterince yüksek değerde ($B \gtrsim 10^{12} \text{ G}$) beklenir (Erkut & Alpar 2004; Türkoğlu et al. 2017).

Karadelik içeren LMXB'lerin güç tayflarındaki QPO'lar için frekans aralığı $\nu_{\text{QPO}} \simeq 0.01 - 450 \text{ Hz}$ olup yüksek frekanslı ($\sim 40 - 450 \text{ Hz}$) QPO çiftlerinde frekans oranı ~ 1.5 olarak ölçülmüştür. QPO frekansı ve X-ışını akısı arasında herhangi bir ilişki bulunamamıştır (Remillard & McClintock 2006).

Nötron yıldızı veya karadelik içeren LMXB'lerin X-ışın parlaklıkları Eddington sınırını fazla aşmamaktadır ($L_X \lesssim L_E$). Bu nedenle, LMXB'lerdeki yoğun cisimlerin Eddington altı hızlarda madde yığıştırdığı düşünülmektedir. Bu çalışmada, Eddington altı hızlarda kütle aktarımı yapan LMXB'lerden gözlenen QPO'ları açıklamak amacıyla kurulmuş bir modeli, yüksek kütleli X-ışın çiftlerinde (HMXB) Eddington üstü hızlarda kütle aktarımı yaptığı düşünülen aşırı parlak X-ışını kaynakları (ULX) için uyarlamakta, böylece QPO gösteren bazı ULX'lerdeki olası nötron yıldızlarının yüzey dipol manyetik alan değerleri için kestirimlerde bulunmaktayız.

2 Yarı periyodik salınımlar ve sınır bölgesi modeli

İlk gözlem sonuçları yorumlandığında, nötron yıldızı içerdiği bilinen LMXB'lerdeki kHz QPO çiftlerinde iki QPO frekansı arasındaki farkın nötron yıldızının dönme frekansına yakın olabileceği ve kaynak başına QPO frekansları değişse de bu frekans farkının yaklaşık sabit bir değerde kalabileceği düşünülmüştür. Sonik nokta vuru frekansı modeli (Miller et al. 1998) olarak da bilinen bu yoruma göre, fark frekansı için $\Delta\nu = \nu_2 - \nu_1 \simeq \nu_*$ yazılabilir. Burada, kHz QPO çiftindeki üst ve alt kHz QPO frekansları, sırasıyla ν_2 ve ν_1 olup ν_* nötron yıldızının dönme frekansını göstermektedir.

Gözlemler ve gözlenen kaynak sayısı arttıkça iki kHz QPO frekansı arasındaki farkın, kaynak başına QPO frekansları değiştikçe sabit kalmadığı görülmüştür. QPO frekansları yeterince arttığında fark frekansı azalmaktadır (van der Klis 2000). Bu davranışı açıklamaya aday ilk model rölativistik yalpalama modelidir (Stella & Vietri 1998, 1999). Bu modele göre, kHz QPO frekansları için $\nu_2 = \nu_\phi$ ve $\nu_1 = \nu_\phi - \nu_r$ kullanılırken alçak

* mherkut@gmail.com

frekanslı QPO'lar için $\nu_L = \nu_\phi - \nu_\theta$ önerilmektedir. Burada, ν_ϕ , ν_r ve ν_θ , sırasıyla yörünge, radyal episklik ve düşey episklik frekanslarını göstermektedir. Frekans farkının gözlemlerle tutarlı davranışını açıklayan modellerden biri de sınır bölgesi modelidir (Alpar & Psaltis 2008; Erkut et al. 2008; Erkut 2011b). Sınır bölgesi modeli sadece nötron yıldızı içeren LMXB'lerdeki yüksek frekanslı QPO'ları açıklamaya çalışmaz, karadelik barındıran LMXB'lerdeki yüksek frekanslı QPO'ların frekans oranlarına da değinir (Erkut 2011a). En iç kararlı dairesel yörünge yakınında genlikçe büyüyen global hidrodinamik mod frekanslarının diskin ışınım akısı üzerinden ağırlıklı ortalaması hesaplandığında karadelik dönme parametresinin geniş aralığında ($0 < a \lesssim 1$) frekans band oranlarının $\nu_2/\nu_1 \sim 1.5$ olduğu durum $\nu_2 = \nu_\phi + \nu_r$ ve $\nu_1 = \nu_\phi$ seçimine karşılık gelmektedir (Erkut 2011a).

Sınır bölgesi modeline göre, nötron yıldızları çevresindeki disklerin en iç yörünge bölgesi yıldızın manyetik alanı (çoğunlukla dipol bileşen) ile etkileşir. Manyetosfer ile etkileşim yığılma diskinin nötron yıldızına yakın en iç bölgesini manyetik frenleme sonucu yavaşlatır ve Kepler altı bir sınır bölgesinin diskin iç yarıçapı komşuluğunda oluşmasına neden olur. Bu bölge içinde radyal episklik frekansı,

$$\nu_r = \nu_\phi \sqrt{4 + 2 \frac{d \ln \nu_\phi}{d \ln r}}, \quad (1)$$

Kepler altı yörünge frekansının radyal profili, yani $\nu_\phi(r)$ ile belirlenir. Nötron yıldızı içeren LMXB'lerden gözlenen kHz QPO frekansları için model $\nu_2 = \nu_r$ ve $\nu_1 = \nu_r - \nu_\phi$ önermektedir. Model yanbantlarını veren $\nu_{L,m} = \nu_r - m\nu_\phi$ ise alçak frekanslı QPO'lara azimutal dalga sayısının $m \geq 2$ değerleri için uygulanabilir (Erkut et al. 2008; Türkoğlu et al. 2017; Erkut et al. 2019).

Farklı nötron yıldızı kaynaklarının oluşturduğu LMXB kümesi için gözlenen kHz QPO frekansları (ν_1, ν_2) ile X-ışın parlaklıkları (L_X) arasında bir ilişkinin var olmadığı bilinmektedir (Ford et al. 2000). Güncel verilerin de eklenmesi ile en çok gözlemsel veriye sahip bulunan alt kHz QPO frekansı ν_1 ve L_X arasında herhangi bir ilişkinin var olmadığı Erkut et al. (2016) tarafından da doğrulanmıştır. Ancak, ν_1 ile kütle yığılma hızı (\dot{M}) veya yığılma hızına bağlı bir parametre ilişkili olabilir. Farklı kaynaklardaki nötron yıldızları için farklı kütle (M) ve yarıçap (R) değerleri, $L_X \simeq GM\dot{M}/R$ bağıntısında kullanılsa da ν_1 ve \dot{M} arasında bir bağ kurulamamıştır. Bununla birlikte, her kaynak için farklı manyetik alan değerleri denenirse ν_1 ile \dot{M}/B^2 arasında bir ilişkinin var olabileceği anlaşılmıştır (Erkut et al. 2016). Manyetosfer-disk etkileşiminde, \dot{M}/B^2 bağımlılığı olan Alfvén yarıçapının disk iç yarıçapını belirlediği düşünülürse, farklı kaynakların oluşturduğu küme için ν_1 ve \dot{M}/B^2 arasındaki olası ilişkinin varlığı anlaşılabilir. İlişki, LMXB'lerdeki nötron yıldızları için, sınır bölgesi modeli kapsamında, $B \approx 10^7 - 10^9$ G aralığını öngörmektedir.

Kaynak başına kHz QPO frekansları ve X-ışın akısı arasında var olan kısa vadeli (\sim saatler) ilişkiye karşın uzun vadede ($>$ gün) farklı ilişkilerin *paralel izler* biçiminde ortaya çıkması problemine de yine sınır bölgesi modelince bir açıklama getirilmiştir (Erkut & Çatmabacak 2017). Alt kHz QPO frekansı için model fonksiyon, $\nu_1 = \nu_r - \nu_\phi$ ifadesinde Denklem 1 kullanılarak inşa edilmiştir. Denklem 1 içinde yörünge frekansı, ν_ϕ , hidromanyetik sınır bölgesinin dönme dinamiği modellenerek bulunmuştur. Modellemede, Kepler altı sınır bölgesinin disk iç yarıçapı cinsinden radyal genişliğini gösteren δ parametresi önemli olup kütle yığılma hızına bağlıdır. Standart disk modeli (Shakura & Sun-

yaev 1973) sayesinde, δ için uzun vadede kaynağın ortalama \dot{M} evrimini veren durağan durum elde edilmiş ve gözlenen paralel izler sınır bölgesi modeli içinde sayısal olarak tekrar üretilmiştir. Bu izlerin, kaynağın uzun vadeli \dot{M} evriminde, ortalama δ değeri etrafında bulunan yarı durağan durumlara karşılık gelebileceği anlaşılmıştır. Paralel iz verileri üretilen her kaynak için, nötron yıldızının farklı M , R ve B değerleri taranarak $\delta \approx 0.01 - 0.3$ aralığının kaynaktan kaynağa fazla değişmediği görülmüştür (Erkut & Çatmabacak 2017).

3 Aşırı parlak X-ışını kaynakları

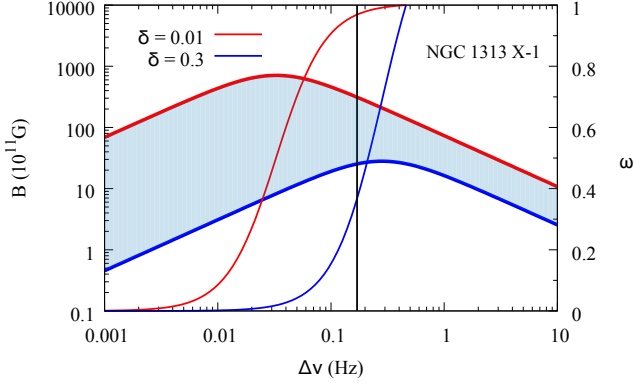
Çoğunlukla yakındaki yıldız oluşum galaksilerinde gözlenen ULX'ler, galaktik merkezin dışında bulunmalarına rağmen, X-ışın parlaklıkları eşyönlü ışına yapan Güneş kütleli bir cisim için Eddington parlaklık limitini fazlasıyla aşan ($L_X \gg L_E$) nokta kaynaklardır. Eşyönlü ışına ve $L_X \leq L_E$ varsayımı altında kütle yığılma yoğun cisimler için alt kütle limitleri $M \approx 10^2 - 10^4 M_\odot$ olarak kestirilmiş, bu nedenle orta kütleli karadeliklerin ULX'lerden gözlenen $L_X \simeq 10^{39} - 10^{41}$ erg s $^{-1}$ düzeyindeki ışımının kaynağı olduğu öne sürülmüştür (Colbert & Mushotzky 1999). ULX'lerden gözlenen QPO'ların rölativistik yalpalama modeli altında yorumlanması da orta kütleli karadelik çıkarımına götürmektedir (ör. Feng et al. 2010). Ancak, evrimsel senaryolara göre orta kütleli karadeliklerin, çoğunlukla, yaşlı sistemler olan küresel kümelerde ortaya çıkmaları beklenir. Oysa, ULX'lerin sıklıkla galaktik düzleme yakın yıldız oluşum bölgelerinde bulunmaları, bu kaynakların çoğunun genç sistemler olabileceğini göstermektedir. Bir ULX olan M82 X-2 kaynağında pulsar keşfedilmesi (Bachetti et al. 2014), aynı kaynak için, gözlenen QPO'lara dayanarak orta kütleli bir karadelik çıkarımının (Feng et al. 2010) ne kadar yanıltıcı olabileceğine en güzel örnektir.

ULX'lerin çoğu genç sistemler ise, bu kaynaklar, Eddington üstü hızlarda kütle yığılma ve eşyönsüz ışına yapan yıldız kütleli karadelik (ör. King et al. 2001) ya da yüksek manyetik alana sahip nötron yıldızı (ör. Ekşi et al. 2015) barındıran HMXB'ler olabilir. Yüksek manyetik alanlar nötron yıldızları için kritik parlaklığın (Eddington limitinin) artmasına da yardımcı olurlar. M82 X-2 kaynağından sonra diğer birkaç ULX'de de X-ışını pulsarı saptanınca, ULX popülasyonu içinde nötron yıldızlarının yaygın olabileceği düşünülmüştür. Pulsasyon saptanamayan ULX'lerde ise, Eddington üstü hızlarda yığılma kütlelenin önemli bir kısmının disk dışına atılması sonucu oluşan optik açıdan kalın ortam, nötron yıldızından gelen periyodik sinyali süpürüyor olabilir (Ekşi et al. 2015).

Pulsasyon görülsün veya görülmesin, güç tayfında QPO gösteren tüm ULX'lerde Eddington üstü hızlarında kütle yığılma nötron yıldızları olduğu varsayılırsa, özellikle birden fazla QPO gösteren ULX'ler için sınır bölgesi modeli (Bölüm 2) kullanılarak nötron yıldızı yüzeyindeki dipol manyetik alanın yeğinliği tahmin edilebilir (Erkut et al. 2019). Eğer bir nötron yıldızı çevresinde, Eddington üstü hızlarda kütle aktarımı yapan bir yığılma diski varsa, hüzmelenme oranı $b < 1$ olmak üzere, eşyönsüz ışına koşulu ($L_X = 4\pi d^2 b F_X$) altında bu diskin iç yarıçapı

$$R_i = \left(\frac{\sqrt{GM} B^2 R^4 \delta}{4\pi d^2 b F_X} \right)^{2/5} \quad (2)$$

şeklinde ifade edilebilir (Erkut et al. 2019). Burada, B kütleli M ve yarıçapı R olan nötron yıldızının yüzeyindeki manyetik dipol alan şiddetini, d ULX kaynağına olan uzaklığı, F_X kaynağın



Şekil 1. NGC 1313 X-1 kaynağındaki olası nötron yıldızının yüzey dipol manyetik alan yoğunluğunun (sol düşey eksen ve taralı bölge) ve hızlılık parametresinin (sağ düşey eksen ve ince eğriler) $\Delta\nu$ ile değişimi. Düşey doğru gözlenen QPO'lerden kestirilen fark frekansdır (Erkut et al. 2019).

X-ışın akısını ve β hüzmelenme oranını belirleyen geometrik bir faktörü göstermektedir. Bu çalışmada, $\beta = 1$ alınmakta ve sınır bölgesinin boyutsuz radyal genişliği için $\delta = 0.01 - 0.3$ aralığı benimsenmektedir (Bölüm 2). Disk iç yarıçapı ve bu yarıçaptaki Kepler frekansını birbirine bağlayan $R_1^3 = GM/(2\pi\nu_K)^2$ ifadesi Denklem 2 ile birlikte kullanılırsa, $B \propto \nu_K^{-5/6}$ olduğu görülür. Sınır bölgesi modeline göre (Bölüm 2), $m \geq 0$ için $\nu_{\text{QPO}} = \nu_r - m\nu_\phi$ yazılabilir. Episiklik frekans, diskin iç yarıçapındaki fark frekansı ($\Delta\nu = \nu_\phi$), sınır bölgesi genişliği ve Kepler frekansının fonksiyonu olarak $\nu_r = f(\Delta\nu, \delta, \nu_K)$ şeklinde yazılabilir. Böylece, Kepler frekansı cinsinden ifade edilen ν_{QPO} ile B birbirine bağlanmış olur. Bu analizin bir özeti olarak Şekil 1, beklenen δ aralığı içinde, bir ULX olan NGC 1313 X-1'deki olası nötron yıldızının yüzeyindeki dipol manyetik alan yoğunluğunu (sol düşey eksen ve taralı bölge) farklı $\Delta\nu$ değerleri için göstermektedir. Hızlılık parametresinin ($\omega \equiv \Delta\nu/\nu_K$) aynı δ aralığının uç değerlerinde $\Delta\nu$ ile nasıl değiştiği ise Şekil 1 içinde sağ eksenle okunabilir. Düşey doğru, kaynaktan gözlenen QPO'lerden kestirilen fark frekansına karşılık gelmektedir. Bu doğrunun taralı bölgeyi kestiği kısım NGC 1313 X-1'deki olası nötron yıldızı için tahmini $B \simeq (0.3 - 3) \times 10^{13}$ G aralığını verir (Erkut et al. 2019).

4 Sonuç

NGC 1313 X-1 kaynağına ek olarak birden fazla QPO gösteren diğer ULX'ler için de Şekil 1 benzeri sonuçlar elde edilmiş ve nötron yıldızı yüzeyindeki manyetik dipol alan yoğunlukları M82 X-1 için $B \simeq (0.5 - 6) \times 10^{12}$ G, M82 X-2 için $B \simeq (0.1 - 1) \times 10^{13}$ G, ULX NGC 628 için $B \simeq (1.5 - 50) \times 10^{14}$ G ve NGC 5408 X-1 için $B \simeq (0.5 - 30) \times 10^{13}$ G aralığında tahmin edilmiştir (Erkut et al. 2019). Genel olarak, ULX'lerden gözlenen QPO frekansları bu kaynaklardaki olası nötron yıldızları için, sınır bölgesi modeli kapsamında, $B \approx 10^{12} - 10^{15}$ G aralığını işaret ederken, LMXB'lerde QPO gösteren nötron yıldızı kaynakları için aynı model $B \approx 10^7 - 10^9$ G öngörmektedir. ULX'lerin çoğu Eddington üstü hızlarda kütle aktarımı gerçekleştiren HMXB'lerdeki nötron yıldızları olabilir. Genç sistemler olan ULX'lerin modellenmesinde hüzmelenme oranı ve Eddington üstü rejim mutlaka hesaba katılmalıdır. Nötron yıldızı veya karadelik içeren LMXB'ler yaşlı sistemler olup genellikle Eddington altı hızlarda kütle yığıstırırlar. Eddington üstü veya altı rejimde olsun nötron yıldızlarından gözlenen

QPO'lar manyetosfer-disk etkileşimine dayanan sınır bölgesi modeli altında anlaşılabilir. Alçak frekanslarda (mHz) QPO gösteren ULX'ler ile yüksek frekanslı (kHz) QPO'ların kaynağı olan LMXB'ler arasındaki en önemli ayırt edici özelliğin kütle aktarım hızına ek olarak nötron yıldızının yüzeyindeki dipol manyetik alanın yoğunluğu olabileceği görülmüştür.

Kaynaklar

- Alpar M. A., Psaltis D., 2008, MNRAS, 391, 1472
 Bachetti M., Harrison F., Walton D., Grefenstette B., Chakrabarty D., et al., 2014, Nature, 514, 202
 Colbert E. J. M., Mushotzky R. F., 1999, ApJ, 519, 89
 Ekşi K. Y., Andaç İ. C., Çıkıntoğlu S., Gençali A. A., Güngör C., Öztekin F., 2015, MNRAS, 448, L40
 Erkut M. H., 2011a, ApJ, 743, 5
 Erkut M. H., 2011b, American Institute of Physics Conference Series, 1379, 103
 Erkut M. H., Alpar M. A., 2004, ApJ, 617, 461
 Erkut M. H., Çatmabacak O., 2017, ApJ, 849, 58
 Erkut M. H., Psaltis D., Alpar M. A., 2008, ApJ, 687, 1220
 Erkut M. H., Duran Ş., Çatmabacak Ö., Çatmabacak O., 2016, ApJ, 831, 25
 Erkut M. H., Ekşi K. Y., Alpar M. A., 2019, ApJ (dergiye gönderilecek)
 Feng H., Rao F., Kaaret P., 2010, ApJL, 710, L137
 Ford E. C., van der Klis M., Méndez M., Wijnands R., Homan J., Jonker P. G., van Paradijs J., 2000, ApJ, 537, 368
 King A. R., Davies M. B., Ward M. J., Fabbiano G., Elvis M., 2001, ApJL, 552, L109
 Miller M. C., Lamb F. K., Psaltis D., 1998, ApJ, 508, 791
 Psaltis D., Belloni T., van der Klis M., 1999, ApJ, 520, 262
 Remillard R. A., McClintock J. E., 2006, ARA&A, 44, 49
 Shakura N. I., Sunyaev R. A., 1973, A&A, 24, 337
 Stella L., Vietri M., 1998, ApJL, 492, L59
 Stella L., Vietri M., 1999, Physical Review Letters, 82, 17
 Türkoğlu M. M., Özsükan G., Erkut M. H., Ekşi K. Y., 2017, MNRAS, 471, 422
 van der Klis M., 2000, ARA&A, 38, 717

Erişim:

031-0920: UAK-2018 Program — UAK Bildiri — Turkish J.A&A.