

DÖNEN KARA DELİKLERDE ENERJİ AKTARIM SÜREÇLERİ

İsmail ÖZBAKIR

Ege Üniversitesi Fen Fakültesi Astronomi ve Uzay Bilimleri Bölümü, Bornova / İZMİR
ozbakir.ismail@gmail.com

Özet: Kara delikler bugün varlıkları geniş bilimsel çevrelerce kabul gören ve aktif gökada çekirdekleri gibi çok yüksek enerjili süreçlerde anahtar rol üstlendikleri düşünülen astrofiziksel yapılardır. Dönen kara deliklerin, çevrelerindeki madde ve alanlarla etkileşime girerek dönme enerjilerini aktarmasıyla ilgili fikirler, onları daha da ilginç kılmaktadır.

Bu bildiri özeti, mevcut süreçler ve bizim bu konu hakkındaki amaçlarımız ile ilgilidir.

1. Giriş

Kara deliklerin dönme enerjileriyle ilgili çalışmalar Penrose'un teorik olarak bulduğu mekanizma ile başladı [1]. Penrose mekanizmasına göre ergosfere giren parçacık burada ikiye bölünür. Ergosferdeki yörüngeler negatif enerjili olduğundan bölünen parçacıklardan biri negatif enerjili diğeri pozitif enerjili olur. Negatif enerjili olan kara deliğe düşerken pozitif enerjili parçacık ergosferden dışarıya kaçar. Sonuç olarak kaçan parçacık, bölünmeye uğramadan önceki parçadan daha çok enerjiye sahip olur. Böylelikle dönen kara deliğin dönme enerjisi aktarılmış olur.

Daha sonra yapılan çalışmalarda böyle parçacık etkileşimlerinin astrofiziksel koşullar altında çok nadir olduğu anlaşıldı. Dolayısıyla Penrose sürecinin etkin olmadığı ortaya çıktı [2]. Ayrıca S. Chandrasekhar, bu mekanizmanın etkinliğinin, parçacıkları gözlenen rölativistik hızlara çıkarmakta yetersiz kaldığını göstermiştir [3].

Dönen kara deliklerin çevresindeki elektromanyetik alanlar ile etkileşerek enerji aktarabileceği ile ilgili fikirler, Goldreich ve Julian'ın 1969 daki çalışmaları ile başladı [4]. Onlar, dönme eksenini ile çift kutuplu manyetik eksenini hizalanmış olan nötron yıldızlarının vakum elektrodinamik çözümlerini analiz ettiler. Buldukları sonuca göre dönmeye indüklenmiş elektrik alan, yıldızın yüzeyindeki yüklü parçacıkları sökmeye yetecek kadar güçlü oluyordu. Böylelikle yıldızın çevresi plazma ile doluyordu.

Oluşan manyetosferi tanımlamak için force-free yaklaşımını kullandıklarında, elektromanyetik olarak yönetilen plazma rüzgarının yıldızın dönme enerjisini ve açısal momentumunu dışarıya taşıyabildiğini fark ettiler.

Nötron yıldızlarında yapılan çözümler düz uzay-zaman geometrisine bağlıydı. R.M. Wald, 1974 yılında Kerr metriği üzerinde vakum Maxwell denklemlerinin parçalı çözümlerini bularak olaya yeni bir bakış açısı getirdi [5]. Bu çözüm, kara delikten çok uzakta dönme eksenine paralel tek düze bir manyetik alan tanımlıyordu. Bununla birlikte deliğin yakınında güçlü bir elektrik alan da tanımlamaktaydı. Gravitasyonel olarak indüklenen bu elektrik alanın önemli bir bileşeni manyetik alan boyunca oluşuyordu. Bu türden daha güçlü manyetik alanların, kara deliklerin toplanma disklerinde üretildikleri Bisnovatyi-Kogan ve Ruzmaikin 1976 da önerildi [6].

2. Blandford-Znajek Süreci

Roger Blandford ve Roman Znajek 1977 de, dönen kara deliklerin çevrelerindeki uzayın elektromanyetik alanlar ile yönlendirilen plazma akıntıları ile dolu olduğunu düşündüler. Dönen nötron yıldızları için var olan vakum elektrodinamik çözümleri ile Kerr kara delikleri için yapılan vakum çözümler arasındaki benzerliklerden yararlanarak manyetik kökenli yeni bir enerji aktarım süreci önerdiler [7].

Dahası, tipik astrofiziksel koşullar altında vakum çözümlerinden bol miktarda yüklü parçacığın çift oluşum süreciyle üretildiklerini önerdiler. Daha sonra kara deliklerin genel bir kuramı olan *eksenel-simetrik durağan-hal force-free* yaklaşımını geliştirdiler. Ayrıca tek manyetik kutuplu yavaş dönen kara deliklerin pertürbasyon çözümünü buldular. Bu çözümün temeli, olay ufku üzerine uygulanan Znajek'in sınır koşullarına dayanmaktadır [8]. Blandford-Znajek sürecinde başlangıç koşulu olarak

kara deliğin etrafında manyetik alana bağlı olmayan parçacıklar söz konusudur. Böyle bir manyetosfere *force-free manyetosfer* denilmektedir. Bunu matematiksel olarak aşağıdaki gibi gösterebiliriz:

$$B^2/4\pi \gg \rho c^2$$

burada B ve ρ sırasıyla manyetik alan ve yük yoğunluğudur [9].

Blandford ve Znajek, analizlerinde kovaryant elektrodinamik denklemlerden yararlanarak, elektromanyetik alan tensörünün ve dörtlü-potansiyelin bileşenlerini işlemlerinde kullandılar.

Bu mekanizmaya göre sürüklenmeye uğrayan manyetik alan çizgileri kara deliğin dönme enerjisini, dışa yönelmiş *Poynting* vektörleri biçiminde ve elektron-pozitron çift oluşumları ile aktarır. Buna göre toplam üretilen güç [10],

$$P \approx 10^{45} \text{ erg s}^{-1} \left(\frac{a}{M} \frac{M}{10^9 M_\odot} \frac{B}{10^4 G} \right)^2$$

ile ifade edilebilir.

Beklenildiği gibi bu çözüm, yönü dışarıya doğru olan elektromanyetik enerji akıları ve açısız momentumu tanımlıyordu. Elektromanyetik mekanizmayla aktarılan bu enerji oldukça güçlü olup, enerjik radyo gök adaları ve kuazarları açıklamak için gereken yüksek enerjiyi karşılıyordu.

Blandford-Znajek sürecinin önemli avantajlarından biri, özellikle aktif gök adalarda oluşan jet benzeri yapıları gözlemlerle uyumlu olarak açıklayabilmesidir. Dolayısıyla bu sürecin, enerji aktarım süreçleri arasında en olası mekanizma olduğu düşünülmektedir.

Dönen kara deliğin çevresindeki toplanma diskinin ürettiği manyetik alan ile kara deliğin çerçeve sürüklenmesine (*frame dragging*) neden olduğu uzay arasındaki etkileşimi temel alan bir mekanizma üzerine kurulu olan teori, birçok araştırmacı tarafından günümüzde de aktif olarak çalışılmaktadır.

3. Sonuç

Kara deliklerden enerji aktarım süreçleri ile ilgili daha ileri çalışmalar arasında, manyetik yeniden birleşme süreçleri (*magnetic reconnection*) ile ilişkilendirmeler de yer almaktadır [11]. Son yıllarda gözlemsel olarak yapılan çalışmalarda toplanma disklerindeki demir çizgilerinin yapısına bakılarak, kara deliğin açısız momentumu hakkında bilgi türetilmektedir [12]. Teorik olarak yapılan çalışmalarda ise 3D –GRMHD simülasyonlar ile bu mekanizmalar araştırılmaktadır [13].

Bu bildiri, yüksek lisans tez konu başlığı olarak mevcut süreçleri irdelediğimiz çalışmanın özeti niteliğindedir. Ayrıca bu çalışma sonunda olası yeni süreçler önerilebilir.

Not: Bu çalışma *Tübitak 111T270 nolu proje* tarafından desteklenmektedir.

4. Kaynaklar

- [1] Penrose R., 1969, Rev.Nuovo Cim., 1, 252
- [2] Bardeen J.M., Press W.H., Teukolsky S.A., 1973, ApJ, 178, 347
- [3] S. Chandrasekhar, Mathematical Theory of Black Holes (Oxford University Press, 1983)
- [4] Goldreich P. and Julian W.H., 1969, Astropys.J., 157, 869
- [5] Wald R.M., 1974, Phys.Rev D, 10(6), 1680
- [6] Bisnovaty-Kogan G.S., Ruzmaikin A.A., 1976, Astrophys.Sp.Sci., 42, 401
- [7] R. D. Blandford and R. L. Znajek, Mon. Not. R. Astr. Soc. 179:433-456 (1977)
- [8] Znajek B.L., 1977, MNRAS, 179, 457
- [9] J.H. Krolik AIP Conf. Proc. 556, pp. 10-22 (2000)
- [10] M. Vietri, Foundations of High-Energy Astrophysics (2008)
- [11] Koide S., and Arai K., Apj. 682:1124-1133 (2008)
- [12] Reynolds et. al. PASP 112, 1145 (2000)
- [13] B. Punsly, Black Hole GravitoHydromagnetics (Astrophysics and Space Science Library) Springer (2008)