Kara Delik Bombası

Dr. Mahir E. Ocak [*TÜBİTAK Bilim ve Teknik Dergisi*

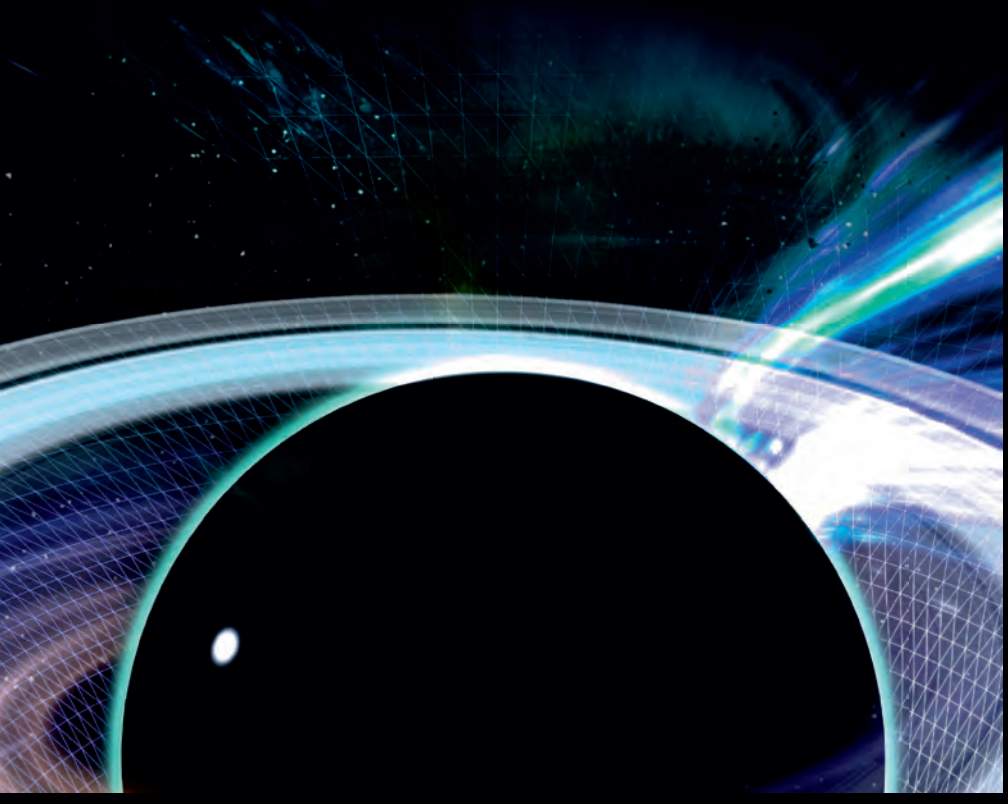
Kuramsal fizikçilerin 1960'lar ve 1970'lerde yaptığı çalışmalar kara deliklerden yüksek miktarda enerji elde etmek için yararlanılabileceğini göstermiş ve hatta bu durumdan faydalanarak "kara delik bombaları" üretilebileceği iddia edilmişti. Bir grup araştırmacı, kara delik bombalarının enerji kaynağı olan süperışıma mekanizmasını laboratuvar ortamında gerçeğe dönüştürdü. Kara delik bombalarının askerî amaçlar için değil bilimsel araştırmalar için yararlı olması bekleniyor.

blackdovfx / iStock

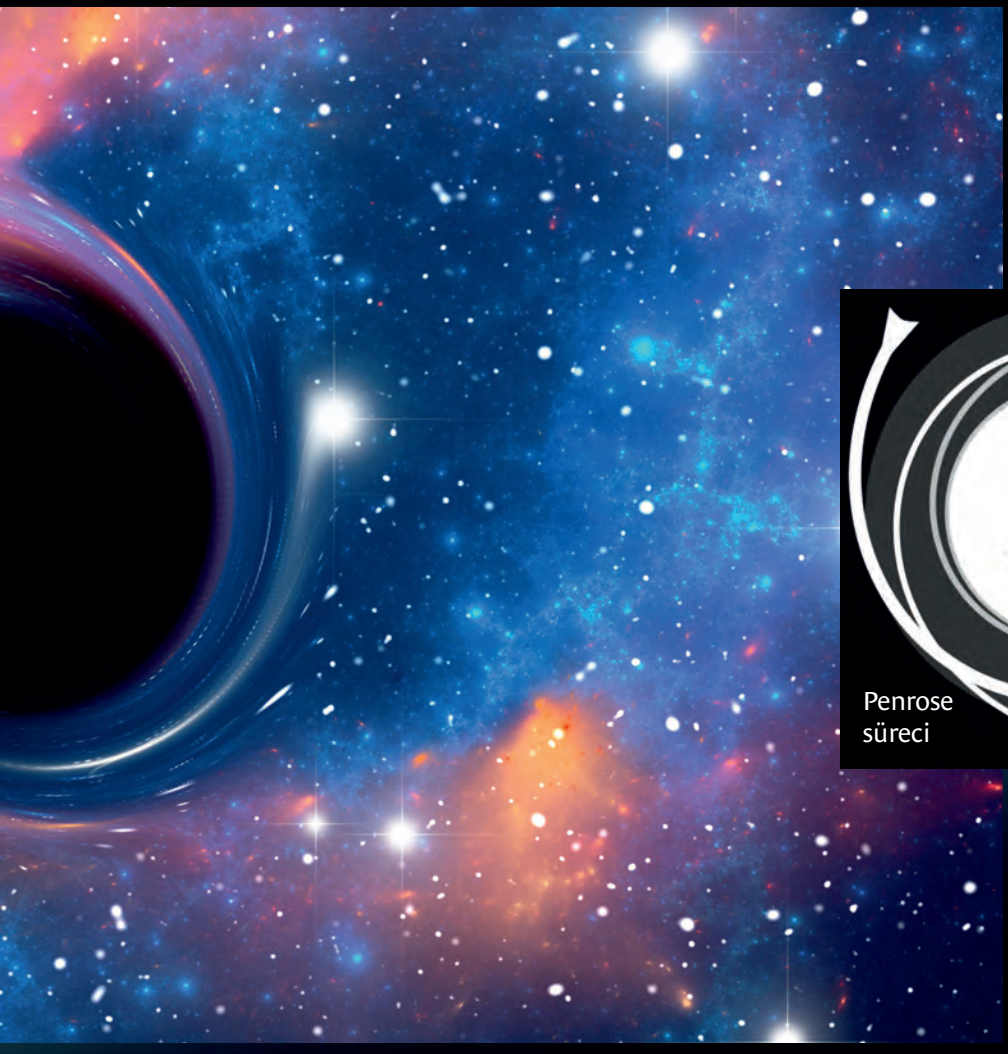
Kara Deliklerden Enerji Elde Etmek

Kara delikler gezegenler, yıldızlar ve diğer gök cisimlerine kıyasla hayli basit gök cisimleridir. Kütle, elektrik yükü, açısal momentum ile ilgili birkaç sayı, bir kara deliğin bütün özelliklerini ifade etmek için yeterlidir. Bir kara deliği diğer gök cisimlerinden ayıran en temel özellikse etraflarında bir olay ufku oluşmasıdır. Kara deliği çevreleyen bu hayalî yüzeyin üzerinde kara deliğin çekiminden kurtulmak için ulaşılması gereken hız ışık hızına eşittir. Hiçbir parçacığın ışıktan daha hızlı hareket etmesi mümkün olmadığı için bir kez olay ufkunu geçip kara deliğin içine düşen bir cisim bir daha olay ufkunun dışına çıkmayı başaramaz ya da olay ufkunun dışına sinyal gönderemez.

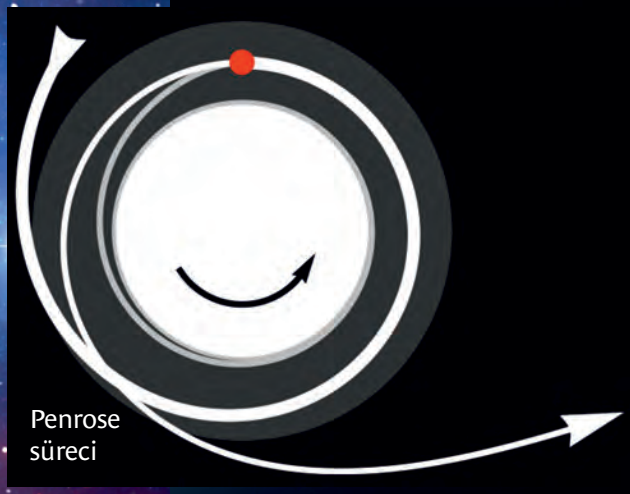
Söz konusu spini ve elektrik yükü 0 olan (kendi etrafında dönmeyen ve yüksüz) kara delikler olduğunda olay ufkunun şekli küreseldir, yarı çapı ise $r_S=2GM/c^2$'ye eşittir. Bu eşitlikte G kütle çekim sabitini, M kara deliğin kütlesini, c ise ışık hızını ifade eder. Bu yarıçap ifadesi, genel görelilik kuramının geliştirilmesinden sadece bir yıl sonra Karl Schwarzschild'ın kendi etrafında dönmeyen küresel cisimler için bulduğu Einstein alan denklemlerinin çözümlerinden türetilir. Bu yüzden spini 0 olan kara delikler Schwarzschild kara delikleri, bu kara deliklerin olay ufkunun yarıçapı ise Schwarzschild



Ramon Andrade 3dciencia / SPL



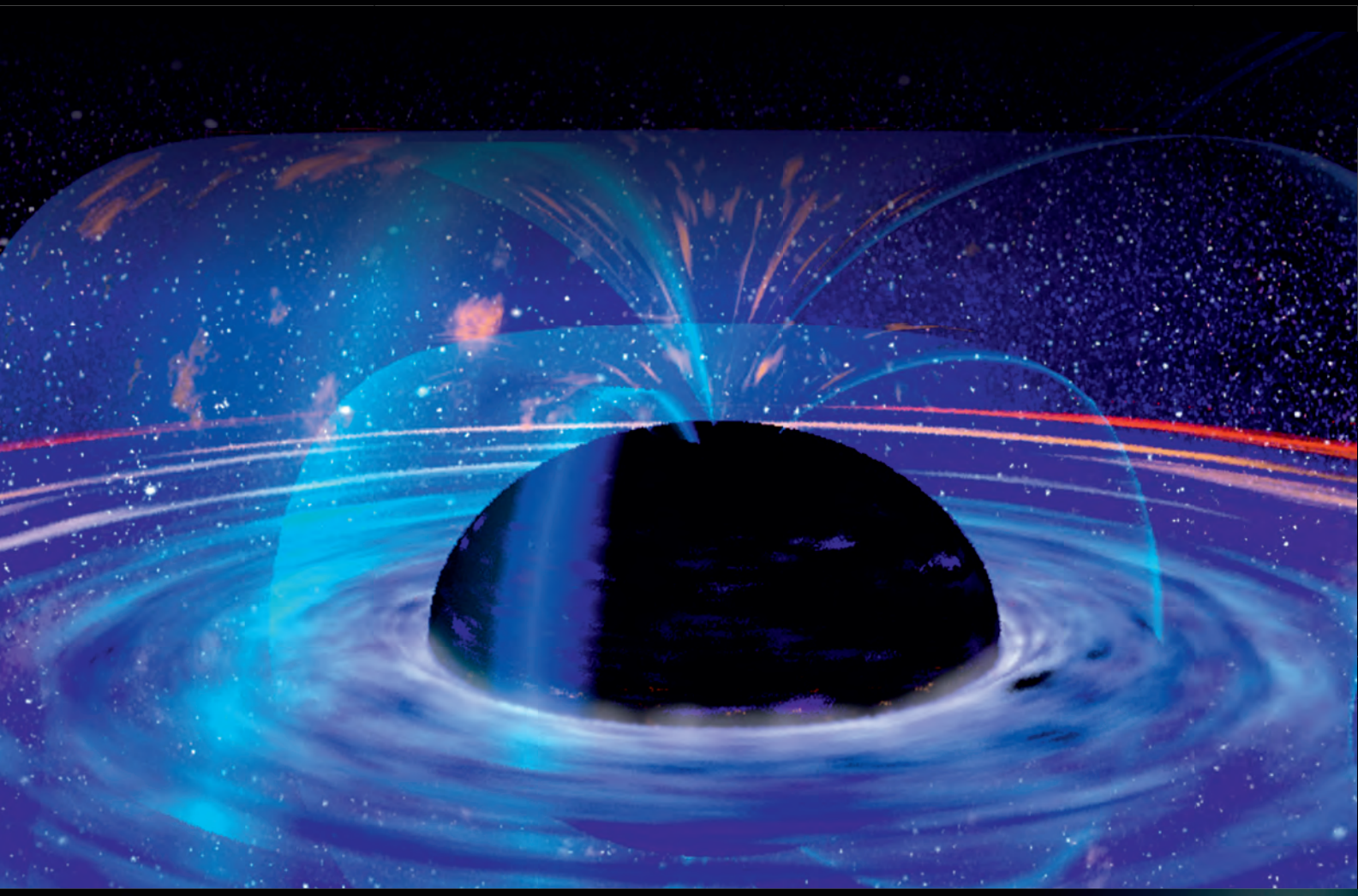
Pasieka / SPL



L3erdnik, CC BY-SA 4.0, https://creativecommons.org/licenses/by-sa/4.0, via Wikimedia Commons

yarıçapı olarak adlandırılır. Söz konusu kendi etrafında dönen ve yüksüz gök cisimleri olduğunda ise Einstein alan denklemlerinin çözümünü bulan Roy Kerr oldu. Kerr'in 1963 yılında bulduğu çözümlerin betimlediği kara deliklerin civarındaki uzay zamanın yapısı Schwarzschild kara deliklerine kıyasla daha karmaşıktır. Kerr kara deliklerinin olay ufkunun şekli mükemmel bir küre gibi değil, yayvandır. Olay ufku yüzeyinin kara deliğin merkezine uzaklığı ise GM/c^2 ile $2GM/c^2$ arasında değişir. Bu mesafe kara deliğin ekvatorunda maksimum, kutuplarında ise minimumdur.

Hareket eden herhangi bir kütlenin etrafında oluşturduğu kütle çekim alanının durağan bir kütlenin etrafında oluşturduğu kütle çekim alanından önemli bir farkı vardır. Hareket eden elektrik yüklerinin etrafında oluşturduğu manyetik alana giren elektrik yüklerinin dönmeye (hareket yönünü değiştirmeye) başlamasına benzer biçimde hareketli kütlelerin etrafında oluşturduğu kütle çekim alanına giren kütleler de dönme hareketi yapmaya başlar. Lens-Thirring olayı olarak adlandırılan bu olgu Kerr kara delikleri için de geçerlidir. Ancak çekimlerinden ışığın bile kurtulamadığı bu gök cisimleri için Lens-Thirring etkisi o kadar güçlüdür ki Kerr kara deliklerinin olay ufkunun dışında ergoküre olarak adlandırılan bir bölge bulunur. Ergokürenin içine giren bir cismin, dışarıdan bakan bir gözlemci tarafından hareketsiz olarak gözlemlenebilmesi için ışıktan daha hızlı hareket edebilmesi gerekir.



Nasa / SPL

Dolayısıyla ergokürenin içindeki tüm nesneler bir dış gözlemciye göre durmaksızın hareket eder. Ergokürenin dış yüzeyindeki bir ışık ışını ise bir dış gözlemciye göre hareketsiz kalır.

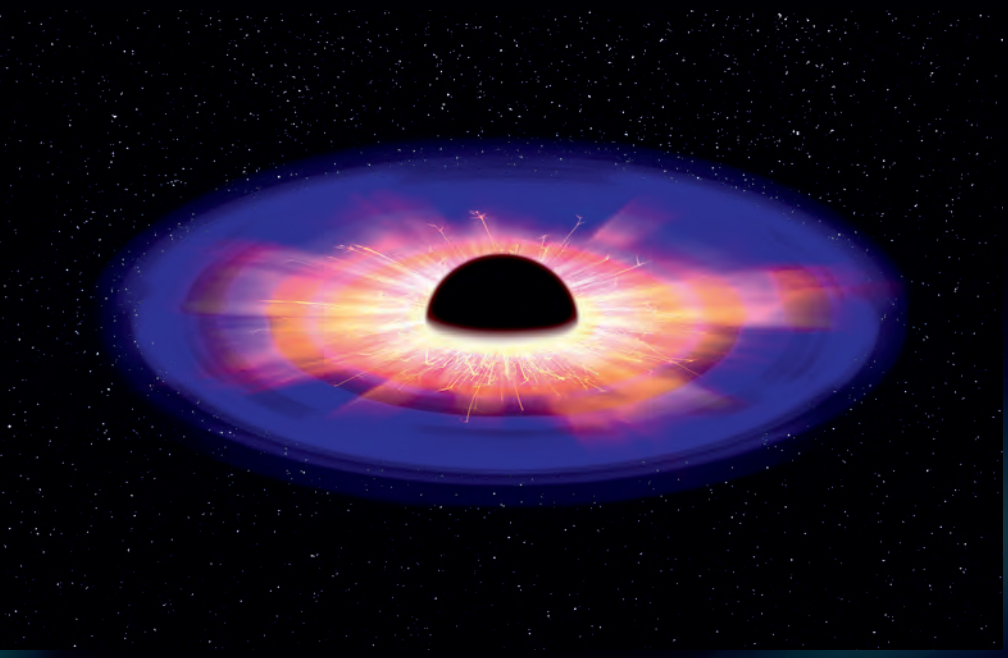
Ergo kelimesi eski Yunancada "iş" anlamına gelir. Ergokürenin sıra dışı bir özelliği de içine giren parçacıklar üzerinde iş yapabilmesi, başka bir deyişle parçacıklara enerji kazandırabilmesidir.

İlk olarak Roger Penrose tarafından 1971 yılında dikkat çekilen bu süreç, örneğin şu şekilde gerçekleşebilir: Bir nesne kara deliğin ergoküresinin içine girip kara delikle beraber dönmeye başladıktan sonra dönme yönüne ters yönde bir parça fırlatır. Dışarıdan bakan bir gözlemciye göre fırlatılan parça da ergokürenin içinde olduğu için kara delikle aynı yönde dönmeye devam eder. Orijinal nesneden geriye kalan parça hız kazanarak kara delikten uzaklaşır. Fırlatılan parça ise kara deliğin içine düşer. Sonuç olarak orijinal nesneden geriye kalanlar enerji kazanarak ergokürenin dışına çıkarken kara delik enerji ve açısal momentum kaybeder.

Kara Delik Bombası

Penrose süreci, bir kara delikten enerji kaynağı olarak yararlanılabileceği anlamına gelir. Üstelik bu durum sadece madde parçacıkları için geçerli değildir. Kara delikler süperışıma olarak adlandırılan bir süreçle üzerlerine düşen elektromanyetik dalgaları da yükseltgeyebilir.

İlk kuramsal çalışmaların yapıldığı dönemde fizikçilerin gerçek kara deliklerde süperışımanın nasıl gözlemlenebileceği hakkında bir fikri yoktu. Ancak 1971 yılında Rus araştırmacı Yakov Zel'dovich, süperışıma ile enerji elde edilebilecek tek fiziksel nesnenin kara delikler olmadığını gösterdi. Zel'dovich'in çalışmalarına göre kendi etrafında dönen, bir eksen etrafında simetrik ve elektromanyetik dalgaları soğuran herhangi bir nesnenin



Victor De Schwanberg / SPL

süperışıma yoluyla enerji yayması mümkündü. Örneğin bir metal silindir belirli koşullar altında süperışıma yapabilirdi. Bunun gerçeğe dönüşmesi için gerekli koşul ise elektromanyetik dalgaları soğuracak nesnenin dönme hızının ışık ışınının frekansı ve orbital açısal momentumu tarafından belirlenen bir değerden daha büyük olmasıydı. Bu koşul sağlandığında kendi etrafında dönen nesnenin soğurma katsayısı işaret değiştirecek, nesne elektromanyetik radyasyonu soğurmak yerine yükseltgemeye başlayacaktı.

Zel'dovich'in bir sonraki başarısı, superışımanın boşlukta da meydana gelebileceğini göstermesi oldu. Kuantum fiziği, fiziksel boşluğun adının ima ettiğinin aksine boş olmadığını, sanal parçacıkların durmaksızın oluşup yok olduğunu söyler. Zel'dovich'in çalışmasına göre bir kara deliğin ya da bir metal silindirin civarında meydana gelen bu vakum salınımları da süperışımaya sebep olabilirdi.

Kuramsal hesaplara göre vakum salınımlarından kaynaklanan ışıma o kadar küçük olacaktı ki gözlemlenmesi çok zordu. Zel'dovich, ışımanın gözlemlenmesini kolaylaştırmak için kendi etrafında dönen nesnenin (kara delik ya da metal silindir) aynalarla çevrelenebileceğini öne sürdü. Aynalar dönen nesneden yayılan ışımayı yeniden nesnenin üzerine yönlendirecek böylece ışınlar tekrar tekrar yükseltgenerek gözlemlenebilecek yoğunluğa ulaşacaktı. Bir süre sonra William Press ve Saul Teukolsky, böyle bir düzenekte birikecek aşırı yüksek enerjinin bir patlamaya yol açabileceğini fark etti ve bu tür düzeneklere "kara delik bombası" adını verdi. Ancak aynaların içinde biriken enerjinin kaynağı kendi etrafında dönen nesne olduğu için kara deliğin ya da metal silindirin başlangıçta sahip olduğu enerji miktarına bağlı olarak bir patlama meydana gelmeden süperışımanın sonlanması da mümkündü.

Deneysel Çalışmalar

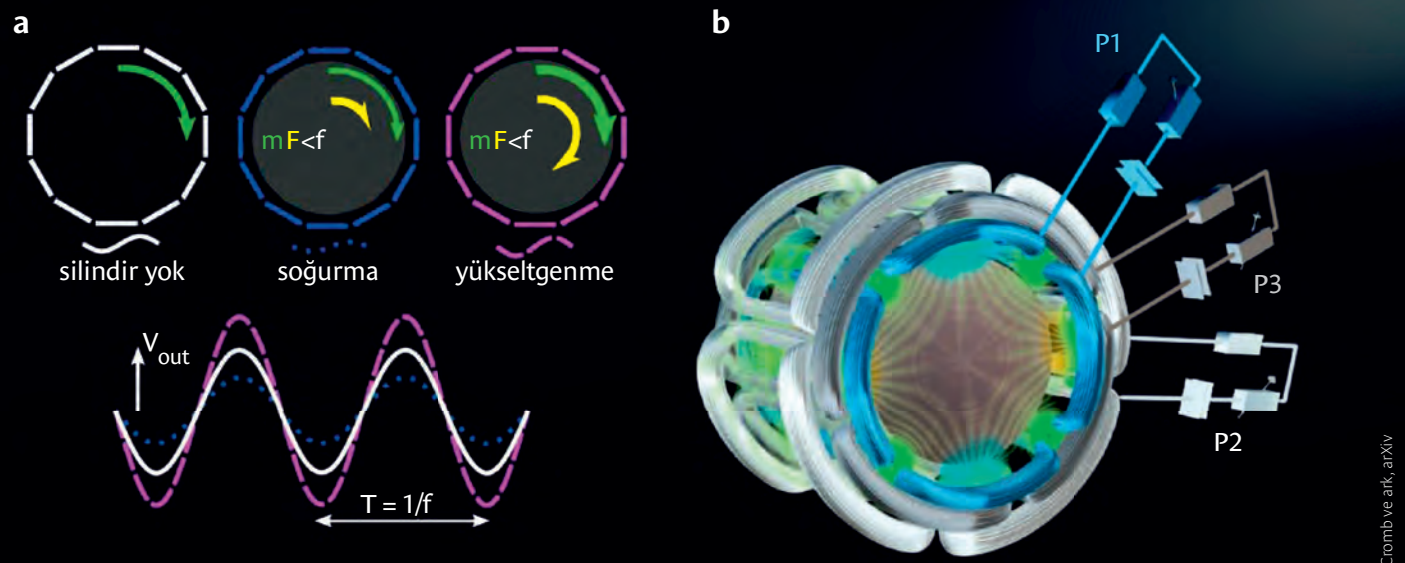
İngiltere'deki Southampton Üniversitesinden Hendrik Ulbricht ve arkadaşları yakın zamanlarda laboratuvar ortamında kara delik bombasını gerçeğe dönüştürdü. Araştırmacılar, metal silindirler ile yaptıkları deneylerde elektromanyetik süperışımayı gözlemlemeyi başardı.

Kara delik bombasının üretilmesine giden yolda en önemli aşama, süperışımanın gözlemlenebileceği koşulların nasıl oluşturulabileceğinin anlaşılması oldu: Araştırmacılar,

dalgalı akım devreleri kullanarak ışık ışınlarının özelliklerini deneyler sırasında metal silindirlerin ulaşabildiği dönme hızına uygun biçimde ayarlamayı başardı. Geliştirilen düzeneğin basit bir yapısı var: Kendi etrafında dönebilen metal silindirin yanı sıra bir indüksiyon motoru ile kapasitör ve dirençlerden oluşuyor. Metal silindirin etrafında yerleştirilen elektronik cihazlar hem manyetik alan oluşturarak elektromanyetik dalgaların üretilmesine yol açıyor hem de elektromanyetik dalgaları metal silindire doğru yansıtarak ayna görevi görüyor. Ölçümler, süperışıma için gerekli koşullar oluştuğunda sistemdeki voltajın Zel'dovich'in kuramsal hesaplarıyla uyumlu biçimde üstel olarak hızla arttığını gösteriyor. Bu sonuçlar, kara delik bombasının elektromanyetik versiyonunun ilk kez gerçeğe dönüştürüldüğü anlamına geliyor. Her ne kadar araştırmacıların geliştirdiği deney düzeneği "bomba" olarak adlandırılsa da askerî amaçlar için kullanılabilecek bir silah değil. Düzeneğin ortaya çıkardığı enerji sadece milijoule ölçeğinde.

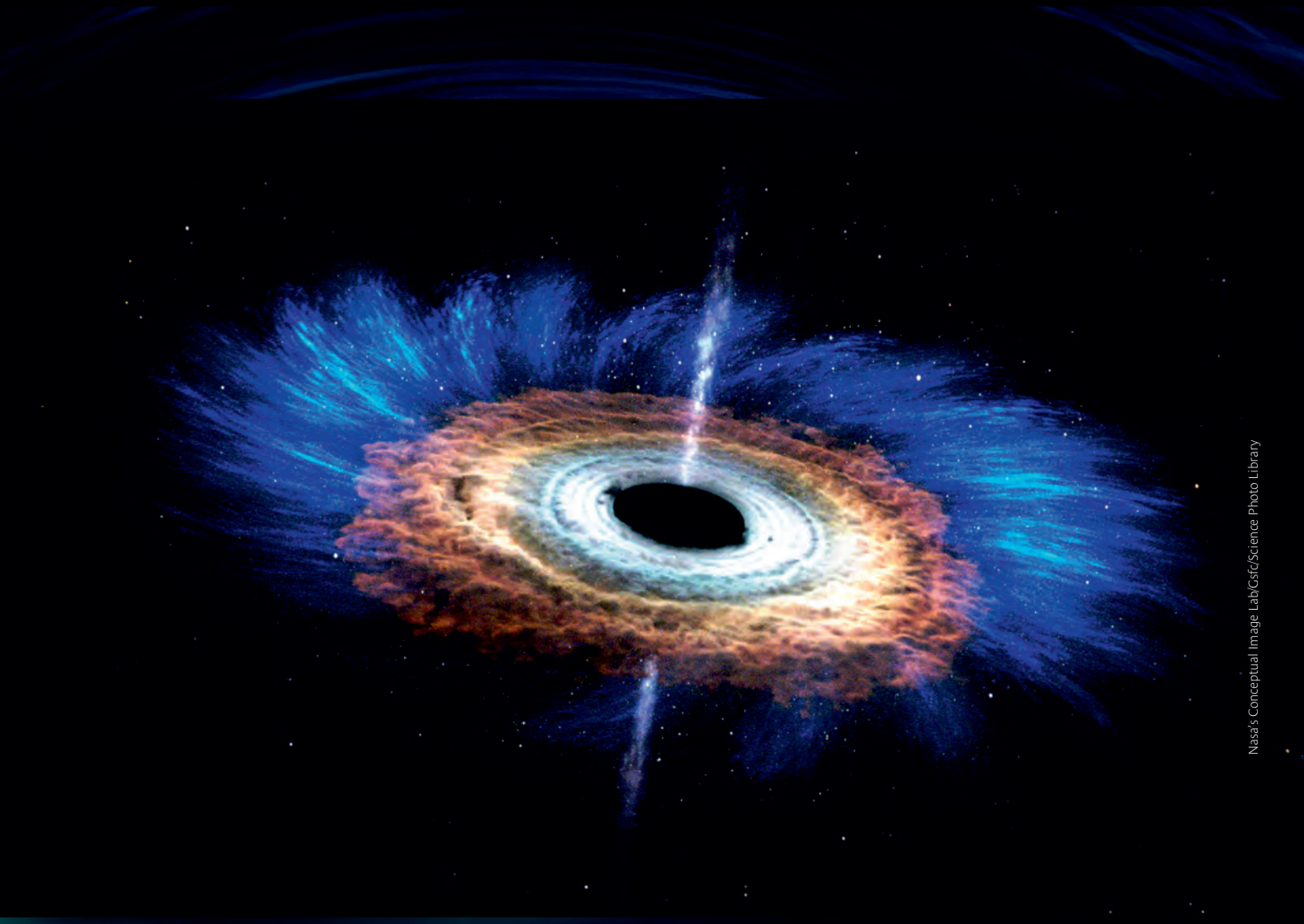
Araştırmacılar aynı deney düzeneği ile vakum salınımlarından kaynaklanan süperışımayı da gözlemlemeye çalışmış. Ancak deneyler oda sıcaklığında yapıldığı ve dolayısıyla ortamdaki termal salınımlar yüksek olduğu için bu amaca ulaşılamamış. Fakat deneyler, metal silindirin dönme hızı uygun bir biçimde seçildiğinde termal gürültüden kaynaklanan elektromanyetik dalgaların da yükseltgendiğini gösteriyor. Dolayısıyla geliştirilen düzeneğin "neredeyse hiçbir şeyden" enerji ürettiği söylenebilir. Deneyler ayrıca beklendiği gibi metal silindirin enerjisi azalmaya devam ettikçe bir noktadan sonra süperışımanın durduğunu gösteriyor.

Çekiminden ışığın bile kurtulamadığı kara deliklerin enerji kaynağı olarak kullanılabileceğini gösteren kuramsal çalışmalar elli yıldan eski olsa da bu kuramsal çalışmaları doğrulayan deneyler ilk kez yakın zamanlarda gerçekleştirildi. Kendi etrafında dönen metal



M. Cromb ve ark, arXiv

Süperışımanın ortaya çıkması için gerekli koşullar (a) ve kara delik bombası düzeneğinin şeması (b).



Nasa's Conceptual Image Lab/Gsfc/Science Photo Library

silindirler ile yapılan deneyler, süperışıma yoluyla enerji elde etmenin mümkün olduğunu gösteriyor.

Araştırmacılar gelecekte benzer deneylerin kuantum versiyonunu da gerçekleştirmeyi, fiziksel boşluktaki kuantum salınımlarından süperışıma yoluyla enerji elde etmeye çalışmayı planlıyor.
Elde edilen sonuçlar gelecekte çeşitli hipotezlerin test edilmesi için de yararlı olabilir. Örneğin kara deliklerden doğal parçacık detektörleri gibi yararlanılabilir: Karanlık maddeyi oluşturduğu öne sürülen axionlar ya da karanlık madde parçacıkları arasındaki etkileşimlere aracılık ettiği düşünülen karanlık fotonlar gibi farazi parçacıkların, eğer gerçekten de böyle parçacıklar varsa, kara deliklerden kazandıkları enerji sayesinde daha kolay bir biçimde tespit edilmeleri mümkün olabilir. Laboratuvar ortamındaki kara delik bombalarıyla bu ve benzeri hipotezler daha kolay ve daha hassas bir biçimde test edilebilir. ■

Kaynaklar

• Cromb, M., ve ark., "Creation of a black hole bomb instability in an electromagnetic system", arXiv:2503.24034v1, https://arxiv.org/abs/2503.24034, 31 Mart 2025.
• Bischoff, M., "Physicists Build a 'Black Hole Bomb' in the Laboratory", *Scientific American*, https://www.scientificamerican.com/article/how-to-build-a-black-hole-bomb/, 12 Mayıs 2025.