

Bir Kuantum Kütlecekimi Kuramına Gerek Var mı?

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

Doğada dört temel etkileşim vardır: kütleçekimi, elektromanyetizma, güçlü ve zayıf etkileşimler. Parçacık fiziğinin standart modeli, kütleçekimi dışındaki etkileşimleri kuantum mekaniği ilkeleriyle uyumlu bir biçimde tek bir çatı altında bir araya getirir. Kütleçekimini açıklayan genel görelilik kuramıysa bir klasik kuramdır.

Günümüzde fizikçiler arasındaki yaygın bir kanı, kuantum mekaniği ilkeleriyle uyumlu bir kütleçekim kuramının geliştirilmesi ve hatta bu kuantum kütleçekimi kuramının diğer üç etkileşimle aynı çatı altında bir araya getirilmesi gerektiği.

Peki ama kütleçekimi gerçekten de kuantum mekaniği ilkeleriyle açıklanması gereken bir olgu mudur?



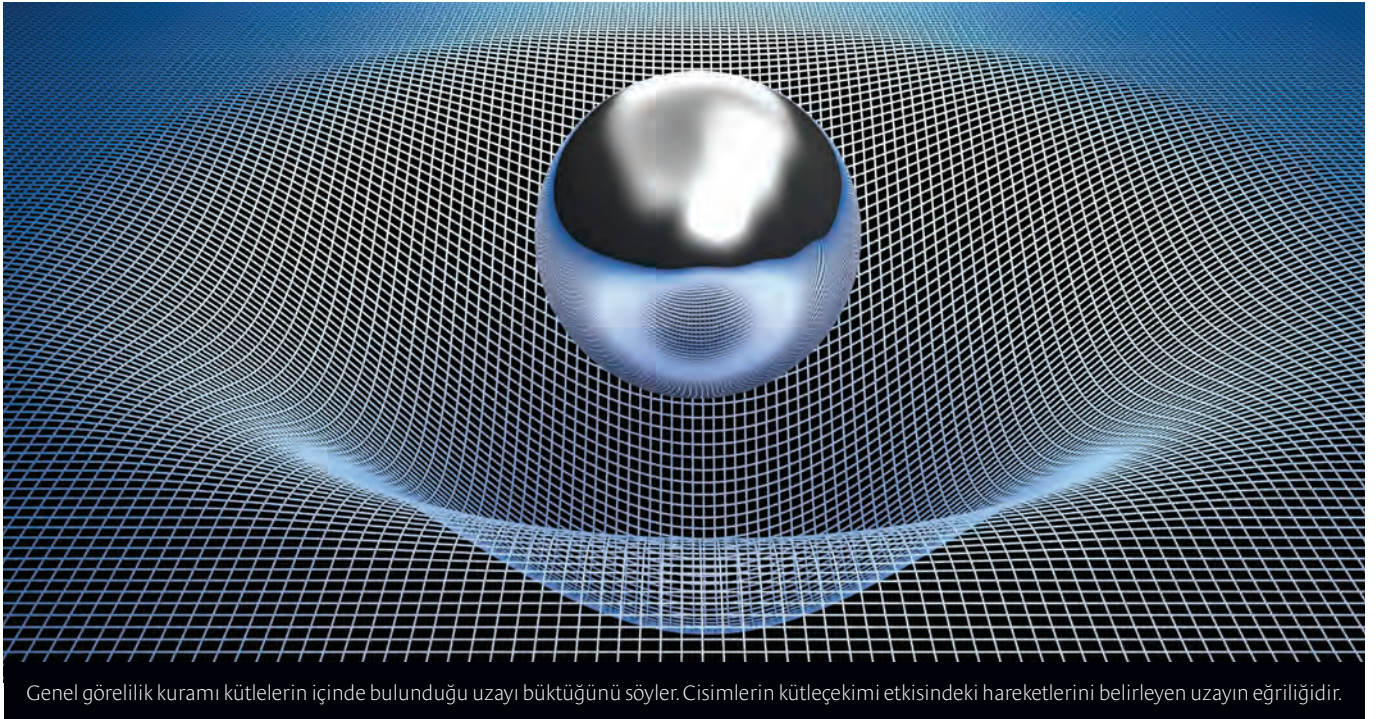
Albert Einstein (1879-1955)

Teorik fizik alanındaki çalışmaları ve özellikle de keşfettiği fotoelektrik etki yasası için 1921 Nobel Fizik Ödülü'nü kazandı.

Ne var ki, 1921 yılında kriterleri sağlayan bir aday olmadığına karar veren ödül komitesi, o yıla ait ödülü bir sonraki yıl verdi. Bu nedenle Einstein, 1921 Nobel Fizik Ödülü'nü aslen 1922'de aldı.

Albert Einstein tarafından 1900'lerin başlarında geliştirilen genel görelilik kuramı, uzayzamanın düz olmadığını söyler. Kütle içerisinde bulunduğu uzayzamanı bükür. Kütlelerin hareketlerini yönlendiren şeyse uzayzamanın eğriliğidir. Klasik bir kuram olarak genel göreliliğin en belirgin özelliği kesinliktir.

Evrendeki kütle dağılımı bilinirse uzayzamanın yapısı kesin olarak hesaplanabilir.



Genel görelilik kuramı kütlelerin içinde bulunduğu uzayı büküğünü söyler. Cisimlerin kütleçekimi etkisindeki hareketlerini belirleyen uzayın eğriliğidir.

Kuantum fiziğinin klasik fizikten en temel farkı belirsizliktir. Kuantum mekaniğinde bir sistemin durumu dalga fonksiyonu olarak adlandırılan bir fonksiyon tarafından temsil edilir. Belirli bir andaki dalga fonksiyonu biliniyorsa başka bir zamandaki dalga fonksiyonu da hesaplanabilir. Ancak dalga fonksiyonu sistemin özellikleri hakkında kesin bilgiler vermez. Sadece sistem üzerinde yapılacak ölçümlerin hangi olasılıkla hangi sonuçları vereceğini söyler. Üstelik sistemin belirli özelliklere sahip olmasını sağlayan şey ölçümdür. Herhangi bir ölçüm yapıncaya kadar sistemin belirli özellikleri yoktur, dahası sistem farklı durumların bir süperpozisyonunda da olabilir. Tıpkı, meşhur Schrödinger'in kedisi örneğinde, kutunun kapağı açılıp içine bakılıncaya kadar kedinin hem ölü hem de diri olması gibi.

Kuantum fiziğinin klasik fizikten bir diğer farkı da süreksizliktir. Örneğin, bir atomdaki elektronlar sadece belirli enerji seviyelerinde bulunabilirler. Elektronların sahip olabileceği enerjinin alabileceği belirli değerler vardır. Klasik fizikte ise böyle bir durum yoktur. Bir parçacığın enerjisi, momentumu ve diğer özellikleri herhangi bir değer olabilir.

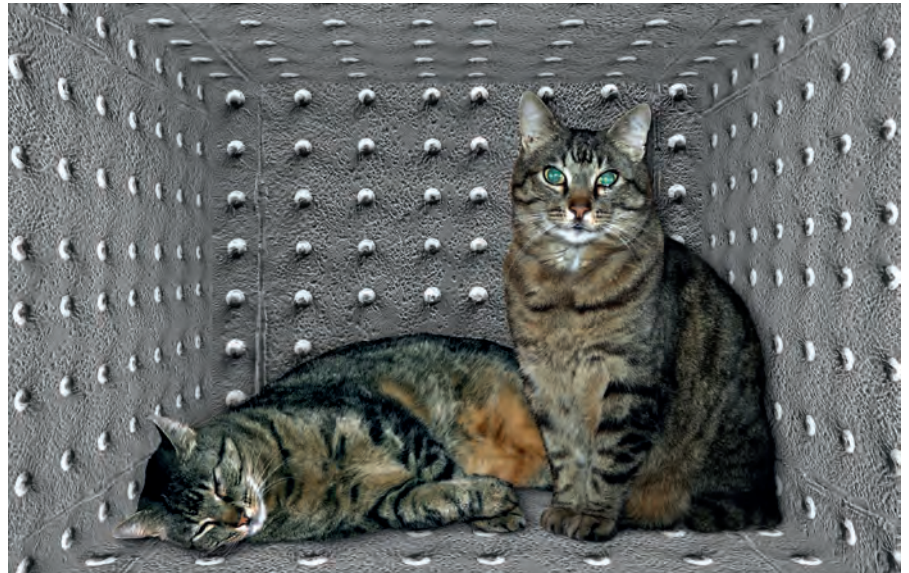
Aralarındaki zıtlıklar göz önünde bulundurulduğunda kuantum mekaniği ile genel göreliliği bir araya getirebilmek için kuramlardan en az birinin modifiye edilmesi gerektiği açıktır. Peki ama hangisi? Genel görelilik, daha önceleri Newton'un kütleçekim kuramıyla açıklanamayan çeşitli olguları başarıyla açıklamıştır. Evrenin büyük ölçekteki yapısını ve işleyişini büyük bir doğrulukla betimler.

Kuramın varlığını tahmin ettiği kütleçekimsel dalgaların birkaç sene önce doğrudan gözlemlenmesi astronomide yeni bir çağ başlattı. Artık evren sadece ışıkla değil kütleçekimsel dalgalarla da gözlemlenebiliyor. Kuantum mekaniği ise atom ölçeğinde meydana gelen süreçleri çok başarılı bir biçimde açıklamıştır. Kuram süperpozisyon ve dolanıklık gibi sağduyuya aykırı pek çok kavram içerirse de bugüne kadar yanlış olduğuna işaret eden tek bir bulguya ulaşamamıştır. Özetle hem genel görelilik hem de kuantum mekaniği, deneylerle ve gözlemlerle defalarca doğrulanmış kuramlardır.

Kuantum mekaniği ve genel göreliliğin her ikisi de her ölçekte doğru olma iddiasındadır. Ancak bugüne kadar bu kuramları doğrulayan deneylerin ve gözlemlerin tamamı sadece kendi hakimiyet alanlarında yapılmıştır. Örneğin, gözlemler Mer-

kür'ün yörüngesinde Newton'un kütleçekim kuramıyla açıklanamayacak kaymalar olduğunu gösterir. Genel görelilik kuramı kullanılarak yapılan hesaplar Merkür'ün yörüngesini çok hassas bir biçimde tahmin eder. Diğer yandan, Güneş Sistemi gibi devasa bir sistemde kuantum mekaniği ile açıklanacak bir olguya rastlanması da beklenmez. Örneğin, Güneş ve Merkür atomaltı parçacıklar gibi aynı anda farklı konumlarda bulunmazlar. Dolayısıyla bu devasa gökci-simler arasındaki kütleçekimsel etkileşimleri açıklamak için klasik bir kuram zaten yeterlidir. Söz konusu olan atom ölçeğindeki fiziksel süreçler olduğundaysa kütleçekimi önemsizdir. Çünkü diğer etkileşimlere göre çok zayıftır. Bundan dolayı, kütleçekimi aracılığıyla yaşanan etkileşimler dikkate alınmadan, kuantum mekaniği kullanılarak çok hassas tahminler yapılabilmesi şartıdır.

Schrödinger'in kedisi deneyinde bir kedi içerisinde zehir bulunan bir kutunun içine hapsedilir. Radyoaktif bir atomun ışın yapması hâlinde zehir serbest kalacak ve kedi ölecektir. Kuantum mekaniği kutunun kapağı açılıp bakılıncaya kadar kedinin hem ölü hem de diri (ölü ve diri durumlarının bir süperpozisyonunda) olduğunu söyler. Kutunun kapağı açıldığı, yani sistem üzerinde ölçüm yapıldığı anda ise kedinin durumu ölü ya da diri durumlarından birine "çöker".



Hem kuantum mekaniği hem de kütleçekiminin dikkate alınması gereken bir sistem düşünelim. İki ayrı konumun süperpozisyonunda bulunan bir temel parçacık olsun. Davranışları kuantum mekaniği ilkeleriyle açıklanan böyle bir parçacık, kütleçekimi aracılığıyla nasıl etkileşir? Genel görelilik kuramını kullanarak parçacığın etrafında oluşturduğu kütleçekim alanını hesaplamak için parçacığın konumunun kesin olarak bilinmesi gerekir. Ancak parçacık süperpozisyon durumunda olduğu için aynı anda farklı konumlardadır!

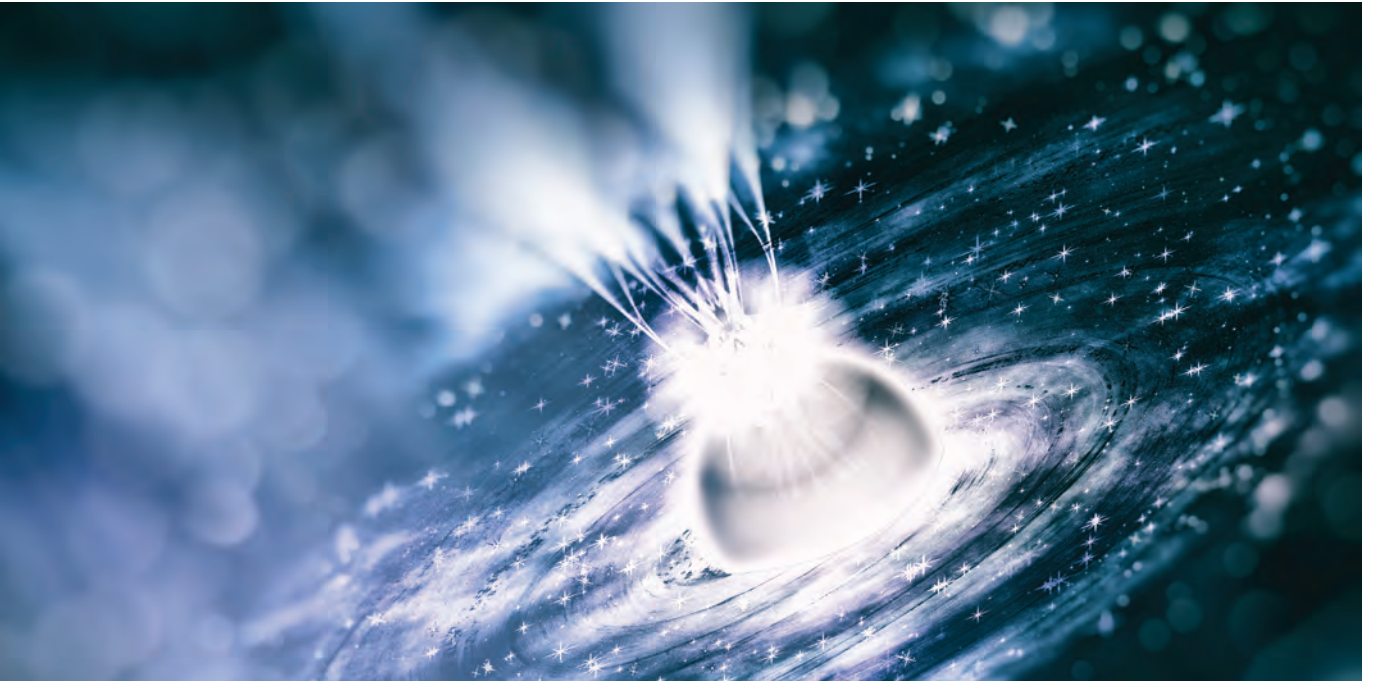
Bugün fizikçiler arasında yaygın bir kanı kuantum fiziğiyle uyumlu bir kütleçekim kuramının geliştirilmesi gerektiği: Tıpkı Maxwell'in 1800'lerin sonlarında matematiksel formülasyonunu yaptığı klasik elektromanyetik kuramın daha sonra "kuantumlaştırılarak" kuantum elektrodinamiğinin geliştirilmesine

benzer biçimde, genel göreliliğin de kuantumlaştırılması ve bir kuantum kütleçekim kuramının geliştirilmesi gereklidir. Bu düşünceye göre genel görelilik kuramı sadece makro ölçekte geçerlidir. Ancak tıpkı kuantum mekaniğinin makro ölçekte klasik mekaniğe yakınsaması gibi, kütleçekiminin doğru bir betimlemesini yapacak bir kuantum kütleçekimi kuramı da makro ölçekte genel göreliliğe yakınsayacaktır. Böyle bir kuram bugün tam olarak anlaşılammış çeşitli konuların da daha iyi kavranmasını sağlayacaktır. Örneğin Büyük Patlama'nın doğası ya da karadeliklerin yapısı gibi.

Bir başka düşünceye göreseye her ölçekte geçerli olmayan genel görelilik değil kuantum mekaniğidir. Dolayısıyla yapılması gereken şey bir kuantum kütleçekimi kuramı geliştirmek değil kuantum mekaniğini klasikleştirerek genel görelilikle

uyumlu hâle getirmektir. Schrödinger'in kedisi gibi sağduyuya aykırı şeylerden kurtulmak da bu şekilde mümkün olacaktır. Hangi düşüncenin doğru olduğuna karar vermenin yolu deneyler yapmaktan geçiyor. Ancak kütleçekiminin bir kuantum kuramı olup olmadığı hakkında bir fikir verecek deneyleri gerçekleştirmek çok zor.

Günümüzde kuantum kütleçekimi ile ilgili deneyler tasarlayan çeşitli araştırma grupları var. Bu gruplardan biri Viyana Üniversitesinde çalışmalar yapıyor. Prof. Dr. Markus Aspelmeyer ve arkadaşları, kütleçekimiyle ilgili daha hassas ölçümler yapabilmek için düzenekler tasarlıyorlar. Eğer bir gün yeteri kadar küçük kütleler üzerinde deneyler yapmak mümkün olursa o zaman kütleçekiminin bir kuantum kuramı olup olmadığı hakkında bir fikir edinmek de mümkün olabilir.



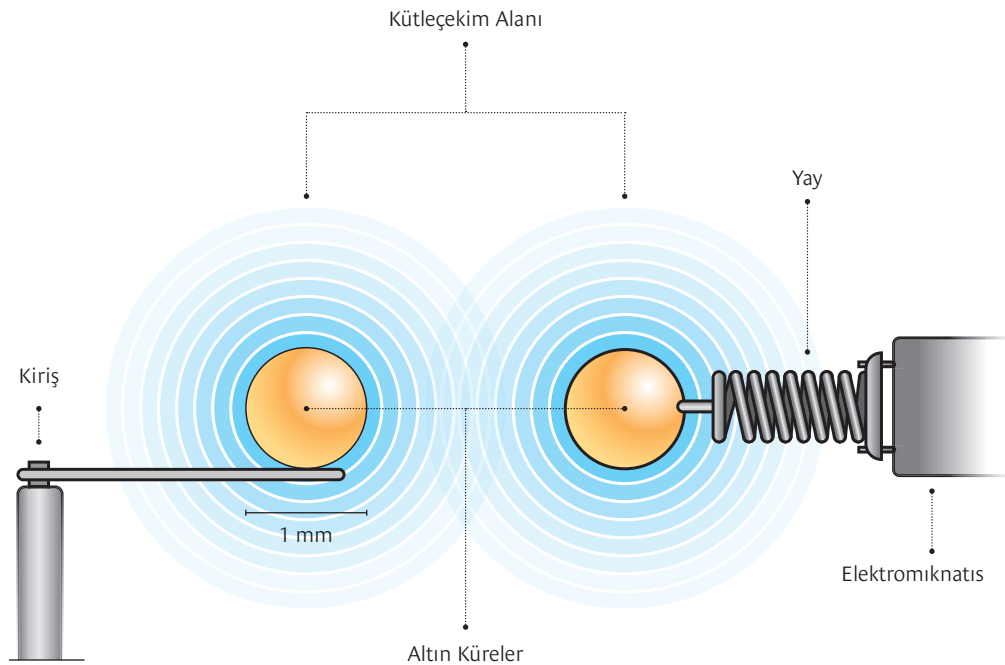


Prof. Dr. Markus Aspelmeyer

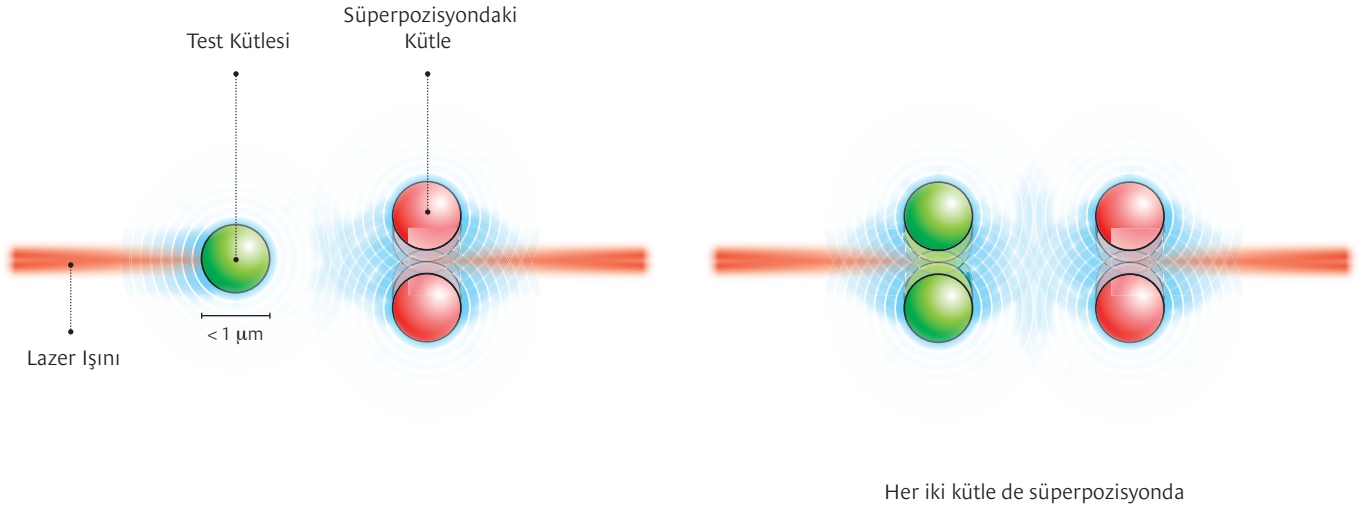
Prof. Dr. Aspelmeyer ve arkadaşlarının yapmayı hayal ettiği deney, yıllar önce Richard Feynman tarafından öne sürülmüştü. Feynman'ın düşünce deneyi kısaca şöyle ilerler: Eğer kütleçekimi gerçekten de kuantum mekaniksel bir olguysa, iki ayrı konumun süperpozisyonunda bulunan bir parçacık, iki ayrı kütleçekim alanının süperpozisyonundaki bir kütleçekim alanı, yani süperpozisyon durumunda bir uzayzaman oluşturmalıdır. Peki, başka bir test kütlesi süperpozisyon durumunda ki bu uzayzamanla nasıl etkileşir? Etkileşim süperpozisyonun yok olmasına mı sebep olur yoksa cismin hareketleri iki ayrı uzayzamanın etkisini mi gösterir? Eğer süperpozisyon yok olmaz ve test kütlesiyle süperpozisyon durumundaki kütleçekim alanı etkileşirse, bu durum test kütlesiyle süperpozisyon durumundaki kütlenin birbirine dolanık hâle geldiğine dair güçlü bir kanıt oluşturur. Dolanıklık da klasik fizikte karşılığı olmayan ve kuantum mekaniğine özgü bir olgu olduğu için bu durum kütleçekiminin de diğer etkileşimler gibi bir kuantum kuramıyla açıklanması gerektiğini gösterir.

Aspelmeyer ve arkadaşlarının Feynman'ın düşünce deneyini gerçeğe dönüştürmek için yapmaya çalıştıkları ilk şey, kütleçekim alanlarını ölçmek için bugün mevcut teknolojiden çok daha hassas bir teknoloji geliştirmek. Bugüne kadar kütleçekim alanı ölçülebilmemiş en küçük kütle 700 miligram ağırlığındaydı. Aspelmeyer ve arkadaşları ise milimetre genişliğinde altın kürelerin kütleçekim alanlarını ölçmeyi planlıyorlar. Bu durum, geliştirmeyi planladıkları teknolojinin bugünün en iyi ölçüm aletlerinden bile onlarca kat daha hassas olacağı anlamına geliyor. Araştırmacılar altın kürelerin birini bir yay aracılığıyla bir elektromıknatısa ilistirecek, diğeri de mikromekanik bir kirişe sabitlenecek. Yaya bağlı kütle salındıkça diğer kütle kirişin üzerinde yukarı aşağı hareket edecek. Bu sırada kirişin hareketi lazerlerle takip edilerek

kirişe bağlı kütleyle etki eden kütleçekim kuvvetinin büyüklüğü ölçülecek. Bir sonraki aşama ise benzer bir deneyi süperpozisyon durumundaki kütlelerle yapmak olacak. Bu deneylerde hareketleri takip edilecek test kütlesinin ve kütleçekim alanı ölçülecek süperpozisyon durumundaki kütlenin yaylarla ve kirişlerle değil optik cumbuzlarla kontrol edilmesi planlanıyor. Deneyi gerçekleştirmek için en büyük zorluk ise kütleçekim alanı ölçülebilecek büyüklükte bir kütlenin süperpozisyon durumuna getirilmesi olacak. Bugüne kadar süperpozisyon durumuna getirilebilmiş en büyük kütle, yaklaşık 800 atomdan oluşan bir moleküldü. İyimser bir tahminle, Aspelmeyer ve arkadaşlarının test kütlelerinin boyutlarını mikrometre ölçeğine kadar düşürmeleri ve geliştirdikleri teknolojiyi bu kütleler üzerinde deney yapacak kadar ilerletmeleri gerekecek.



Aspelmeyer ve arkadaşları tarafından önerilen deneyler



Araştırmacıların nihai hedefiyse tek bir kütlenin değil her iki kütlenin de süperpozisyon durumunda olduğu deneyler yapmak.

Kütleçekiminin kuantum mekaniği ile açıklanması gereken bir olgu olup olmadığı hakkında fikir verecek deneyler tasarlayan başka araştırma grupları da var. University College London'dan Sougato Bose ve arkadaşları ile Oxford Üniversitesinden Chiara Marletto ve Vladko Vedral bir süre önce birbirlerinden bağımsız olarak yeni bir deney önerdiler. Kuantum bilgi kuramı, iki kuantum sisteminin klasik iletişimle birbiriyle dolanık hâle gelebileceğini söyler. Dolayısıyla, eğer kütleçekimi bir kütleçekim alanı aracılığıyla gerçekleşen bir etkileşimse, iki kuantum sisteminin kütleçekimi aracılığıyla birbiriyle dolanık hâle gelmesi, kütleçekiminin klasik bir olgu olmadığını gösterir.

Araştırmacıların önerdiği deneyde, mikrometre genişliğinde iki elmas küre süperpozisyon durumuna getiriliyor ve Dünya'nın kütleçekim alanında serbest düşmeye bırakılıyor. Tahminlere göre, kütlelerin arasındaki mesafe 100 mikrometreden azsa, kütleçekim alanları kütlelerin birbirleriyle dolanık hâle gelmesine ve parçacıkların özellikleri (örneğin spinleri) arasında klasik fizikle açıklanamayacak korelasyonlar ortaya çıkmasına sebep olacaktır. Dolayısıyla, deneyler süperpozisyon durumundaki iki kütlenin gerçekten de kütleçekimi aracılığıyla birbiriyle dolanık hâle geldiğini gösterirse, bu durum, kütleçekiminin kuantum mekaniği ile açıklanması gereken bir olgu olduğunu gösterecektir. Deneyi gerçekleştirmekteki en büyük zorluk, yine kuantum mekaniği açısından büyük sayılabilecek kütleleri süperpozisyon durumuna getirmek olacak.

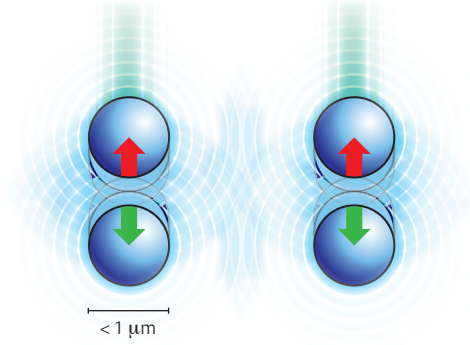
Süperpozisyonun en azından birkaç saniye yok olmasını engellemek ve elmas küreleri sadece kütleçekimi aracılığıyla dolanık hâle gelecek kadar birbirine yaklaştırmak da aşılması gereken diğer zorluklar. Üstelik tüm bunları yaparken parçacıkların kütleçekimi dışındaki kuvvetlerle etkileşmesini de engellemek gerekecek.



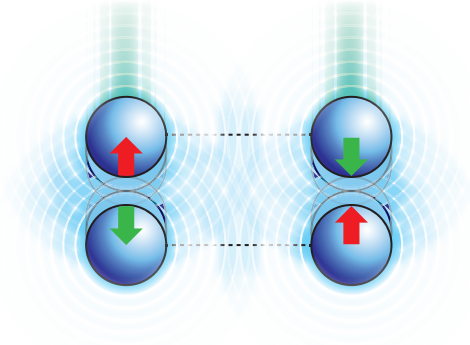
Spin durumları birbirine dolanık iki elektron.

Parçacıklarının spinlerinin birbirine dolanık olması birisinin spini üzerinde yapılacak bir ölçümün diğerini de eşzamanlı olarak etkileyeceği anlamına gelir.

Marletto ve Vedral ile Bose ve arkadaşları tarafından önerilen deney



Süperpozisyondayken düşen kütleler

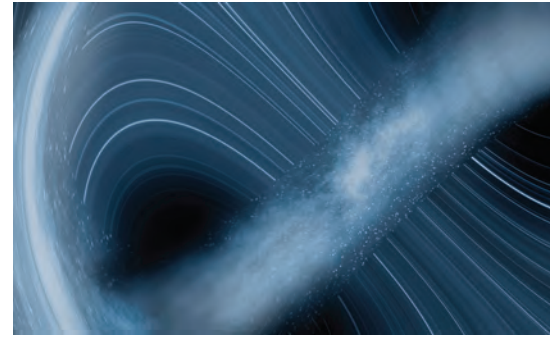


Küreler dolanık hâle gelir

Kuantum mekaniği ile uyumlu bir kütleçekimi kuramı geliştirmek, günümüzde kuramsal fizikteki en aktif araştırma alanlarından biri. Ancak kütleçekiminin gerçekten de bir kuantum kuramıyla açıklanması gereken bir olgu olduğuna dair herhangi bir deneysel ya da gözlemsel veri olmaması tartışmalara da sebep oluyor. Kuantum mekaniğinin esasen varsayıldığı gibi her ölçekte geçerli olmadığını öne süren fizikçiler de var. Örneğin, Roger Penrose, kütleçekiminin belirli bir ölçeğin üzerindeki süperpozisyonların yok olmasına sebep olduğunu ve böylece kuantum dünyası ile klasik dünya arasında bir sınır çektiğini öne sürüyor.

Hangi düşüncenin doğru olduğuna karar vermenin yolu deneylerden ve gözlemlerden geçiyor. Ancak bu konuda fikir verecek deneyleri gerçekleştirmek pek çok bakımdan oldukça zor. Yine de çeşitli araştırma

grupları yakın zamanlarda laboratuvar ortamında yapılabilecek çeşitli deneyler önerdi. Şu an için bu deneyleri gerçeğe dönüştürmek imkânsız ancak, birkaç sene içinde olmasa bile, belki on sene sonra mümkün olabilir. Bu deneylerle elde edilecek sonuçlar bugüne kadar geliştirilmiş çeşitli kuantum kütleçekimi kuramlarından herhangi birini doğrulamayacak fakat kütleçekiminin daha doğru betimlenmesi için bir kuantum kütleçekimi kuramının gerekli olup olmadığı hakkında fikir verecektir. Ayrıca eğer sonuçlar kütleçekiminin de diğer etkileşimler gibi bir kuantum kuramıyla açıklanması gerektiğini doğrularsa kuantum mekaniğinin her ölçekte geçerli olduğu varsayımı da doğrulanacaktır. ■



Kaynaklar

Folger, T., "Quantum Gravity In The Lab", *Scientific American*, Nisan Sayısı, s. 48, 2019.

Marletto, C., Vedral, V., "Gravitationally-induced entanglement between two massive particles is sufficient evidence of quantum effects in gravity", <https://arxiv.org/abs/1707.06036>, 2017.

Bose, S., ve ark., "A Spin Entanglement Witness for Quantum Gravity", <https://arxiv.org/abs/1707.06050>, 2017.

Schmölle, J., "A micromechanical proof-of-principle experiment for measuring the gravitational force of milligram masses", *Classical and Quantum Gravity*, Cilt 33, Makale No: 125031, 2016.