



## Astronomik Gözlemlerde Yeni Bir Çağ: Kütleçekim Dalga Detektörleri

Figen BİNBAY<sup>1\*</sup>, İlhan CANDAN<sup>2</sup>

<sup>1</sup> Dicle Üniversitesi, Fen Fakültesi, Fizik Bölümü, Diyarbakır, Türkiye

<sup>2</sup> Dicle Üniversitesi, Fen Fakültesi, Fizik Bölümü, Diyarbakır, Türkiye

Figen BİNBAY ORCID No: 0000-0002-1390-4151

İlhan CANDAN ORCID No: 0000-0001-9489-5324

\*Sorumlu yazar: [figenbinbay@hotmail.com](mailto:figenbinbay@hotmail.com)

(Alınış: 14.08.2020, Kabul: 28.02.2021, Online Yayınlanma: 25.06.2021)

### Anahtar

### Kelimeler

Genel  
Görelilik  
Teorisi,  
Kütleçekim  
dalgaları,  
Lazer  
Girişimölçerli  
kütleçekim  
dalga  
dedektörleri

**Öz:** Kütleçekim dalgalarının varlığı Haziran 1916'da A. Einstein tarafından yazılan bir makalede öngörülmüştür. Söz konusu dalgalar ivmelenmiş kütleli cisimlerin sebep olduğu uzay-zaman eğriliğindeki tedirginmelerdir. 1960'lardan itibaren, bilim insanları bu dalgaları gözlemleyebilmek için çeşitli teknikler geliştirmişlerdir. Öngöründe bulunduktan yaklaşık 100 yıl geçmişken; 2015 yılının 14 Eylül günü Lazer Girişimölçerli Kütleçekim Dalga Gözlemevlerinin iki detektörü, eşzamanlı olarak bir enine kütleçekim dalga sinyali ölçmüşlerdir. Bir asırı bulan teorik ve teknolojik çalışmalar, özellikle Lazer Girişimölçerli detektörlü gözlemevlerinin bu başarısı bu derlemenin konusudur. Çalışmamızda ayrıca kütleçekim dalgalarının olası kaynaklarından ve bu dalgaları ölçmek için geliştirilen tekniklerden bahsedeceğiz. Bu teknikler evreni araştırmak için yeni bir pencere ve astronomik gözlemler için yeni bir çağın başlangıcı olmuştur.

290

## Usher In A New Era Of The Astronomical Observations: Gravitational Wave Detectors

### Keywords

General  
Relativity  
Theory,  
Gravitational  
Waves, Laser  
Interferometer  
Gravitational  
Wave  
Detectors

**Abstract:** The existence of Gravitational waves has been predicted in an article which is written by A. Einstein on June 1916. Gravitational waves are perturbations in the curvature of spacetime caused by accelerated masses. Since 1960s' scientists have been developed various techniques to observe them. Nearly, one hundred years have passed since the prediction was made; on September 14, 2015 two detectors of the Laser Interferometer Gravitational Wave Observatories simultaneously observed a transient gravitational wave signal. Theoretical calculations and developed techniques to observe these waves and recently the achievement of detection of the waves are the subject of this review. In this study, we will mention additionally possible sources of these waves and the techniques which were developed to observe them. These techniques have been a new window to look at the universe and started a new era for the astronomical observations.

### 1. GİRİŞ

1916 yılında, genel göreliliğin alan denklemlerinin ortaya konmasından bir yıl sonra, Albert Einstein tarafından kütleçekim dalgalarının varlığı öne sürüldü [1, 2]. Einstein, çizgiselleştirilmiş zayıf alan denklemlerinin dalga çözümlerine sahip olduğunu buldu. Uzaysal gerilimin bu enine dalgaları ışık hızında hareket ediyorlar ve kaynağın kütle kuadropol momentinin zamansal değişimleri tarafından üretiliyorlardı [3, 4]. Einstein, ayrıca kütleçekim dalgalarının genliklerinin çok küçük olacağını da hesapladı. Genliğin küçük olması

bu dalgaların gözlenmesini ve ölçülmesini neredeyse olanaksız kılıyordu.

Yine 1916'dan başlayarak K. Schwarzschild tarafından alan denklemleri için, daha sonra bir karadeligi tanımladığı anlaşılan bir çözümün bulunduğu çalışması yayımlandı [5, 6]. 1963'te R. P. Kerr tarafından bu çözüm birbiri etrafında dönen karadelik birleşmelerinin modellenebilmesine ve bunların sonucunda oluşabilecek kütleçekimsel dalga şekillerinin doğru tahminlerine olanak sağladı [7, 8].

Çok sayıda karadelik adayı elektromanyetik gözlemlerle tespit edilebilirken, karadelik birleşmeleri henüz gözlenmemiştir. Daha sonra karadelik birleşmelerinin yaratacağı kütleçekim dalgalarının, genliği çok küçük olan bu dalgaların ölçülebilmesine olanak sağlayacağı konusu ağırlık kazandı. Sadece büyük ivmelere ve kuadropol momentlere sahip karadelik birleşmeleri sonucu birleşik kozmik nesnelere kütleçekimsel dalga detektörleri için uygun kaynaklar olduğu öne sürüldü [9, 10].

Einstein'in kütleçekim dalgalarından bahsettiği makaleden yaklaşık 50 yıl kadar sonra, Joseph Weber tarafından bu ışımanın ölçülebilmesi için birkaç tasarım geliştirildi [11]. Sonunda "Çınlanımlı kütle detektörleri" ya da "Weber çubukları" adıyla anılan detektörlerde karar kılındı. Derlememizin ilerleyen bölümlerinde, kütleçekim dalga kaynaklarından bahsedildikten sonra, Weber'in çalışması ile başlayan detektör çeşitleri ayrıntılı olarak anlatılacaktır. Einstein yine söz konusu makalesinde bir kütleçekim alanındaki herhangi bir ani değişikliğin ışık hızında hareket eden kütleçekim ışıması şeklinde dışarı doğru yayılması gerektiğini de belirlemiştir.

Daha sonra, söz konusu ışımanın dolaylı bir kanıtı olacak şekilde; 1974 yılında Joseph Taylor ve Russel Hulse adındaki bilim insanları PSR1913+16 adındaki ikili pulsarın yörüngesel periyodunun yavaşça azaldığını, bunun nedeninin yıldızların yörüngesel enerjilerinin kütleçekim ışıması nedeniyle azalması olduğunu ve birbirlerine doğru helisel bir şekilde yaklaştıklarını Doppler kayması gözlemi yoluyla tespit ettiler (Normal ikili yıldızlar birbirlerinden çok ayırdırlar ve yörüngeleri kayda değer kütleçekim ışıması yaymaları için çok yavaştır) [12-14].

Kütleçekim dalgaları, madde asimetric bir şekilde ivmelendiği zaman üretilmektedir. Fakat kütleçekim etkileşmesinin doğasına bağlı olarak, ışımanın algılanabilen seviyeleri sadece çok büyük kütleli cisimler, çok güçlü kütleçekim alanlarında ivmelendikleri zaman üretilmektedir [15]. Böylesi bir durum yerküre üzerinde gerçekleşemez, sadece evrende astrofiziksel sistemler arasında gerçekleşebilir [16]. Kütleçekim dalga sinyallerinin kozmolojik arkaplandaki (oluşmuş) dalgalar durumunda  $\cong 10^{-17}$  Hz'den, süpernova patlamalarındaki nötron yıldızlarının oluşmasına  $\cong 10^3$  Hz'e kadar olmak üzere geniş bir frekans aralığında olması beklenir [10, 17, 18].

Bu çalışmanın bir sonraki bölümünde kütleçekim ışımasının kaynaklarından ve 1960'lardan itibaren geliştirilen detektör çeşitlerinden kısaca bahsedilecektir [19, 20]. Son bölümde ise, Astronomik gözlemlerde yeni bir çığır açan ölçümü gerçekleştiren Lazer Girişimölçerli Kütleçekimsel Dalga Gözlemevleri (LIGO) ve benzeri oluşumlar daha ayrıntılı olarak incelenecektir [21-25].

## 2. KÜTLEÇEKİM DALGA KAYNAKLARI

Kütleçekim dalga genliği [26, 27]:

$$h = \frac{2\delta l_{kd}}{l} \quad (1)$$

şeklindeki boyutsuz nicelikte verilir. Burada  $\delta l_{kd}$  iki zamansal olay arasındaki  $l$  kendi mesafesinde, kütleçekim dalgasının neden olduğu değişimdir,  $h$ ,

$$h = \frac{2G}{c^4} \frac{1}{r} \frac{\partial^2 I}{\partial t^2} \quad (2)$$

olacak şekilde kaynağın indirgenmiş kuadropol momenti  $I'$ 'ya ve kaynağa olan  $r$  uzaklığına da bağlıdır. Burada  $G$  Newton'un kütleçekim sabitidir. Bu ifadedeki  $\frac{2G}{c^4} = 1.6 \times 10^{-44} s^2 kg^{-1} m^{-1}$  çarpanı kütleçekim dalga genliği için çok küçük değerler verir. Sadece büyük ivmeli ve büyük kuadropol momente sahip birleşik kozmik nesnelere bunu dengeleyebilir. Fakat yaklaşık 10 kiloparsek'lik bir uzaklıkta, Samanyolu galaksisindeki süpernova patlaması gibi şiddetli olaylar bile yaklaşık  $10^{-20}$  değerinde bir genlik oluşturur. Yine Samanyolu galaksisinde yer alan, kütleleri yaklaşık olarak güneşin kütlelerinin 1,4 katı olan ikili nötron yıldızının birleşmesi durumunda  $h = 10^{-19}$  değerini bulmak umulabilir. Fakat bu tür olaylar çok nadir olaylardır. Bu yüzden kütleçekim dalga detektörlerinin komşu galaksilere ulaşacak kadar bir duyarlılığa sahip olmaları gerekmektedir [28-30]. Kozmolojik evrende kütleçekim ışımasının ya da kütleçekim dalgalarının yayılması aşağıda bahsedilecek olaylar sonucu gerçekleşmektedir [31-34].

### 2.1. Patlamalar

Burada söz konusu patlamaların olası kaynakları bizim galaksimiz ve diğer galaksilerdeki süpernovaların çöken ve sıçrayan merkezleri, karadeliklerin özellikle de büyük kütleli olanların olduğu anlardır. Karadelikler arasındaki birleşmeyle sonuçlanan çarpışmalar, karadelikler ile küresel kümelerdeki, galaktik çekirdeklerdeki ve kuasarlardaki (kuasarlar galaksi dışındaki yıldızsı gök cisimleridir) nötron yıldızları arasındaki çarpışmalar sonucu gerçekleşen olaylardır. Ayrıca daha önce sözünü ettiğimiz PSR 1913+16 olarak adlandırılan ikili pulsar (atarca) arasında olduğu gibi, atarcaların birleşmeleri ve yekpare bir şekilde helisel yörüngede hareket etmeleri de kütleçekim dalgalarını oluştururlar.

### 2.2. Periyodik dalgalar

Bu dalgaların olası kaynakları ikili yıldız sistemleri, dönen şekli bozulmuş beyaz cüceler ve nova patlamalarını takiben beyaz cücelerin titreşimleridir.

### 2.3. Stokastik (rastgele) kaynaklar

Bu kaynaklar ise büyük patlamanın sıcak zamanlarını, evrenin erken dönemlerindeki homojen olmayan durumları ve galaksiler şekillenmeden önce oluşan popülasyon III yıldızlarından sonra oluşan karadelikleri içerirler.

### 3. DETEKTÖR ÇEŞİTLERİ

Genliğinin çok küçük olması nedeniyle ilk sözü edildiğinde ölçülemeyeceği düşünülen kütleçekim dalgalarının algılanabilmesi için tarihsel süreç içerisinde J. Weber'in "Weber çubukları" tasarımının yanısıra iki tür detektör daha geliştirilmiştir. Bunlar "Lazer Girişimölçerleri" ve "Uzay aracıyla izleme" dir [35-40].

#### 3.1. Çınlanımlı kütle detektörleri

Bir kütleçekim dalgası katı ve geniş bir nesne üzerine, nesneyi genişletecek ve sıkıştırarak şekilde gelgit kuvveti gibi etki eder. Dolayısıyla çınlanımlı kütle detektörleri  $l$  uzunluklu (ya da yarıçaplı) elastik katı bir cisim gibi kütleçekim dalgası tarafından çınlanımına uğratılacak mekaniksel çınlanımcı kullanırlar [41-44]. Kütleçekim dalgasının aniden ortaya çıkması durumunda kütlelenin uçlarının yer değiştirmesi  $1000 \text{ kg}$ 'lık bir kütle ve  $l \approx 1 \text{ m}$  için [29]:

$$\delta l_{kd} \approx hl \approx 10^{-21} \text{ m} \quad (3)$$

şeklinde olacaktır. Kütlelenin esnek titreşimleri, yer değiştirmeyi yükseltmiş bir elektrik sinyaline dönüştüren bir dönüştürücü yardımıyla ölçülür. Sıklıkla anten aşağıdaki şekilde verilen "etkin" bir sıcaklıkla karakterize edilir:

$$T_{\text{etk}} = \left(\frac{T}{\beta Q}\right) + 2T_G \quad (4)$$

bu formülde  $kT_{\text{etk}}$  ölçülebilen minimum enerjidir,  $\beta$  dönüştürücünün etkinliğidir (ya da çiftlenim katsayısı), yani elektriksel enerji ve mekaniksel titreşim enerjisinin birbirine oranıdır,  $T_G$  'de dönüştürücünün gürültü sıcaklığıdır [23, 36].

Eşitlik 3. formülüyle verilen son derece küçük kütleçekim dalga genliğinin ölçülmesinde sorun yaratacak olan başlıca gürültü kaynakları aşağıdaki gibidir.

Bunlardan biri ısısal gürültü olup, bu gürültü titreşiminin Brownian hareketinden kaynaklanır. Detektör duyarlılığına olan olumsuz etkiden kurtulmak için  $T \approx 0.1 \text{ K}$  'e kadar soğutulan çınlanımcılar kullanılmaktadır [42, 45].

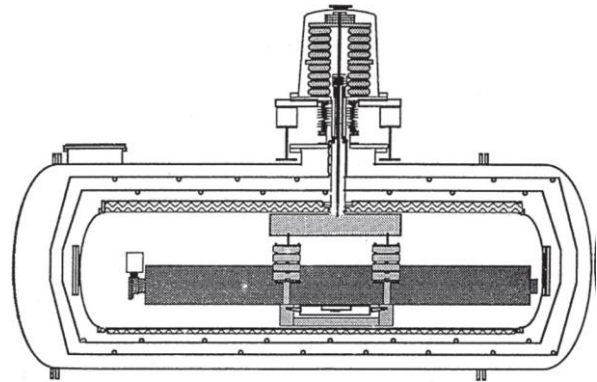
Diğeri sensör gürültüsü olup, burada dönüştürücüler gürültü üretir. Dönüştürücünün frekans bant aralığı en azından  $\Delta f \approx 1/\tau_{kd}$  kadar olmalıdır, burada  $\tau_{kd}$  sinyalin devam süresidir, tipik bir kütleçekim dalgası patlaması için bu süre  $1 \text{ ms}$  kadardır. Dolayısıyla dönüştürücülerin bant aralığı  $100$ 'lerce Hz olmalıdır [41].

Bir diğeri de kuantum sınırı olup, Heisenberg belirsizlik ilkesine göre, bir çınlanımcının sıfır-nokta titreşimleri de bir gürültü kaynağı olarak dikkate alınmalıdır. Bu gürültünün genliği aşağıdaki formülle verilir [46]:

$$\langle \delta l^2 \rangle_{ku}^{1/2} = \left(\frac{h}{4\pi M f_0}\right)^{1/2} \approx 4 \times 10^{-21} \text{ m} \quad (5)$$

burada  $f_0$  çınlanımcının çınlanım frekansdır.  $h$  Planck sabitidir,  $M$  çınlanımcının kütesidir. Kütleçekim gradyen gürültüsü ise, Dünya üzerindeki insanların hareketleri, kara-hava ulaşım araçları hareketleri ve yine dünya üzerindeki kayaların sismik hareketleri bu gürültünün kaynaklarıdır. Uzayda konuşlandırılan detektörler de bu gürültülerden kurtulmak için düşünülmektedirler.

Joseph Weber'in 1960'larda Samanyolu'nun merkezindeki kütleçekim dalgalarını ölçme amacıyla tasarladığı "çınlanımlı kütle detektörü" (ya da diğer adıyla Weber çubukları) bu amacı gerçekleştirmedi ama detektör araştırmaları yapan grupların yolunu açtı [11]. Çubuk detektörleri dar-bant detektörleriydi, belirli bir frekansa ayarlanmaları gerekmekteydi. Çubuklar alimünyum, silikon ve niyobyumdan yapılıyorlardı. Çeşitli dünya kaynaklı gürültü kaynaklarından yalıtılıyor ve  $2 \text{ K}$  ya da daha az sıcaklığa kadar soğutuluyorlardı. Weber'in tekniği geniş bir Al silindirin rastgele maruz kalacağı deformasyonu (ısımanın sonucunda uğrayacağı deformasyonu) ölçmeyi içeriyordu. Kütleçekim dalgasına maruz kaldığında silindirin boyuna (eksenel) titreşim kipleri uyarılmaktadır. Şekil 1 de görüldüğü gibi, tipik bir "çubuk detektör"  $3 \text{ m}$  lik bir uzunluğa  $1000 \text{ kg}$  lık bir kütle ve yaklaşık  $1 \text{ kHz}$  lik bir çınlanım frekansına sahiptir. Sıvı Helyum sıcaklığında çalıştırılmaktadır ve titreşimler çok düşük gürültülü bir dc SQUID yükselticisi ile çiftlenimli bir çınlanım dönüştürücü (mikrodalga kovuğu) yardımıyla algılanmaktadır.



Şekil 1. Kriyojenik bir çınlanımlı çubuk detektörün enine kesiti [20, 29].

Dünya üzerinde çeşitli yerlerde konuşlanmış, yukarıda bahsedilen detektör tipini kullanan çeşitli gözlemevleri vardır. ALLEGRO 1991'de Los Angeles Amerika Birleşik Devletlerindeki Louisiana Eyalet Üniversitesinde  $2296 \text{ kg}$ 'lık Alüminyum antene sahip,  $4.2 \text{ K}$ 'e kadar soğutulmuş bir detektör olarak kurulmuştur [47]. 1991'den 2008'e kadar çalıştırılmıştır. AURIGA 1997'de Padova İtalya'daki Legnaro' da kurulmuştur [48]. Bu detektör de artık çalışmalarını sürdürmemektedir. EXPLORER 1984'te Roma Grubu tarafından Cenevre, İsviçre'deki CERN'de kurulmuştur [49]. Detektör  $2.5 \text{ K}$ 'e kadar soğutulmuş  $2270 \text{ kg}$ 'lık Alüminyum bir detektördür. EXPLORER, kozmik ışın sağanağıyla çubuk detektörün, akustik uyarılma yoluyla etkileşmesini sağlamak üzere kozmik ışın detektörleriyle donatılmıştır. NAUTILUS Roma grubu tarafından İtalya'daki Frascati'de 1995'te kurulmuştur [50].

NAUTILUS da kozmik ışın detektörleriyle donatılmıştır. NIOBE Batı Avustralya'da Perth'de 1995'ten beri kuruludur [51]. Detektör olarak Alüminyum yerine Nyobiyum kullanılmaktadır. Yukarıda bahsi geçen Çubuk Detektörlerinin bazıları çalışmalarını durdurmuştur. Hala çalışanlar IGEC (International Gravitational Event Collaboration) çatısı altında çalışmalarına devam etmektedirler [52].

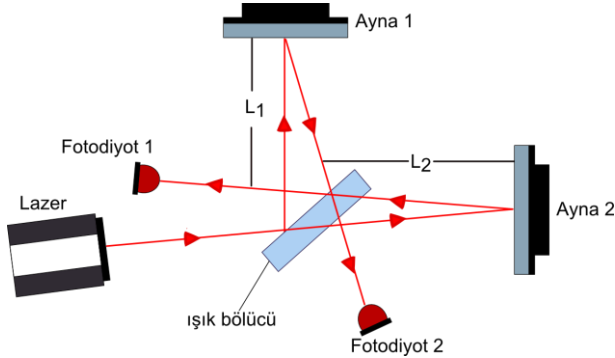
### 3.2. Lazer girişimölçerli detektörler

Yine 1960'ların başında ABD Caltech'den (Californiya Teknik Enstitüsü) Kip Thorne'un kütleçekim dalgalarının ölçülebileceğine dair çalışmalarıyla ve 1970'lerden itibaren Caltech ve MIT'ten (Massachusetts Teknoloji Enstitüsü, ABD) Barry C. Barish, Rainer Weiss'in ortak çalışmalarıyla Lazer Girişimölçerli Kütleçekim dalga detektörlerinin prototipi oluşturuldu [19, 39, 53-55]. Thorne, Barish ve Weiss 2017'de bu çalışmadan ötürü Nobel ödülünü aldılar [56].

Şekil 2 de görüldüğü gibi, bu detektör türü daha geniş bir bant aralığına sahiptir ve dalganın genliğinin  $h(t)$  şeklindeki zamana bağlılığını ayrıntılı inceleyecek kadar bir frekans aralığını kapsayabilmektedir. Bir girişimölçerinin basit bir şeması aşağıdaki şekilde gibidir [11]. Bu tür detektörlerin duyarlılığı:

$$h = \frac{\Delta(L_1 - L_2)}{L_1}, \quad (6)$$

şeklinde verilir. Burada  $\Delta$  kütleçekim dalgalarının varlığından kaynaklanan değişimi göstermektedir.



Şekil 2. Lazer girişimölçerli bir kütleçekim dalga detektörünün basit şeması [57].

Ayrıca düşük frekanslarda dünya üzerindeki hareketlilikten (insanların hareketleri, kara-hava ulaşım araçları vs hareketleri) kaynaklanan gürültüleri yok etmek imkânsız değilse bile zordur. Bundan kurtulabilmek için uzayda konuşlandırılan detektörler tasarlanmıştır [58-60]. Detektörler uzaydaki istasyonlarda ya da uzay araçlarına konuşlandırılırlar.

### 3.3. LIGO ve diğer gözlemleri

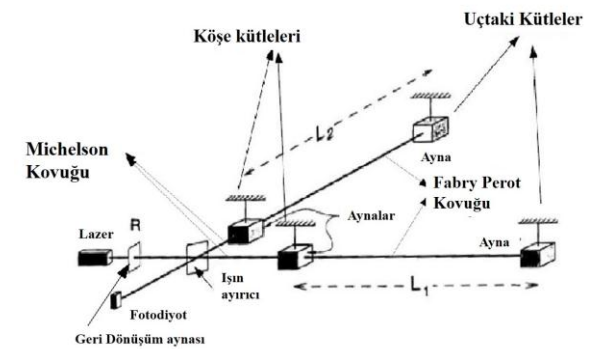
LIGO (Laser Interferometer Gravitational Waves Observatory)'nun yapısı Şekil 3 'te görüldüğü gibi Michelson Girişimölçerini temel almaktadır [61, 62].

Bilindiği üzere, 1887'de Albert Michelson ve Edward Morley tarafından eter teorisinin geçerli olduğunu

ispatlamak için adlarıyla anılan Girişimölçerli deneyi tasarlamışlar, fakat eter'in varlığını ispatlayamamışlardır [63]. Lazer girişimölçerinde de aynı temel ilke kullanılmaktadır. Uzayda gerçekleşen bir kütleçekim dalgası girişimölçere ulaştığında uzayı bir yönde uzatırken diğer yönde sıkıştırır [28, 64]. Farklı noktalar arasında seken lazerlerin girişimini ölçerek aradaki uzayın uzadığı mı yoksa sıkıştığı mı çok net olarak ölçülebilir. Bu iş yüksek derecede duyarlılık gerektirir. Michelson girişimölçeri ile Lazer girişimölçeri arasındaki temel benzerlikler aşağıdaki şekildedir.

İkisi de L şeklindedir. İkisi de kolların uçlarında aynalara sahiptirler. Bunlar ışık demetlerini birleştirmek için ışığı yansıtıma yararlar. Böylece bir girişim deseni oluşturulur. Her ikisi de iki demetin üst üste binmesi sağlandıktan sonra sonuçta elde edilen ışık demetinin yoğunluğunu ve desenlerini ölçerler. Ortak yönleri yalnızca bunlardır. Hem yapı hem de karmaşıklık açısından LIGO, Michelson Girişimölçerlerinin çok ötesindedir. Örneğin, kolları 4 km uzunluğundadır (Michelson-Morley deneyinde kullanılanın 360 katı uzunluğundadır). Kollar ne kadar uzun olursa, lazer o kadar uzağa gider. Kol uzunluğundaki bir değişiklik ölçümü, bir protondan 1000 kez daha küçüktür.

Uzay araçlarını kullanmak, kol uzunluklarını 50000 veya 5 milyon km'ye kadar uzatarak frekans aralığını genişletecektir. Kollar ne kadar uzun olsa da kütleçekim dalgaları kadar küçük genlikli niceliklerin ölçülebilmesi, aynalar (Fabry-Perot kovukları ya da girişimölçerleri) ve güç geri dönüşümlü Lazerler kullanılarak sağlanmaktadır. Fabry-Perot girişimölçeri duran dalga çınlanımlı, yüksek yansıtma gücüne sahip ince aynalardan oluşur [65, 66]. Böylece LIGO'nun girişimölçer kolları 1120 km uzunluğuna ulaştırılır. LIGO'nun duyarlılığını arttırmak için Lazer gücü de önemlidir.



Şekil 3. Lazer girişimölçerli detektörün (LIGO) şeması [14].

Kolları uzatmak girişimölçerinin titreşimlere duyarlılığını artırırken, lazer gücünü artırmak çözünürlüğünü artırmaktadır. Bu işlem de yine "daha fazla ayna" kullanarak sağlanmaktadır. Bu teknik "Güç Geri dönüşümü" olarak adlandırılır [29].

Daha önce bahsedildiği gibi kütleçekim dalgalarının olası kaynaklarından bazıları nötron yıldızları ve karadeliğin birleşmeleridir [67-69]. Karadeliğin



birleşmeleri en net kütleçekim dalgaları sinyalleri sağlar. Böyle birleşmeler her galaksi başına 1000 yılda bir gerçekleşme sıklığına sahiptir. Bu yüzden çok sayıda galaksiyi tarayacak girişimölçerlere ihtiyaç vardır. Bu gereksinimi karşılamak üzere LIGO ve benzeri birçok gözlemevi yerküre üzerinde kurulmuşlardır.

Advanced (Geliştirilmiş) LIGO Amerika Birleşik Devletleri'nde Hanford (Washington) ve Livingston'da (Louisiana) yer almaktadır. Advanced LIGO 2001'de kurulan LIGO'nun geliştirilmiş bir sürümüdür [30, 70]. GEO600 2001'den beri Almanya-İngiltere işbirliğinde Hannover (Almanya) yakınındaki Ruthe'de çalıştırılmaktadır [71, 72]. Kolları kısadır (3 km uzunluğu), "Sinyal Geridönüşümü" tekniğini kullanan ilk detektördür. VIRGO Pisa (İtalya) kenti yakınındaki Cascina'da yer almaktadır [73, 74]. TAMA300 1999'dan beri Tokyo'da (Japonya) işletilmektedir [75, 76]. LISA (Laser Interferometer Space Antenna) çok düşük frekanslardaki ( $10^{-4}$  - 1 Hz) kütleçekim dalga spektrumunun keşfini sağlaması planlanan bir uzay görevidir [77, 78]. Avrupa Uzay Ajansı (ESA) ile NASA iş birliğinde sürdürülmektedir.

#### 4. SONUÇ

Kütleçekim dalgalarını ölçmek üzere Dünya üzerinde araştırma grupları küresel iş birliği içerisinde çalışmalarını sürdürmektedirler. Bunlar iki ana grup şeklinde olup, aşağıda açıklanmıştır.

IGEC (International Gravitational Event Collaboration): "Uluslararası Kütleçekim Olgu İş birliği" 1997'de kurulmuştur. İşletilmekte olan bütün çubuk detektörleri bu çatı altında bağlantılıdır. Bu grup tarafından Kütleçekim dalgalarının algılanmasına dair istatistiksel bir kanıt henüz bulunamamıştır [79-83].

LSC (LIGO Scientific Collaboration): Bu grup yine 1997'de kurulmuştur. Lazer Girişimölçerli detektörlerle gözlem yapan LIGO, Virgo, GEO600 gibi gözlemevleri arasında gerçekleştirilen iş birliğidir. Bu işbirliğinde; ikili nötron yıldızı birleşmelerinden kaynaklanan sarmal olmayan sinyal araştırılması, hızlıca dönen bir atarcadan yayılan düzenli dalgaların araştırılması, bilinmeyen kaynaklı kısa patlamaların araştırılması, kozmolojik başlangıcın stokastik arkaplan araştırılması gibi analizler gerçekleştirilmektedir [84, 85].

Bu iş birliklerinin kurulması ve sürdürdükleri çalışmaların sonucunda; A. Einstein'ın 1916'daki öngörüsünden yaklaşık 100 yıl kadar sonra, 14 Eylül 2015'te LIGO ve Virgo (LSC) Gözlemevlerindeki bilim insanlarının iş birliğiyle bir kütleçekim dalga sinyalinin gözlemlendiği duyuruldu [86-88]. Sinyalin 35 ile 250 Hz arasında bir frekansa ve  $1.0 \times 10^{-21}$  genliğe sahip olduğu ölçüldü. Bu ölçüm, dünyadan 1,3 milyar ışık yılı uzaktaki bir çift karadeliğin çarpışıp kaynaşması sonucu oluşan tek karadeliğin yaydığı genel görelilikçe öngörülen kütleçekim dalgasıyla uyumlu bir dalgayı tespit etmiş oldu. Birleşmeden önceki karadeliğlerden birinin kütlesi, Güneşin kütlesinin 36 katı, diğeri 29 katıydı. Bu gözlem evrende ikili Karadelik

birleşmelerinin ve bunun sonucunda kütleçekim dalgalarının oluştuğunun doğrudan kanıtı olmuştur.

Şimdiye kadar yapılan gözlemler; kozmolojik evrende gerçekleşen olayların, var olan oluşumların yaydığı elektromanyetik ışımının algılanmasıyla gerçekleştirilmekteydi. Elektromanyetik ışımının temel alındığı detektörlere ek olarak kütleçekim dalgalarının algılanmasına yönelik çalışmalar, kozmolojik evrenin kararlık madde ve negatif enerjili oluşumlarını ve en erken evren (oluşumundan  $10^{-21}$  saniye sonrasına kadar) hakkındaki bilgilerimizi arttıracaktır. Büyük Patlama teorisine göre patlamadan sonra 380 bin yıl boyunca elektromanyetik ışım olmamıştır [89, 90]. Bu dönem 'opak dönem' olarak adlandırılmaktadır. Evrenin başlangıcının bu zamanlarına dair elektromanyetik gözlem yoktur. Kütleçekim dalgalarının ölçülebilmesiyle bu dönem aydınlatılabilecektir. Yukarıda sözü edilen gözlem Karadelik parametrelerinin yüksek doğrulukla tespiti konusunda da faydalı olmuştur. Dolayısıyla kütleçekim dalga profiline doğru biçimde oluşturulması veya elektromanyetik gözlemlerle elde edilen verilerin doğrulanması karadeliğlerin ve karadelik çarpışmalarının daha kapsamlı incelenmesini sağlayacaktır [35, 91-93]. Milenyumun başlangıcından beri, özellikle Lazer girişimölçerli detektörlerin teknolojik gelişimi ve 2015'te gerçekleştirilen bu gözlem ve arkasından gelen 2017'deki ikili nötron yıldızı çarpışması sonucu ortaya çıkan dalgaların ölçülmesi, astronomik gözlemlerde kütleçekim dalgaları detektörlerinin devreye girmesini sağlayarak yeni bir pencere açmış ve yeni bir çağ başlatmıştır. Ayrıca, bu pencere insanoğlunun evrenin oluşumuna dair daha fazla kanıtı ulaşmasını da sağlayabilecektir.

#### KAYNAKLAR

- [1] Einstein A. Approximative integration of the field equations of gravitation. Sitzungsber Preuss Akad Wiss Berlin (Math Phys). 1916;1916(688-696):1.
- [2] Einstein A. About Gravity Waves. Sitzungsber Preuss Akad Wiss Berlin (Math Phys). 1918:154.
- [3] Flanagan EE, Hughes SA. The basics of gravitational wave theory. New Journal of Physics. 2005;7(1):204.
- [4] Woodhouse N. Gravitational Waves. General Relativity. 2007:145-56.
- [5] Schwarzschild K. On the gravitational field of a point mass in Einstein's theory. Reimer, Berlin, S. 1916.
- [6] Crothers SJ. A brief history of black holes. Progress in Physics. 2006;2:54.
- [7] Kerr RP. Gravitational field of a spinning mass as an example of algebraically special metrics. Physical review letters. 1963;11(5):237.
- [8] Kerr R. Scalar invariants and groups of motions in a four dimensional Einstein space. Journal of Mathematics and Mechanics. 1963:33-54.
- [9] d'Inverno RA. Introducing Einstein's relativity: Clarendon Press; 1992.
- [10] Pitkin M, Reid S, Rowan S, Hough J. Gravitational wave detection by interferometry (ground and space). Living Reviews in Relativity. 2011;14(1):5.

- [11] Weber J. Evidence for discovery of gravitational radiation. *Physical Review Letters*. 1969;22(24):1320.
- [12] Hulse RA, Taylor JH. Discovery of a pulsar in a binary system. *The Astrophysical Journal*. 1975;195:L51-L3.
- [13] Damour T. 1974: the discovery of the first binary pulsar. *Classical and Quantum Gravity*. 2015;32(12):124009.
- [14] Seeds MA, Backman D. *Horizons: Exploring the universe*: Nelson Education; 2013.
- [15] Collins H. *Gravity's shadow: the search for gravitational waves*: University of Chicago Press; 2010.
- [16] Davies PCW, Davies G. *The search for gravity waves*: CUP Archive; 1980.
- [17] Schutz BF. *Gravitational wave sources and their detectability*. *Classical and Quantum Gravity*. 1989;6(12):1761.
- [18] Andersson N, Ferrari V, Jones D, Kokkotas K, Krishnan B, Read J, et al. Gravitational waves from neutron stars: promises and challenges. *General Relativity and Gravitation*. 2011;43(2):409-36.
- [19] Thorne KS. Gravitational-wave research: Current status and future prospects. *Reviews of Modern Physics*. 1980;52(2):285.
- [20] Blair DG. *The detection of gravitational waves*: Cambridge university press; 2005.
- [21] Hughes SA. Listening to the universe with gravitational-wave astronomy. *Annals of Physics*. 2003;303(1):142-78.
- [22] Raab FJ. Progress Toward a Laser Interferometer Gravitational-Wave Observatory. APS. 1996:G5.02.
- [23] Abbott B, Abbott R, Adhikari R, Ageev A, Allen B, Amin R, et al. Detector description and performance for the first coincidence observations between LIGO and GEO. *Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section A: Accelerators, Spectrometers, Detectors and Associated Equipment*. 2004;517(1-3):154-79.
- [24] Cho A. To catch a wave. *American Association for the Advancement of Science*; 2015.
- [25] Sanjuan J, Mueller G, Livas J, Preston A, Arsenovic P, Castellucci K, et al. LISA telescope spacer design investigations. *cosp*. 2010;38:10.
- [26] Moore CJ, Cole RH, Berry CP. Gravitational-wave sensitivity curves. *Classical and Quantum Gravity*. 2014;32(1):015014.
- [27] Easther R, Lim EA. Stochastic gravitational wave production after inflation. *Journal of Cosmology and Astroparticle Physics*. 2006;2006(04):010.
- [28] Saulson PR. *Fundamentals of interferometric gravitational wave detectors*: World Scientific; 1994.
- [29] Aufmuth P, Danzmann K. Gravitational wave detectors. *New Journal of Physics*. 2005;7(1):202.
- [30] Harry GM, Collaboration LS. Advanced LIGO: the next generation of gravitational wave detectors. *Classical and Quantum Gravity*. 2010;27(8):084006.
- [31] Owen BJ, Lindblom L, Cutler C, Schutz BF, Vecchio A, Andersson N. Gravitational waves from hot young rapidly rotating neutron stars. *Physical Review D*. 1998;58(8):084020.
- [32] Gogoberidze G, Kahniashvili T, Kosowsky A. Spectrum of gravitational radiation from primordial turbulence. *Physical Review D*. 2007;76(8):083002.
- [33] Smartt SJ. Progenitors of core-collapse supernovae. *Annual Review of Astronomy and Astrophysics*. 2009;47.
- [34] Malbon RK, Baugh C, Frenk C, Lacey C. Black hole growth in hierarchical galaxy formation. *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society*. 2007;382(4):1394-414.
- [35] Konoplya R, Zhidenko A. Detection of gravitational waves from black holes: Is there a window for alternative theories? *Physics Letters B*. 2016;756:350-3.
- [36] Abbott B, Abbott R, Adhikari R, Ajith P, Allen B, Allen G, et al. LIGO: the laser interferometer gravitational-wave observatory. *Reports on Progress in Physics*. 2009;72(7):076901.
- [37] Danzmann K, Chen J, Nelson P, Niebauer T, Rüdiger A, Schilling R, et al. The GEO—project a long-baseline laser interferometer for the detection of gravitational waves. *Relativistic Gravity Research with Emphasis on Experiments and Observations*: Springer; 1992. p. 184-209.
- [38] Estabrook FB, Wahlquist HD. Response of Doppler spacecraft tracking to gravitational radiation. *General Relativity and Gravitation*. 1975;6(5):439-47.
- [39] Thorne KS, Braginskii V. Gravitational-wave bursts from the nuclei of distant galaxies and quasars-Proposal for detection using Doppler tracking of interplanetary spacecraft. *The Astrophysical Journal*. 1976;204:L1-L6.
- [40] Bertotti B, Carr B. The prospects of detecting gravitational background radiation by Doppler tracking interplanetary spacecraft. *The Astrophysical Journal*. 1980;236:1000-11.
- [41] Fafone V. Resonant-mass detectors: status and perspectives. *Classical and Quantum Gravity*. 2004;21(5):S377.
- [42] Michelson PF, Taber RC. Can a resonant-mass gravitational-wave detector have wideband sensitivity? *Physical Review D*. 1984;29(10):2149.
- [43] Aguiar OD. Past, present and future of the Resonant-Mass gravitational wave detectors. *Research in Astronomy and Astrophysics*. 2011;11(1):1.
- [44] Astone P. Resonant mass detectors: present status. *Classical and Quantum Gravity*. 2002;19(7):1227.
- [45] Boughn SP, Fairbank W, Mapoles E, McAshan M, Michelson P, Giffard R, et al. Observations with a low-temperature, resonant mass, gravitational radiation detector. *The Astrophysical Journal*. 1982;261:L19-L22.
- [46] Hollenhorst JN. Quantum limits on resonant-mass gravitational-radiation detectors. *Physical Review D*. 1979;19(6):1669.
- [47] Astone P, Bassan M, Bonifazi P, Carelli P, Coccia E, Cosmelli C, et al. Search for gravitational

- radiation with the Allegro and Explorer detectors. *Physical review D*. 1999;59(12):122001.
- [48] Cerdonio M, Bonaldi M, Carlesso D, Cavallini E, Caruso S, Colombo A, et al. The ultracryogenic gravitational-wave detector AURIGA. *Classical and Quantum Gravity*. 1997;14(6):1491.
- [49] Astone P, Bassan M, Bonifazi P, Carelli P, Castellano M, Cavallari G, et al. Long-term operation of the Rome" Explorer" cryogenic gravitational wave detector. *Physical Review D*. 1993;47(2):362.
- [50] Astone P, Bassan M, Bonifazi P, Carelli P, Coccia E, Cosmelli C, et al. The gravitational wave detector NAUTILUS operating at T= 0.1 K. *Astroparticle Physics*. 1997;7(3):231-43.
- [51] Astone P, Bassan M, Blair D, Bonifazi P, Carelli P, Coccia E, et al. Search for coincident excitation of the widely spaced resonant gravitational wave detectors EXPLORER, NAUTILUS and NIOBE. *Astroparticle Physics*. 1999;10(1):83-92.
- [52] Astone P, Babusci D, Bassan M, Bonifazi P, Carelli P, Cavallari G, et al. Study of the coincidences between the gravitational wave detectors EXPLORER and NAUTILUS in 2001. *Classical and Quantum Gravity*. 2002;19(21):5449.
- [53] Thorne KS, Will CM. Theoretical frameworks for testing relativistic gravity. I. Foundations. *The Astrophysical Journal*. 1971;163:595.
- [54] Weiss R. Gravitational radiation. *Reviews of Modern Physics*. 1999;71(2):S187.
- [55] Barish BC, Weiss R. LIGO and the detection of gravitational waves. *Physics Today*. 1999;52:44-50.
- [56] Castelvechi D. Gravitational wave detection wins physics Nobel. *Nature News*. 2017;550(7674):19.
- [57] Drever R, Hought J, Munley A, Lee S-A, Spero R, Whitcomb S, et al. Gravitational wave detectors using laser interferometers and optical cavities: Ideas, principles and prospects. *Quantum Optics, Experimental Gravity, and Measurement Theory*: Springer; 1983. p. 503-14.
- [58] Luo J, Chen L-S, Duan H-Z, Gong Y-G, Hu S, Ji J, et al. TianQin: a space-borne gravitational wave detector. *Classical and Quantum Gravity*. 2016;33(3):035010.
- [59] Bartolo N, Caprini C, Domcke V, Figueroa DG, Garcia-Bellido J, Guzzetti MC, et al. Science with the space-based interferometer LISA. IV: Probing inflation with gravitational waves. *Journal of Cosmology and Astroparticle Physics*. 2016;2016(12):026.
- [60] Caprini C, Hindmarsh M, Huber S, Konstandin T, Kozaczuk J, Nardini G, et al. Science with the space-based interferometer eLISA. II: Gravitational waves from cosmological phase transitions. *Journal of cosmology and astroparticle physics*. 2016;2016(04):001.
- [61] Spero R, Whitcomb S. The laser interferometer gravitational-wave observatory (LIGO). *Optics and Photonics News*. 1995;6(7):35-9.
- [62] Abramovici A, Althouse WE, Drever RW, Gürsel Y, Kawamura S, Raab FJ, et al. LIGO: The laser interferometer gravitational-wave observatory. *science*. 1992;256(5055):325-33.
- [63] Michelson AA, Morley EW. On the Relative Motion of the Earth and of the Luminiferous Ether. *Sidereal Messenger*, vol 6, pp 306-310. 1887;6:306-10.
- [64] Accadia T, Acernese F, Alshourbagy M, Amico P, Antonucci F, Aoudia S, et al. Virgo: a laser interferometer to detect gravitational waves. *Journal of Instrumentation*. 2012;7(03):P03012.
- [65] Rakhmanov M, Romano J, Whelan JT. High-frequency corrections to the detector response and their effect on searches for gravitational waves. *Classical and Quantum Gravity*. 2008;25(18):184017.
- [66] Ando M, Arai K, Takahashi R, Heinzl G, Kawamura S, Tatsumi D, et al. Stable operation of a 300-m laser interferometer with sufficient sensitivity to detect gravitational-wave events within our galaxy. *Physical Review Letters*. 2001;86(18):3950.
- [67] Zhang B. Early X-ray and optical afterglow of gravitational wave bursts from mergers of binary neutron stars. *The Astrophysical Journal Letters*. 2013;763(1):L22.
- [68] Voss R, Tauris TM. Galactic distribution of merging neutron stars and black holes—prospects for short gamma-ray burst progenitors and LIGO/VIRGO. *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society*. 2003;342(4):1169-84.
- [69] Thorne KS. Probing black holes and relativistic stars with gravitational waves. *Black Holes And The Structure Of The Universe*: World Scientific; 2000. p. 81-118.
- [70] Fritschel P. Advanced LIGO systems design. *LIGO Tech Note T-010075-00-D*, <http://docuser.v.ligo.caltech.edu>. 2001.
- [71] Rüdiger A, Danzmann K. The GEO 600 Gravitational Wave Detector Status, Research, Development. *Gyros, Clocks, Interferometers: Testing Relativistic Gravity in Space*: Springer; 2001. p. 131-40.
- [72] Willke B, Aufmuth P, Aulbert C, Babak S, Balasubramanian R, Barr B, et al. The GEO 600 gravitational wave detector. *Classical and Quantum Gravity*. 2002;19(7):1377.
- [73] Acernese F, Agathos M, Agatsuma K, Aisa D, Allemandou N, Allocca A, et al. Advanced Virgo: a second-generation interferometric gravitational wave detector. *Classical and Quantum Gravity*. 2014;32(2):024001.
- [74] Bradaschia C, Del Fabbro R, Di Virgilio A, Giazotto A, Kautzky H, Montelatici V, et al. The VIRGO project: a wide band antenna for gravitational wave detection. *Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section A: Accelerators, Spectrometers, Detectors and Associated Equipment*. 1990;289(3):518-25.
- [75] Tsubono K, editor 300-m laser interferometer gravitational wave detector (TAMA300) in Japan. *First Edoardo Amaldi conference on gravitational wave experiments*; 1995: World Scientific.
- [76] Takahashi R, collaboration T. Status of TAMA300. *Classical and Quantum Gravity*. 2004;21(5):S403.

- [77] Danzmann K, Team LS. LISA: laser interferometer space antenna for gravitational wave measurements. *Classical and Quantum Gravity*. 1996;13(11A):A247.
- [78] Hough J. LISA-Laser Interferometer Space Antenna for gravitational wave measurements. *gwe*. 1995:50.
- [79] Prodi G, Martinucci V, Mezzena R, Vinante A, Vitale S, Heng I, et al. Initial operation of the International Gravitational Event collaboration. *International Journal of Modern Physics D*. 2000;9(03):237-45.
- [80] Astone P, Babusci D, Baggio L, Bassan M, Blair D, Bonaldi M, et al. Methods and results of the IGEC search for burst gravitational waves in the years 1997–2000. *Physical Review D*. 2003;68(2):022001.
- [81] Astone P, Babusci D, Baggio L, Bassan M, Bignotto M, Bonaldi M, et al. Results of the IGEC-2 search for gravitational wave bursts during 2005. *Physical Review D*. 2007;76(10):102001.
- [82] Allen Z, Astone P, Baggio L, Busby D, Bassan M, Blair D, et al. First search for gravitational wave bursts with a network of detectors. *Physical review letters*. 2000;85(24):5046.
- [83] Whitcomb SE. Ground-based gravitational-wave detection: now and future. *Classical and Quantum Gravity*. 2008;25(11):114013.
- [84] Blackburn L, Cadonati L, Caride S, Caudill S, Chatterji S, Christensen N, et al. The LSC glitch group: monitoring noise transients during the fifth LIGO science run. *Classical and Quantum Gravity*. 2008;25(18):184004.
- [85] Gustafson E, Shoemaker D, Strain K, Weiss R. LSC white paper on detector research and development. LIGO Document T990080-00-D. 1999.
- [86] Collaboration LS, Collaboration V. GWTC-1: a gravitational-wave transient catalog of compact binary mergers observed by LIGO and Virgo during the first and second observing runs. *PHYSICAL REVIEW X Phys Rev X*. 2019;9:031040.
- [87] Abbott B, Abbott R, Abbott T, Abraham S, Acernese F, Ackley K, et al. GWTC-1: a gravitational-wave transient catalog of compact binary mergers observed by LIGO and Virgo during the first and second observing runs. *Physical Review X*. 2019;9(3):031040.
- [88] Abbott BP, Abbott R, Abbott T, Abernathy M, Acernese F, Ackley K, et al. Observation of gravitational waves from a binary black hole merger. *Physical review letters*. 2016;116(6):061102.
- [89] Fox KC. *The big bang theory: What it is, where it came from, and why it works*: John Wiley & Sons; 2002.
- [90] Linde A, Linde D, Mezhlumian A. From the Big Bang theory to the theory of a stationary universe. *Physical Review D*. 1994;49(4):1783.
- [91] Caprini C, Figueroa DG. Cosmological backgrounds of gravitational waves. *Classical and Quantum Gravity*. 2018;35(16):163001.
- [92] Bauswein A, Just O, Janka H-T, Stergioulas N. Neutron-star radius constraints from GW170817 and future detections. *The Astrophysical Journal Letters*. 2017;850(2):L34.
- [93] Carson Z, Seymour BC, Yagi K. Future prospects for probing scalar–tensor theories with gravitational waves from mixed binaries. *Classical and Quantum Gravity*. 2020;37(6):065008.