

**2+1 Boyutta Yüksek Mertebeden Türevli Kütle-Çekim Kuramlarının
Klasik ve Kuantum Mekaniksel Yapıları**

Proje No: 110T339

Prof.Dr. Bayram TEKİN

ARALIK 2012
ANKARA

ÖNSÖZ

“2+1 Boyutta Yüksek Mertebeden Türevli Kütle-Çekim Kuramlarının Klasik ve Kuantum Mekaniksel Yapıları” başlıklı proje 110T339 proje numarası ile TÜBİTAK 1001 destek programı kapsamında 01/11/2010-01/11/2012 tarihleri arasında desteklenmiştir. Projede bir proje yürütücüsü ile iki doktora öğrencisi araştırmacı görev almıştır.

İÇİNDEKİLER

ÖNSÖZ.....	2
İÇİNDEKİLER.....	3
ŞEKİLLER.....	4
ÖZET.....	5
ABSTRACT.....	6
GİRİŞ.....	7
GENEL BİLGİLER.....	9
GEREÇ VE YÖNTEM.....	12
BULGULAR.....	15
SONUÇ.....	20
REFERANSLAR	21

ŞEKİLLER

ŞEKİL 1: Uzayzamanda enerji-momentum tensörleri ile gösterilen iki kaynağın bir graviton vasıtası ile etkileşmesini ifade eden Feynman diyagramı 13

ÖZET

Bu projede 2+1 boyutta yüksek mertebeden türevli kütleçekim teorilerinin klasik ve kuantum özellikleri çalışılmıştır. Üç boyutta kazanılan yeni kavrayışlar, yüksek boyutlardaki kütleçekim teorilerinin doğasını anlamak için kullanılmıştır. Projenin en önemli sonuçları iki yeni teorik yapıdır: (1) kütleçekimsel bir Higgs mekanizması, Weyl-değişmezlik fikri yeni kütleli gravitasyon (NMG), topolojik kütleli gravitasyon (TMG), ve yeni kütleli gravitasyonun Born-Infeld genişletmesi (BINMG) gibi özel üç boyutlu yüksek mertebeden türevli teorilere uygulanarak ortaya konulmuştur; (2) ilhamını NMG ve kiral gravitasyon teorisinden alan dört boyutlu kritik gravitasyon teorisi D boyuta genelleştirilmiştir.

Bu teorik yapılara ek olarak, denk ikinci mertebeden eğrilikli eylem metodu, Born-Infeld teorilerini de içerecek şekilde yüksek mertebeden eğrilikli gravitasyon teorilerinin üniterliğini analiz etmek üzere uyarlanmıştır. Bu metod kullanılarak kübik eğrilikli teorilerinin, BINMG'nin, ve Lovelock gravitasyon teorisinin üniterliği analiz edilmiştir. Buna ilaveten, Weyl-değişmezlik fikri D boyutlu ikinci mertebeden eğrilikli gravitasyon teorilerine de uygulanmış, ardından üç boyutlu ve D boyutlu Weyl-değişmez teorilerin üniterliği analiz edilmiştir. Ağaç mertebesinde kuantum yapıyı ortaya çıkaran üniterlik analizine ek olarak, yüksek mertebeden eğrilikli teorilerin çözümleri de bulunmuştur. Üç boyutta, bütün yüksek mertebeden eğrilikli teorilerin çözümlerini bulmak üzere algoritmik bir yaklaşım geliştirilmiş ve bu yaklaşım kullanılarak BINMG ile ikinci mertebeden ve kübik eğrilikli teorilerin çözümleri bulunmuştur. Öte yandan, yüksek boyutlarda ikinci mertebeden eğrilikli teorilerin AdS-dalga çözümleri bulunmuştur. AdS-dalga çözümü alan denklemlerini doğrusal mertebeye indirdiğinden, kritik gravitasyonun logaritmik modlarını tanımlayan çözümler de bulunmuştur. Bunların yanında, ikinci mertebeden eğrilikli gravitasyonun alan denklemlerini AdS-dalga gibi doğrusallaştıran bir uzayzaman sınıfı tanımlanmış ve bu sınıfta özel bir sonuç olarak D boyutlu ikinci mertebeden eğrilikli gravitasyonun küresel AdS-dalga çözümleri bulunmuştur. Yüksek mertebeden türevli kütleçekim teorilerinin proje süresince çalışılan diğer bir özelliği ise bu teorilerin korunan kütleçekimsel yükleridir. TMG'nin korunan yükleri, teorisinin eşdeğer simplektik yapısı kullanılarak tanımlanmış, diğer yandan D-boyutlu yüksek eğrilikli teorilerin korunan yükleri ise denk ikinci mertebeden eğrilikli eylem metodu kullanılarak bulunmuştur.

Anahtar kelimeler: Weyl simetrisi, Higgs mekanizması, yeni kütleli gravitasyon, topolojik kütle, Born-Infeld, AdS-dalga

ABSTRACT

In this project, classical and quantum properties of higher derivative gravity theories in 2+1 dimensions have been studied. The new insights gained in three dimensions have been used to understand the nature of higher-dimensional gravity theories. The most important outcomes of the project are two novel theoretical constructions: (1) a gravitational Higgs mechanism was introduced by applying the Weyl-invariance idea to the particular three-dimensional higher derivative gravity theories, namely, new massive gravity (NMG), topologically massive gravity (TMG), and Born-Infeld extension of new massive gravity (BINMG); (2) the four-dimensional critical gravity theory-whose inspiration comes from NMG and chiral gravity theory-was extended to D-dimensions.

In addition to these theoretical constructions, the method of equivalent quadratic curvature action was adapted to analyze the unitarity of higher curvature gravity theories including Born-Infeld gravity. The unitarity of cubic curvature theories, BINMG, and Lovelock gravity was analyzed by using this method. Furthermore, Weyl-invariance idea was also applied to the quadratic curvature gravity theory in D-dimensions, and then the unitarity of three-dimensional and D-dimensional Weyl-invariant theories have been analyzed. In addition to the unitarity analysis revealing the tree-level quantum structure, the solutions for the higher curvature theories were also found. In three dimensions, an algorithmic approach to find solutions of all higher curvature theories was developed and this approach was used to find solutions of BINMG, and quadratic and cubic curvature theories. On the other hand, in higher dimensions the AdS-wave solutions of quadratic curvature theories were found. As the AdS-wave solution linearizes the field equations, the solutions representing logarithmic modes of critical gravity were also found. In addition, a class of spacetimes which linearizes the field equations of quadratic curvature gravity just like AdS-wave was determined, and as a particular solution in this class, the spherical AdS-wave solutions of D-dimensional quadratic curvature gravity were found. Another property of the higher-derivative gravity theories that have been studied during the project is the gravitational conserved charges of the theories. The conserved charges of TMG are determined by using the covariant symplectic structure of the theory, while the conserved charges of generic D-dimensional higher curvature theories are found by using the method of equivalent quadratic curvature action.

Keywords: Weyl symmetry, Higgs mechanism, new massive gravity, topological mass, Born-Infeld, AdS-wave

GİRİŞ

Einstein'ın genel görelilik kuramı, evreni kavrayışımızı kökünden değiştiren ve tutarlılığı güneş sistemi ölçeklerinde deneylerle kanıtlanmış başarılı bir teorik yapıdır. Bütün başarısına rağmen teorinin kuantum mekaniği prensipleri ile uyumsuzluğundan kaynaklı teorik nedenler ve kozmik ivmelenme gibi deneysel sonuçlar teorinin değışkelerinin göz önünde bulundurulmasını gerektirmektedir.

Einstein teorisinin kuantum mekaniği ile uyumsuzluğundaki temel problemlerden biri teorinin renormalize olmamasıdır. Sicim teorisi ve asimptotik güvenlik gibi kuantum kütleçekim yaklaşımlarında, Einstein teorisi düşük enerji limitinde efektif bir alan teorisi olarak kabul edilmektedir. Efektif alan teorisi bakış açısının doğal sonucu, Einstein teorisinin yüksek enerjilerde teorinin simetrisi ile uyumlu yüksek mertebeden türevli ve eğrilikli terimler ile genişletilmesidir. Bu şekilde yapılacak ilk genişletme teoriye ikinci mertebeden eğrilikli terimlerin eklenmesidir ki bu terimlerin eklenmesi ile Einstein teorisi dört boyutta renormalize olma özelliğini kazanır, ancak üniterlik özelliğini yitirir (STELLE, 1977).

Öte yandan, kozmik ivmelenme Einstein teorisinin evren ölçeklerinde geçerliliği ile ilgili bir açmazı ifade eder. Bu deneysel gözlemi açıklamak için teoride yapılabilecek en basit değışiklik kozmolojik sabitin eklenmesidir. Ancak, bu deneysel gözlemi kütleçekimin evren ölçeklerinde zayıflaması olarak algılayıp, kütleçekimin erimini azaltacak şekilde kütleçekim kuvvetinin taşıyıcısı olan gravitona kütle vermeyi düşünmek de diğeri bir teorik alternatiftir.

Bu motivasyonlarla projede yüksek mertebeden türevli ve kütleli gravitasyon teorilerine odaklanılmıştır. Her ne kadar yaşadığımız evren dört boyutlu uzayzamanla betimlense de çalışmalarımızda dört boyutlu teorilere göre daha basit bir matematiksel yapıya sahip olan üç boyutlu gravitasyon teorileri, teorik bir laboratuvar olarak kullanılmıştır. Üç boyutta elde edilen

Çıkarımlar daha yüksek boyutlu gravitasyon teorilerine uygulanmaya çalışılmıştır.

Proje kapsamında üç boyutlu teorilerdeki graviton kütlesinin standart modelde olduğu gibi simetri kırılması ilkesi ile nasıl elde edilebileceğine dair bir yaklaşım geliştirilmiştir. Ayrıca, hem üç boyutta hem de daha yüksek boyutlarda çeşitli teorilerin ağaç mertebesinde kuantum mekaniksel tutarlılığı, üniterlik analizi yapılarak sınanmıştır. Her boyutta teorilerin çözümleri incelenerek teorilerin klasik yapıları anlaşılmaya çalışılmıştır. Son olarak teorilerdeki kütleçekimsel korunan yükler diğer bir inceleme konusu olmuştur.

GENEL BİLGİLER

Bu bölümde proje çalışmalarının genel çerçevesini oluşturan üç boyutlu ve dört boyutlu yüksek mertebeden türevli gravitasyon teorileri ile ilgili yakın zamanda gerçekleşen önemli bilimsel gelişmeler tartışılmıştır.

Üç boyutta Einstein teorisi kütleçekim kuvvetini ileten bir serbesti derecesi barındırmayan basit bir yapıya sahiptir. Bu basit yapıya rağmen kozmolojik Einstein teorisi için kara delik çözümleri bulunmuştur (BANADOS, 1992). Ayrıca, AdS/CFT sanısına dair ilk işaretler yine kozmolojik Einstein teorisinin asimptotik simetri cebirinin çalışılması ile elde edilmiştir (BROWN, 1986). Üç boyutlu Einstein teorisinin bu niteliklerinden ötürü, teorinin kuantum kütleçekimsel yapısını AdS/CFT sanısını kullanarak tanımlamayı amaçlayan ve (WITTEN, 2007) ile başlayan yakın zamanlı yoğun çalışmalar yapılmıştır.

Üç boyutta Einstein teorisinin değişkeleri de kuantum kütleçekim çerçevesinde yoğun bir araştırma sahasıdır. Bu bağlamda topolojik kütleli gravitasyon (TMG) yakın zamanda ilgi çekmiştir. Bu teoride Einstein teorisinin aksine bir kütleli spin-2 bir serbesti derecesi vardır (DESER, 1982). Ayrıca, teorinin kozmolojik sabit eklenmiş hali Einstein teorisi ile aynı kara delik çözümüne sahiptir. Teorinin tutarlılığı açısından temel problem, teorideki serbesti derecesinin üniterliği ile kara deliğin enerjisinin pozitifliği tutarlılık gereksinimlerinin çelişik olmasıdır. Ancak, kozmolojik sabitin belirli bir değerinde serbesti derecesinin kütlesi ile enerjisini sıfırlamak ve aynı zamanda kara delik için de enerjisi sıfırlamak mümkündür (Lİ, 2008). Teorinin parametre uzayındaki bu özel noktada teorideki serbesti derecesinin üniterliği ile kara deliğin enerjisinin pozitifliği arasındaki çelişik durum çözümlenir. Bu noktada teoriye karşılık gelen bir kiral kuantum kütleçekim kuramının varlığına dair bir önerme yapılmıştır (Lİ, 2008). Bu özel teori ve bu önerme üzerine çalışmalar hala devam etmektedir.

TMG tek bir helisiteye sahip gravitona imkan verirken, yakın zamanda tanımlanan yeni kütleli gravitasyon (NMG) teorisi parite-değişmez ve yine kütleli spin-2 serbesti derecesine sahip bir teoridir (BERGSHOEFF, 2009a). NMG teorisi ikinci mertebeden eğrilikli terimlerin özel bir kombinasyonunu içerir. NMG'nin en önemli özelliği dört boyutlu ikinci mertebeden türevli teorinin aksine düz ve (A)dS arka plan uzaylarında üniter oluşudur ve teorideki ikinci mertebeden eğrilikli terimlerin kombinasyonu üniterliğe imkân veren yegâne kombinasyondur (BERGSHOEFF, 2009a, 2009b; NAKASONE 2009; DESER 2009; GÜLLÜ 2009, 2010a). Teorinin dört boyutta Einstein teorisinin renormalize olmasını sağlayan ikinci mertebeden eğrilikli terimleri içermesi, ilk başta NMG'nin de renormalize olacağını düşündürmüştür. Ancak, üniterliğe imkân veren özel kombinasyonda teorinin renormalize olmadığı gösterilmiştir (MUNEYUKİ 2012). NMG teorisi üniter kütleli spin-2 serbesti derecesi ile doğrusal seviyede gravitona kütle veren Fierz-Pauli (FP) kütle teriminin doğrusal olmayan üniter bir genellemesini teşkil eder (DE RHAM, 2011a). FP kütle terimini doğrusal olmayan seviyede genellemek bu genellemelerde ortaya çıkan ve Boulware-Deser (BD) hayaleti olarak adlandırılan modlar yüzünden yakın zamana kadar çözülememiş bir problemdir. Dört boyutta BD hayaletinin bulunmadığı doğrusal olmayan kütleli spin-2 teorileri (DE RHAM, 2011b)'de tanımlanmış ve (HASSAN, 2012)'de bu teorinin çift metriklili gravitasyon genellemesi yapılmıştır. NMG, bu çift metriklili gravitasyon teorisinin limiti olarak üç boyutta ortaya çıkmaktadır (PAULOS, 2012). AdS/CFT bağlamında NMG teorisin tutarlı bir yapıya sahip olması için gerekli şartlardan biri de sınır konformal alan teorisinin (CFT) üniter olmasıdır; ancak, NMG için işareti sınır teorisinin üniterliğini belirleyen c-yükü hesaplandığında sınır teorisi üniter çıkmamıştır (BERGSHOEFF, 2009b). NMG'deki bu problemi çözmek için AdS/CFT bağlamında teoride holografik c-fonksiyonlarının varlığı şart koşularak kübik ve dördüncü mertebeden eğrilikli genişletmesi yapılmış, ancak sınır CFT'nin üniterliği sağlanamamıştır (SINHA, 2010). NMG teorisinin bir diğer genişletmesi ise teoriye Born-Infeld kütleçekim fikrinin (DESER, 1998) uygulanmasıdır (GÜLLÜ, 2010b). BINMG olarak adlandırılan bu genişletme üçüncü ve dördüncü eğrilik mertebelerinde, NMG'nin AdS/CFT kavramları kullanılarak elde edilmiş genellemesini vermektedir (GÜLLÜ, 2010b, 2010c). Bundan öte, BINMG hesaplanan c-fonksiyonu Einstein teorisinin c-fonksiyonu ile denktir (GÜLLÜ, 2010c).

Üç boyuttaki teoriler çalışılırken en önemli konu, dört boyutta ulaşılan bilgilerin ne ifade edeceği, dört boyuttaki kütleçekim teorilerine nasıl uygulanacağıdır. Bu bağlamda kritik gravitasyon teorisi (LU, 2011) üç boyuttaki çıkarımların dört boyutta ilginç bir uygulamasıdır. Dört boyutta ikinci mertebeden türevli teorilerin spektrumunda kütesiz spin-2 Einstein modu ile kütleli spin-0 ve kütleli spin-2 modları bulunur. Kütleli spin-2 modun üniterliği diğer iki mod ile çelişiktir. Kritik

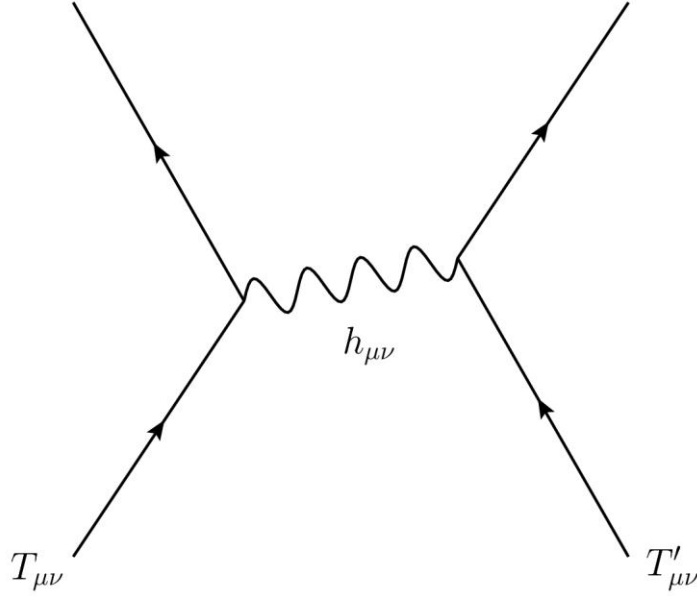
gravitasyon teorisinde NMG'deki ikinci mertebeden eğrilikli terimlerin özel kombinasyonunun dört boyutlu karşılığı kullanılarak spin-0 modu spektrumdan düşürülmüştür. Ardından, kiral gravitasyondaki gibi kozmolojik sabit özel bir değerde seçilerek kütleli spin-2 mod kütesiz hale getirilmiştir. Bu özel değerde spin-2 modların enerjisi ve kara deliklerin enerjisi de sıfır olmaktadır. Sonuçta elde edilen teori Einstein teorisi gibi spektrumunda kütesiz spin-2 mod bulunduran yüksek mertebeden eğrilikli bir teoridir. Ancak, teorinin üniterliği kütleli spin-2 modun yürütücüsünün kütesiz hale gelerek kütesiz spin-2 modun yürütücüsü ile örtüşmesinden kaynaklanan logaritmik modlardan ötürü problemlidir (PORRATI, 2011).

GEREÇ VE YÖNTEM

Bu bölümde sırasıyla Weyl-değişmez teorileri tanımlarken, herhangi bir kütle çekim teorisinin spektrum ve üniterlik analizini yaparken, teorilere klasik çözümler ararken ve teorilerde korunan yükleri tanımlarken kullandığımız teknikler anlatılacaktır.

Kütleçekimsel Higgs mekanizmasını NMG, TMG, ve BINMG teorileri çerçevesinde tanımlamak için söz konusu teorilerin Weyl-değişmez genişletmelerinin bulunması gereklidir. Weyl-değişmezlik kütleçekim teorisinin yerel ölçek dönüşümleri altında değişmez kalacak şekilde ifade edilmesidir. Bu şekilde bir ifadeye ulaşabilmek için teoriye uygun ölçek dönüşümlerine sahip skaler ve vektör alanların da eklenmesi gerekmekte ve ayar eşdeğişir türevlerin tanımlanması gerekmektedir. Söz konusu üç boyutlu teoriler boyutlu parametreler içermeyen Weyl-değişmez bir şekilde yazıldıktan sonra yerel ölçek simetrisinin kırılması ile kütleli gravitasyon teorilerindeki graviton kütle kazanır. Simetri kırılması (A)dS arka plan uzayzamanında kendiliğinden gerçekleşirken, düz arka plan uzayzamanda ikinci halka düzeyinde Coleman-Weinberg mekanizması ile gerçekleşir.

Bir gravitasyon teorisinin spektrumunun ve üniterliğinin incelenmek istendiğinde ilk olarak teorisin arka plan uzayzamanı ya alan denklemlerinden ya da metrik pertürbasyonunda birinci mertebeye eylemden bulunmalıdır. Ardından, teorisin spektrumunu tanımlayan metrik pertürbasyonunda ikinci mertebeye eylem bulunmalıdır. İkinci mertebeye eylem elde edildikten sonra üniterlik analizi için iki yol takip edilebilir. İlk yolda metrik bileşenleri üzerinden ayar seçerek ya da ayar değişmez bir şekilde ikinci derece eylem, serbesti derecelerinde ayrıştırılmış Klein-Gordon (KG) eylemlerinin bir toplamı olarak yazılabilir. Eylem bu şekilde yazıldıktan sonra üniterlik analizi KG eylemlerinin işaretini kontrol etmekten ibarettir. İkinci yolda ise Şekil-1'de verilen Feynman diyagramı ile ifade edilen genlik hesaplanıp Newton potansiyeli elde edilir ve üniter bir kütleçekim teorisinin hep çekim kuvveti vermesi gerekliliğinden teorisin üniterliğine karar verilir.



Şekil 1: Uzayzamanda enerji-momentum tensörleri ile gösterilen iki kaynağın
 bir graviton vasıtası ile etkileşmesini ifade eden Feynman diyagramı

İkinci mertebeden eğrilikli teorilerin üniterliği düz ve (A)dS arka planlar için sırasıyla (STELLE, 1978)'de ve (GÜLLÜ, 2009)'da analiz edilmiş olduğundan dolayı, metrik pertürbasyonunda ikinci derece eylemi bu teori ile aynı yapıya sahip olan yüksek mertebeden türevli teorilerin üniterlik analizi denk ikinci mertebeden eğrilikli eylem metodu kullanılarak da yapılabilir. Denk ikinci mertebeden eğrilikli eylemi elde etmek için temelde yapmak gereken arka plan uzayzaman etrafında çalışılacak teorinin eylemini eğrilikte ikinci mertebeye kadar Taylor serisi açılımı ile açmaktır. Bu eğrilikte ikinci mertebeden Taylor seri açılımı doğal olarak bir ikinci mertebeden eğrilikli teori tanımlar ve bu teori tanımlı gereği üniterliği analiz edilecek orijinal teori ile aynı arka plan ve aynı spektruma sahiptir.

Teorilerde klasik çözüm ararken metrik formuna dair ön kabuller çok önem arz eder. Uygun bir ön kabulle alan denklemleri çok basitleştirilebilir. İkinci mertebeden eğrilikli gravitasyon teorilerine çözüm ararken Kerr-Schild (KS) metrik ön kabulü (KERR, 1965; GÜRSES 1975) teorilerin alan denklemlerini, metrik pertürbasyonunda doğrusal denklemlerle aynı forma indirgeyerek çok basitleştirir. Sonuçta ortaya çıkan denklemler değişkenleri ayrıştırma metodu ile çözülebilecek dördüncü dereceden kısmi diferansiyel denklemlerdir. Öte yandan üç boyutta yüksek mertebeden eğrilikli teorilerin alan denklemleri çalışılırken uzayzamanın doğasına dair yapılacak Petrov-Segre sınıflandırmasında Tip N ve Tip D kabulleri, alan denklemlerini NMG teorisinin alan denklemleri

ile aynı forma indirir. NMG teorisi için daha önceden bulunmuş olan çözümler (GÜRSES 2010; AHMEDOV 2010, 2011a, 2011b) kullanılarak üç boyuttaki yüksek mertebeden eğrilikli teorilerin Tip N ve Tip D çözümleri bulunabilir.

Fiziksel teorilerde zamanla değişmeyen enerji, açısal momentum gibi büyüklükler çok önemlidir. Bu “korunan” yükler fiziksel sistemdeki simetriler ile doğrudan ilgilidir ve sistemin dinamiğinin ve kinematiğinin anlaşılmasında vazgeçilmez yerleri vardır. Gravitasyon dışındaki fizik teorilerinde korunan yüklerin tanımı ve hesaplanması genelde oldukça basittir. Fakat gravitasyonda, uzayzamanın dinamik bir yapı arz etmesi nedeniyle, sorunlar çıkmaktadır. Pek çok uzayzaman modelinde, henüz üzerinde herkesin anlayabileceği bir enerji tanımı yapılmamıştır. Örneğin, kozmolojik sabit pozitif ise (nitekim son gözlemler Evren’in pozitif bir kozmolojik sabiti olduğunu gösteriyor) bütün uzayda geçerli bir “evrensel” zaman tanımlamak mümkün olmamakta ve sonuç itibarı ile evrensel olarak korunan yüklerden, büyüklüklerden bahsetmek mümkün görünmemektedir.

Yüksek mertebeden eğrilikli teorilerde yükleri tanımlamak için bir eylemden elde edilebilen her türlü kütleçekim teorisi için geçerli olan Deser-Tekin tekniğini (DESER 2002, 2003) kullanmak mümkündür. Deser-Tekin tekniği ile asimptotik olarak (A)dS uzayzamanların toplam korunan yüklerini (enerji ve açısal momentumlarını) tanımlamak mümkündür ve sonuçlar kara deliklerin termodinamiği kullanılarak elde edilen korunan yüklerle örtüşmektedirler. Yüksek mertebeden türevli bir teoride yükleri bulmak için uygulanması gereken yöntem teorinin denk ikinci mertebeden eğrilikli eylemini bulmak ve bu eylem için (DESER 2002, 2003)'teki ikinci mertebeden eğrilikli teoriye ait sonuçları kullanmaktır.

BULGULAR

Projede üç boyutlu ve daha yüksek boyutlardaki yüksek mertebeden türevli ve eğrilikli kütleçekim teorileri üzerine bütünlüklü ve geniş bir analiz yapılmıştır. Elde edilen bulgular yayınlanmış olan makaleler üzerinden aşağıdaki listelenmiştir:

1. *All Bulk and Boundary Unitary Cubic Curvature Theories in Three Dimension*, Phys Rev D 83, 024033 (2011): Bu makalede 2+1 boyutta üniter (kuantum mekaniği açısından çok önemli bir özellik) teorilerin tamamı tasnif edilmiştir. Ayrıca bu makalede, daha önce hiç örneği bulunmayan, hem uzayın sınırında hem de ana hacminde üniter olan yüksek türevli teoriler keşfedilmiştir. Bu makalenin son derece başarılı olduğu düşünülmektedir.
2. *Unitarity analysis of general Born-Infeld gravity theories*, Phys. Rev. D 82, 124023 (2010): Bu makalede, prensipte sonsuz türevli olan kütleçekim teorilerinin üniterlik analizini yapabilmek için yeni teknikler geliştirilmiştir. Bu sonsuz türevli teoriler, renormalizasyon açısından Einstein'ın teorisine kıyasla daha makbul teorilerdir. Dolayısıyla, önümüzdeki yıllarda ilgi çekmeleri beklenmektedir.
3. *Critical Points of D-Dimensional Extended Gravities*, Phys. Rev. D 83, 061502 (2011): Bu makalede genel boyutlu uzaylarda, kozmolojik Einstein teorisi ile aynı spektruma sahip, ama renormalize edilebilir, üniter teoriler bulunmuştur.
4. *AdS Waves as Exact Solutions to Quadratic Gravity*, Phys Rev D 83, 084015 (2011): Bu makalede genel Riemann tensöründe 2. dereceden teorilerde dalga çözümleri bulunmuştur. Bir önceki maddede belirtilen kritik kütleçekim kuramı da detaylı bir şekilde analiz

edilmiştir.

5. *All unitary cubic curvature gravities in D dimensions*, Class. Quant. Grav. 28, 195004 (2011): Bu makalede Riemann, Ricci tensörleri ve eğrilik skaleri kullanılarak tanımlanan, eğrilikte üçüncü dereceden en genel, kütleçekim teorileri içerisinde olasılık yapısı tutarlı olanlar sınıflandırılmış ve teorilerdeki parçacık çeşitliliği belirlenmiştir. Makalede ortaya atılan metot son derece kuvvetlidir ve çok karmaşık görünen yüksek mertebeden türevli kütleçekim kuramlarının serbest teorilerinin analizi için çok etkindir.
6. *Higgs Mechanism for New Massive Gravity and Weyl Invariant Extensions of Higher Derivative Theories*, Phys. Rev. D 84, 024033 (2011): 3 boyutta yeni kütleli gravitasyon (NMG) diye nitelendirilen yüksek mertebeden türevli bir modelin serbest parçacık spektrumu kütleli spini 2 olan (yani graviton diye nitelendirebileceğimiz) bir parçacıktan oluşmaktadır. Bahsi geçen makalede NMG teorisi özel skaler ve vektörel alanlar ile genişletilmiş ve Weyl simetrisi olan bir model elde edilmiştir. Bu modelde graviton kütlesi, Higgs mekanizmasında olduğu gibi, kendiliğinden simetri kırılması sonucunda ortaya çıkmaktadır. Burada bahsi geçen simetri Weyl simetrisidir. Böylece, kuantum alan teorilerindeki paradigmaya uygun olarak, gravitona bir kütle kazandırmak mümkün olmuştur. Makalede, ayrıca, bütün boyutlarda ikinci dereceden türevli ve Born-Infeld tipi teorilerin Weyl simetrisine sahip halleri yazılmıştır. Bu teorilerin detaylı çalışması bir başka makalede verilecektir.
7. *Covariant Symplectic Structure and Conserved Charges of Topologically Massive Gravity* Phys. Rev. D 83, 124039 (2011) : 3 boyutta topolojik kütleyle sahip kütleçekim modeli çok çalışılan bir modeldir. Bu modelin kuantum teorisi ile uyumlu olup olmadığı henüz tam açık değildir. Bu nedenle teorinin klasik faz uzayını anlamak ve onu kuantize etmek önemlidir. Bahsi geçen makalede teorinin klasik faz uzayı, Lorentz simetrisini kırmadan (yani, zaman ve momentumlar açıkça belirlenmeden) tanımlanmıştır. Bu tanım teoride faz uzayının yapısını belirleyen simplektik, ayar dönüşümleri altında değişmez bir 2-form bulunarak yapılmıştır. Ayrıca bu 2-form kullanılarak teorideki klasik korunan yükler (enerji, açısal momentum) tanımlanmıştır.

8. *Unitarity of Weyl-Invariant New Massive Gravity and Generation of Graviton Mass via Symmetry Breaking*, Phys. Rev. D. 85, 064008 (2012): Bu makalede, daha önce verilmiş olan yeni kütleli gravitasyon kuramının Weyl değişmez versiyonunun 2+1 boyutta parçacık spektrumu ve pertürbatif üniterliği detaylı olarak incelenmiştir. Teorinin eyleminden, (anti-)de Sitter [(A)dS] ve düz uzayzaman etrafında metrik, ayar ve skaler alanlar için hareket denklemleri bulunmuştur. Bu hareket denklemleri incelendiğinde, teorinin, üniter olan kütleli spin-2, kütleli (ya da kütesiz) spin-1 ve kütesiz spin-0 uyarımları (parçacıkları), teorideki birimsiz parametrelerin belli aralıkları için oluşturduğu gözlenmiştir. Ayrıca kuramın, dS uzayzaman arka planında üniter olmadığı gözlenmiştir. Ölçek değişmezlik AdS arka planında kendiliğinden kırılırken, düz uzayzaman arka planında ikinci halka mertebesinde ışımsal olarak kırılmıştır.
9. *Weyl-Invariant of Higher Curvature Gravity Theories in n Dimensions*, Phys. Rev. D 85, 064016 (2011): Bu makalede, Weyl değişmez ikinci mertebeden eğrilikli kütleçekim teorilerinin parçacık spektrumu ve üniterliği genel n -boyutlu (A)dS ve düz uzayzamanları için çalışılmıştır. Weyl simetrisi (A)dS uzayzamanlarında kendiliğinden kırılırken, düz uzayzaman arka planında ikinci halka seviyesinde kırılmaktadır. Üç boyutlu Weyl-değişmez kütleçekim kuramı dışında gravitonun kütesiz kaldığı gösterilmiştir. Üniterlik koşulu teoriye dayatıldığında geriye Einstein-Gauss-Bonnet kuramının Weyl-değişmez genellemesinin kaldığı gösterilmiştir.
10. *Some Exact Solutions of All $f(\text{Ricci})$ Theories in Three Dimensions*, Phys. Rev. D 86, 024001 (2012): Ricci tensörü ile oluşturulmuş bütün yüksek mertebeli eğrilikli teoriler için Tip N ve Tip D sabit eğrilikli çözümler bulunmuştur. Bu genel yüksek türevli kuramların, daha önce çalışılmış olan kozmolojik sabitli topolojik kütleli gravitasyon ve yeni kütleli gravitasyon teorilerinin alan denklemlerinin çözümlerini de ihtiva ettiği, kuramın parametreleri ayarlanarak, gösterilmiştir. Genel yüksek türevli kuramın yanı sıra bazı ikinci mertebeden ve kübik eğrilikli teoriler ile yeni kütleli gravitasyon teorisinin Born-Infeld genellemesi ayrıntılı olarak incelenmiştir.
11. *New Exact Solutions of Quadratic Curvature Gravity*, Phys. Rev. D 86, 024009 (2012): Kerr-Schild tipi çözümlerin genel göreliliğin hem kesin hem de doğrusal Einstein alan denklemlerini sağladığı bilinen bir gerçektir. Bu çalışmada, bu özelliğin, Kerr-Schild

metriğinin özel bir sınıfı için D-boyutlu yüksek eğrilikli kuramlarda da geçerli olduğu gösterilmiştir. AdS arka planında düzlemsel dalgalara karşılık gelen AdS-dalga metriğine ek olarak bu çalışmada, D-boyutlu ikinci mertebeden eğrilikli kütleçekime yeni kesin çözüm bulunmuştur. Bu çözüm AdS arka planında küresel dalgalara karşılık gelmektedir.

12. *Spectra, Vacua and Unitarity of Lovelock Gravity in D-Dimensional AdS Spacetimes*, Phys. Rev. D 86, 044041 (2012): D-boyutlu Lovelock kütleçekim kuramının sabit eğrilikli vakumunda, kozmolojik Einstein kütleçekim teorisi gibi, üniter kütesiz spin-2 uyarımına sahip olduğu açıkça gösterilmiştir. Teorinin yürütücüsü, Einstein kütleçekim teorisinin yürütücüsüne indirgeniyor, fakat saçılma genliği, bu makalede sağlanmış olan efektif Newton sabiti ile hesaplanmalıdır. Ağaç mertebesi üniterlik, teorinin parametreleri üzerinde tek bir kısıtlamada bulunduğundan dolayı geniş bir parametre aralığında üniterliğin sağlandığı gösterilmiştir.

13. *Weyl-gauging of Topologically Massive Gravity*, Phys. Rev. D 86, 104014 (2012): Bu makalede topolojik kütleli gravitasyon (TMG) Weyl simetrisi altında değişmeyen hali bulunmuştur. Elde edilen teori bir kısım beklenmedik sonuçlar içerir, örneğin, topolojik kütleli elektrodinamik (TME) zorunlu olarak ortaya çıkmaktadır. Yani Weyl simetrisi 3 boyutta topolojik kütleli gravitasyon ile topolojik kütleli elektrodinamiği birleştirmektedir. Bunların yanında ayrıca Proca kütle terimi ve konformal olarak etkileşen skaler alan da ortaya çıkmaktadır. Teori Lagrangian düzeyinde birimsiz parametreler içermektedir. Dolayısıyla, simetrik fazda bütün parçacıklar kütesizdir. Diğer yandan simetri eğri uzaylarda kendiliğinde kırıldığında, ya da düz uzay etrafında ağaç mertebesinde kırıldığında, parçacıklar kütle kazanırlar. Teoride parite-simetrisi altında değişen tek bir kütleli graviton ve bir de kütleli spin-1 ayar alanı vardır. Kiral gravitasyon AdS uzayında teorinin bir özel durumu olarak ortaya çıkmasa da dS uzayında çıkmaktadır. Oldukça simetrik olan, bu teorinin kuantum teorisi olma ihtimali vardır.

14. *Energy and Angular Momentum in Generic F(Riemann) Theories*, Phys. Rev. D 86, 124030 (2012): Bu çalışmada, Riemann tensörü kullanılarak elde edilmiş en genel yüksek mertebeden eğrilikli teoriler için (A)dS arka plan uzayzamanında korunan yükler tanımlanmıştır. Kullandığımız yöntem doğrusal ve ikinci mertebeden eğrilikli gravitasyon

teorilerindeki ADT yüklerinin genellemesidir. Örnek olarak, BINMG teorisindeki BTZ karadeliğinin enerji ve açısal momentumu bulunmuştur.

SONUÇ

Teorik fiziğin temel problemlerinden bir tanesi kuantum fiziğinin prensipleri ile uyumlu bir gravitasyon teorisinin bulunmasıdır. Son derece zor olan bu problemin çözümü için atılan her adım değerlidir. Aklımızın bir köşesinde bu büyük problemi tutarak, proje kapsamında özellikle üç boyutta gravitasyon teorileri oluşturduk. Bu teoriler 3+1 boyutlu daha gerçekçi teori için birer teorik fizik laboratuvarı olarak algılanmalıdır. Oluşturduğumuz teorilerin korunan yükleri ve klasik dalga çözümleri gibi bir kısım özelliklerini inceledik. Elde ettiğimiz sonuçları daha üst boyutlardaki teorilere taşımaya çalıştık. İki yıllık çalışmamızın sonunda iki doktora öğrencisi proje desteği ile doktora tezlerini yazmıştır. A grubu dergilerde proje kapsamında 14 makale çıkmıştır ve bu yayımlar bu süreçte 152 atf almıştır.

Önerimiz: Proje süresinin uzatılması durumunda bursiyerler için de ek destek verilmesi projenin sağlıklı bir şekilde devam etmesi için gereklidir.

REFERANSLAR

- (AHMEDOV, 2010) AHMEDOV H., Aliev A. N., The General Type N Solution of New Massive Gravity, *Phys. Lett. B* 694, 143 (2010).
- (AHMEDOV, 2011a) AHMEDOV H., Aliev A. N., Exact Solutions in D3 New Massive Gravity, *Phys. Rev. Lett.* 106, 021301 (2011).
- (AHMEDOV, 2011b) AHMEDOV H., Aliev A. N., Type D Solutions of 3D New Massive Gravity, *Phys. Rev. D* 83, 084032 (2011).
- (BANADOS, 1992) BANADOS M., Teitelboim C., Zanelli J., The Black hole in three-dimensional space-time, *Phys. Rev. Lett.* 69, 1849 (1992).
- (BERGSHOEFF, 2009a) BERGSHOEFF E., Hohm O., Townsend P. K., Massive Gravity in Three Dimensions, *Phys. Rev. Lett.*, 102, 201301 (2009).
- (BERGSHOEFF, 2009b) BERGSHOEFF E., Hohm O., Townsend P. K., More on Massive 3D Gravity, *Phys. Rev. D* 79, 124042 (2009).
- (BROWN, 1986) BROWN J. D., Henneaux M., Central Charges in the Canonical Realization of Asymptotic Symmetries: An Example from Three-Dimensional Gravity, *Commun. Math. Phys.* 104, 207 (1986).
- (DE RHAM, 2011a) DE RHAM C., Gabadadze G., Pirtskhalava D., Tolley A. J., Yavin I., Nonlinear Dynamics of 3D Massive Gravity, *JHEP* 1106, 028 (2011).
- (DE RHAM, 2011b) DE RHAM C., Gabadadze G., Tolley A. J., Resumation of Massive Gravity, *Phys. Rev. Lett.*, 106, 231101 (2011).

- (DESER, 1982) DESER S., Jackiw R., Templeton S., Topologically Massive Gauge Theories, *Annals Phys.* 140, 372 (1982).
- (DESER, 1998) DESER S., Gibbons G. W., Born-Infeld-Einstein actions?, *Class. Quant. Grav.* 15, L35 (1998).
- (DESER, 2002) DESER S., Tekin B., Gravitational energy in quadratic curvature gravities, *Phys. Rev. Lett.* 89, 101101 (2002).
- (DESER, 2003) DESER S., Tekin B., Energy in generic higher curvature gravity theories, *Phys. Rev. D* 67, 084009 (2003).
- (DESER, 2009) DESER S., Ghost-free, finite, fourth order D=3 (alas) gravity, *Phys. Rev. Lett.* 103, 101302 (2009).
- (GÜLLÜ, 2009) GULLU I., Tekin B., Massive Higher Derivative Gravity in D-dimensional Anti-de Sitter Spacetimes, *Phys. Rev. D* 80, 064033 (2009).
- (GÜLLÜ, 2010a) GULLU I., Sisman T.C., Tekin B., Canonical Structure of Higher Derivative Gravity in 3D, *Phys. Rev. D* 81, 104017 (2010).
- (GÜLLÜ, 2010b) GULLU I., Sisman T.C., Tekin B., Born-Infeld Extension of New Massive Gravity, *Class. Quant. Grav.* 27, 104017 (2010).
- (GÜLLÜ, 2010c) GULLU I., Sisman T.C., Tekin B., c-functions in the Born-Infeld extended New Massive Gravity, *Phys. Rev. D* 82, 024032 (2010).
- (GÜRSES, 1975) GURSES M., Gursev F., Lorentz Covariant Treatment of the Kerr-Schild Metric, *J. Math. Phys.* 16, 2385 (1975).
- (GÜRSES, 2010) GURSES M., Killing Vector Fields in Three Dimensions: A Method to Solve Massive Gravity Field Equations," *Class. Quant. Grav.* 27, 205018 (2010).
- (HASSAN, 2012) HASSAN S. F., Rosen R. A., Bimetric Gravity from Ghost-free Massive Gravity, *JHEP* 1202, 126 (2012).

- (KERR, 1965) KERR R. P., Schild A., Some algebraically degenerate solutions of Einstein's gravitational field equations, *Proc. Symp. Appl. Math.* 17 199 (1965).
- (LÌ, 2008) LI W., Song W., Strominger A., Chiral Gravity in Three Dimensions, *JHEP* 0804, 082 (2008).
- (LU, 2011) LU H., Pope C. N., Critical Gravity in Four Dimensions, *Phys. Rev. Lett.* 106, 181302 (2011)
- (MUNEYUKI, 2012) MUNEYUKI K., Ohta N., Unitarity versus Renormalizability of Higher Derivative Gravity in 3D, *Phys. Rev. D* 85, 101501 (2012).
- (NAKASONE, 2009) NAKASONE M., Oda I., On Unitarity of Massive Gravity in Three Dimensions, *Prog. Theor. Phys.* 121, 1389 (2009).
- (PAULOS, 2012) PAULOS M. F., Tolley A. J., Massive Gravity Theories and limits of Ghost-free Bigravity models, *JHEP* 1209, 002 (2012).
- (PORRATI, 2011) PORRATI M., Roberts M. M., Ghosts of Critical Gravity, *Phys. Rev. D* 84, 024013 (2011)
- (SINHA, 2010) SINHA A., On the new massive gravity and AdS/CFT, *JHEP* 1006, 061 (2010)
- (STELLE, 1977) STELLE K. S., Renormalization Of Higher Derivative Quantum Gravity, *Phys. Rev. D* 16, 953 (1977).
- (STELLE, 1978) STELLE K. S., Classical Gravity with Higher Derivatives, *Gen. Rel. Grav.* 9, 353 (1978).
- (WITTEN, 2007) WITTEN E., Three-Dimensional Gravity Revisited, arXiv:0706.3359 [hep-th].