Born-Infeld Kütle-Çekim Teorilerinin Kozmolojisi

Program Kodu: 1001

Proje No: 113F155

Proje Yürütücüsü:

Prof. Dr. Bayram TEKİN

Danışman

Prof. Dr. Metin GÜRSES

Bursiyerler:

Dr. İbrahim GÜLLÜ

Dr. Suat DENGİZ

EYLÜL 2016

ANKARA

ÖNSÖZ

"Born-Infeld Kütle-Çekim Teorilerinin Kozmolojisi" başlıklı proje 113F155 proje numarası ile TÜBİTAK 1001 destek programı kapsamında, 01/09/2013-01/09/2016 tarihleri arasında desteklenmiştir. Projede proje yürütücüsü, bir danışman, bir doktora-sonrası araştırmacı, bir doktora öğrencisi (bu öğrenci proje devam ederken mezun olup, projeye doktora sonrası araştırmacı olarak katılmıştır) çalışmıştır. Proje tarafından desteklenen 17 makale uluslararası A grubu dergilerde yayınlanmış, 3 makale ise halizahırda hakemlerdedir. Bir doktora öğrencisi proje desteği ile doktora tezini bitirmiş ve ardından yine TÜBITAK desteği ile Massachusetts Institute of Technology (MIT)'ye Prof. Dr. Roman Jackiw ile çalışmak üzere doktora-sonrası araştırmacı alarak gitmiştir. Projede, başvuru esnasında öngörülen çalışmalar tamamlanmış ve konu ile ilgili literatüre önemli katkılar yapılmıştır.

İÇİNDEKİLER

ÖNSÖZ i

İÇİNDEKİLER ii

ŞEKİL LİSTELERİ iii

ÖZET iv

ABSTRACT v

GİRİŞ 1

LİTERATÜR ÖZETİ 2

GEREÇ VE YÖNTEM 4

BULGULAR 5

TARTIŞMA VE SONUÇ 12

ŞEKİL LİSTELERİ

Şekil 1. Kütleli Gravitasyon Teorisinde Spin Etkileşimleri.

ÖZET

Einstein'ın genel görelilik teorisi orta ölçeklerde (örneğin güneş sisteminde, dünyada) kütle-çekim etkileşimini çok iyi anlatmaktadır. Ancak, çok küçük ve çok büyük mesafelerde (mikroskobik boyutlarda ve galaksi, evren boyutunda) teorinin yetersiz kaldığı bilinmektedir. Bir kısım galaksilerdeki yıldızların dönme hızlarının izahı ve evrenin ivmelenerek genişlemesi, teorinin açıklayamadığı büyük ölçek sorunlarıdır. Diğer yandan kara deliklerdeki ve evrenin başındaki tekilliklerin izahı küçük ölçek sorunlarıdır. Bu sorunlar nedeniyle, teorinin daha tutarlı bir teori içine yerleştirilmesi beklenmektedir. Projede genel görelilik teorisinin özelliklerine sahip ama özellikle küçük mesafelerde daha tutarlı bir model oluşturmayı öngördük ve bunu gerçekleştirdik. Oluşturduğumuz modelin bir kısım kara delik tipi ve enflasyon kozmolojisi çözümlerini inceledik. Beklediğimiz gibi, modelimiz genel göreliliğe kıyasla daha iyi sonuçlar vermektedir. Örneğin, statik, küresel simetrik çözümlerin tekillik sorunu çözülmektedir.

Anahtar Kelimeler: Born-Infeld Kütleçekim, Kozmoloji, Klasik Çözümler, Evren

ABSTRACT

Einstein's general relativity is very successful in describing gravitational phenomena at the solar system scales, but it is well known that certain problems arise at very large and small scales: as in the case of galaxy rotation curves of spiral galaxies and the accelerated expansion of the universe and the UV problems at short distances, such as the black hole and initial singularity in the beginning of the universe. Because of these problems, one expects that general relativity is at best an effective theory, embedded in a larger, better-behaved theory. In this project, we have managed to construct a theory which has the same properties as general relativity but behaves much better at short distances. We studied certain black hole and inflationary solutions of our model. As we expected, we obtained better results compared to general relativity. For example, for static spherically symmetric solutions, singularities are resolved.

Keywords: Born-Infeld Gravity, Cosmology, Classical Solutions, Universe

1. GİRİŞ

Einstein'ın genel görelilik kuramı, evreni kavrayışımızı kökünden değiştiren ve tutarlılığı güneş sistemi ölçeklerinde deneylerle kanıtlanmış başarılı bir teorik yapıdır. 2016 yılı içerisinde doğrudan gözlemi yapılan gravitasyon dalgaları, teorinin önemli öngörülerinden birisidir. Ancak, bütün başarısına rağmen teorinin kuantum mekaniği prensipleri ile uyumsuzluğundan kaynaklı nedenler ve kozmik ivmelenme gibi deneysel sonuçlar nedeniyle, teorinin değiştirilmesi gerektirmektedir. Einstein teorisinin kuantum mekaniği ile uyuşmazlığındaki temel problemlerden biri teorinin renormalize olmamasıdır. Yani, yüksek enerjilerde, teoriyi matematiksel olarak tutarlı yapabilmek için, sonlu sayıda parametre yetmemektedir. Bu durumda, teorinin öngörülerine sadece düşük enerjilerde güvenmek mümkündür. Sicim teorisi ve asimptotik güvenlik gibi kuantum kütleçekim yaklaşımlarında, Einstein teorisi düşük enerji limitinde etkin (efektif) bir alan teorisi olarak kabul edilmektedir. Efektif alan teorisi bakış açısının doğal sonucu, Einstein teorisinin yüksek enerjilerde teorinin simetrileri 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. Yani teori yüksek enerjilerde sonlu ihtimaller vermektedir ama bu ihtimaller malesef her zaman pozitif sıfır-bir aralığında değildir. Renormalize olsa da, üniter olmayan bir teori kabul edilmez. Öte yandan, düşük enerjilerde, ya da büyük ölçeklerdeki sorunlara bakacak olursak, halihazırda evrenin ivmelenerek genişleyen bir fazda olması, Einstein teorisinin evren ölçeğinde geçerliliği ile ilgili bir çelişkiyi gösterir. Gravitasyon teorisine göre “çekim” olması gerekirken, bir itme vardır. Bu deneysel gözlemi açıklamak için teoride yapılabilecek en basit değişiklik evrenin genişlemesine neden olacak basıncı veren pozitif bir kozmolojik sabitin eklenmesidir. Kozmolojik sabit eklendiğinde de ortaya başka sorunalr çıkmaktadır: örneğin bu sabitin kaynağı nedir, değeri niye sıfıra bu kadar yakındır, kuantum fiziği ile uyuşma durumu nedir ? Bu deneysel gözlemi kütleçekimin evren ölçeklerinde zayıflaması olarak algılayıp, kütleçekimin erimini azaltacak şekilde kütleçekim kuvvetinin taşıyıcısı olan gravitona kütle vermeyi düşünmek de diğer bir teorik alternatiftir veya daha genel kütleçekim teorileri belki de ivmelenmeyi doğal olarak verecektir.

2. LİTERATÜR ÖZETİ

Einstein teorisinin Born-Infeld (BI) tipi modifikasyonunu yapma fikri ilk olarak Deser ve Gibbons (1998) tarafından ortaya atılmıştır. İsimden anlaşılacağı üzere, teori Born-Infeld (1934) elektrodinamiğinin geometrik analoğu olup, kütleçekim için önerilmiş halidir. Ek olarak, Eddington'ın (1924) kütleçekim teorisi, BI kütle çekim teorisi için diğer bir ilham kaynağıdır. BI elektrodinamiği, fiziksel büyüklüklerin (örneğin elektronun öz enerjisinin) sonlu olma prensibine dayanmakta ve Maxwell elektrodinamiğinde ortaya çıkan bir kısım sonsuzlukları ortadan kaldırmayı amaçlamaktadır. Bunun için relativistik noktasal parçacık eylemine benzer bir şekilde, karekökü alınmış bir determinant formu ile BI elektrodinamik eylemi yazılır. Bu özel eylem formundaki doğrusal olmayan terimlerin varlığı ile de elektromanyetik alan şiddetleri sonlu hale gelir. Ayrıca, teori üniter (pozitif kinetik enerjiye sahip) bir yapıdadır.

Kütleçekim teorileri alanında ise determinant formunda eylemler ilk olarak Eddington (1924) tarafından çalışılmıştır. Eddington, temel geometrik nicelik manifoldun bağlantısı (connection) olacak şekilde bir kütleçekim teorisi kurmak istemiş ve bu onu Ricci tensörünün determinantından oluşan bir eylem formunu kullanmaya götürmüştür. Bu iki fikri takiben, uzun yıllar sonra, Deser ve Gibbons (1998) metrik ve Ricci tensörünün bir kombinasyonunu karekök içinde determinant eylemi olarak seçmişlerdir. Bu yapıdaki bir eylem ile, düşük enerjilerde Einstein teorisi ile örtüşürken, yüksek enerjilerde Einstein teorisindeki problemleri doğrusal olmayan terimlerin varlığı ile çözmeyi amaçlamışlardır. Ancak, Deser ve Gibbons'un bu teori ile ilgili karşılaştıkları en büyük sorun, eğriliği sıfır olmayan, maksimal simetrik arkaplan uzayzamanlarında (de Sitter ve anti-de Sitter uzayları) üniter bir teoriyi tanımlamak olmuştur. Düz uzayda bunu başarmış olsalar da, eğri uzayda yapamamışlardır. Maksimal simetrik arkaplan uzayzamanlarda üniter bir BI kütleçekim teorisi oluşturma hedefine bu projeden önce, 2+1 boyutta Gullu vd. (2010a) tarafından ulaşılmıştır. Bu teori anti-de Sitter Konformal Alan Teorisi (AdS/CFT) sanısı kaynaklı kavramlar kullanılarak da oluşturulabildiği için, Gullu (2010b), Jatkar (2011), kuantum kütleçekim açısından önemli bir teoridir.

BI gravitasyon teorisinin 3+1 ve daha üst boyutlarda oluşturulması için gerekli üniterlik analizi için kullanılması gereken teorik altyapı Gullu (2010c) tarafından verilmiş ve bu çalışmayı genişleten bir doktora tezi Sisman (2012) yazılmıştır. Bu teorilerin oluşturulması proje çerçevesinde yaptığımız çalışmalarda gerçekleşmiştir. Genel *n* boyutlu teori ile 3+1 boyutlu teori farklılık arz ettiğinden iki ayrı

çalışmada bu sonuçlar yayınlanmıştır: 3+1 boyutlu teori Gullu (2015a), genel *n* boyutlu teori Gullu (2015b) olarak yayınlanmıştır. Teorinin küresel simetrik çözümleri Karasu (2016) tarafından çalışılmış ve tekillik konusunda Einstein teorisine göre daha iyi sonuçlar alınmıştır. Teorinin kozmolojik enflasyon çözümü ve evrenin yeterince büyüdükten sonra enflasyon fazından çıkışı Tekin (2016) makalesinde gösterilmiştir. Born-Infeld tipi teorilerinin analizinde en temel sorun, prensipte sonsuz sayıda eğrilik teriminin olmasıdır ve bu eğrilik terimlerinin parçacık spektrumuna katkılarının hesabı, de Sitter ve anti-de Sitter maksimal simetrik uzayzamanlarında kolay değildir. Bu analiz daha önce grubumuzdaki araştırmacılar tarafından yapılmıştır.

3. GEREÇ VE YÖNTEM

Einstein teorisinin bir kaç önemli özelliği vardır: genel koordinat dönüşümleri altında değişmezliği (daha teknik olarak söyleyecek olursak, diffeomorfizm değişmezliği), üniter, kütlesiz spin-2 gravitona sahip olması, maksimal simetriye sahip tek bir vakum çözümü olması. Teorinin bu özelliklerini değiştirmeden, Einstein teorisini yüksek enerjilerde değiştirmek çok kolay değildir. Örneğin teoriye eğriliğin karesi terimlerini eklediğimizde, gravitasyondan sorumlu yeni parçacıklar ortaya çıkmaktadır ve genel olarak birden fazla vakum çözümü bulunmaktadır. Bu çözümler arasında fiziği kullanarak bir tercih yapmak mümkün görünmemektedir, çünkü bütün vakum çözümlerinin enerjisi aynıdır. Kuantum fiziğindeki gibi bir tünelleme mekanizması da anlamlı değildir. Son yıllarda yaptığımız çalışmalar sonucunda, Einstein teorisinin bu özelliklerini koruyan ama yüksek enerjilerde daha iyi çalışan teoriler yazmanın temel gereçlerini ortaya çıkarmıştık. Bu gereçlerin içinde bir kısım özel teknikler vardır. Bu özel tekniklerin kullandığı temel yaklaşım ise pertürbatif analizi eylem seviyesinde yapmaktır ve bu teknikler I. Gullu, T. C. Sisman and B. Tekin, (2010) “Unitarity analysis of general Born-Infeld gravity theories,” Phys. Rev. D 82, 124023 makalesinde geliştirilmiştir. Temel teknik sorun sonsuz sayıda terime sahip teorilerde vakum hesabını yapmak ve bu vakum etrafında perturbasyon yaparak temel serbestlik derecelerini, parçacıkların kütle ve spinlerini bulmaktır. Yukarıda bahsi geçen makalede bunun nasıl yapılacağını gösterdik. Önemli bir kısmı kâğıt kalem ile yapılan hesapların bir kısmı da Mathematica ve Cadabra yazılımları ile tekrarlanmıştır.

4. BULGULAR

Projede üç boyutlu, 4 boyutlu ve genel *n* boyutlu yüksek mertebeden türevli ve eğrilikli (Born-Infeld tipi ve onun belli düzeyde kesilmiş versiyonlarında) hem teoriler oluşturulmuş, hem de bütünlüklü üniterlik analizi ve çözümler yapılmıştır. Uluslararası düzeyde, bu konularla ilgili en üst düzey dergilerde 17 makale yayınlanmış, 3 makale de yayına gönderilmiştir.

Elde edilen bulgular yayınlanmış olan makaleler üzerinden aşağıda anlatılmaktadır.

1. *Born-Infeld Gravity with a Massless Graviton in Four Dimensions*, Phys. Rev. D91, 044007 (2014) : Bu makalede, dört boyutta ağaç mertebesinde üniter (hayalet ve takyon olmayan, pozitif kinetik enerjili) olan, sıfırdan farklı eğriliğe sahip maksimum simetrik vakum etrafında kütlesiz spin-2 modları tanımlayan Born-Infeld tipi kütleçekim teorisi oluşturduk. Teorinin tek bir vakumu vardır ve bir anlamda Einstein teorisinin en doğal genelleştirilmiş halidir. Ayrıca, prensipte sonsuz tane terim içeren bu teorinin sadece sonlu sayıda terimi alındığında da, teori aynı özelliklere sahiptir. Bu çervede 4 boyutta başka bir teori literatürde, bildiğimize göre, yoktur. Büyük ölçeklerde Einstein teorisine inmektedir, küçük ölçeklerde, kütlesiz gravitona sahiptir ama gravitonun kendisi ile olan etkileşimi Einstein'ın teorisinden farklıdır.

2. *Born-Infeld Gravity with a Unique Vacuum and a Massless Graviton*, Phys. Rev. D92, 104014 (2015) : Bu makalede, vakum ve parçacık içeriği açısından Einstein'in kütleçekimi ile aynı özelliklere sahip *n* boyutlu Born-Infeld (BI) tipi bir kütleçekim teorisi oluşturduk. Şöyle ki, bu teori tek bir kararlı vakuma (maksimum simetriye sahip çözüm) ve bu vakum etrafında tek bir kütlesiz üniter spin-2 gravitona sahiptir. Yukarıda bahsi geçen makalenin genel *n* boyut için yapılmış halidir. Ancak, özellikle vakumun tek olduğunu göstermek gerçekten ciddi bir analiz gerektirmiştir. Çünkü vakumu veren denklem bir polinomdur, ve genel bir polinomun köklerinin detaylı analizi gerekmiştir. Strum teoremi sıkça kullanılmıştır.

3. *Minimal Extension of Einstein's Theory: The Quartic Gravity*, Phys. Rev. D93, 084040 (2016) : Bu çalışmada, yukarıdaki ilk makalemizde oluşturduğumuz teorinin eğriliğin dördüncü ve daha alt seviyelerde eyleme katıldığı halini çalıştık. Küresel simetrik statik çözümlerin tekillik içermediğini gösterdik ve küresel bir kütlenin uzağında Newton potansiyeline gelen katkıları bulduk. Beklediğimiz gibi, Einstein'ın teorisinin bir doğal modifikasyonu olan bu teori, yüksek enerjilerde veya düşük mesafelerde oldukça ümit verici sonuçlar içermektedir.

4. *Inflation in Pure Gravity with only Massless Spin-2 Fields*, arXiv: 1602.08949 (2016): Bu makale halihazırda dergide hakem kontrolündedir. Evrenin günümüzde görünen homojenliğini ve izotropluğunu açıklayabilmek için, zamanın hemen başlangıçta, evrenin bir hızlı büyüme (kozmolojik enflasyon) fazı yaşaması gerektiği neredeyse fizikçilerin tamamı tarafından kabul görmüştür (istisnalar vardır). Kozmolojik enflasyon sonunda evren hem büyümüş hem de galaksilerin oluşmasına neden olacak küçük kırışıklıklara sahip olmuştur. Enflasyon fikri gerçekten radikal bir fikirdir fakat sadece Einstein'ın teorisi çerçevesine evrenin enflasyona uğraması mümkün değildir. Bu nedenle, başka alanlar (örneğin scalar inflaton alanı) gerekmektedir. Tabi daha sonra bu alan bir şekilde yok olmalı, maddeye dönüşmelidir ki evren sürekli şişme fazında kalmasın veya çok uzun süre şişme fazında kalmasın. Kalırsa, galaksi oluşumu gerçekleşemez. Bu çalışmada, pertürbatif spektrumunda sadece kütlesiz spin-2 eksitasyona sahip Einstein kütleçekiminin spesifik yüksek türevli genişletmesinin (Born-Infeld teorisi), ekstra alanlar ya da serbeslik dereceleri tanımlamadan, kozmolojik ufuk olayı ve bağlı problemlerin çözümü için gerekli bir enflasyon fazına, yani bir yarı-de Sitter fazına sahip olduğunu gösterdik. Evrenin yeterince büyüdükten sonra, enflasyon fazından kolayca çıkması önemli bir sorundur, bu makalede, bunun mümkün olduğunu gösterdik.

5. *Spin-Spin Interactions in Massive Gravity and Higher Derivatives Theories,* Phys. Lett. B 728, (2014): Bu makalede, uzak mesafelerde ve zayıf alan limitinde kütleli kütleçekim teorisi ile Genel Rölativite (GR) teorisinin öngördüğü spin doğrultuları arasında keskin bir farkın ortaya çıktığı gösterilmiştir. GR tüm mesafeler için kaynakları birbirine bağlayan doğru üzerinde anti-paralel spin doğrultusu öngörürken, kütleli kütleçekim kuramı mesafeye dayalı olarak spin doğrultusu belirlemektedir. Böylelikle GR'da toplam spin minimize olmaktadır. Buna karşılık kütleli kütleçekim teorisi, kaynaklar arasındaki mesafe küçükken (mg $r \leq 1.62$) verdiği sonuçlar GR teorisinin sonuçları ile aynıdır. Fakat, büyük mesafelerde (mg $r > 1.62$) spin doğrultuları parallel oluyor ve kaynakları birleştiren doğru ile doksan derecelik bir açı oluşturuyorlar. Kısaca, kütleli kütleçekim teorisinde potansiyel enerji, toplam spin maksimum olduğunda minimize oluyor. Bu çalışmada, ayrıca, quadratik kütleçekim teorisi için spin-spin etkileşimi hesaplanmıştır. Bu hesaplar sonucunda iki kaynak arasındaki mesafe büyük iken GR sonuçlarıyla uyumlu sonuçlar ortaya çıkarken küçük mesafelerde spin doğrultuları iki kaynağı birleştiren doğruya dik ve birbirlerine zıt olacak şekilde bulunmuştur.

6. *Scattering in Topologically Massive Gravity, Chiral Gravity and the Corresponding Anyon-Anyon Potential Energy,* Phys. Rev. D89, 024033 (2014) : Bu çalışmada, üç kütleli serbestlik derecesine sahip Pauli-Fierz terimi eklenmiş kozmolojik sabitli topolojik kütleli kütleçekim teorisinde kovariant olarak korunan iki yük arasındaki saçılma genliğini ağaç-mertebesinde hesapladık. Anti-de Sitter uzayzamanında ve düz uzayzamanda kiral kütleçekim limiti ele alındı. Kiral kütleçekimin üniter bir şekilde Pauli-Fierz kütlesi ile deform edilemiyeceğini gösterdik. Spini olan iki noktasal kaynak arasındaki potansiyel enerji hesapladık. Beklenen kütle-kütle ve spin-spin etkileşimlerine ek olarak kütleçekimsel Chern-Simons teriminden dolayı kütle-spin etkileşimlerinin olduğunu ve bu terimin her kütleli objeye spin verdiğini ve dolayısıyla bu objeleri anyonlara çevirdiğini gösterdik. Düz uzay kiral kütleçekimin ağaç-mertebesi saçılma genliğinin sıfır olduğunu da gösterdik.

7. *AdS-plane Waves and pp-wave Solutions of Generic Gravity Theories,* Phys. Rev. D90, 124005 (2014): Bu makalede, Riemann tensorünün en genel kuvvetleri ve türevleri ile oluşturulmuş genel kütleçekim teorisinin AdS-düzlem dalga çözümlerini, *pp*-dalga çözümlerini örnek alarak, oluşturduk. En genel gravitasyon teorisinin dalga çözümlerini oluştururken, Riemann tensörü ve türevinden oluşturulmuş en genel iki-indeksli tensörün Ricci tensörü cinsinden yazılabileceğini gösterdik. Kuadratik kütleçekim teorisinin başat bir rolü olduğundan dolayı dalga çözümlerini bu teori için yeniden ele aldık. Genel formalizmimize örnek olarak altı-boyutlu konformal kütleçekimi ve bunun konformal olmayan deformasyonunu, ayrıca üç-kritik kütleçekimi, Lanczos-Lovelock kütleçekimi ve sicim teorisinden gelen kübik eğrilikli teoriyi çalıştık.

8. *Minimal Massive Gravity: Conserved Charges, Excitations and the Chiral Limit,* Phys. Rev. D90, 081701 (2014) : Bu çalışmada, asimptotik olarak Anti-de Sitter (AdS) olan uzayzamanında, yeni bulunan 2+1 boyutlu Minimal Massive Gravity (MMG)'nin eksitasyonlarını bulduk ve korunan yüklerini (kütle ve açısal momentum) oluşturduk. Teorinin kiral limitinde ortaya çıkan teoriyi bulduk. 2+1 boyutta üniterlik sorunu olmayan, tek dinamik gravitasyon teorisi olarak, bu teori oldukça önemlidir.

9. *More on Cotton Flow,* JHEP 1506, (2015): Bu çalışmada, daha önce yapılmış Cotton akışı çalışmaları üzerinde daha geniş bir araştırma yaptık ve modifiye DeTruck metodunu kullanarak genel

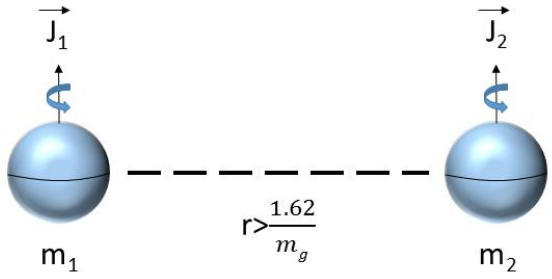
bir başlangıç metriğinin Cotton akısı sonucunda nereye gideceğini çalıştık. Akışın düz uzay etrafında, kritik nokta olarak, komplex yayılım bağıntısına sahip doğrusal KdV denkleminin anizotropik genellemesine indirgendiğini ve bunun düz uzayı küçük salınımlar etrafında kararsız bıraktığını gösterdik. Buna ek olarak, Einstein uzaylarının ve bazı Einstein olmayan konformal olarak düz uzayların lineer düzeyde kararsız olduklarını gösterdik.

10. *Exact Solutions and the Consistency of 3D Minimal Massive Gravity,* Phys. Rev. D92, 025033 (2015) : Bu makalede, Topolojik Kütleli Kütleçekimin bütün cebirsel *O*-tipi, *N*-tipi ve bazı Kundt-tipi çözümlerinin holografik olarak deforme edilmiş Topolojik Kütleli Kütleçekimden, ki bu yakın zamanda bulunan Minimal Kütleli Kütleçekimdir (Minimal Massive Gravity), geldiğini gösterdik.

11. *Bulk and Boundary Unitary Gravity in 3D: MMG2,* Phys, Rev. D92, 024008 (2015): Bu çalışmada, anti-de Sitter uzayında uzam-sınır çelişkisinden etkilenmeyen, dolayısıyla holografiyle uyumlu 2+1 boyutta kütleli spin-2 teorisi oluşturduk. Bu teori, yakın zamanda bulunan Minimal Kütleli Kütleçekim (Minimal Massive Gravity) gibi, Topolojik Kütleli Kütleçekimin (TMG) bir genişletmesidir. Fakat bu teori bir yerine iki moda sahip bir spin-2 parçacık içermektedir. Bu teori, tekrar tanımlanmış topolojik parametre ile TMG'nin bütün çözümlerine izin verir. Shapiro zaman-kaymasını hesapladık ve düz uzayın (lokal) nedenseliği bozmadığını gösterdik.

12. Stern-Gerlach Experiment with Higher Spins, Eur. J. Phys. 37, 035401 (2016): Bu makalede, idealize ardışık Stern-Gerlach deneylerini yüksek spin parçacıkları ile analiz ettik.

13. *Gravitomagnetism in Massive Gravity,* Phys. Rev. D93, 044068 (2016): Kütleli kütleçekim, zayıf alan limitinde, dört boyutta 5 serbestlik derecesine sahip Fierz-Pauli teorisi ile ifade edilir. Bu teori içinde, iki, noktasal, spini olan ve ayrıca birbirleri etrafinda bir yörüngede dönen kaynak arasındaki gravitomanyetik etkileşimleri (potansiyel enerji) spinlerin ve hız vektörlerin küçük olduğu limitte hesapladık. Kütleli kütleçekim teorisindeki spin-spin, spin-yörünge ve yörünge-yörünge etkileşimleri Genel Relativitedeki etkileşimlere göre dikkate değer, diskrit farklılıklara sahiptir.



Şekil 1. Kütleli Gravitasyon Teorisinde Spin Etkileşimleri: Kütleli gravitasyon teorisinde (yani gravitonu kütleli olan teori) dönen iki kütlenin denge durumunda spin yönleri verilmiştir. Gravitonun kütlesi çok küçük olsa da Newton potansiyeline ve spin-spin etkileşimine etkisi çok fazladır. Einstein'ın teorisinde spinler birbirlerine bakmaktadır ve toplam spin minimize olur. Kütleli teoride ise toplam spin, uzak mesafelerde, şekildede görüldüğü gibi maksimize olmaktadır. Evrenin büyük ölçekteki dinamiğinde bu buluş önemli rol oynayabilir. Şekil 1., Tasseten K, Tekin B., (2016). Gravitomagnetism in Massive Gravity, Phys. Rev. D93, 044068, makalesinden alınmıştır.

14. *Gravity Waves in Three Dimensions,* Phys. Rev. D92, 084016 (2015): Bu makalede, üç boyutta en genel yüksek türevli kütleçekim teorisinin hem doğrusal hem de kesin alan denklemlerini çözen anti-de Sitter düzlem, anti-de Sitter küresel ve *pp* dalgalarının açık formlarını bulduk.

15. *Holographically Viable Extensions of Topologically Massive and Minimal Massive Gravity,* Phys. Rev. D93, 025033 (2016) : Bu çalışmada, MMG'nin (Minimal Massive Gravity) eşsiz bir teori olduğunu ve herhangi bir TMG'nin veya MMG'nin deformasyonun kübik ve dörtlenik seviyede (ve ötesinde)

eğriliklerde olmadığını gösterdik. Teoriye madde eklendiğinde alan denklemleri seviyesinde tutarlı olduğunu gösterdik.

16. *Asymptotically Flat Black Holes in 2+1 Dimensions,* Phys. Rev. D93, 084003 (2016) : Bu makalede, NMG'nin (new massive gravity) saf kuadratik versiyonu (Einstein-Hibert terimi olmadığı durum) için yeni bulunan kara çiçek (deforme olmuş olay ufkuna sahip asimptotik düz kara delikler) çözümlerini, statik kara delikleri, dönen kara delikleri ve dinamik kara çiçekleri (ışınımsal gravitonlu kara delikler) çalıştık. Bunların bu teoride nasıl ortaya çıktıklarını gösterdik. Ayrıca, bunların NMG'nin sonsuz seviyede genişletilmiş versiyonu olan kesilmiş Einstein parçalı Born-Infeld genişletmesi için de çözümler olduklarını gösterdik.

17. *Causality in 3D Massive Gravity Theories,* arXiv: 1602.03376 (2016): (Bu makele dergide hakem kontrolündedir). Bu çalışmada, 2+1 boyutta dinamik kütleçekim teorilerinin lokal nedensellik koşulundan kaynaklanan sınırlamaları çalışıldı. Bir tane parite invariant-olmayan kütleli serbestlik derecesine sahip TMG'de (Topologically Massive Gravity) ve iki kütleli spin-2 serbestlik derecesi olan NMG'de (New Massive Gravity) nedensellik ve üniterlik birbirleri ile uyumlu ve her ikisi de Newton sabitinin negatif olmasını gerektiriyor. Born-Infeld kütleçekim ve MMG (Minimal Massive Gravity) gibi bunların genişletilmiş hallerinde de durum benzerdir ve yüksek boyutlu karşıtlarından, örneğin kuadratik (Einstein-Gauss-Bonnet) ya da kübik teoriler, ki bunlarda nedensellik ve üniterlik çelişiktir, oldukça farklıdır.

18. *Kerr-Schild—Kundt Metrics are Universal,* arXiv: 1603.06524 (2016): (Bu makele dergide hakem kontrolündedir). Üniversal metrikler, Riemann tensörünün kontraksiyonun kuvvetlerinden ve kovariant türevlerinden oluşan kovariant alan denklemleri ile ifade edilen genel kütleçekim teorilerini çözen metriklerdir. Bu makalede, Kerr- Schild-Kundt sınıfı metriklerin, literatürde görece seyrek bulunan üniversal metrik ailesinin üniversal genişletmesi olduğunu gösterdik. Bunun yanında zaten ilginç olan bu metrikler, çok yüksek enerjilerde kuantum alan teorileri için tutarlı bir arkaplan oluştururlar.

19. *From Smooth Curves to Universal Metrics,* Phys.Rev. D94 044042 (2016) : Herhangi bir prosedür bilinmediğinden dolayı, yukarıda bahsi geçen, üniversal metrikleri açıkça bulmak zor bir problemdir. Bu çalışmada, bu zorluğun üstesinden geldik ve *(d-1)* boyutlu Minkowski uzayzamanı veya Öklid uzayında bulunan eğrilerden oluşmuş *d* boyutlu uzayzaman için üniversal metriklerin kuruluşunu verdik.

20. *Particle Content of Quadratic and f(Riem) Theories in (A)dS,* Phys. Rev. D93, 101502 (2016) : Bu makalede, kuadratik kütleçekimin ve genel f(Rμνσρ) teorisinin olası kendi vakumları (örneğin, maximal simetrik çözüm) etrafında serbestlik derecelerinin eksiksiz bir ayrıklaştırmasını yaptık, spin-2 ve spin-0 modlarının kütlelerini açık şekilde bulduk.

5. TARTIŞMA VE SONUÇ

Proje kapsamında yapılan araştırmalarda, başvuruda öngörülen teoriler oluşturulmuş, bu teorilerin fiziksel bir kısım çözümleri incelenmiştir. Özellikle Einstein teorisinin sahip olduğu özelliklere sahip olan ve küçük mesafelerde Einstein'in teorisinden daha iyi çalışan modelimiz literatürde ilgi çekmektedir. Proje kapsamında yaptığımız yayınlar bugün itibari ile (INSPIRES veritabanına göre) 86 atıf almışlardır. Proje çıktılarımızın son 3 yıl içinde, bir kısmının da 2016 yılı içinde, olduğunu düşünürsek, henüz yeni sayılırlar ve ilerleyen zamanda bir kısım makalelerimizin daha fazla ilgi çekeceğini düşünüyoruz. Bu anlamda koyduğumuz başarı kriterlerini projemiz sağlamıştır.

Bunun yanında, projenin grubumuza oldukça çok faydası olmuştur. Bunları kısaca sıralayalım.

1) Suat Dengiz, projeye doktora öğrencisi olarak başlamış, aldığı destekle doktora tezini bitirmiştir. Ve çalışmalarımızın bir sonucu olarak, kendisi yine TÜBİTAK desteği ile, kuramsal fiziğe çok katkısı olan MIT profesörlerinden Roman Jackiw'in yanına doktora sonrası araştırmacı olarak katılmıştır. ODTÜ'deyken başka geliri olmayan Dr. Dengiz için bu proje desteği çok önemli bir katkı sağlamıştır. Suat Dengiz'in doktora tezinde projeden aldığı destek ifade edilmiştir.

2) Dr. İbrahim Güllü, projeden aldığı destekle çalışmalarına devam etmiş ve başarılı çalışmaları sonucunda doçent ünvanını almıştır.

3) Proje yürütücüsü Prof. Dr. Bayram Tekin, çalışmalarınının bir kısmını *"Metric theories of gravity: perturbations and conservation laws*" isimli kitapta yazmıştır. Toplam 4 yazarlı olan, 650 sayfalık bu kitap yakında de Gruyter tarafından basılacaktır. Projeye teşekkür edilmiştir. Kitabın kapağı ve bir parçası rapor ile birlikte sisteme yüklenmiştir.

4) Bu projede ortaya atılan modeller ve proje kapsamında yaptığımız çalışmalar bir anlamda yüksek türevli gravitasyon teorileri içerinde yeni bir alta çalışma sahası açmıştır. Bilkent üniversitesinde Prof. Dr. Metin Gürses, THK Üniversitesinde Doç. Dr. Tahsin Çağrı Şişman ve ODTÜ'de Prof. Dr.

Bayram Tekin (ve öğrencileri) bu konular üzerine yoğun bir şekilde çalışmaya devam etmektedirler. Özellikle proje kapsamında aldığımız bilgisayarlar işimizi çok kolaylaştırmaktadır. Mathematica ile yaptığımız bir kısım sembolik hesaplar, projeden aldığımız hızlı bilgisayar sayesinde yapılabilmektedir.

5) Öneri: çalışmalarımıza projenin katkıları yadsınamaz, bu nedenle TÜBİTAK'a teşekkür ediyoruz. Bir öneri olarak projede harcama yapmanın biraz daha kolaylaştırılması gerektiğini düşünüyoruz. Seyahat giderlerini hiç harcayamadık, çünkü bizim açımızdan bu harcamanın çok fazla bürokratik yönü bulunmaktadır. Ayrıca, Bilkent Üniversitesinde bulunan Danışmanımız Prof. Dr. Metin Gürses'e henüz hiç PTI ödeyemedik, bu ödeme süreci de son derece bürokratik olarak karmaşıktır. Bu konularda TÜBİTAK'ın yapacağı sadeleşme, araştırmacıların vakit kaybetmemesi için oldukça önemlidir.

KAYNAKLAR

Born B.M, Infeld L, 1934. “Foundations of the new field theory,” Proc. Roy. Soc. Lond. A 144, 425.

Deser S., Gibbons G. W., 1998. “Born-Infeld-Einstein actions?” Class. Quant. Grav. 15, L35.

Eddington A., 1924. “The Mathematical Theory of General Relativity” Cambridge University Press, Cambridge, England.

Gullu I., Sisman T.C., Tekin B., 2010a. “Born-Infeld extension of new massive gravity,”Class. Quant. Grav. 27, 162001.

Gullu I., Sisman T.C., Tekin B., 2010b. “c-functions in the Born-Infeld extended New Massive

Gravity,” Phys. Rev. D 82, 024032.

Gullu I., Sisman T.C., Tekin B., 2010c. “Unitarity analysis of general Born -Infeld gravity theories,” Phys. Rev. D 82, 124023.

Gullu I., Sisman T.C., Tekin B., 2015a. “Born-Infeld Gravity with a Massless Graviton in Four Dimensions,” Phys. Rev. D 91, 044007.

Gullu I., Sisman T.C., Tekin B., 2015b. “Born-Infeld Gravity with a Unique Vacuum and a Massless Graviton,” Phys. Rev. D 92, 104014.

Jatkar D.P., Sinha A, 2011. “New Massive Gravity and AdS4 counterterms,” Phys. Rev. Lett. 106, 171601.

Karasu A., Kenar E., Tekin B., 2016. “Minimal extension of Einstein’s theory: The quartic gravity,” Phys. Rev. D 93, 084040.

Sisman T.C. 2012, “Born-Infeld Gravity Theories in D-Dimensions”, PhD Thesis, METU.

Tekin B., 2016. “Inflation in pure gravity with only massless spin-2 fields,” arXiv:1602.08949 (dergide).

TÜBİTAK
PROJE ÖZET BİLGİ FORMU

Proje Yürütücüsü:	Prof. Dr. BAYRAM TEKİN
Proje No:	113F155
Proje Başlığı:	Born-Infeld Kütleçekim Teorilerinin Kozmolojisi
Proje Türü:	1001 - Araştırma
Proje Süresi:	36
Araştırmacılar:	
Danışmanlar:	METİN GÜRSES
Projenin Yürütüldüğü Kuruluş ve Adresi:	ORTA DOĞU TEKNİK Ü. FEN-EDEBİYAT F. FİZİK B.
Projenin Başlangıç ve Bitiş Tarihleri:	01/09/2013 - 01/09/2016
Onaylanan Bütçe:	234245.0
Harcanan Bütçe:	183306.67
Öz:	Born-Infeld Kütle-Çekim Teorilerinin Kozmolojisi başlıklı proje 113F155 proje numarası ile TÜBİTAK 1001 destek programı kapsamında 01/09/2013-01/09/2016 tarihleri arasında desteklenmiştir. Projede proje yürütücüsü, bir danışman, bir doktora-sonrası araştırmacı, bir doktora öğrencisi (daha sonra mezun olmuş ve projeye doktora-sonrası araştırmacı olarak katılmıştır) çalışmıştır. Projeye teşekkür ettiğimiz 17 makale A grubu dergilerde yayınlanmış, 3 makale ise halihazırda hakemlerdedir. Bir doktora öğrencisi proje sayesinde tezini bitirmiş ve ardından yine TÜBITAK desteği ile Massachusetts Institute of Technology (MIT)'ye Prof. Dr. Roman Jackiw ile çalışmak üzere doktora-sonrası araştırmacı alarak gitmiştir. Proje başvurusunda öngörülen çalışmalar gerçekleştirilmiştir. Proje kapsamında yapılan çalışmalarda Einstein'ın genel görelilik kuramı ile aynı parçacık spektrumuna sahip (kütlesiz bir spin-2 graviton), tek bir vakumu olan teori bulunmuştur ve bu teorinin bir kısım fiziksel çözümleri (küresel simetrik çözümler ve kozmolojik enflasyon çözümü) incelenmiştir.
Anahtar Kelimeler:	Born-Infeld, Kozmoloji, kara delik, tek vakum, üniterlik, kuantum kütle-çekim teorisi
Fikri Ürün Bildirim Formu Sunuldu Mu?:	Hayır

TÜBİTAK

Projeden Yapılan Yayınlar:	1- More On Cotton Flow (Makale - Diğer Hakemli Makale), 2- Bulk and boundary unitary gravity in 3D: MMG(2) (Makale - Diğer Hakemli Makale), 3- Minimal massive gravity: Conserved charges, excitations, and the chiral gravity limit (Makale - Diğer Hakemli Makale), 4- AdS-plane wave and pp-wave solutions of generic gravity theories (Makale - Diğer Hakemli Makale), 5- Born-Infeld gravity with a massless graviton in four dimensions (Makale - İndeskli Makale), 6- Bulk and boundary unitary gravity in 3D: MMG(2) (Makale - İndeskli Makale), 7- Particle content of quadratic and f (R-mu nu sigma rho) theories in (A)dS (Makale - Diğer Hakemli Makale), 8- Gravitomagnetism in massive gravity (Makale - Diğer Hakemli Makale), 9- From smooth curves to universal metrics (Makale - Diğer Hakemli Makale), 10- Stern-Gerlach experiment with higher spins (Makale - İndeskli Makale), 11- Born-Infeld gravity with a unique vacuum and a massless graviton (Makale - İndeskli Makale), 12- Gravity waves in three dimensions (Makale - İndeskli Makale), 13- Exact solutions and the consistency of 3D minimal massive gravity (Makale - İndeskli Makale), 14- Exact solutions and the consistency of 3D minimal massive gravity (Makale - İndeskli Makale), 15- Spin-spin interactions in massive gravity and higher derivative gravity theories (Makale - İndeskli Makale), 16- Asymptotically flat black holes in 2+1 dimensions (Makale - Diğer Hakemli Makale), 17- Holographically viable extensions of topologically massive and minimal massive gravity? (Makale - Diğer Hakemli Makale), 18- Exact solutions and the consistency of 3D minimal massive gravity (Makale - Diğer Hakemli Makale), 19- Scattering in topologically massive gravity, chiral gravity, and the corresponding anyon-anyon potential energy (Makale - Diğer Hakemli Makale), 20- Spin-spin interactions in massive gravity and higher derivative gravity theories (Makale - Diğer Hakemli Makale),

TÜBİTAK