

# **Kuantum Renk Dinamiği'nde Hadron Etkileşimlerine Pertürbatif Olmayan Yaklaşımlar**

**Proje No: 110T245**

Doç. Dr. Güray Erkol  
Prof. Dr. Altuğ Özpineci  
Ulaş Özdem  
K. Utku Can

Şubat 2014  
İSTANBUL

### **Önsöz**

Bu proje, hadron özelliklerinin ve etkileşimlerinin temel prensiplerden yola çıkarak hesaplanmasını sağlayan QCD toplam kuralları ve lattice QCD yöntemlerinin oktet baryonların aksiyel ve tensör yapı faktörleri ile tılsımlı mezon ve baryonların elektromanyetik yapı faktörlerini belirlemek üzere yapılan çalışmaları içermektedir. Kullandığımız yöntemlerdeki en büyük motivasyon bu yöntemlerin temel prensiplerden yola çıkarak sonuca ulaşması ve model bağımlı kabullenmelere gereksinim duymamasıdır. Elde ettiğimiz sonuçlar tılsımlı hadronların foton ile nasıl etkileştiklerini, elektrik ve manyetik yapılarının farklı enerjilerde nasıl değiştiğini ve spinin hadronlar içerisinde kuark ve gluonlara nasıl dağıldığını anlamak için önemli bilgiler içermektedir.

Bu proje, 1 Ocak 2011-31 Aralık 2013 tarihleri arasında TÜBİTAK tarafından desteklenmiştir.

## İçindekiler:

Tablolar . . . . .	v
Şekiller . . . . .	v
Özet . . . . .	vii
Abstract . . . . .	viii
1. QCD TOPLAM KURALLARI İLE HADRON ÖZELLİKLERİNİN İNCELENMESİ. . . . .	1
1.1 Baryon Aksiyel Vektör Yapı Faktörleri. . . . .	1
1.1.1 Giriş. . . . .	1
1.1.2 Literatür Özeti . . . . .	1
1.1.3 Yöntem . . . . .	2
1.1.4 Bulgular . . . . .	2
1.2 Baryon Tensör Yapı Faktörleri. . . . .	4
1.2.1 Giriş. . . . .	4
1.2.2 Literatür Özeti . . . . .	5
1.2.3 Bulgular . . . . .	5
2. LATTİCE QCD YÖNTEMİ İLE HADRON ÖZELLİKLERİNİN İNCELENMESİ. . . . .	6

2.1 Tılsımlı Mezon Etkileşimleri ve Yapı Faktörleri . . . . .	6
2.1.1 Giriş. . . . .	6
2.1.2 Yöntem . . . . .	7
2.1.3 Literatür Özeti . . . . .	7
2.1.4 Bulgular . . . . .	7
2.2 Çift Tılsımlı Baryon Yapı Faktörleri . . . . .	9
2.2.1 Giriş. . . . .	9
2.2.2 Bulgular . . . . .	9
2.3 Tılsımlı ve Gariplik İçeren Baryon Yapı Faktörleri . . . . .	12
2.3.1 Giriş. . . . .	12
2.3.2 Bulgular. . . . .	12
3. SONUÇ. . . . .	14

## Tablolar:

Tablo 1. Işık konisi ile hesaplanan tensör yükleri.. . . . .	6
Tablo 2. Örgü üzerinde baryon kütlelerinin farklı kuark kütlelerinde ve kiral noktadaki değerleri . . . . .	12
Tablo 3. Sigma_c baryonunun elektrik ve manyetik yük yarıçapları ve manyetik momentlerinin her bir kuark kütlelerindeki ve kiral noktada ekstrapolasyon ile elde edilen değerleri . . . . .	13
Tablo 4. Omega_c ve Omega_cc baryonlarının elektrik ve manyetik yük yarıçapları ve manyetik momentlerinin her bir kuark kütlelerindeki ve kiral noktada ekstrapolasyon ile elde edilen değerleri. . . . .	14

## Şekiller:

Şekil 1. Nükleon, Sigma ve Xi baryonlarının aksiyel-vektör yapı faktörleri. . . . .	3
Şekil 2. Nükleon ve Sigma baryonunun indirgenmiş sanki-vektör yapı faktörleri . . . . .	4
Şekil 3. Üç adet tensör yapı faktörünün momentum bağımlılıkları ve kiral kuark soliton model ve lattice QCD sonuçlarıyla kıyaslanması . . . . .	5
Şekil 4. D ve D* mezonlarının elektrik yapı faktörlerinin momentuma göre değişimi.. . . .	8
Şekil 5. D ve D* mezonlarının rho mezonu ile çiftlenim sabitleri ve bu mezonların yük yarıçaplarının pion kütlelerine bağımlılığı. . . . .	8
Şekil 6. Çift tılsımlı Xi_cc baryonunun elektrik yapı faktörü. Bütün kuark kütlelerindeki veri noktalarla, dipol fitler ise çizgilerle gösterilmiştir . . . . .	10
Şekil 7. Çift tılsımlı Xi_cc baryonunun manyetik yapı faktörü. Bütün kuark kütlelerindeki veri noktalarla, dipol fitler ise çizgilerle gösterilmiştir . . . . .	11
Şekil 8. Çift tılsımlı Xi_cc baryonunun elektrik ve manyetik yük yarıçaplarının pion kütlelerine bağımlılığı ve kiral ekstrapolasyonu . . . . .	11

Şekil 9. Baryonların elektromanyetik yapı faktörlerinin momentum bağımlılıkları. . . . . 13

## Özet:

Doğanın en temel parçacıklarından olan kuarklar güçlü etkileşime yolaçan bir *renk yükü* taşırlar ve sınırlılık (confinement) olarak bilinen mekanizma nedeniyle doğada serbestçe var olamazlar. *Renkli* kuarklar ve gluonlar birleşerek *renksiz* hadronları (kuark–anti-kuark durumlarıyla *mezonları* and üç kuark durumlarıyla *baryonları*) meydana getirir. Kuarkların gluon değişimi aracılığı ile oluşan dinamiğini ve etkileşimini açıklamak için geliştirilen Kuantum Renk Dinamiği kuramı, özellikle düşük enerjilerde, zor ve karmaşıktır.

Hadronların yapısını ve etkileşimlerini anlamak için sıkça kullanılan iki yöntem *QCD toplam kuralları* ve *lattice QCD*'dir. QCD toplam kuralları hadron özellikleri hakkında niceliksel ve niteliksel bilgi elde etmek için oldukça güçlü bir yöntemdir. Bu yöntemde, hadronların yüksek ve düşük enerjilerdeki davranışları eşleştirilerek analitik bir inceleme yapılır. Ardından bu eşleşme, hadronların karakteristik özelliklerinin doğrudan QCD kullanılarak elde edilmesini sağlar. Bu yöntemle elde edilen bilgiler uzunca bir süredir diğer teorik ve deneysel yaklaşımlara girdi sağlamaktadır.

Temel prensiplerden yola çıkarak ve herhangi bir model bağımlı kabullenmeye gerek duymadan bilgi edinmemizi sağlayan Lattice QCD yönteminde ise, QCD bir uzay zaman örgüsü üzerinde formüle edilir ve ortaya çıkan denklemler bilgisayarlar kullanılarak nümerik olarak çözülür. Lattice QCD, mezon ve baryonların tayfsal özellikleri kadar etkileşimlerini belirleyen parametrelerin öngörülmesinde de oldukça başarılı olmuştur.

Bu projede, içeriğinde hafif kuarklar bulunan oktet baryonların aksiyel ve tensör yapı faktörleri QCD toplam kuralları yöntemi kullanılarak, tılsımlı mezon ve baryonların elektromanyetik yapı faktörleri ise lattice QCD yöntemi kullanılarak hesaplanmıştır. Bu sayede tılsımlı hadronların foton ile nasıl etkileştiklerini, elektrik ve manyetik yapılarının farklı enerjilerde nasıl değiştiğini ve spinin hadronlar içerisinde kuark ve gluonlara nasıl dağıldığını temel prensiplerden yola çıkarak anlamak için önemli bilgiler elde edilmiştir.

Bu bilgiler, kuark modeli ile açıklanamayan egzotik moleküler durumları ve maddenin kuark-gluon plazma ortamı gibi aşırı şartlarda nasıl davrandığını anlamak açısından kritik seviyede önemlidir. Sınırlılığın ortadan kalktığı enerji seviyelerinde ağır iyon çarpışma deneyleri ile bu tür aşırı madde ortamları yaratılmakta ve tılsımlı mezonların etkileşimleri bu ortamları anlamak için önemli bir rol oynamaktadır.

**Anahtar kelimeler:** Kuantum renk dinamiği, hadron yapısı, lattice QCD, QCD toplam kuralları, garip ve tılsımlı hadronlar.

**Abstract:**

Quarks, which are one of the fundamental particles of nature, carry a *color* charge that results in strong interaction and due to a mechanism known as confinement they cannot exist freely in nature. *Colored* quarks and gluons combine so as to form *colorless* hadrons (quark-antiquark states as mesons and three-quark states as baryons). A theory known as Quantum Chromodynamics has been developed in order to describe the dynamics and interactions of quarks in terms of gluons. This theory is highly complicated, especially at low energies.

Two methods that are commonly used to study the structure and the interactions of hadrons are *QCD sum rules* and *lattice QCD*. QCD sum rules are a powerful tool to obtain qualitative and quantitative information about hadron properties. In this method, hadrons are analytically studied by matching their behaviors at high and low energies. This matching provides characteristic properties of hadrons from QCD. The information obtained by QCD sum rules has been used as an input to other theoretical and experimental approaches for a long time.

One other method that starts from fundamental principles and that does not require a model-dependent assumption is lattice QCD. In this method, QCD is formulized on a discrete space-time lattice and the resulting equations are numerically solved on supercomputers. Lattice QCD has been very successful in determining the spectrum and parameters governing the interactions of mesons and baryons.

In this project, QCD sum rules have been used as a tool to calculate the axial and tensor form factors of octet baryons and lattice QCD has been employed to compute the electromagnetic form factors of charmed mesons and baryons. As a result, we have obtained valuable information to understand how the charmed hadrons interact with the photon, how their electric and magnetic structure change at various energies and how total spin is distributed among quarks and gluons inside the hadron.

Findings of this project are critically important to explain the exotic molecular states that cannot be understood using naïve quark models, and how matter behaves in extreme conditions such as quark-gluon plasma. Heavy-ion collisions can produce such extreme environments in the unconfined regime, where the interactions of charmed hadrons play an important role in understanding these conditions.



**Keywords:** Quantum chromodynamics, hadron structure, lattice QCD, QCD sum rules, strange and charmed hadrons.

# 1. QCD TOPLAM KURALLARI İLE HADRON ÖZELLİKLERİNİN İNCELENMESİ

## 1.1 Baryon Aksiyel Vektör Yapı Faktörleri

### 1.1.1 Giriş

Baryon yapı faktörleri baryonların boyut ve şekilleri hakkında önemli bilgiler sunarlar. Bu nedenle nükleon yapı faktörleri, deneysel verilerle kıyaslanma olanağının da bulunması nedeniyle yoğun şekilde çalışılmıştır. Yapı faktörünün momentum değişiminin sıfır olduğu noktadaki değeri olarak tanımlanan nükleon aksiyel yükü, nükleer beta bozunumundan büyük bir kesinlikle bilinmektedir. Yapı faktörünün momentum bağımlılığı,  $1 \text{ GeV}^2$  değerine kadar antinötrino saçılımından,  $0.2 \text{ GeV}^2$  'den küçük değerler içinse pion elektro-üretimi deneylerinden belirlenmiştir. Yüksek momentum transferlerinde deneysel veri oldukça azdır. Ancak hem yüksek hem de düşük momentum transferlerindeki yapı faktörü verisi Fermilab'daki Minerva deneyinde elde edilecektir. Bu sayede geniş bir momentum aralığında nükleonun yapısı hakkında bilgi sahibi olabileceğiz.

### 1.1.2 Literatür Özeti

Bu deneylerde gariplik-üreten (s kuarkı içeren) süreçler hiperonların (s kuarkı içeren baryonların) yapı faktörlerini de belirlememizi sağlayacaktır. Deneysel olduğu kadar teorik çalışmalar da hiperonların, özellikle aksiyel yüklerini belirleme konusunda devam etmektedir (Savage ve Walden, 1997; Jiang ve Tiburzi, 2008; Jiang ve Tiburzi, 2009; Flores-Mendiata ve Jenkins, 1998; Chiu vd., 1985). Benzer şekilde indirgenen sanki-skaler yapı faktörü için de muon deneylerinden gelen sonuçlar bulunmaktadır. Ek olarak, lattice QCD hesapları nükleonun yapı faktörleri için temel prensiplerden yola çıkarak sonuçlar elde etmektedir. Hala kullanılan kuark kütleleri fiziksel kütlere kıyasla yüksek olsa da gelişen yöntemler ve örgü özellikleri ile daha gerçekçi sonuçlar elde etmek mümkün olmaktadır. Hiperon özelliklerini çok kısa ömürleri nedeniyle deneysel olarak hesaplamak zor olsa da lattice QCD yöntemi bunu mümkün kılmaktadır. Hiperon aksiyel yükü ve mezon çiftlenimleri için sonuçlar literatürde bulunmaktadır [Lin ve Orginos, 2009; Sasaki ve Yamazaki, 2009; Erkol vd., 2009; Erkol vd., 2010].

### 1.1.3 Yöntem

Lattice QCD'yi tamamlayan yöntemlerden bir tanesi hadron özellikleri hakkında niteliksel ve niceliksel bilgi etmede oldukça kuvvetli bir yöntem olan QCD toplam kurallarıdır (Shifman vd., 1979a; Shifman vd., 1979b; Reinders vd., 1985). Bu yaklaşımda başlangıç noktası incelenen hadronun kuantum sayılarına göre belirlenen ve baryon oluşturma alanları ile kurulan bir ilişkilendirme fonksiyonudur. Geleneksel yöntemde ilişkilendirme fonksiyonu Wilson çarpanları ve lokal operatörler ile kurulan *operatör çarpan genişletmesi yöntemi*yle hesaplanır. Bu ilişkilendirme fonksiyonu hadronların fenomenolojik özellikleriyle kurulan bir başka fonksiyona eşitlenir. Bu eşitleme ile hadronların kütleleri, manyetik momentleri, çiftlenim sabitleri gibi özellikler hesaplanabilir.

Yüksek momentum transferlerinde uygulanabilen alternatif bir yöntemde ise ilişkilendirme fonksiyonu operatör çarpan genişletmesi yöntemi yerine ışık konisi üzerinde operatörlerin çevrimleri kullanılarak hesaplanır (Braun ve Filyanov, 1989; Balitsky vd., 1989; Chernyak vd Zhitnitsky, 1990). Ardından baryon dağılım genliklerinin momentleri kullanılarak hadron matris elemanları belirlenebilir.

### 1.1.4 Bulgular

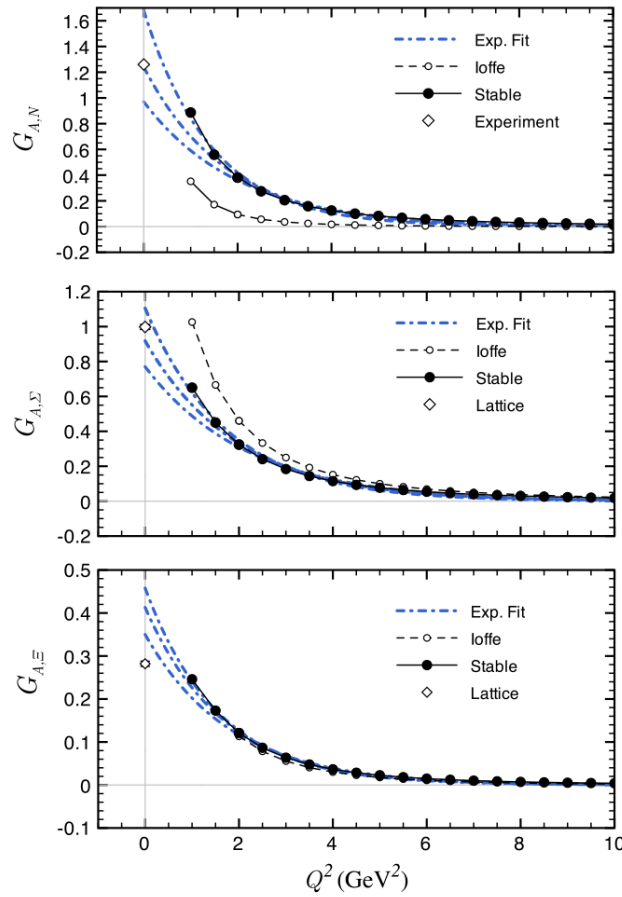
Işık konisi toplam kuralları yüksek momentum transferlerinde yapı faktörlerini belirlemek için başarıyla kullanılmıştır. Nükleonun elektromanyetik ve aksiyel yapı faktörleri bu yöntemle hesaplanmış ve deneysel verilerle uyum içerisinde sonuçlar elde edilmiştir [Braun vd., 2006]. Ardından bu analiz nükleonun izoskaler ve indirgenmiş sanki-skaler yapı faktörlerine genelleştirilmiştir (Aliiev ve Savci, 2007; Wang vd., 2006).

Hiperonun dağılım genlikleri yakın zamana kadar bilinmiyordu. Ancak bu dağılım genlikleri hesaplandı ve bunlardan yola çıkarak elektromanyetik yapı faktörlerinin analizi yapıldı (Liu ve Huang, 2009a; Liu ve Huang, 2009b). Bu çalışmaların ve paralel olarak yürütülen örgü hesaplarının getirdiği motivasyonla, SU(3) sektörünü daha iyi anlamak amacıyla gariplik içeren oktet baryonların aksiyel-vektör yapı faktörlerini ışık konisi toplam kuralları kullanarak belirledik. Sigma ve Xi baryonlarının diagonal izovektör geçişlerini ve indirgenmiş yapı faktörlerini hesapladık.

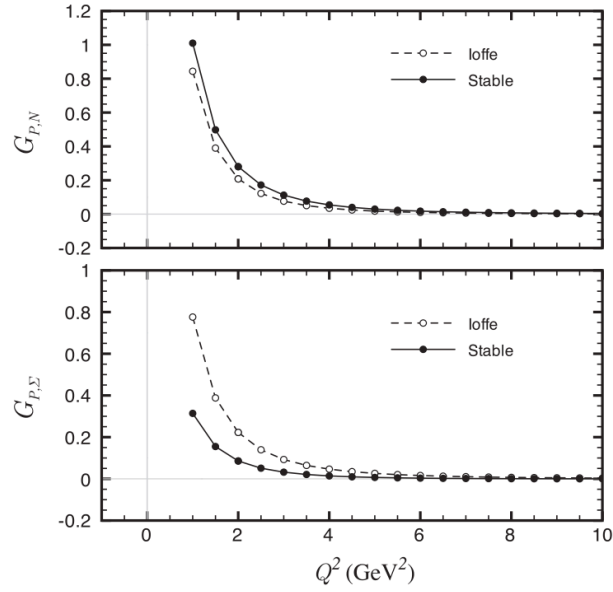
Hesaplarımız ve sonuçlarımız detaylı olarak Ref. (Erkol ve Ozpineci, 2011a)'da anlatılmaktadır. Nükleon, Sigma ve Xi baryonlarının aksiyel-vektör yapı faktörlerinin ışık konisi toplam kuralları ile elde edilmiş sonuçları Şekil 1'de gösterilmektedir. Bu şekilde yapı faktörlerinin momentum bağımlılıkları iki ayrı baryon alanı için verilmiş ve deneysel veri de

ayrıca gösterilmiştir. Şekil 2’de ise nükleon ve Sigma baryonunun indirgenmiş sanki-vektör yapı faktörleri gösterilmiştir.

Şekil 1’de görülebileceği gibi deneysel veri ile ışık konisi toplam kurallarından elde edilen sonuçlar arasında iyi bir uyum bulunmaktadır. Işık konisi toplam kuralları ile ulaştığımız sonuçlar nükleon aksiyel yükü için deneysel veriye beklenen şekilde uzanmakta ancak  $2 \text{ GeV}^2$  ‘nin üzerinde bir uyumsuzluk gözlenmektedir. Benzer bir durum Sigma ve Xi baryonları için de gözlenmekte ancak bu baryonlar için henüz deneysel veri olmadığından kıyaslama olanağımız bulunmamaktadır. Yakın gelecekte daha fazla deneysel verinin üretilmesi ve örgü ile yapılan çalışmalar daha iyi bir kıyaslama yapmamızı sağlayacaktır.



Şekil 1. Nükleon, Sigma ve Xi baryonlarının aksiyel-vektör yapı faktörleri



Şekil 2. Nükleon ve Sigma baryonunun indirgenmiş sanki-vektör yapı faktörleri

## 1.2 Baryon Tensör Yapı Faktörleri

### 1.2.1 Giriş

Nükleonun kuark yapısı çevrim-2 seviyesinde üç tane kuark dağılım fonksiyonu ile açıklanır. Polarize olmamış dağılım fonksiyonu ve spin bağımlı helisite dağılımı çizgisel momentuma olan kuark katkısını ve nükleonun net helisitesini verir. Bu iki kiral-çift dağılım fonksiyonu derin inelastik saçılım verisinden gayet iyi derecede belirlenmiştir. Enine dağılım fonksiyonu ise enine polarize nükleona paralel polarizasyonu olan kuarkların yoğunluğunu ölçer. Kiral-tek bir dağılım olduğu için ölçülmesi oldukça zordur. Enine polarize Drell-Yan süreçleri ve polarize nükleonların mezonlardan elektro- ve foto-üretimleri bu dağılım fonksiyonunu deneysel olarak ölçmek için uygun yöntemler olarak önerilmiştir. Belle, HERMES ve COMPASS verisi kullanılarak bu dağılım fonksiyonu çok yakın bir zamanda belirlenmiştir.

Çevrim-1 seviyesinde nükleon yapısının daha genel bir açıklaması sekiz adet genelleştirilmiş parton dağılımı ile yapılır. Bunlardan kiral-çift ve spin bağımsız, iki tanesi kiral-çift ve spin bağımlı ve dört tanesi ise kiral-tek ve spin bağımlıdır (Ji, 1997). Bu dağılımlar nükleonun kuark gluon yapısı ile ilgili önemli bilgiler taşımaktadır. Örneğin, nükleonun hareketine göre partonların enine düzlemde nasıl dağıldığı ya da kuark orbital açısıl momentumun nükleonun toplam spinine ne ölçüde katkı verdiği bu dağılımlar incelenerek açıklanabilir.

Genelleştirilmiş parton dağılımlarının momentleri alınarak lokal akımların nükleon yapı faktörleri elde edilebilir. Kiral-çift ve spin bağımsız dağılımların momentleri aksiyel akımları, kiral-çift ve spin bağımlı dağılımların momentleri elektromanyetik akımları ve kiral-tek ve spin bağımlı dağılımların momentleri ise tensör akımları ile belirlenen yapı faktörlerini verirler.

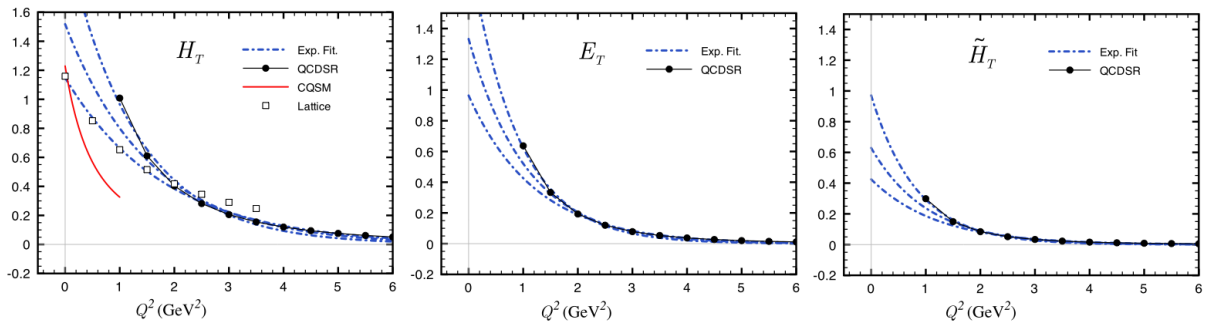
### 1.2.2 Literatür Özeti

Projenin bu kısmında amacımız nükleonun tensör yapı faktörlerini hesaplamak olmuştur. Bu amaçla yukarıda anlatıldığı şekliyle ışık konisi toplam kuralları yöntemini kullandık. Tensör yapı faktörünün momentum değişiminin sıfır olduğu noktadaki değeri nükleonun tensör yükünü verir. Nükleon tensör yükü daha önce QCD toplam kuralları (He ve Ji, 1995; He ve Ji, 1996), relativistik kuark modelleri (Pasquini vd., 2005), aksiyel vektör baskın model (Gamberg ve Goldstein, 2001) ve kiral-kuark soliton modeli (Lorce, 2009) kullanılarak hesaplanmıştır. Tensör yapı faktörlerinin  $1 \text{ GeV}^2$  'den küçük değerleri lattice QCD yöntemiyle de belirlenmiştir (Gockeler vd., 2005; Hagler vd., 2008).

### 1.2.3 Bulgular

Hesaplarımız ve sonuçlarımız detaylı olarak Ref. (Erkol ve Ozpineci, 2011b)'de anlatılmaktadır. Şekil 3'te üç adet tensör yapı faktörünün momentum bağımlılıkları gösterilmiş ve kiral kuark soliton model (Lorce, 2009) ve lattice QCD (Gockeler vd., 2005; Hagler vd., 2008) sonuçlarıyla kıyaslanmıştır. Tablo 1'de ise ışık konisi ile hesaplanan tensör yükleri verilmiştir.

Işık konisi toplam kuralları ile ulaştığımız sonuçlar kiral kuark modelinden elde edilen model bağımlı yaklaşımlara göre düşük momentumlarda uyumlu bir yaklaşım sergilerken artan momentum değerlerinde farklılıklar gözlenmektedir. Diğer tensör yapı faktörleri literatürde ilk kez bizim tarafımızdan hesaplandığı için henüz başka sonuçlarla kıyaslama olanağımız bulunmamaktadır. Yakın gelecekte deneysel ve örgü hesaplarıyla yapılacak çalışmalar sonrasında sonuçlarımızı tekrar tartışma olanağı bulacağız.



Şekil 3. Üç adet tensör yapı faktörünün momentum bağımlılıkları ve kiral kuark soliton model [27] ve lattice QCD sonuçlarıyla kıyaslanması.

**Tablo 1. Işık konisi ile hesaplanan tensör yükleri.**

Form factor	Fit region (GeV <sup>2</sup> )	$F_T(0)$	$m_T$ (GeV)
$H_T$	[2.0-10]	1.15	1.35
	[1.5-10]	1.52	1.25
	[1.0-10]	2.11	1.13
$E_T$	[2.0-10]	0.96	1.11
	[1.5-10]	1.33	1.03
	[1.0-10]	1.92	0.94
$\tilde{H}_T$	[2.0-10]	0.43	1.10
	[1.5-10]	0.63	1.01
	[1.0-10]	0.97	0.91

## 2 LATTİCE QCD YÖNTEMİ İLE HADRON ÖZELLİKLERİNİN İNCELENMESİ

### 2.1 Tılsımlı Mezon Etkileşimleri ve Yapı Faktörleri

#### 2.1.1 Giriş

Relativistik ağır iyon çarpıştırıcılarında kuark-gluon plazmanın oluşumunun bir işareti olarak kabul edilen J/psi üretimindeki baskılanmayı efektif mezon Lagrangian modelleri başarılı bir şekilde açıklamaktadır. Bu modeller pi, rho, J/psi, D ve D\* mezonlarının etkileşim köşelerini de içerirler. Bu nedenle mezonlar arasındaki etkileşim katsayıları, relativistik ağır iyon çarpıştırıcılarında tılsımlı hadronların üretimi ve baskılanmasını açıklayabilmek için kritik bir öneme sahiptir. Hadron yapı faktörlerini dört boyutlu bir uzay zaman kafesi üzerinde hesaplamayı amaçladığımız projenin bu kısmında, ilk sonuçlarımızı tılsımlı kuark içeren D ve D\* mezonlarının hafif mezonlarla etkileşim katsayılarını hesaplayarak elde ettik.

Mezon değişim modelleri efektif Lagrangian'ları oluştururken etkileşim katsayılarının hesaplanması sırasında SU(4) simetrisini ve Vektör Mezon Baskınlığı modelini kullanırlar. D ve D\* mezonlarının diğerleriyle etkileşimi sürecinde en önemli katkılardan biri rho mezonu değişiminden gelir. Çalışmanın bu kısmında öncelikli amacımız DDRho ve D\*D\*rho köşelerindeki etkileşim katsayılarını herhangi bir modele bağlı kalmadan ve 2+1 çeşnili lattice QCD yöntemini kullanarak hesaplamak olmuştur. Aynı veriyi kullanarak D ve D\* mezonlarının elektromanyetik form faktörleri ve yük yarıçaplarını (fotonun mezonla etkileşmesi esnasında karşılaştığı mezon boyutu) hesaplamak mümkün olmuştur. Bu aşamada önemli bir kriter değeri deneyle de ölçülmüş D\*Dpi etkileşim katsayısını örgü üzerinde üretebilmektir.

### 2.1.2 Yöntem

Lattice QCD yönteminde, QCD bir hiperkübik, diskritize uzay-zaman örgüsü üzerinde formüle edilir ve oluşan denklemler süperbilgisayarlar üzerinde nümerik olarak çözülür. Bu formülasyonda, kuarklar örgünün köşe noktalarında oluşturulur ve bu köşeleri birleştiren bağlantılar aracılığıyla tanımlanan ayar alanları ile etkileşir. Lattice QCD yönteminde CPU-zaman cinsinden hesaplama maliyeti, küçülen örgü aralığı ve büyüyen örgü boyutu ile çarpıcı şekilde artar. Bu nedenle farklı örgü aralığında ve boyutlarında hesap yapılarak sürekli ve sonsuz uzay-zamana bir ekstrapolasyon yapılır. Lattice QCD hesaplamalarının ilk döneminde birçok çalışmada bastırılmış yaklaşım ve gerçekçi olmayan kuark kütleleri ile yapılmışken, gelişmiş algoritmalar ve güçlü hesaplama kaynakları sayesinde gerçekçi simülasyonlar zamanımızda başarıyla gerçekleştirilmektedir.

### 2.1.3 Literatür Özeti

Lattice QCD yöntemi hadron tayfının yanı sıra, nükleonun sanki-vektör yükünü hesaplamak için kullanılmış [LHPC Kolaborasyonu, 2006; QCDSF Kolaborasyonu, 2006a], bu hesaplar daha sonra nükleonun sanki-vektör yapı faktörlerini de içerecek biçimde genişletilmiştir [LHPC Kolaborasyonu, 2006b; Alexandrou, 2007]. Eşleşme katsayıları arasında pion-nükleon eşleşme katsayısı, düşük enerjilerde önemli bir parametre olması nedeniyle yoğun bir ilgiyle çalışılmış ve Lattice QCD yaklaşımıyla yeniden incelenmiştir [Erkol vd., 2009; Erkol vd., 2010; Liu vd., 1995].

### 2.1.4 Bulgular

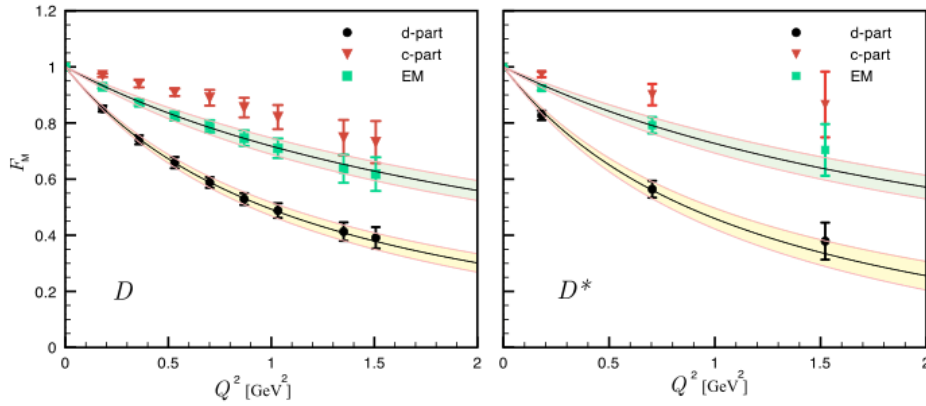
Bu amaçlar doğrultusunda projenin ilk üç döneminde gerçekleştirdiğimiz simülasyonlarla elde ettiğimiz  $32^3 \times 64$  boyutundaki ve iki çeşnili örgü iletilicilerini kullanarak  $D^*D_{pi}$ ,  $DD_{rho}$  ve  $D^*D^*_{rho}$  etkileşim katsayılarını hesapladık. Simülasyonlarımızı 700, 570, 410, and 300 MeV'e karşılık gelen  $u, d$  kuark kütlelerinde ve fiziksel  $s$  kuark kütlelerinde koşturduk. Farklı momentum değerlerinde veri olarak etkileşim katsayılarının momentum aktarımına bağlı olarak nasıl değiştiğini bulmayı hedefledik.

Şekil 4'te  $D$  ve  $D^*$  mezonlarının elektrik yapı faktörlerinin momentuma göre değişimi en ağır kuark için gösterilmiştir. Şekil 5'te ise  $D$  ve  $D^*$  mezonlarının  $\rho$  mezonu ile çiftlenim sabitleri ve bu mezonların yük yarıçaplarının pion kütlelerine bağımlılığı verilmiştir.

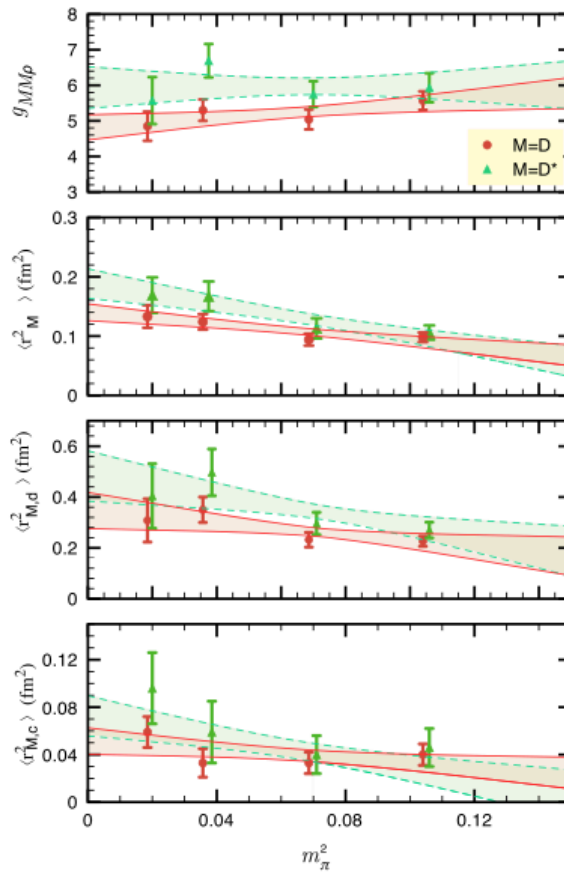
Sonuç olarak  $D^*D_{pi}$  etkileşim katsayısının  $DD_{rho}$  ve  $D^*D^*_{rho}$  katsayılarına kıyasla büyük olduğunu ve  $SU(4)$  simetrisinin büyük ölçüde kırıldığını bulduk.  $D$  ve  $D^*$  mezonlarının elektromanyetik yapı faktörlerinin momentum değişimine bağımlılıklarını belirledik ve bunlardan



yola çıkarak bu mezonların yük yarıçaplarını hesapladık. Sonuçlarımız gösteriyor ki D ve D\* mezonlarının yarıçapları birbirine çok yakın ve en hafif hadron olan pion'un yarıçapına kıyasla oldukça küçüktür. Yük yarıçaplarına en baskın katkı hafif kuarklardan gelmektedir ve c kuarkının ağır olması D ve D\* mezonlarının yarıçaplarını küçültmektedir. Hesap ve sonuçlarımız detaylı olarak Ref. (Can vd., 2013a)'da anlatılmaktadır.



Şekil 4. D ve D\* mezonlarının elektrik yapı faktörlerinin momentuma göre değişimi. En ağır kuark için olan veri gösterilmiştir.



Şekil 5. D ve D\* mezonlarının rho mezonu ile çiftlenim sabitleri ve bu mezonların yük yarıçaplarının pion kütlesine bağımlılığı.

## 2.2 Çift Tılsımlı Baryon Yapı Faktörleri

### 2.2.1 Giriş

Tılsımlı baryon sektörü, özellikle SELEX kolaborasyonu tarafından  $\Xi_{cc}$  baryonunun keşfinin duyurulmasının ardından hem teorik hem de deneysel olarak ilgiyle çalışılmaya başlanmıştır. Hala birçok baryon deneysel olarak keşfedilmeyi beklerken, tılsımlı baryonlar üzerine yürütülen teorik çalışmalar hızla devam etmektedir.  $\Xi_{cc}$  gibi çift tılsımlı baryonları ilginç yapan özelliklerden bir tanesi iki ağır kuark ve bir hafif kuarkın oluşturduğu bu sistemin güçlü etkileşimlerin bağlaşıklık durumu (confinement) hakkında çok önemli ipuçları vermesidir. Diğer yandan çift tılsımlı baryonların zayıf bozunumu tek tılsımlı baryonların dinamiğine yönelik bilgiler sağlar.

Tılsımlı baryonlar üzerine yürütülen daha önceki çalışmalar genelde onların tayfsal özelliklerini inceledi. Yakın zamandaki lattice QCD çalışmaları  $\Xi_{cc}$  baryonunun kütesini SELEX kolaborasyonunun deneysel olarak bulduğu değerin (3519 MeV) yaklaşık 100 MeV yukarısında öngörmektedir. Baryon tayfının belirlenmesinin yanı sıra baryonların elektromanyetik özelliklerinin hesaplanması da içsel yapılarının ortaya çıkarılması açısından önemlidir. Lattice simülasyonları nükleonun elektromanyetik yapısını 180 MeV gibi düşük pion kütlelerinde hesaplayabilecek bir seviyeye gelmiştir ve her geçen gün ilerleyen bir teknoloji ile gelişmektedir. Bu çerçevede  $\Xi_{cc}$  baryonları da çok ilginç özellikler taşımaktadır. İki ağır üç kuarkın baryonun içerisinde nasıl konumlandığı bilgisini taşıyan elektromanyetik yapı faktörleri ağır kuark dinamiğini anlamak ve sadece ağır baryonların değil tüm baryonların içsel yapısını belirlemek açısından önemlidir.

### 2.2.2 Bulgular

Projenin bu kısmında simülasyonlarımızı öncelikle çift tılsımlı  $\Xi_{cc}$  baryonlarının elektromanyetik yapı faktörlerini, yük yarıçaplarını ve manyetik momentlerini hesaplamak için sürdürdük. Aynı zamanda moleküler durumları bir bozon değişimi potansiyelleri çerçevesinde anlamak için önemli parametrelerden biri olan  $\Xi_{cc}$  baryonunun rho mezonu ile olan etkileşim katsayısını hesapladık. Bu amaçlar doğrultusunda projenin ilk üç döneminde gerçekleştirdiğimiz simülasyonlarla elde ettiğimiz  $32^3 \times 64$  boyutundaki ve iki çeşnili örgü ilerleticilerini kullanarak, simülasyonlarımızı 700, 570, 410, ve 300 MeV'e karşılık gelen  $u, d$  kuark kütlelerinde ve fiziksel  $s$  kuark kütesinde koşturduk. Farklı momentum değerlerinde

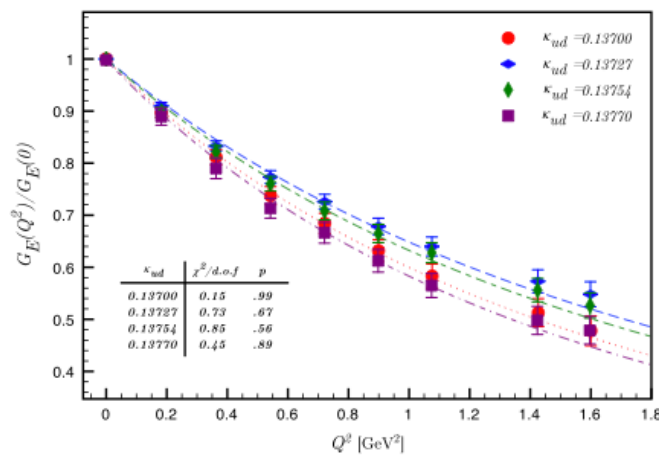
veri olarak  $\chi_{i,cc}$  baryonunun statik özelliklerinin momentum aktarımına bağlı olarak nasıl değiştiğini belirlemeyi hedefledik.

Şekil 6 ve Şekil 7’de  $\chi_{i,cc}$  baryonunun elektrik ve manyetik yapı faktörleri tüm kuark kütlelerinde gösterilmiştir. Şekil 8’de ise  $\chi_{i,cc}$  baryonunun elektrik ve manyetik yük yarıçaplarının pion kütlesi bağımlılığı ve kiral ekstrapolasyonu verilmiştir.

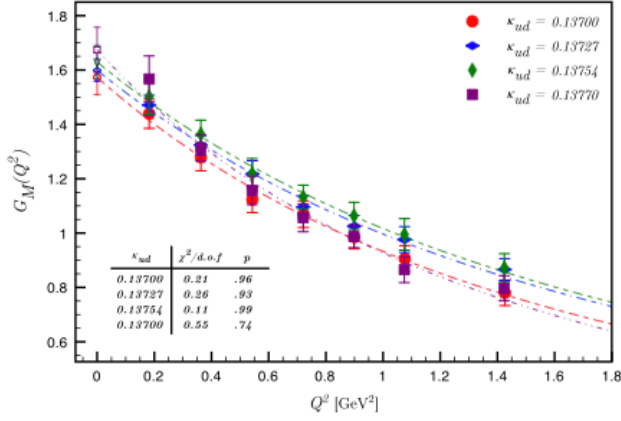
Sonuç olarak:

- $\chi_{i,cc}$  baryonunun elektrik ve manyetik yük yarıçaplarının protonunkilere kıyasla oldukça küçük olduğunu
- Daha önce D ve D\* mezonları için yaptığımız gözlem ile örtüşür şekilde c kuarkının ağır kütlelerinin tılsımlı baryonların yük yarıçaplarını daha küçük değerlere düşürdüğünü
- Aynı durumun  $\chi_{i,cc}$  baryonunun manyetik momenti için de geçerli olduğunu
- Relativistik ve relativistik olmayan kuark modellerine kıyasla örgü üzerinde hesapladığımız manyetik moment değerlerinin daha küçük olduğunu bulduk.

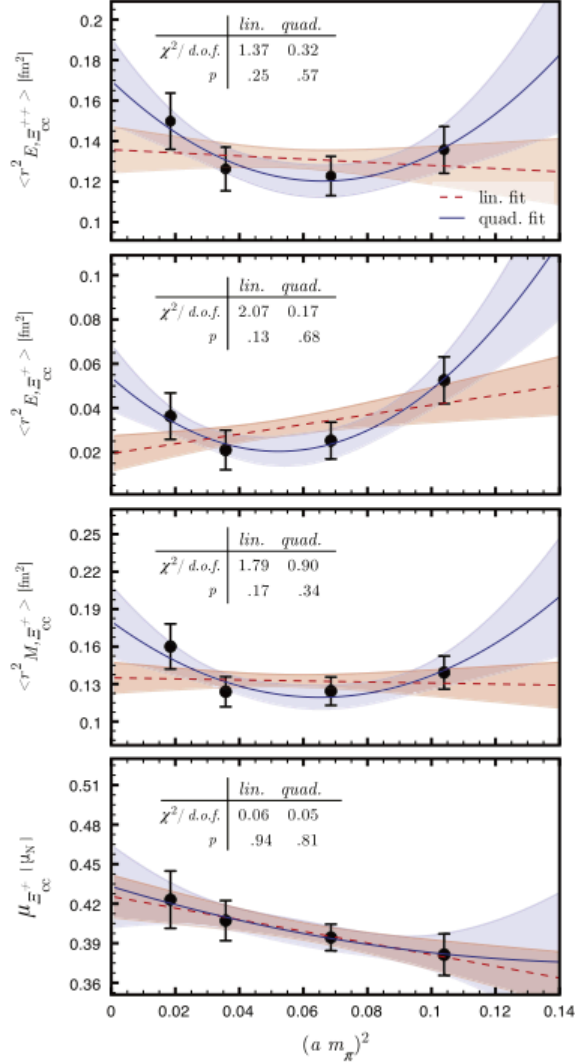
Bununla beraber güçlü etkileşimlerin bağımlılık durumuna dair çok ilginç bulgulara rastladık. Yük yarıçapları kuark kütlesi arttıkça sistematik olarak azalmamakta s kuarkı bölgesinde artmaya başlamaktadır. Bu sonuç artan kuark kütleleri için yük yarıçaplarının daha küçük olacağı öngörümüzle çelişiyor gibi görünmesine rağmen, bu davranış hadron içerisinde bağımlılığı sağlayan kuvvetlerin değişmesiyle ilintili olabilir. Sıkıştırılmış iki c kuarkı yapısı diğer hafif kuark ağırlaştıkça bozulmakta ve hadron yapısı değişmektedir. Hesap ve sonuçlarımız detaylı olarak (Can vd., 2013b)’de anlatılmaktadır.



Şekil 6. Çift tılsımlı  $\chi_{i,cc}$  baryonunun elektrik yapı faktörü. Bütün kuark kütlelerindeki veri noktaları, dipol fitler ise çizgilerle gösterilmiştir.



Şekil 7. Çift tılsımlı Xi\_cc baryonunun manyetik yapı faktörü. Bütün kuark kütlelerindeki veri noktaları, dipol fitler ise çizgilerle gösterilmiştir.



Şekil 8. Çift tılsımlı Xi\_cc baryonunun elektrik ve manyetik yük yarıçaplarının pion kütlesi bağımlılığı ve kiral ekstrapolasyonu.

## 2.3 Tılsımlı ve Gariplik İçeren Baryon Yapı Faktörleri

### 2.3.1 Giriş

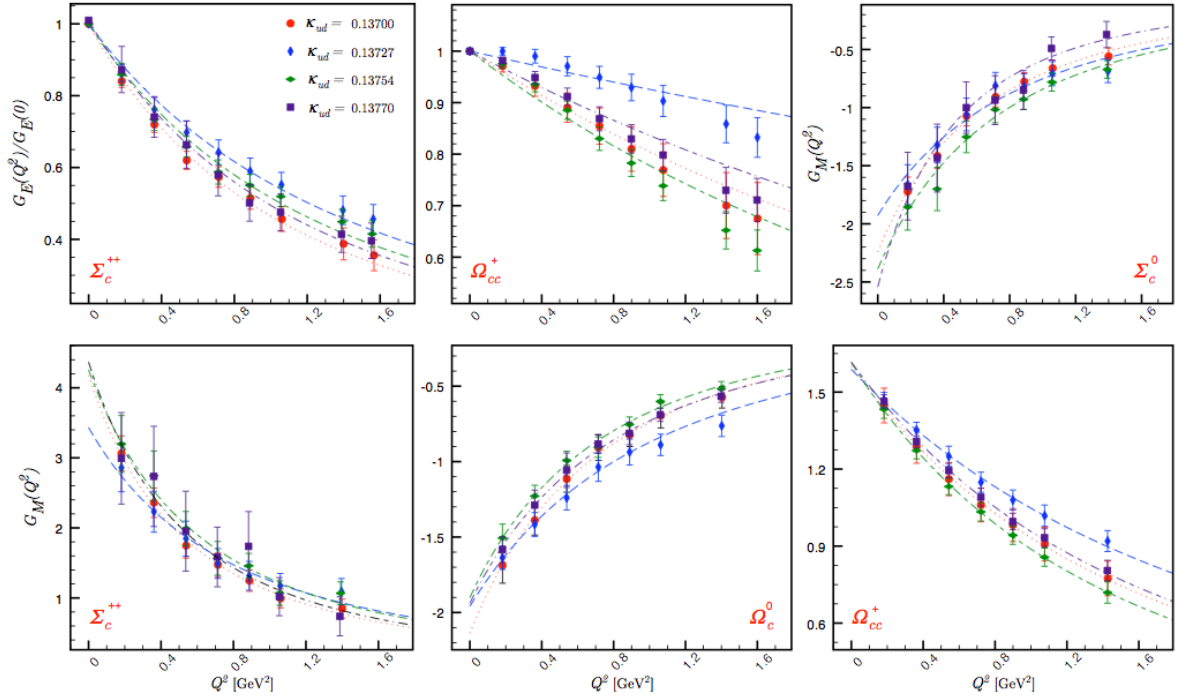
$\Xi_{cc}$  baryonunun elektromanyetik yapı faktörlerini incelediğimiz önceki çalışmamızın doğal bir uzantısı olarak tılsımlı ve gariplik içeren baryonların elektromanyetik yapı faktörlerini de örgü üzerinde çalıştık. Bu çalışma tılsımlı baryonların içerisinde bulunan hafif kuark ağırlaştıkça yük yarıçaplarının nasıl değiştiğini anlamak açısından önemlidir. Ayrıca tek tılsımlı baryonların elektromanyetik yapı faktörlerini de anlamak baryon yapısının daha geniş bir resmini oluşturmamızı sağlayacaktır. Bu amaçla hesaplarımızı Sigma\_c (cuu, cdd), Omega\_c(css) ve Omega\_cc(ccs) baryonlarına aynı örgüler üzerinde genişlettik.

### 2.3.2 Bulgular

Baryon kütleleri için ulaştığımız sonuçlar farklı kuark kütlelerinde ve kiral noktada değerleriyle Tablo 2’de gösterilmektedir. Baryonların elektromanyetik yapı faktörlerinin momentum bağımlılıkları ise Şekil 9’da gösterilmektedir. Tablo 3 ve Tablo 4’te ise Sigma\_c, Omega\_c ve Omega\_cc baryonlarının elektrik ve manyetik yük yarıçapları ve manyetik momentlerinin her bir kuark kütlelerindeki ve kiral noktada ekstrapolasyon ile elde edilen değerleri verilmektedir. Hesap ve sonuçlarımız detaylı olarak (Can vd., 2014)’de anlatılmaktadır.

**Tablo 2. Örgü üzerinde baryon kütlelerinin farklı kuark kütlelerinde ve kiral noktadaki değerleri. En alttaki iki satırda deneysel ve PACS-CS kolaborasyonunun sonuçları verilmektedir.**

$\kappa_{\text{orgü}}^{u,d}$	$m_{\Sigma_c}$	$m_{\Omega_c}$	$m_{\Xi_{cc}}$	$m_{\Omega_{cc}}$
	[GeV]	[GeV]	[GeV]	[GeV]
0.13700	2.841(18)	2.951(18)	3.871(13)	3.926(17)
0.13727	2.753(19)	2.880(21)	3.847(13)	3.846(19)
0.13754	2.647(19)	2.844(22)	3.756(15)	3.836(17)
0.13770	2.584(28)	2.806(22)	3.712(17)	3.796(28)
Lin. Fit	2.553(18)	2.784(21)	3.693(13)	3.780(20)
Quad. Fit	2.525(38)	2.793(36)	3.690(26)	3.813(42)
Exp.	2.455	2.695	3.519	-
PACS-CS [13]	2.467(39)(11)	2.673(5)(12)	3.603(15)(16)	3.704(5)(16)



Şekil 9. Baryonların elektromanyetik yapı faktörlerinin momentum bağımlılıkları.

Tablo 3. Sigma\_c baryonunun elektrik ve manyetik yük yarıçapları ve manyetik momentlerinin her bir kuark kütesindeki ve kiral noktada ekstrapolasyon ile elde edilen değerleri.

$\kappa_{val}^{u,d}$	$\langle r_{E,\Sigma_c^{++}}^2 \rangle$	$G_{M,\Sigma_c^{++}}$	$\mu_{\Sigma_c^{++}}$	$\langle r_{M,\Sigma_c^{++}}^2 \rangle$
	[fm <sup>2</sup> ]		[ $\mu_N$ ]	[fm <sup>2</sup> ]
0.13700	0.217(23)	4.177(344)	1.380(113)	0.442(53)
0.13727	0.159(22)	3.433(477)	1.170(163)	0.307(64)
0.13754	0.184(24)	4.650(707)	1.648(252)	0.388(60)
0.13770	0.195(34)	4.305(890)	1.564(326)	0.511(129)
Lin. Fit	0.169(22)	4.127(563)	1.499(202)	0.372(51)
Quad. Fit	0.240(44)	5.507 (1.094)	2.027(390)	0.656(142)
$\kappa_{val}^{u,d}$	$G_{M,\Sigma_c^0}$	$\mu_{\Sigma_c^0}$	$\langle r_{M,\Sigma_c^0}^2 \rangle$	
0.13700	-2.240(182)	-0.740(60)	0.362(45)	
0.13727	-1.928(266)	-0.657(91)	0.280(65)	
0.13754	-2.618(371)	-0.928(132)	0.335(47)	
0.13770	-2.425(456)	-0.881(166)	0.478(117)	
Lin. Fit	-2.409(285)	-0.875(103)	0.346(46)	
Quad. Fit	-3.032(557)	-1.117(198)	0.568(130)	

**Tablo 4. Omega\_c ve Omega\_cc baryonlarının elektrik ve manyetik yük yarıçapları ve manyetik momentlerinin her bir kuark kütleindeki ve kiral noktada ekstrapolasyon ile elde edilen değerleri.**

$\kappa_{val}^{u,d}$	$\langle r_{E,\Omega_{cc}}^2 \rangle$	$G_{M,\Omega_{cc}}$	$\mu_{\Omega_{cc}}$	$\langle r_{M,\Omega_{cc}}^2 \rangle$
	[fm <sup>2</sup> ]		[ $\mu_N$ ]	[fm <sup>2</sup> ]
0.13700	0.053(14)	1.602(76)	0.383(18)	0.145(18)
0.13727	0.016(11)	1.596(50)	0.389(12)	0.098(15)
0.13754	0.062(9)	1.615(43)	0.395(11)	0.162(13)
0.13770	0.044(8)	1.617(36)	0.400(11)	0.140(14)
Lin. Fit	0.050(9)	1.621(36)	0.402(10)	0.150(14)
Quad. Fit	0.064(15)	1.628(68)	0.403(19)	0.176(24)
$\kappa_{val}^{u,d}$		$G_{M,\Omega_c}$	$\mu_{\Omega_c}$	$\langle r_{M,\Omega_c}^2 \rangle$
0.13700		-2.137(148)	-0.679(47)	0.325(38)
0.13727		-1.994(148)	-0.650(47)	0.218(43)
0.13754		-1.902(130)	-0.627(44)	0.318(30)
0.13770		-1.939(152)	-0.648(47)	0.294(26)
Lin. Fit		-1.853(133)	-0.627(43)	0.295(23)
Quad. Fit		-1.950(236)	-0.655(74)	0.343(52)

Sonuç olarak:

- Omega\_cc ve Xi\_cc baryonlarının yük yarıçaplarının hemen hemen aynı olduğunu ve s kuarkın yük yarıçapı üzerinde çok etkisi olmadığını
- İncelediğimiz baryonlar içerisinde en büyük yarıçapın Sigma\_c<sup>++</sup> baryonuna ait olduğunu
- Manyetik özellikler için de benzer bir durum oluştuğunu ve Sigma\_c<sup>++</sup> (Omega\_cc) baryonunun en büyük (küçük) manyetik momente sahip olduğunu
- Hafif ve ağır kuarkın manyetik momente katkılarının ters işaretli yani spinlerinin ters yönlü olduğunu bulduk.

### 3. SONUÇ

Bu projede, içeriğinde hafif kuarklar bulunan oktet baryonların aksiyel ve tensör yapı faktörleri QCD toplam kuralları yöntemi kullanılarak, tılsımlı mezon ve baryonların elektromanyetik yapı faktörleri ise lattice QCD yöntemi kullanılarak hesaplanmıştır. Bu sayede tılsımlı hadronların elektromanyetik yapıları ve yük yarıçaplarını, elektrik ve manyetik yapılarının farklı enerjilerde nasıl değiştiğini ve spinin hadronlar içerisinde kuark ve gluonlara nasıl dağıldığını temel prensiplerden yola çıkarak anlamak için önemli bilgiler elde edilmiştir.

Bu bilgiler, kuark modeli ile açıklanamayan egzotik moleküler durumları ve maddenin kuark-gluon plazma ortamı gibi aşırı şartlarda nasıl davrandığını anlamak açısından kritik seviyede önemlidir. Sınırlılığın ortadan kalktığı enerji seviyelerinde ağır iyon çarpışma deneyleri ile bu

tür aşırı madde ortamları yaratılmakta ve tılsımlı mezonların etkileşimleri bu ortamları anlamak için önemli bir rol oynamaktadır.

Hadron özelliklerini daha gelişmiş kuark eylemleri ve iyileştirilmiş örgüler üzerinde gerçeğe çok yakın kuark kütleleriyle belirlemek için çalışmalarımız devam etmektedir. Özellikle tılsımlı hadronların diğer yapı faktörlerini örgü üzerinde belirlemek bizim için öncelikli hedef olacaktır. Bu proje bünyesinde ürettiğimiz yazılım altyapısı, kuark ileticileri ve hesaplama teknolojisi, sonrasında hedeflediğimiz çalışmaların da temelini oluşturacaktır.

## EKLER

Daha önce yayımlanmış dört makalemize ek olarak, projenin son döneminde gerçekleştirilmiş olduğumuz çalışmalarını içeren ve yayımlanmak üzere Journal of High Energy Physics dergisine gönderilmiş makalemiz (Can vd., 2014) ve Hadron 2013 konferansında sunumunu gerçekleştirdiğimiz ve Proceedings of Science'ta yayımlanmak üzere kabul edilen bildirimiz sonuç raporuna ek olarak sunulmuştur. Bu yayınlarda Tübitak desteği belirtilmiştir.

### Kaynaklar Listesi

Alexandrou, C. 2007. "Axial Nucleon and Nucleon to Delta Form Factors and the Goldberger-Treiman Relations from Lattice QCD", Phys. Rev. D, 76, 094511.

Aliev, T.M., Savci, M. 2007. "Nucleon Form Factors Induced by Isovector and Isoscalar Axial-vector Currents in QCD", Phys. Lett. B, 656, 56.

Balitsky, I. I., Braun, V. M., Kolesnichenko, A. V. 1989. "Radiative Decay  $\Sigma^+ \rightarrow p \gamma$  in Quantum Chromodynamics", Nucl. Phys. B, 312, 509.

Braun, V. M., Lenz, A., Wittmann, M. 2006. "Nucleon Form Factors in QCD", Phys. Rev. D 73, 094019.

Braun, V. M., Filyanov, I. E. 1989. "QCD Sum Rules in Exclusive Kinematics and Pion Wave Function", Z. Phys. C 44, 157.

Can, K. U., Erkol, G., Oka M., Ozpineci, A., Takahashi, T. T. 2013. "Vector and Axial-Vector Couplings of D and D\* Mesons in 2+1 Flavor Lattice QCD", Phys. Lett. B, 719, 103.

Can, K. U., Erkol, G., Isildak, B., Oka, M., Takahashi, T. T. 2013. "Electromagnetic Properties of Doubly Charmed Baryons in Lattice QCD", Phys. Lett. B726, 703.



Can, K. U., Erkol, G., Isildak, B., Oka, M., Takahashi, T. T. 2013. "Electromagnetic structure of charmed baryons in Lattice QCD", ArXiv, <http://arxiv.org/abs/arXiv:1310.5915>, Son erişim tarihi: 26 Ocak 2014.

Chernyak, V. L., Zhitnitsky, I. R. 1990. "B Meson Exclusive Decays into Baryons", Nucl. Phys. B, 345, 137.

Chiu, C. B., Pasupathy, J., Wilson, S. L. 1985. "Renormalization of the Axial Vector Current in QCD", Phys. Rev. D, 32, 1786.

Erkol, G., Oka, M., Takahashi, T. T. 2009. "Pseudoscalar-meson-Octet-baryon Coupling Constants in Two-flavor Lattice QCD", Phys. Rev. D, 79, 074509.

Erkol, G., Oka, M., Takahashi, T. T. 2010. "Axial Charges of Octet Baryons in Two-flavor Lattice QCD", Phys. Lett. B, 686, 36.

Erkol, G., Ozpineci, A. 2011. "Isovector Axial-vector Form Factors of Octet Baryons in QCD", Phys. Rev. D, 83, 114022.

Erkol, G., Ozpineci, A. "Tensor Form Factors of Nucleon in QCD", 2011. Phys. Lett. B, 704, 551.

Flores-Mendieta, R., Jenkins, E. E. 1998. "SU(3) Symmetry Breaking in Hyperon Semileptonic Decays", Phys. Rev. D, 58, 094028.

Gamberg, L.P., Goldstein, G.R. 2001. "Flavor Spin Symmetry Estimate of the Nucleon Tensor Charge", Phys. Rev. Lett., 87, 242001.

Gockeler, M. vd. 2005. "Quark Helicity Flip Generalized Parton Distributions from Two-flavor Lattice QCD", Phys. Lett. B 627, 113.

Hagler, P. vd. 2008. "Nucleon Generalized Parton Distributions from Full Lattice QCD", Phys. Rev. D, 77, 094502.

He, H.-x., Ji, X.-D. 1996. "QCD Sum Rule Calculation for the Tensor Charge of the Nucleon", Phys. Rev. D, 54, 6897.

He, H.-x., Ji, X.-D. 1995. "The Nucleon's Tensor Charge", Phys. Rev. D, 52, 2960.

Ji, X.-D. 1997. "Gauge Invariant Decomposition of Nucleon Spin and Its Spin-off", Phys. Rev. Lett., 78, 610.

Jiang, F.-J., Tiburzi, B.C. 2008. "Chiral Corrections to Hyperon Axial Form Factors", Phys. Rev. D, 77, 094506.

Jiang, F.-J., Tiburzi, B.C. 2009. "Hyperon Axial Charges in Two-Flavor Chiral Perturbation Theory", Phys. Rev. D, 80, 077501.

- LHPC Kolaborasiyonu. 2006. "Nucleon Generalized Parton Distributions from Full Lattice QCD", Phys. Rev. D, 77, 094502.
- LHPC Kolaborasiyonu. 2006. "The Nucleon Axial Charge in Full Lattice QCD", Phys. Rev. Lett., 96, 052001.
- Lin, H.-W., Orginos, K. 2009. "First Calculation of Hyperon Axial Couplings from Lattice QCD", Phys. Rev. D, 79, 034507.
- Liu, K. F. vd. 1995. "Pi N N and Pseudoscalar Form factors from Lattice QCD", Phys. Rev. Lett., 74, 2172.
- Liu, Y.-L., Huang, M.-Q. 2009. "Distribution Amplitudes of Sigma and Lambda and Their Electromagnetic Form Factors", Nucl. Phys. A, 821, 80.
- Liu, Y.-L., Huang, M.-Q. 2009. "Light-cone Distribution Amplitudes of Xi and their Applications", Phys. Rev. D, 80, 055015.
- Lorce, C. 2009. "Tensor Charges of Light Baryons in the Infinite Momentum Frame", Phys. Rev. D, 79, 074027.
- Pasquini, B., Pincetti, M., Boffi, S. 2005. "Chiral-odd Generalized Parton Distributions in Constituent Quark Models", Phys. Rev. D, 72, 094029.
- QCDSF Kolaborasiyonu. 2006. "Axial Coupling Constant of the Nucleon for Two Flavours of Dynamical Quarks in Finite and Infinite Volume", Phys. Rev. D, 74, 094508.
- Reinders, L. J., Rubinstein, H., Yazaki, S. 1985. "Hadron Properties from QCD Sum Rules", Phys. Rep., 127, 1.
- Sasaki, S., Yamazaki, T. 2009. "Lattice Study of Flavor SU(3) Breaking in Hyperon Beta Decay", Phys. Rev. D, 79, 074508.
- Savage, M.J., Walden J. 1997. "SU(3) breaking in neutral current axial matrix elements and the spin content of the nucleon", Phys. Rev. D, 55, 5376.
- Shifman, M. A., Vainshtein, A. I., Zakharov, V. I. 1979. "QCD and Resonance Physics. Sum Rules", Nucl. Phys. B, 147, 385.
- Shifman, M. A., Vainshtein, A. I., Zakharov, V. I. 1979. "QCD and Resonance Physics. Applications", Nucl. Phys. B, 147, 448.
- Wang, Z.-G., Wan, S.-L., Yang, W.-M. 2006. "Axial form-factor and induced Pseudoscalar Form Factor of the Nucleons", Eur. Phys. J. C 47, 375.
- Yamazaki, T. 2009. "Nucleon Form Factors with 2+1 flavor Dynamical Domain-wall Fermions", Phys. Rev. D, 79, 114505.

**TÜBİTAK**  
**PROJE ÖZET BİLGİ FORMU**

Proje Yürütücüsü:	Doç. Dr. GÜRAY ERKOL
Proje No:	110T245
Proje Başlığı:	Kuantum Renk Dinamiği'nde hadron etkileşimlerine pertürbatif olmayan yaklaşımlar
Proje Türü:	Araştırma
Proje Süresi:	36
Araştırmacılar:	ALTUĞ ÖZPİNECİ
Danışmanlar:	
Projenin Yürütüldüğü Kuruluş ve Adresi:	ÖZYEGİN Ü. MÜHENDİSLİK F. ELEKTRİK ELEKTRONİK MÜHENDİSLİĞİ B.
Projenin Başlangıç ve Bitiş Tarihleri:	01/01/2011 - 01/01/2014
Onaylanan Bütçe:	280730.0
Harcanan Bütçe:	220885.4
Öz:	<p>Doğanın en temel parçacıklarından olan kuarklar güçlü etkileşime yolaçan bir renk yükü taşırlar ve sınırlılık (confinement) olarak bilinen mekanizma nedeniyle doğada serbestçe var olamazlar. Renkli kuarklar ve gluonlar birleşerek renksiz hadronları (kuark-anti-kuark durumlarıyla mezonları and üç kuark durumlarıyla baryonları) meydana getirir. Kuarkların gluon değişimi aracılığı ile oluşan dinamiğini ve etkileşimini açıklamak için geliştirilen Kuantum Renk Dinamiği kuramı, özellikle düşük enerjilerde, zor ve karmaşıktır.</p> <p>Hadronların yapısını ve etkileşimlerini anlamak için sıkça kullanılan iki yöntem QCD toplam kuralları ve lattice QCD'dir. QCD toplam kuralları hadron özellikleri hakkında niceliksel ve niteliksel bilgi elde etmek için oldukça güçlü bir yöntemdir. Bu yöntemde, hadronların yüksek ve düşük enerjilerdeki davranışları eşleştirilerek analitik bir inceleme yapılır. Ardından bu eşleşme, hadronların karakteristik özelliklerinin doğrudan QCD kullanılarak elde edilmesini sağlar. Bu yöntemle elde edilen bilgiler uzunca bir süredir diğer teorik ve deneysel yaklaşımlara girdi sağlamaktadır.</p> <p>Temel prensiplerden yola çıkarak ve herhangi bir model bağımlı kabullenmeye gerek duymadan bilgi edinmemizi sağlayan Lattice QCD yönteminde ise, QCD bir uzay zaman örgüsü üzerinde formüle edilir ve ortaya çıkan denklemler bilgisayarlar kullanılarak nümerik olarak çözülür. Lattice QCD, mezon ve baryonların tayfsal özellikleri kadar etkileşimlerini belirleyen parametrelerin öngörülmesinde de oldukça başarılı olmuştur.</p> <p>Bu projede, içeriğinde hafif kuarklar bulunan oktet baryonların aksiyel ve tensör yapı faktörleri QCD toplam kuralları yöntemi kullanılarak, tılsımlı mezon ve baryonların elektromanyetik yapı faktörleri ise lattice QCD yöntemi kullanılarak hesaplanmıştır. Bu sayede tılsımlı hadronların foton ile nasıl etkileştiklerini, elektrik ve manyetik yapılarının farklı enerjilerde nasıl değiştiğini ve spinin hadronlar içerisinde kuark ve gluonlara nasıl dağıldığını temel prensiplerden yola çıkarak anlamak için önemli bilgiler elde edilmiştir.</p> <p>Bu bilgiler, kuark modeli ile açıklanamayan egzotik moleküler durumları ve maddenin kuark-gluon plazma ortamı gibi aşırı şartlarda nasıl davrandığını anlamak açısından kritik seviyede önemlidir. Sınırlılığın ortadan kalktığı enerji seviyelerinde ağır iyon çarpışma deneyleri ile bu tür aşırı madde ortamları yaratılmakta ve tılsımlı mezonların etkileşimleri bu ortamları anlamak için önemli bir rol oynamaktadır.</p>
Anahtar Kelimeler:	Kuantum renk dinamiği, hadron yapısı, lattice QCD, QCD toplam kuralları, garip ve tılsımlı hadronlar
Fikri Ürün Bildirim Formu Sunuldu Mu?:	Hayır

Projeden Yapılan Yayınlar:	<p>1- Vector and axial-vector couplings of D and D* mesons in 2 + 1 flavor Lattice QCD (Makale/Kitap/Kitapta Bölüm)2- D*Dpi Coupling Constant in 2+1 Flavor Lattice QCD (Tez (Araştırmacı Yetiştirilmesi) - Yüksek Lisans Tezi),</p> <p>3- Isovector axial-vector form factors of octet baryons in QCD (Makale - İndeksli Makale (A)),</p> <p>4- Electromagnetic properties of doubly charmed baryons in Lattice QCD (Makale - Diğer Hakemli Makale),</p> <p>5- Tensor form factors of nucleon in QCD (Makale - İndeksli Makale (A)),</p> <p>6- Vector and axial-vector couplings of D and D* mesons in 2+1 flavor lattice QCD (Makale - Diğer Hakemli Makale),</p>
----------------------------	---

TÜBİTAK