

Parçacık Fiziğinde Tıkanıklık Var Mı?

Vedat Tanrıverdi

tanriverdivedat@googlemail.com

Öz

“Parçacık fiziğinde tıkanıklık var mı?” sorusunun cevabını verebilmek için tarihsel olarak bilimin nasıl geliştiğine dair belli başlı örneklerle değineceğiz. Sonrasında parçacık fiziğinin gelişimini genel hatlarıyla özetleyeceğiz. Bu kısa tarihsel özeti, mezon ailelerinden biri olan çarmonyum ailesi üzerine daha detaylı bir özet takip edecek. Burada aynı zamanda iki farklı potansiyel modelin karşılaştırması da yapılacak, ve bu iki başarılı modelin nasıl yorumlanabileceği ve ilerisi için neyi gösterdiği üzerine değineceğiz. Sonra, bilimin nasıl ilerlediği ve problemlerin çözümlerinin nasıl bulunduğu dair bazı örneklerle değineceğiz ve bu örnekler aynı zamanda çözüm için ne yapılabilir sorusunun cevabını da daha iyi anlamamızı sağlayacak. Sonunda ise bu sürecin ve örneklerin parçacık fiziği ile ilgili ne anlattığına değinip, bundan sonrası için nasıl davranılabileceği konusunda çıkarımda bulunacağız.

Abstract

We will try to answer the question “Is particle physics stuck?” by considering some well known examples of the scientific development in the history. Then, we will briefly summarize the developments in the particle physics. Subsequently, there will be a more detailed summary on one of the meson families, charmonium. In this part, there will be a comparison of two different potential models, and there will be some comments on these and we will also mention about some future probabilities. Then, we will mention on how science develops and find solutions to the problems with some examples, and these examples will be helpful to understand what should be done for solutions. Finally, we will mention on what scientific development and those examples show, and then we will mention about our possible position.

I. GİRİŞ

Parçacık fiziği 1930'lardan 1980'lere kadar çok önemli ve hızlı gelişmelere sahne olmuş bir alandır [1]. Proton ve nötronun içyapılarının keşfi, bunların etkileşimi, mezonların keşfi, standart modelin geliştirilmesi, alan kuramının geliştirilmesi ve parçacık fiziğine uygulanması gibi çok önemli gelişmeler görece kısa zaman aralığında yaşanmıştır. 1980'lere kadar olan hızlı gelişmeyle, 1980'lerden sonra gelişmeyi kıyasladığımızda 1980'ler sonrası gelişmelerin birçok önemli yanı olsa da 1980'ler öncesi kadar yeniliğe sahne olmadığını söyleyebiliriz. Bu durum yeni bir olgunun ortaya çıkması ve bu olgu üzerinde yapılan çalışmaların belirli bir olgunluğa geldiğinin göstergesidir. Ama bu olgunluk henüz birçok soruyu cevaplamadığı için yeniliklere gebe bir olgunluktur. Hem bunu neden olgunluk olarak değerlendirebileceğimizi anlamak hem de bu yeniliklerin nasıl ortaya çıkabileceğini anlamak için tarihsel gelişmeleri değerlendirmek yerinde olacaktır. Bu gelişmeler bize yeniliklerin nasıl meydana gelebileceğine dair bir öngörü sağlayacaktır.

Tarihsel gelişmelerin hepsinden alınabilecek ayrı dersler vardır, ama burada hepsinden bahsetme imkanımız olmadığı için sadece bazı örneklerle değineceğiz. İlk kısımda, köklerimiz nereden ve nasıl oluştuğunu anlayabilmek için Antik Yunan'daki ilk önemli örneklerin katkılarının nasıl olduğu, sonrasında müslüman bilim insanlarının katkılarıyla nasıl sürdüğü ve Avrupa'nın öncüllerinin nasıl katkı sağladığını bazı örnekler üzerinden kısaca özetleyeceğiz. Bu konu aslında çok uzun ve öğretici bir konudur[2], ama asıl konumuz farklı olduğu için ve bu öğretici unsurların önemlilerinden bahsedilmek gerektiği için Tales, Öklit, Arşimet, İbni Heysem, Galileo ve Kepler gibi isimlerin nasıl katkı sağladığından genel hatlarıyla bahsedeceğiz. İkinci kısımda, parçacık fiziğinde olan önemli gelişmeleri kısaca özetledikten sonra henüz cevabını bilmediğimiz bazı sorulara değineceğiz. Üçüncü kısımda, çarmonyum ailesinden ve onların iki farklı modelle [3, 4, 5] modellenmesinden bahsettikten sonra kısaca mezon molekülleri veya dörtlü kuark yapıları ile nasıl ilişkilendirilebileceğine değineceğiz. Dördüncü kısımda bilimin nasıl ilerlediğinden ve standart modelden bahsederek parçacık fizinde yaşanan durumu anlamaya çalışacağız. Sonuç kısmında ise tarihsel gelişimin bize gösterdiği yolu açıklamaya çalışacağız.

II. BİLİMİN ÖNCÜLLERİ

Günümüzde galaksilerden kuarklara kadar geniş bir çerçevede bilgiye ve kuramsal bakış açısına sahibiz. Geldiğimiz bu noktanın tarihsel gelişiminin ana hatlarından bazılarına bakalım.

Antik Yunan öncesine ait çok az isim günümüze ulaşmıştır, günümüze ulaşan ve bildiğimiz isimler üzerinden olayı değerlendirmek daha kolay olacağı için ilk örnekleri Antik Yunan'dan seçeceğiz. İsmi bildiğimiz en eski doğa üzerine çalışma yapan insanlardan biri Tales'tir (y. MÖ 624-546). Tales doğa olaylarını nedensellik ilkesi ile açıklamaya çalışan bildiğimiz ilk örneklerdendir. Her denemesi başarılı olmasa da, insanların olayların nedenlerini merak etmelerini sağlayacak düşünceler üretmiştir. Bunların en önemlisi Demokritus ve Leisuppus'un atom düşüncesinin gelişmesine yol açan, doğadaki maddelerin bir başlangıcı olması gerektiği ve bu başlangıcın da "su" olduğu düşüncesiydi. Tales'e yakın zamanlarda yaşamış bir diğer önemli isim Pisagor'dur (y. MÖ 570-495). Pisagor öğrenme amaçlı Mısır'a, Babil'e ve Hindistan'a yolculuklar yapmıştı, ve oralarda öğrendiği bilgilerle ilk kuramsallaştırma örneklerinden biri olan Pisagor kuramını geliştirmişti. Antik Yunan'da yaşayanların diğer medeniyetlerden öğrendikleri sadece doğru bilgiler yoktu, aynı zamanda yanlış bilgiler de vardı. Bu yanlış bilgiler onların en çok zorlandığı konuları oluşturacaktı. Mısırlıların Dünya ilgili değişik bakış açıları vardı, "4 element" bakış açısı bunlardan biriydi. Simya gibi değişik konular bu bakış açısı üzerinden şekillenmişti, ve insanlık için yüzlerce yıl boyunca soruna sebep olacaktı. Eski medeniyetlerden gelenlerin yanı sıra antik Yunan'da da doğruların ve yanlışların olduğu birçok

bakış açısı geliştirildi. Bu bakış açılarından bazıları o zamanın bilgi sınırlarının ötesinde sorulardan kaynaklanıyordu; ether, Dünya'nın düz olması, atom kuramı, bütün maddelerin sudan oluştuğu, ateşten, topraktan veya havadan oluştuğu ve daha bir çok farklı bakış açısı. Bu gibi düşüncelerin hangisinin doğru olduğunu, hangisinin yanlış olduğunu anlamak ve daha doğru bakış açıları geliştirebilmek için uzun yoldan gitmemiz gerekiyordu. Çünkü elimizde bunları ayırt edebilecek veriler olmadan oluşturacağımız bakış açılarından ne kadar doğru ne kadar yanlış olduğunu ölçemezdik. Atom kuramı doğruya yakın ve yirminci yüzyıla kadar kabul edilmemiş bir kuramdı, diğer taraftan Dünya'nın düz olduğu yanlış olan ve günümüzde bile destekçileri olabilen bir bakış açıydı. Zamanın ötesinde sorular sorulduğu ve tartışıldığı zaman bu örneklerde olduğu gibi yanlış cevaplar da olabiliyor, iyi bir akıl yürütmeye elde edilen atom kuramı gibi bakış açıları da geliştirilebiliyordu. Bunların doğru mu yanlış mı olduğunu anlamımıza giden yol deney yapmaktan geçiyordu, ve Arşimet (y. MÖ 287-212) kontrollü deneyler yapan ilk bilim insanlarından biriydi. Kontrollü deney yapmadan ağırlık merkezi, kaldıraç ve suyun kaldırma kuvveti gibi konuları kuramsal şekilde ifade etmek mümkün değildi. İbni Heysem (y. 964-1040) ise kontrollü deney yapan, bunun bilimde nasıl kullanılacağını ve deney olmadan önyargılarla karar verebileceğimizi söyleyen ilk insandı. İbni Heysem bilimsel yöntemin günümüze yakın ilk tanımını yaparak ve diğer çalışmalarıyla tarihteki en önemli bilim insanlarından biri olmuştu. Duvarlara küçük delikler açıyordu, evini iğne deliği kameraya dönüştürüp küçücük delikten içeri giren ışığı inceliyordu, ve bu yaptığı deneylerle ışığın ışıkla etkileşmediğini ilk defa İbni Heysem keşfetmişti. Galileo (1564-1642) ise kendi laboratuvarında sarkacın nasıl çalıştığı, eğik düzlemde hareketin nasıl olduğu, gökyüzünde neler olduğu gibi konularda çalışıyordu. Diğer insanların önemsemediği veya küçük görebileceği bu konularla ilgili çalışmaları insanlık için çok önemli bir başlangıca yol açacaktı. Arşimet, İbni Heysem ve Galileo'yu takip eden insanlar doğanın küçük parçalarının nasıl işlediğine dair deneyler yapıp, bu deneylerden doğa hakkında bilgi çıkarmaya başlamıştı.

Başka bilim insanlarının çalışmalarından da bahsetmek bazı şeyleri daha iyi fark edebilmek adına faydalı olacaktır. Deney yapamadığımız, sadece gözlemler üzerinden yaklaşmamız gereken konular da vardı. İnsanlar yıldızları izlediğinde doğal olarak onlardan çok etkilenmişti. Yıldızları izlerken bazılarının diğerlerine göre hareket ettiklerini fark ettiler ve hareket edenleri "gezgin" (planet) olarak isimlendirdiler. Gezginlerin dönüşünü Eflatun (Platon) (MÖ y. 428-348) merak etmişti ve günümüzdeki akademi kavramının da temelini oluşturan okulu Akademi'de tartışılmıştı. Eudoksus (Eudoxus of Cnidus MÖ y. 390-337) kısa süreli akademide öğrenci olmuş, daha sonra Mısır'da rahiplerden dersler almıştı ve gezginlerin hareketini 27 çember ile modellemişti. Callippus (MÖ y. 370-300) ve Aristo (MÖ 384-322) Eudoksus'un modelini bazı durumları açıklayabilmek için daha fazla çember ekleyerek değiştirecekti. Bu aslında açıklanamayan kısımları açıklayabilmek için daha fazla parametre eklemektir. Hiparkus (MÖ y. 190-120) bu modeli geliştirerek gezginlerin hareketini açıklayan bir sistem oluşturmuştu. Batlamyus (Ptolemy y. 100-170) bazı eklemelerle Hiparkus'un modelini değiştirecekti, ve Ptolemik modelin de anlatıldığı kitabı Almagest yüzyıllar boyunca gezginlerin hareketi ile ilgili temel eser olarak kullanılacaktı. Diğer taraftan Aristarkus (MÖ y. 310-230) hem Güneş Merkezli hem de Dünya merkezli modelin gezginlerin hareketini açıklayabileceğini ileri sürmüştü. Aristarkus'un Galileo ve Kepler'e kadar sadece üç önemli takipçisi olacaktır; Seleucus (MÖ 2. yy), Kopernik (1473-1543) ve Bruno (1548-1600). Bu takipçiler de Güneş merkezli bakış açısını savundukları için farklı zorluklarla karşılaşacaklardı. Buna rağmen antik Yunan'da ve müslümanların altın çağında Güneş merkezli bakış açısı ve Dünya merkezli bakış açısı tartışılmaya devam edecekti. Arşimet, Dünya merkezli bakış açısına inanıyordu ve Aristarkus'un düşüncelerini eleştiriyordu. Biruni (973-1048) her iki bakış açısını da ele alıp değerlendirecek ve kesin bir cevap vermenin kendi zamanı için mümkün olmadığını ve daha fazla çalışmak gerektiğini ifade edecekti, İbni Heysem ise Ptolemik modeli eleştiren ve

Dünya merkezli bakış açısının sorunlu olduğu konuları anlatan bir kitap yazacaktı. Ama devrim için başka bilim insanlarının çabaları gerekecekti. Brahe (1546-1601) yaptığı gözlemler sonucunda Ptolemik modelin verileri incelemek için kullanışlı olmadığını düşünerek antik Yunan'da da düşünülmüş olan Dünya-Güneş merkezli (geoheliocentric) bir modeli kullanacaktı. Bunu kullanmak onun Dünya merkezli bakış açısına inancını etkilemeyecekti. Bu modelde Merkür ve Venüs Dünya'nın etrafında değil Güneş'in etrafında dönüyordu, diğer gezginler ise Güneş'in etrafında döndükleri ve Güneş de Dünya'nın etrafında döndüğü için Dünya'nın etrafında dönüyorlardı. Kepler (1571-1630) öncelikle Eflatun'un beş katı cismini kullanarak bunların etrafına küreler geçirerek 6 gezginin yörüngelerini belirlemeye çalıştı ve bunun üzerine "Kozmik Gizem" (Mysterium Cosmographicum) isimli kitabını yazdı. Brahe, Kepler'in çalışmalarını kullandığı verilerin yeterince hassas olmadığını söyleyerek eleştirdi. Kepler bunun üzerine müziğin, matematiğin ve gezginlerin hareketindeki arasındaki harmoniyi aramaya girişti. Bir süre optik ve astronomik gözlemler üzerine çalıştı, bu çalışmalar sayesinde Kepler İbni Heysem'in düşüncelerini öğrendi ve onun optik üzerine çalışmalarını ilerletti. Tabi bu dönemde İbni Heysem'in Ptolemik modele yönelik eleştirileriyle tanışmış olabileceğini ifade etmek gerekir. Bu dönem Kepler için başka öğretici şeyler de içeriyordu, elips ile çember ilişkisi üzerine daha fazla bilgi sahibi oldu ve bir süre Brahe'nin asistanlığını yaptı. Astronomi çalışmalarına geri döndü, ve artık asistanlığını yaptığı Brahe'nin verilerini kullanabiliyordu. Mars üzerine verileri kullanarak yıllar süren 40 civarı denemeden sonra gezginlerin eliptik yörüngeyle hareket ettiği düşüncesini denemeye karar verdi ve sonuç doğrudu. Başlangıçta gezgin olarak isimlendirilen gökcisimlerinin hareketi daha iyi anlaşılabilir ve bizim gezegen tanımımızla algıladığımız şeylere dönüşmeye başlayacaktı. 1605 yılında ulaştığı sonuçları ancak 1609 yılında yayınlatabilecekti. Sonrasında bu sonuçların insanlar arasında bilinir hale gelmesi için Galileo ve teleskobu gerekecekti. Galileo teleskopla yaptığı gözlemlerle insanların yanlış bilgilerden edinilmiş önyargılarını fark edecekti ve engizisyona karşı Güneş merkezli bakış açısını savunacaktı. 1616'da Güneş merkezli düşünceleri reddetmesi ve herhangi bir şekilde savunmaması, sözlü veya yazılı şekilde desteklememesi istenmişti, tabi bu durum onu düşünmekten alıkoymadı ve çalışmaya devam etti. Yıllar boyunca çalıştı ve çalışmaları sonucunda yazdığı 1632'de yayınlanan "İki Büyük Dünya Sistemi Hakkında Diyalog" isimli kitabında önyargılarla teleskopla elde ettiği bilgileri karşılaştırıyordu. Bu önyargıların çoğunluğu Aristo'nun eserlerinde bulunabilecek olan ama hepsi Aristo'nun savunduğu düşünceler olmayan, önceki tarihlerde bu konu üzerine düşünmüş ve çalışmış insanların yazdıklarından basitleştirilerek elde edilmiş düşüncelerin mutlak doğru şeklinde değerlendirilmesiyle insanlara anlatılan dogmalardan kaynaklanıyordu, ve bunda en önemli pay kilisenin bunları din ile ilişkilendirmesinden ve öyle olmamasına rağmen bunların Hristiyanlık inancının temelinde yer alan düşünceler olduğunu anlatmasından kaynaklanıyordu. Galileo iki sistemi de ele alıyor iki bakış açısının da sonuçlarını ortaya koyuyordu, tabi ki teleskop ile elde ettiği veriler Güneş merkezli sistemi desteklediği için doğal olarak Güneş merkezli sistem öne çıkıyordu. Bu eseri yargılanmasına yol açacaktı, uzun süre engizisyonun istediği ifadeyi vermeyi reddetmesine rağmen işkence tehditleri ve arkadaşlarının ikna çabaları sonucunda politik dille yargılayanların istediğini yerine getirerek Güneş merkezi bakış açısını geri çektiğini söyleyecekti. Bu onu hapis cezasından alıkoymayacaktı, verilen hapis cezası ertesi gün ev hapsine çevrilecekti. Galileo politik bir şekilde düşüncesini geri çekmesine rağmen Dünya'nın hareketiyle ilgili "Yine de hareket ediyor" ("E pur si muove") diyecekti. Galileo'nun hikayeleri insanlar arasında dolaşacaktı ve bu hikayeler insanların düşünmesine yol açacaktı. Düşünmek ve anlamaya çalışmak Galileo'nun onu duyan gelecek kuşaklara bıraktığı mirastı, ve bu mirası takip edenler "hakikat aşkıyla" hareket edecek ve Dünya'nın hareketini ortaya koyacaktı. Tabi ki Halley'in Newton'u cesaretlendirmesi ve Newton'un Dünya'nın hareketini kütleçekim kuramıyla nedensel şekilde açıklaması olmadan devrim tam olarak gerçekleşmeyecekti. Bir tarafta önyargılar sonucunda söylenen "Dünya evrenin merkezindedir ve her şey onun etrafında hareket

ediyor" düşüncesi, diğer tarafta ise "Kütleçekim Dünya'nın ve diğer gezegenlerin hareket etmesine yol açıyor" düşüncesi vardı. Eğitim ile edinilmiş önyargıları, Kilise'nin insanları eğitirken kullandığı düşünceleri aşmak için "Kütleçekim yasası"nın başarılarına ihtiyacı vardı ve bu da Gauss, Le Verrier ve diğer bilim insanları ile mümkün olacaktı; Neptün'ün keşfi. Devrim yüzyıllar içinde birçok bilim insanının katkılarıyla ve bilimsel düşüncüyü destekleyen insanların çabaları ve mücadeleleriyle gerçekleşebilecekti. Bu devrim sadece bilimsel bir devrim değildi, aynı zamanda zihinsel bir devrimdi de; artık her şey bizim etrafımızda dönmüyordu. İnsanlar kendilerinin diğer canlılara birçok yönden benzeyen bir canlı olduğunu ve her şeyin kendi etraflarında dönmediği gerçeğini de kabullenmeye başlamışlardı.

Bahsetmemiz gereken başka bir durum da başarılı modellemelerin ve doğayla tutarlı kuramların yeniliklere açık olmasıdır. Her doğayla tutarlı açıklama yeniliklerin eklenebildiği ve yeni modellerin geliştirilebildiği bir zemin sağlar. Bu zemin üzerine çalıştıkça yeni şeyler öğreniriz. Neptün'ün keşfi Newton'un kütleçekim bakış açısının başarısını gösterir, kütleçekim kuramı ve Gauss'un da katkı sağladığı gezegenlerin yörüngelerini nasıl hesaplayabileceğimize dair tekniklerin geliştirilmesi Le Verrier'in Neptün'ü keşfetmesini mümkün kılacaktı. Benzer çalışmalar yapılmasaydı, Merkür'ün günberi noktasının öndelenimi (Precession of Perihelion of Mercury) bulunamaz ve Newton'un kütleçekim kuramının açıklayamadığı kısmı öğrenemezdik. Dokunamadığımız dogmalarla bu bilimsel gelişmeyi sağlayamayız. Aristo'nun düşüncelerinin basit dogmalara dönüştürülmesi ve sorgulanamaz hale getirilmesi kısır bir bakış açısına yol açmıştı, ve bu kısır bakış açısından kurtulmadan yeniliklere yol açan bilimsel keşifler yapılamadı. Bize öğretilen bilgileri düşünmemiz onları anlamamız ve onları sorgulamamız gerekir ki bu bilgiler doğayı cidden açıklıyor mu açıklamıyor mu kavrayabilelim. Tabi burada daima yanlış bakış açısına düşme ihtimalimizin de var olduğunu unutmamalıyız, yanlış bakış açısına düşüp düşmediğimizi fark edebilmek için bilim insanlarıyla fikir alışverişini sağlıklı yapabildiğimiz ortamlar geliştirmeliyiz. Bu ortamlar sayesinde daha kolay doğru sorular sormayı öğrenebiliriz.

Bilim "Evren nasıl yaratıldı?", "Madde neyden oluştu?" gibi büyük soruların cevaplarından çok "Denge durumu nasıl oluşur?", "Görüntü nasıl oluşur?", "Bir cismin hareketi serbest düşmede nasıldır?" gibi soruların cevaplarıyla ilerledi. Bu sorulara bulduğumuz cevaplar büyük sorulara daha iyi cevap verebilmek için bizim yolumuzu açtı. Küçük sorulara cevap bulmadan ve onları yeterince iyi anlamadan büyük sorulara cevap vermekte çok zorlanıyorduk ve hatta yanlış cevaplar üzerine uzun tartışmalar yürütüyorduk. Bunun yerine Arşimet, İbni Heysem, Galileo gibi deney yapabildiğimiz ve ayrıştırabildiğimiz küçük şeylerden ilerlememiz, Tales gibi nedensel açıklamalar üretmek için çalışmamız gerekiyordu. Bu yoldan gittiğimizde vücudumuzdaki karbon atomlarının yıldızlarda nasıl üretildiğine cevap verebilecek, bunların üretimi için gerekli hidrojenin oluşmasını büyük patlamayla açıklayabilecektik. Tabi ki bu konularda hala çalışılması hala sorgulanması gereken şeyler var, ama bu "Dünya'nın düz olduğu ve evrenin merkezinde olduğu düşüncesinden" bugünlere gelişimizi düşündüğümüzde ne kadar mesafe katettiğimizi unutturmaması gereken bir durumdur.

III. PARÇACIK FİZİĞİNİN GELİŞİMİ

Şimdi de parçacık fiziği ile ilgili konulara bakalım, ve sonrasında mezonlar ve potansiyel kuark modelinin gelişimini örnek olarak ele alalım.

Becquerel'in radyoaktiviteyi (ışınletkinlik) keşfinden sonra bilim insanları bunu ölçmeye başladılar. Herhangi bir radyoaktif kaynak yanında olmamalarına rağmen ölçümler bir kaynak olduğunu gösteriyordu, ve bu ölçümlerin toprakta bulunan radyoaktif maddelerden kaynaklandığını düşünüyorlardı. Victor Hess 1912 yılında ölçüm aletlerini sıcak havayla uçan bir balona yükleyerek gökyüzünde ölçüm yaptı, ve ölçümleri yukarı çıktıkça radyoaktivitenin arttığını

gösteriyordu. Bu kozmik ışınların ilk habercisiydi, artık bilim insanları kaynağın toprakta değil göklerde olduğunu fark etmişlerdi. Bu keşif insanlara kozmik ışınlarla ilgilenmeleri için gerekli motivasyonu sağlamıştı, ve kozmik ışınlar üzerine çalışan bilim insanları yeni parçacıklar keşfettiler. Kozmik ışınların bulut odasında (Cloud chamber) oluşturdukları izleri kullanarak 1932'de pozitronun keşfi Anderson tarafından ve 1936'da müonun keşfi Anderson ve Neddermeyer tarafından yapılmıştı. Pion da Anderson'un izlediği yöntemle benzer şekilde Powell ve ekibi tarafından, kaon ise Rochester ve Butler tarafından 1947'de, lambda baryonu da 1950'de Hopper ve Biswas tarafından keşfedildi.

1930'lardan beri geliştirilmeye başlanan parçacık hızlandırıcılarında yapılan ilk keşif ise anti-proton'un keşfiydi, ve 1955 yılında Chamberlain ve Segre tarafından yapılmıştı. Bu keşif birçok keşfin öncüsüydü ve devamında yapılan farklı parçacık hızlandırıcılarında birçok yeni parçacık keşfedilecekti. 1960'lar Gell-Mann'ın öncülüğünde ve Ne'eman'ın katkılarıyla bulunan mezon ve baryonların sınıflandırılması ve kuramların geliştirildiği yıllardı. Mezonlar bir kuark ve bir antikuarın oluşturduğu, baryonlar ise üç tane kuarkın oluşturduğu yapıları, ve bu durum o yıllarda anlaşılıyordu. 1962'de Okun tarafından mezonlar ve baryonlar genel olarak hadron şeklinde isimlendirilmişti. Bu süreçte Gell-Mann ve Zweig bu hadronların iç yapısının olduğunu düşündü; ve bu parçacıkları, Gell-Mann kuark olarak isimlendirdi. Bu yapılar 1960'ların sonlarında Stanford Doğrusal Hızlandırıcı Merkezinde (Stanford Linear Accelerator Center-SLAC) yapılan derin inelastik saçılmalarda (deep inelastic scattering) kendini gösterdi. Bu deneyler protonun içinde 3 tane saçılma merkezi olduğunu gösteriyordu ve kuark modele kuvvetli bir delil sunuyordu. Bu deneyler, kuark bakış açısını desteklese de Pauli dışlama ilkesine göre olmaması gereken bir şey oluyordu, üç tane aynı cinsten kuark bir baryonun içinde bulunabiliyordu. Bu durum için çözüm önerisi 1964'de Greenberg tarafından her kuark mavi, kırmızı veya yeşil üç renkten birine sahip olabilir şeklinde yapılmıştı. Greenberg'den bağımsız bir şekilde Han ve Nambu bu durumu kuramsallaştırarak 8 tane yöneyle ayar bozonu (vector gauge boson) ile bu etkileşimin olması gerektiğini söylemişlerdi.

Bu gelişmeler olurken serbest kuark görülmemesi ve bir süreliğine Pauli dışlama ilkesinin kuark modellerle tam uyumlu olmaması bir anlamda göz ardı edildi, ve bu durumlar kuark hapsolmesi ve üç renk kuramı gibi tanımlamalarla gerçekleştirildi (realize edildi). Bu süreçte henüz kuarklar tam olarak kabul edilmemişti ve bazı bilim insanlarıncı "parton" sözcüğü tercih ediliyordu. Kuark modelin genel kabul görmesine yol açan bu sorunların çözülmesi değil, 1974 yılında J/Psi mezonunun keşfedilmesi idi. J/Psi mezonunun keşfinin kuark modelin kabul edilmesine yol açan şey olmasının ardında daha önceden düşünülen ve tartışılan bir problemi çözmesi yatıyordu; "Neden 4 lepton varken 3 kuark var?". Bu başarı kuark modelin güçlenmesine yol açtı. Ama 1975 yılında üçüncü lepton ailesi keşfedildi ve lepton sayısı altıya çıktı. Bu problem de çok uzun sürmeden, 1977 yılında, Upsilon mezonunun keşfiyle beşinci kuarkın ortaya çıkmasına ve altıncı kuarkın da tahmin edilmesine yol açtı. Altıncı kuarkın keşfi ise kütesinin ağırlığı nedeniyle 1995 yılına kadar yapılamayacaktı.

Beta bozunması zayıf etkileşimin ilk habercisiydi, bu konuyla ilgili ilk model Fermi tarafından geliştirilmişti ve düşük enerjiler için başarılı düzeydeydi. Bu etkileşimin de parçacık değişimiyle olması gerekiyordu ve bu parçacıklar ortanca yöney bozonları (intermediate vector bosons) olarak tanımlanıyordu. İlk modellerde bunların kütesinin protonun kütesinin yarısı olduğu düşünülüyordu, daha sonra 2.5 katı olduğu düşünölmeye başlandı. Weinberg'in 1967'de yaptığı hesap daha ağır olduğunu gösteriyordu. Ortanca yöney bozonları bulunamadıkça kütleler artıyordu; ve 1982 yılında tahmin W bozonu için $82 \pm 2 \text{ GeV}/c^2$ 'ye, Z bozonu için $92 \pm 2 \text{ GeV}/c^2$ 'ye çıkmıştı. 1952'de kurulum çalışmalarına başlanan CERN, 1973'de ilk önemli keşfini yapacak Weinberg, Salam ve Glashow tarafından tahmin edilen zayıf akımları (weak currents) gözlemleyecekti. İkinci önemli keşfini ise 1983 yılında, W ve Z bozonlarını 1982'deki tahmin ile uyumlu şekilde

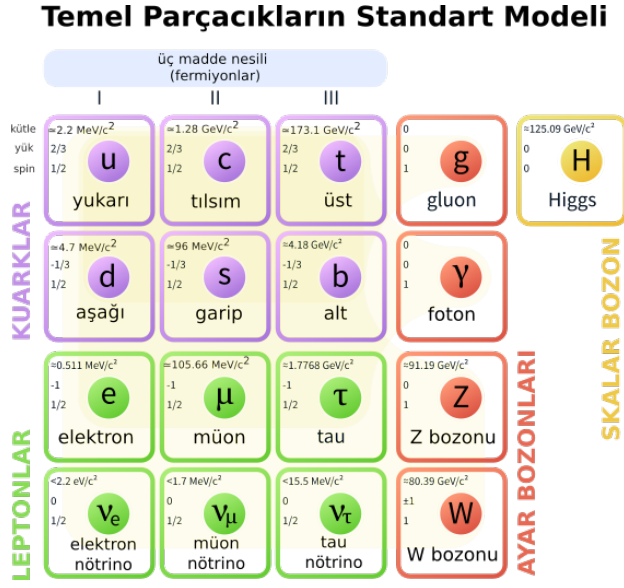


Figure 1: Standart modelin temel parçacıkları ve özellikleri

$80.403 \pm 0.029 \text{ GeV}/c^2$ ve $91.188 \pm 0.002 \text{ GeV}/c^2$ bularak yapacaktı. Standart modelin başka bir öngörüsü ise W ve Z bozonlarına elektromanyetik ve zayıf etkileşim arasındaki simetrinin kırınımı ile kütle kazandırdığı ve fotonun kütesiz kalmasına yol açtığı düşünülen Higgs bozonu idi. 2013 yılında CERN'den yapılan duyuruda Higgs bozonuna benzer bir parçacık keşfettilerini ve daha çalışılması ve araştırılması gereken bir çok konunun olduğu açıklanacaktı[6].

Şimdi, kısaca standart modelin temel parçacıklarını gözden geçirelim. Şu anda standart model olarak isimlendirdiğimiz model ile parçacık fiziğini değerlendiriyoruz. Standart modelde 6 lepton, 6 kuark, kuark ve leptonların anti-parçacıkları, Higgs bozonu ve ortancalar bulunuyor, bunlarla ilgili bir çizmeyi Fig. 1'de görebilirsiniz. Ortancalar 8 tanesi gluon olmak üzere, iki W bozonu, Z bozonu ve fotondan oluşuyor, bunların parçacıklar arasındaki etkileşimlerde değişen parçacıklar olduğunu düşünüyoruz ve etkileşimleri bu şekilde modelliyoruz. Gluonların 8 tane olması ise kuantum renk dinamiğinin (KRD) bir sonucu idi, 1960'larda hipotez olarak düşünülen bu renk etkileşimleri deneylerde elde edilen delillerle güçlendi ve şu an kuarklar ve gluonların her birinin 3 ayrı renkyükü taşıdığını düşünüyoruz. Antikuarkların ise anti-renkyükü taşıdığını düşünüyoruz, sonuçta elimizde 36 farklı kuark ve antikuark olasılığı bulunuyor. Toplamda 18 kuark, 18 antikuark, 6 lepton, 6 anti-lepton, 12 ortanca ve 1 de Higgs bozonu olmak üzere en az 61 parçacık bulunuyor. Üç farklı renkyükü ile geliştirilen kuantum renk dinamiği birçok deneyle tutarlı sonuç veriyor. Standart modelde 20'nin üzerinde deneylerden elde edilen sabit (parametre) kullanmamız gerekiyor. Bu parametrelerin çokluğu henüz açıklanmamış birçok şey olduğunun göstergelerinden biri olarak niteleniyor.

Günümüzde, henüz cevaplanmamış birçok büyük soru var. Bu sorulardan bir kısmı bilim insanları arasında dile getirilen sorulardır[7]:

- Neden elektron ile protonun yükleri aynı?
- Evren neden antimaddeden değil de maddeden oluşmuştur?
- Nötrino salınımları neden oluyor? Lepton sayısının korunmaması ne anlama geliyor?
- Kuarkların birbirlerine dönüşmeleriyle ilgili olasılıkları veren CKM matrisi elemanları neden öyle? Neden farklı sayılar değil?

- Karanlık madde/enerji nedir ve nerededir? Var mıdır?
- Kütlelerin kaynağı nedir?
- Fermiyon kütlelerinde gözlenen farklılıklar nasıl meydana geliyor?
- Kuarkların ve leptonların kütlelerini ne belirliyor?
- Eğer kuramsal olarak düşündüğümüz "Higgs bozonu" belirliyorsa, bunun deneyde bulunduğumuz "Higgs bozonu" ile ilişkisi ne?
- Higgs bozonunun kuarklara ve leptonlara nasıl kütle kazandırdığını deneysel olarak gözlemlenmenin yöntemi nedir veya var mıdır?
- Eğer varsa nasıl bir deney tasarlayarak Higgs bozonunun kütle kazandırma işlemini gözlemleyebiliriz?

Antik Yunan'da yaşanan gelişmeleri değerlendirerek bu sorular üzerine düşünmemiz faydalıdır. O zamanlar birçok düşünürün dile getirdiği bakış açısı vardı. Bu bakış açıları farklı sorulara cevap bulmaya çalışılırken geliştirilmiş şeylerdi. Kimi sorular zamanının ötesinde sorular olduğu için üretilen cevaplar yüzyıllar boyunca tartışmalı kaldı, ve doğru cevapları yüzyıllar sonra ancak öğrenebildik. Ama kimi sorulara verilen cevaplar bir o kadar zamanının ilerisinde cevaplar ile ilgiliydi, ve onların doğruya götürebildiğini aynı şekilde yüzyıllar sonra öğrenebildik. Bu sorulara vermeye çalıştığımız cevaplar kimi zaman doğru veya doğruya yakın olabilir, kimi zaman ise yanlış olabilir. Bilimsel süreç böyle işler, doğru olabilecek ve yanlış olabilecek bakış açıları üzerinde çalışmamız gerekir ki hakikat arayışında ilerleyebilelim.

IV. ÇARMONYUM AİLESİ VE POTANSİYEL MODELLERİ

Şimdilik büyük soruları kenara bırakıp daha küçük bir sorunun nasıl cevaplandığına bakalım: "Mezon ailelerinde görülen kütle farklılıklarını nasıl açıkladık?"

J/Psi mezonunun gözlemlenmesinden sonra içinde c ve \bar{c} kuarklarının olduğu başka mezonlar da gözlemledik. Bu mezonların içerikleri aynı olmasına rağmen kütleleri farklıydı, bu nasıl olabiliyordu? Cevabı öğrenebilmek için başka bir durumla analogi yapmamız faydalı oldu; pozitronyum [1, 8]. Pozitronyum bir elektron ve bir pozitrondan oluşan bağlı bir durumdur. Bu bağlı durumun uyarılmış durumlarını da deneyde gözlemleyebilmiştik. Uyarılmış durumların enerjileri daha yüksekti ve atomda olduğu gibi ışınım yaparak temel duruma düşüyorlardı. Bu ışınımların enerjilerini ölçerek uyarılmış durumların enerjilerini bulabiliyorduk. Kuramsal olarak bu durumu nasıl açıklayacaktık? Bu problem üzerine düşündüğümüzde atomik yapıya benzer bu durumu atomu anlamak için kullandığımız özelliklerden yola çıkarak anlamaya çalıştık. Elektron ve pozitron zıt yükleri sayesinde bir arada duruyordu ve spinlerine göre farklı yörüngelerde bulunabiliyordu. Spin-spin etkileşimleri, yörünge-spin etkileşimleri düşünmemiz gereken temel şeylerdi, bunların yanı sıra görelilik etkileri dahil etmek için Thomass öndelenimini (precession) de dahil etmemiz gerekiyordu. Bunları düşünerek oluşturacağımız kuramsal yapıyla hesap yapmak için kuantum sayılarını kullanmamız gerekiyordu. Bunları düşünerek hesap yaptığımızda oldukça başarılı sonuçlar elde ediyorduk [9].

Pozitronyum yapı olarak çarmonyuma oldukça çok benziyordu, bu benzerliği kullanarak bir model geliştirebilirdik. Ama her analogide olduğu gibi farklılıklar da bulunuyordu ve bunların üzerine çalışılması gerekiyordu. Öncelikle yapılan analogideki benzerliklere bakalım. İki durum da bir parçacık ve onun anti parçacığının birleşmesinden oluşmuştu, ve ikisi de spin 1/2 parçacıklar oldukları için etkileşimlerinde benzerlikler vardı. Pozitronyumun ve çarmonyumun J^{PC} değerlerine göre enerjileri bir grafikte çizildiğinde ikisinin de benzerlikler içeren bir dağılıma sahip oldukları görülüyordu, Fig. 2.

Farklarını düşündüğümüzde ise biri elektromanyetik etkileşimle etkileşiyordu, diğeri tamamen farklı olan renk etkileşimiyle etkileşiyordu. Bunun yanı sıra grafiğe baktığımızda başka farklılıklar

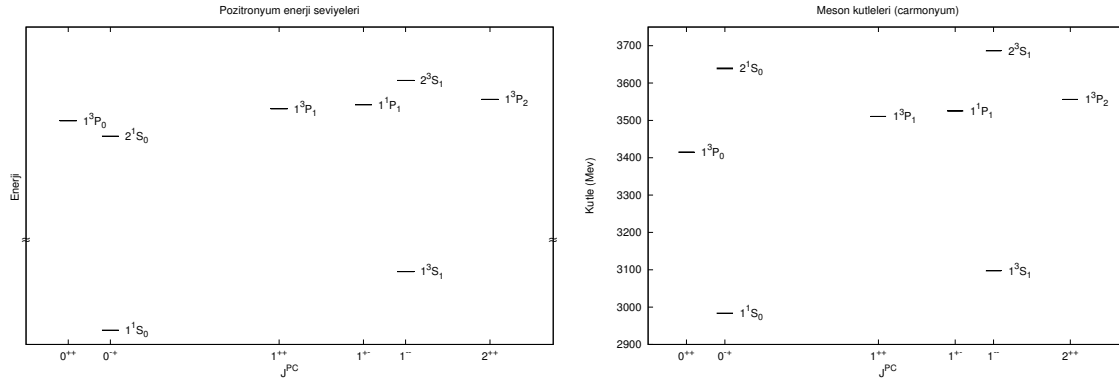


Figure 2: Sol: Pozitronyum enerji spektrumu [9], Sağ: Çarmonyum enerji spektrumu.

da görüyorduk; 2^1S_0 durumu çarmonyum çizgesinde pozitronyumunkine göre daha yüksek bir değere sahip oluyordu. Etkileşim farkı birçok şeyi zorlaştırıyordu çünkü renk etkileşimi elektromanyetik etkileşime göre çok daha karmaşıktı. 3 renkyükünün sonucunda oluşan 8 tane gluon ile renk etkileşimini modelliyorduk, ve düşük enerjiler ve yüksek enerjiler için tamamen iki farklı durum vardı; renkyüğüyle etkileşen iki parçacık birbirine çok yakında iken etkileşim zayıf oluyordu ve neredeyse serbest parçacık gibi hareket ediyorlardı (asimptotik freedom), birbirlerinden uzaklaştıklarında ise etkileşim çok güçlü oluyordu ve yalnız başına bir kuark gözlemleyemiyorduk onun yerine kuark antikuark çiftleri oluşuyordu (renk hapsi). Yakın mesafelerde etkileşimin $1/r$ ile değişmesi gerektiğini bir gluon değişiminden anlayabiliyorduk ama uzak mesafedeki etkileşimleri anlayabilmemiz için farklı olasılıklar üzerinde çalışmamız gerekmişti. Üç olasılık en çok düşünülenlerdi; doğrusal r , ikinci dereceden r^2 veya logaritmik $\ln r$ şeklindeki etkileşim. Farklı modeller bize bu üçü arasında doğrusal etkileşimin daha iyi sonuçlar verdiğini gösteriyordu. Bunun sonucunda renk etkileşimini

$$V(r) = -\frac{4}{3} \frac{\alpha_s \hbar c}{r} + Ar + B \quad (1)$$

şeklinde yazmaya başladık, bu yazım ilk defa Cornell Üniversitesinde yürütülen çalışmalar esnasında kullanıldığı için Cornell potansiyeli olarak da isimlendirilecekti. Burada $\frac{4}{3}$ renk çarpanı, α_s enerjiyle değişen renk etkileşimi sabiti, A ve B deneyle belirlenebilecek parametrelerdir. α_s değeri diğer etkileşimlerdeki gibi sabit değildi, enerjiye bağlı olarak değişiyordu. Etkileşim sabitindeki bu değişim kuantum renk dinamiğinin çalışma konularından biri olacak ve yıllarca tam bir cevap bulamayacaktı. Potansiyeli yukarıdaki haliyle bile Schrödinger denkleminde analitik olarak çözemiyorduk, onun yerine sayıl (nümerik) çözümler uygulamamız gerekiyordu. Bu basit haliyle sayıl çözüldüğünde farklı enerji kuantum sayıları için farklı enerji değerleri elde edilebiliyordu [10], ama problem daha karmaşıktı. Çözüme yaklaşmak için daha yapılması gerekenler vardı.

J/Psi'nin bulunmasından sonra birçok mezon bulunacaktı, günümüzde bilinen çarmonyum ailesine ait mezonları tablo 1'de bulabilirsiniz. Kuramsal modellerle bu yapının elde edilmesi önemli bir problemdi. Problemin çözümü için uğraşan ekiplerden biri Godfrey ve Isgur'du. Onlar pozitronyumdaki etkileşimleri düşünerek bunların çarmonyuma uyarlamasını yaptılar ve görelileştirerek bir Hamiltonyen elde etmişlerdi. Şimdi onların modellerini özetleyelim.

$I^G(J^{PC})$	Particle	Mass(MeV)	$I^G(J^{PC})$	Particle	Mass(MeV)
$0^+(0^{-+})$	$\eta_c(1S)$	2983.4 ± 0.5	$0^-(1^{--})$	$\psi(4040)$	4039.6 ± 4.3
$0^-(1^{--})$	$J/\psi(1S)$	3096.900 ± 0.006	$?(?^?)$	$X(4050)^\pm$	$4051 \pm 14^{+20}_{-41}$
$0^+(0^{++})$	$\chi_{c0}(1P)$	3414.75 ± 0.31	$?(?^?)$	$X(4055)^\pm$	$4054 \pm 3 \pm 1$
$0^+(1^{++})$	$\chi_{c1}(1P)$	3510.66 ± 0.07	$0^+(?^?+)$	$X(4140)$	4146.9 ± 3.1
$?^?(1^{+-})$	$h_c(1P)$	3525.38 ± 0.11	$0^-(1^{--})$	$\psi(4160)$	4191 ± 5
$0^+(2^{++})$	$\chi_{c2}(1P)$	3556.20 ± 0.09	$?^?(?^?)$	$X(4160)$	$4156^{+25}_{-20} \pm 15$
$0^+(0^{-+})$	$\eta_c(2S)$	3639.2 ± 1.2	$?(1^+)$	$X(4200)^\pm$	4196^{+31+17}_{-29-13}
$0^-(1^{--})$	$\psi(2S)$	3686.097 ± 0.010	$?^?(1^{--})$	$X(4230)$	$4230 \pm 8 \pm 6$
$0^-(1^{--})$	$\psi(3770)$	3778.1 ± 1.2	$?^?(0^-)$	$X(4240)^\pm$	$4239 \pm 18^{+45}_{-10}$
$?^?(2^{--})$	$\psi(3823)$	3822.2 ± 1.2	$?(?^?)$	$X(4250)^\pm$	$4248^{+44+180}_{-29-35}$
$0^+(1^{++})$	$X(3872)$	3871.69 ± 0.17	$?^?(1^{--})$	$X(4260)$	4251 ± 9
$1^+(1^{+-})$	$X(3900)$	3886.6 ± 2.4	$0^+(?^?+)$	$X(4350)$	$4350.6^{+4.6}_{-5.1} \pm 0.7$
$0^+(0veya2^{++})$	$X(3915)$	3914.4 ± 1.9	$?^?(1^{--})$	$X(4360)$	4346 ± 6
$0^+(2^{++})$	$X_{c2}(2P)$	3927.2 ± 2.6	$0^-(1^{--})$	$X(4415)$	4415.1 ± 7.9
$?^?(?^?)$	$X(3940)$	$3942^{+7}_{-6} \pm 6$	$?(1^+)$	$X(4430)^\pm$	4478^{+15}_{-18}
$1(?^?)$	$X(4020)$	4024.1 ± 1.9	$?^?(1^{--})$	$X(4660)$	4643 ± 9

Table 1: Çarmonyum ailesi [11]

Kullandıkları görelileştirilmiş Hamiltonyen

$$\begin{aligned}
 H = & (p^2 + m_1^2)^{1/2} + (p^2 + m_2^2)^{1/2} + \left(1 + \frac{p^2}{E_1 E_2}\right) \tilde{G}(r) \left(1 + \frac{p^2}{E_1 E_2}\right) \\
 & + \frac{\vec{S}_1 \cdot \vec{L}}{2m_1^2} \frac{1}{r} \frac{\partial \tilde{G}_{11}^{so(v)}}{\partial r} + \frac{\vec{S}_2 \cdot \vec{L}}{2m_2^2} \frac{1}{r} \frac{\partial \tilde{G}_{22}^{so(v)}}{\partial r} + \frac{(\vec{S}_1 + \vec{S}_2) \cdot \vec{L}}{m_1 m_2} \frac{1}{r} \frac{\partial \tilde{G}_{12}^{so(v)}}{\partial r} \\
 & + \frac{2\vec{S}_1 \cdot \vec{S}_2}{3m_1 m_2} \nabla^2 \tilde{G}_{12}^c - \frac{\vec{S}_1 \cdot \hat{r} \vec{S}_2 \cdot \hat{r} - \frac{1}{3} \vec{S}_1 \cdot \vec{S}_2}{m_1 m_2} \left(\frac{\partial^2}{\partial r^2} - \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r}\right) \tilde{G}_{12}^t \\
 & + \tilde{S}(r) - \frac{\vec{S}_1 \cdot \vec{L}}{2m_1^2} \frac{1}{r} \frac{\partial \tilde{S}_{11}^{so(s)}}{\partial r} - \frac{\vec{S}_2 \cdot \vec{L}}{2m_2^2} \frac{1}{r} \frac{\partial \tilde{S}_{22}^{so(s)}}{\partial r}
 \end{aligned} \quad (2)$$

şeklindedir. Burada enerji kuarklar için $E_i = (p_i^2 + m_i^2)^{1/2}$ şeklindedir, \vec{S} spin açısai momentumu, \vec{L} açısai momentumdur. Renk etkileşimi için yaygınlaştırılmış Coulomb terimi

$$\tilde{G}(r) = - \sum_k \frac{4\alpha_k}{3r} \left(\frac{2}{\sqrt{\pi}} \int_0^{\tau_{kij} r} e^{-x^2} dx \right), \quad (3)$$

yaygınlaştırılmış doğrusal terim

$$\tilde{S}(r) = br \left(\frac{e^{-\sigma_{ij}^2 r^2}}{\sqrt{\pi} \sigma_{ij} r} \left[1 + \frac{1}{2\sigma_{ij}^2 r^2} \right] \frac{2}{\sqrt{\pi}} \int_0^{\sigma_{ij} r} e^{-x^2} dx \right) + c \quad (4)$$

şeklindedir, ve b ve c renkyükü etkileşimi için sabitlerdir. Yaygınlaştırmada kullanılan işlevler ise aşağıdaki şekildedir;

$$\frac{1}{\tau_{kij}^2} = \frac{1}{\gamma_k^2} + \frac{1}{\sigma_{ij}^2}, \quad (5)$$

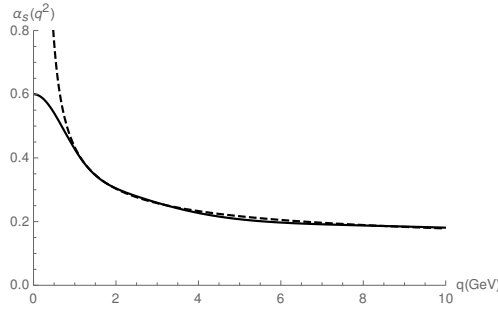


Figure 3: Renk etkileşimi çiftlenim sabitinin enerjiye bağlı değişimi. Kesikli çizgi denklem 8 kullanılarak elde edilen sonucu, düz çizgi ise $\alpha_s(q^2) = 0.25\exp(-q^2) + 0.15\exp(-q^2/10) + 0.20\exp(-q^2/1000)$ şeklinde hesaplar için uydurulan ve sonsuza giden kısmı sonlu bir değerde sabitlenen işlevi gösteriyor.

$$\sigma_{ij}^2 = \sigma_0^2 \left[\frac{1}{2} + \frac{1}{2} \left(\frac{4m_i m_j}{(m_i + m_j)^2} \right)^4 \right] + s^2 \left(\frac{2m_i m_j}{m_i + m_j} \right)^2 \quad (6)$$

burada σ_0 yaygınlaştırma için kullanılan bir parametre, ve s değeri $\sigma_{QQ} = sm_Q$ şeklinde ağır mezonlar için beklenen doğrusal ilişkiyi veren bir parametredir. Etkileşim işlevlerinin görelileştirilmesi ise

$$f_{\alpha\beta}^i(r) = \left(\frac{m_\alpha m_\beta}{E_\alpha E_\beta} \right)^{1/2+\epsilon_i} f(r) \left(\frac{m_\alpha m_\beta}{E_\alpha E_\beta} \right)^{1/2+\epsilon_i}, \quad (7)$$

şeklinde yapılmıştır, ve ϵ_i her terim için değişen bir sabittir. Burada $f(r)$ yerine spin-spin, spin-yörünge, Coulomb ve Thomass öndeleniminden kaynaklı Godfrey ve Isgur'un çalışmasında verilen etkileşim terimleri gelecektir. Zamana bağlı değişen renk etkileşimi çiftlenim sabitinin KR'de en düşük çizge seviyesinde hesabı

$$\alpha_s(q^2) = \frac{12\pi}{(33 - 2n_f)\ln(q^2/\Lambda^2)} \quad (8)$$

şeklinde ve n_f düşünülecek çeşni sayısını göstermektedir. Yukarıdaki haliyle değişen çiftlenim sabiti düşük enerjilerde sonsuza gitmektedir, ve konum uzayına geçtiğimizde aradaki uzaklığın artması sonsuzlara yol açacaktır. Bu durum integral alındığında sonsuzluklarla sonuçlanacağı için ve aslında aradaki uzaklık mezonlar için belirli bir değerden büyük olamayacağı, çoğunlukla küçük değerlere sahip olacağı için enerji sıfıra giderken belirli bir değere sabitlenebilir. Bu yaklaşım Fig.3'de görülebilir. Konum uzayında değişen çiftlenim sabiti aşağıdaki şekilde düşünülmüştür

$$\alpha_s(r) = \sum_k \alpha_k \frac{2}{\sqrt{\pi}} \int_0^{\gamma_k r} e^{-x^2} dx \quad (9)$$

burada α_k renk etkileşiminin değişen çiftlenim sabitini deneyle uyumlu hale getirmek için kullanılan parametrelerdir.

Bu hamiltonyenin analitik çözümünü bilmediğimiz için sayıl şekilde çözmemiz gerekiyor. Sayıl çözüm, düşünülen yeterince büyük harmonik salıncı (oscillator) bazında özdeğer (eigenvalue) denklemleri çözülerek hem hamiltonyenin karşılık geldiği enerji değerlerini hem de özyöney (eigenvector) değerlerini bularak yapılır. Burada elde edilen özdeğerler olası mezonların kütlelerine karşılık gelir.

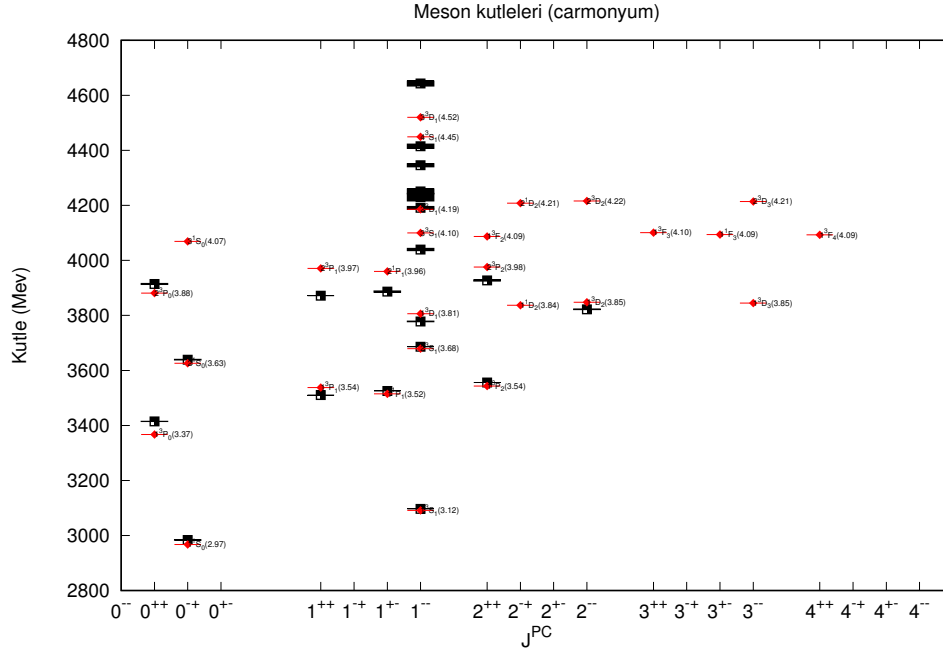


Figure 4: Godfrey ve Isgur'un modeliyle elde edilen sonuçlar. Siyah dikdörtgenler deney verilerini, kırmızı elmas şekilleri Godfrey ve Isgur'un yöntemi ile elde edilen sonuçları gösteriyor.

Hamiltonyen sayıl olarak çözüldüğünde çarmonyum ailesi ve diğer mezonlar için tutarlı sonuçlar vermektedir. Çarmonyum ailesi için elde edilen çözümler Fig.4'de çizge halinde gösterilmiştir.

Godfrey ile Isgur bu hesabı yaparken çok fazla parametre kullanmışlar ve eğitilmiş tahmin şeklinde elle koyulmuş yöntemlere başvurmuşlardır. Kendileri de yaygınlaştırmamanın ve görelileştirmenin yeterli olmadığını düşünüyorlardı. Detaylar için Godfrey ile Isgur'un makalesine bakmak yerinde olur [3], ve bakıldığında aynı zamanda çözümün ne kadar çok mezonunun kütlesini tahmin ettiği de görülecektir. Bizim burada amacımız daha çok süreci izlemek olduğu için çok kısa bir özet verdik.

Aynı problemle ilgilenen başka bilim insanları farklı çözüm yolları izledi. 1981'de Gupta ve Ratford kuark antikuar etkileşimi üzerinde çalışarak bu etkileşim için bir potansiyel yazdılar [12] (Repko'nun katkılarıyla). Ebert, Galkin ve Faustov onların yazdığı potansiyeli kullanarak mezon spektrumunu elde ettiler. Şimdi de onların yöntemini özetleyelim.

Mezon kütleleri Schrödinger denklemine benzer hemen potansiyel (quasipotential) denklemi

$$\left(\frac{b^2(M)}{2\mu_R} - \frac{\mathbf{p}^2}{2\mu_R} \right) \Psi_M(\mathbf{p}) = \int \frac{d^3q}{(2\pi)^3} V(p, q; M) \Psi_M(\mathbf{p}) \quad (10)$$

çözülerek elde edilebilir. Burada kütle işlevi

$$b^2(M) = \frac{[M^2 - (m_1 + m_2)^2][M^2 - (m_1 - m_2)^2]}{4M^2} \quad (11)$$

şeklinde, ve $\mu_R = \frac{M^4 - (m_1^2 - m_2^2)^2}{4M^3}$ göreli indirgenmiş kütleyle karşılık gelmektedir. Potansiyelin

açıkça ifade edilmiş hali kuark ve antikuark saçılımından hesaplanmaktadır:

$$V(\mathbf{p}, \mathbf{q}; M) = \bar{u}_1(p)\bar{u}_2(-p)\mathcal{V}(\mathbf{p}, \mathbf{q}; M)u_1(q)u_2(-q), \quad (12)$$

ve \mathcal{V}

$$\mathcal{V}(\mathbf{p}, \mathbf{q}; M) = \frac{4}{3}\alpha_s D_{\mu\nu}(\mathbf{k})\gamma_1^\mu\gamma_2^\nu + V_{conf}^V(\mathbf{k})\Gamma_1^\mu\Gamma_{2;\mu} + V_{conf}^S(\mathbf{k}) \quad (13)$$

şeklinde yazılabilir. Burada

$$\Gamma_\mu(\mathbf{k}) = \gamma_\mu + \frac{i\kappa}{2m}\sigma_{\mu\nu}k^\nu \quad (14)$$

şeklinindedir. Potansiyelin spin ve açısal momentum etkileri olmayan basit halinin yöneyli kısmı

$$V_V(r) = (1 - \epsilon)Ar + B \quad (15)$$

ve sayıl kısmı

$$V_S(r) = \epsilon Ar \quad (16)$$

şeklinindedir. Burada A, B renkyükünün doğrusal etkileşiminde bulunan parametrelerdir. Düşünülen yapı deney sonuçlarıyla kıyaslandığında $\epsilon = -1$ ve $\kappa = -1$ şeklinde bulunur.

Potansiyelin spin bağımsız kısmı

$$\begin{aligned} V_{SI}(r) = & -\frac{4\bar{\alpha}_V}{3r} + Ar + B - \frac{4\beta_0\alpha_S^2}{3} \frac{\ln(\mu r)}{2\pi r} \quad (17) \\ & + \frac{1}{8} \left(\frac{1}{m_1^2} + \frac{1}{m_2^2} \right) \Delta \left[-\frac{4\bar{\alpha}_V}{3r} - \frac{4\beta_0\alpha_S^2}{3} \frac{\ln(\mu r)}{2\pi r} + (1 - \epsilon)(1 + 2\kappa)Ar \right] \\ & + \frac{1}{2m_1m_2} \left(\left\{ -\frac{4\bar{\alpha}_V}{3r} \left[\mathbf{p}^2 + \frac{(\mathbf{p} \cdot \mathbf{r})^2}{r^2} \right] \right\}_W - \frac{4\beta_0\alpha_S^2}{3} \frac{\ln(\mu r)}{2\pi} \left\{ \mathbf{p}^2 \frac{\ln(\mu r)}{r} + \frac{(\mathbf{p} \cdot \mathbf{r})^2}{r^2} \left(\frac{\ln(\mu r)}{r} - \frac{1}{r} \right) \right\}_W \right) \\ & + \left[\frac{1 - \epsilon}{2m_1m_2} - \frac{\epsilon}{4} \left(\frac{1}{m_1^2} + \frac{1}{m_2^2} \right) \right] \left\{ Ar \left[\mathbf{p}^2 - \frac{(\mathbf{p} \cdot \mathbf{r})^2}{r^2} \right] \right\}_W + \left[\frac{1}{4} \left(\frac{1}{m_1^2} + \frac{1}{m_2^2} \right) + \frac{1}{m_1m_2} \right] B\mathbf{p}^2 \end{aligned}$$

şeklinindedir. Burada

$$\bar{\alpha}_V = \alpha_S \left[1 + \left(\frac{a_1}{4} + \frac{\gamma_E\beta_0}{2} \right) \frac{\alpha_S}{\pi} \right], \quad a_1 = \frac{31}{3} - \frac{10}{9}n_f, \quad \beta_0 = 11 - \frac{2}{3}n_f \quad (18)$$

$$\alpha_S = \frac{4\pi}{\beta_0 \ln(\mu^2/\Lambda^2)} \quad (19)$$

$$\mu = \frac{2m_1m_2}{m_1 + m_2} \quad (20)$$

şeklinindedir, ve Euler sabiti $\gamma_E \approx 0.5772$ olarak alınmıştır. n_f düşünülecek çeşni sayısına karşılık gelmektedir ve çarmonyum için 3'tür. Momentum ve konumun belirsizliğinden oluşacak sorunları gidermek üzere düşünülen Weyl kuralı da

$$\{f(r)p_i p_j\}_W = \frac{1}{4} \{ \{f(r), p_i\}, p_j \} \quad (21)$$

şeklinindedir. Spin bağımlı kısmı ise

$$V_{SD}(r) = a\mathbf{L} \cdot \mathbf{S} + b \left[\frac{3}{r^2} (\mathbf{S}_1 \cdot \mathbf{r})(\mathbf{S}_2 \cdot \mathbf{r}) - (\mathbf{S}_1 \cdot \mathbf{S}_2) \right] + c\mathbf{S}_1 \cdot \mathbf{S}_2 + d\mathbf{L} \cdot (\mathbf{S}_1 - \mathbf{S}_2) \quad (22)$$

$$\begin{aligned}
 a &= \frac{1}{4} \left(\frac{1}{m_1^2} + \frac{1}{m_2^2} \right) \left\{ \frac{4}{3} \frac{\bar{\alpha}_V}{r^3} \left(1 + \frac{\alpha_S}{\pi} \left[\frac{7}{3} - \frac{\beta_0}{12} + \gamma_E \left(\frac{\beta_0}{2} - 3 \right) + \frac{\beta_0}{2} \ln(\mu r) - 3 \ln(\sqrt{m_1 m_2} r) \right] \right) \right. \\
 &\quad \left. - \frac{A}{r} \right\} + \frac{1}{m_1 m_2} \frac{4}{3} \frac{\alpha_S}{r^3} \left(1 + \frac{\alpha_S}{\pi} \left[\frac{1}{6} - \frac{\beta_0}{12} + \gamma_E \left(\frac{\beta_0}{2} - \frac{3}{2} \right) + \frac{\beta_0}{2} \ln(\mu r) - \frac{3}{2} \ln(\sqrt{m_1 m_2} r) \right] \right) \\
 &\quad + \left(\frac{1}{m_1^2} - \frac{1}{m_2^2} \right) \frac{\alpha_S}{2\pi r^3} \ln \frac{m_2}{m_1} + \frac{1}{2} \left(\frac{1}{m_1} + \frac{1}{m_2} \right)^2 (1 + \kappa)(1 - \epsilon) \frac{A}{r} \\
 b &= \frac{1}{3m_1 m_2} \left\{ \frac{4\alpha_S}{r^3} \left(1 + \frac{\alpha_S}{\pi} \left[\frac{29}{6} - \frac{1}{4}\beta_0 + \gamma_E \left(\frac{\beta_0}{2} - 3 \right) + \frac{\beta_0}{2} \ln(\mu r) - 3 \ln(\sqrt{m_1 m_2} r) \right] \right) \right. \\
 &\quad \left. + (1 + \kappa)^2 (1 - \epsilon) \frac{A}{r} \right\} \\
 c &= \frac{4}{3m_1 m_2} \left\{ \frac{8\pi\alpha_S}{3} \left(\left[1 + \frac{\alpha_S}{\pi} \left(\frac{5}{12}\beta_0 - \frac{11}{3} - \left[\frac{m_1 - m_2}{m_1 + m_2} + \frac{1}{8} \frac{m_1 + m_2}{m_1 - m_2} \right] \ln \frac{m_2}{m_1} \right) \right] \delta^3(r) \right. \right. \\
 &\quad \left. \left. + \frac{\alpha_S}{\pi} \left[-\frac{\beta_0}{8\pi} \Delta \left(\frac{\ln(\mu r) + \gamma_E}{r} \right) + \frac{21}{16\pi} \Delta \left(\frac{\ln(\sqrt{m_1 m_2} r) + \gamma_E}{r} \right) \right] \right) + (1 + \kappa)^2 (1 - \epsilon) \frac{A}{r} \right\} \\
 d &= \frac{1}{4} \left(\frac{1}{m_1^2} - \frac{1}{m_2^2} \right) \left\{ \frac{4}{3} \frac{\alpha_S}{r^3} \left(1 + \frac{\alpha_S}{\pi} \left[\frac{7}{3} - \frac{\beta_0}{12} + \gamma_E \left(\frac{\beta_0}{2} - 3 \right) + \frac{\beta_0}{2} \ln(\mu r) - 3 \ln(\sqrt{m_1 m_2} r) \right] \right) \right. \\
 &\quad \left. - \frac{A}{r} - 2(1 + \kappa)(1 - \epsilon) \frac{A}{r} \right\} + \left(\frac{1}{m_1} + \frac{1}{m_2} \right)^2 \frac{\alpha_S^2}{2\pi r^3} \ln \frac{m_2}{m_1}
 \end{aligned}$$

şeklinde ve çarmonyum gibi kuarkların kütlelerinin eşit olduğu durumlarda yoketme çizgelerinden kaynaklı α_s 'in ikinci derecede katkısından yukardaki c 'ye

$$\delta c = \frac{8\alpha_S^2}{3m^2} (1 - \ln 2) \delta^3(r) \quad (23)$$

katkısı eklenmelidir.

Bu kadar karmaşık bir etkileşimi çözmek için geliştirilen yöntemi gözden geçirelim. Öncelikle görelî olmayan, spin ve yörünge terimlerini içermeyen potansiyel için

$$V_{NR}(r) = -\frac{4}{3} \frac{\bar{\alpha}_V}{r} + Ar + B \quad (24)$$

adım adım ötelenerek (iteratively) hemen hemen potansiyel denklemini çözümlmek ve bir dalga işlevi elde etmek gerekiyor. Buradan elde edilen dalga işlevi

$$\frac{b^2(M)}{2\mu_R} = \langle V_{SI} \rangle + \frac{\langle \mathbf{p}^2 \rangle}{2\mu_R} + \langle a \rangle \langle \mathbf{L} \cdot \mathbf{S} \rangle \quad (25)$$

$$+ \langle b \rangle \langle [(3/r^2) (\mathbf{S}_1 \cdot \mathbf{r})(\mathbf{S}_2 \cdot \mathbf{r}) - (\mathbf{S}_1 \cdot \mathbf{S}_2)] \rangle \quad (26)$$

$$+ \langle c \rangle \langle \mathbf{S}_1 \cdot \mathbf{S}_2 \rangle + \langle d \rangle \langle \mathbf{L} \cdot (\mathbf{S}_1 - \mathbf{S}_2) \rangle \quad (27)$$

denkleminde kullanılarak $b^2(M)$ işlevinden M değeri elde edildiğinde mezonların kütleleri elde edilmiş oluyordu. Bu potansiyel çarmonyum için sayıl yöntem ile çözüldüğünde elde edilen

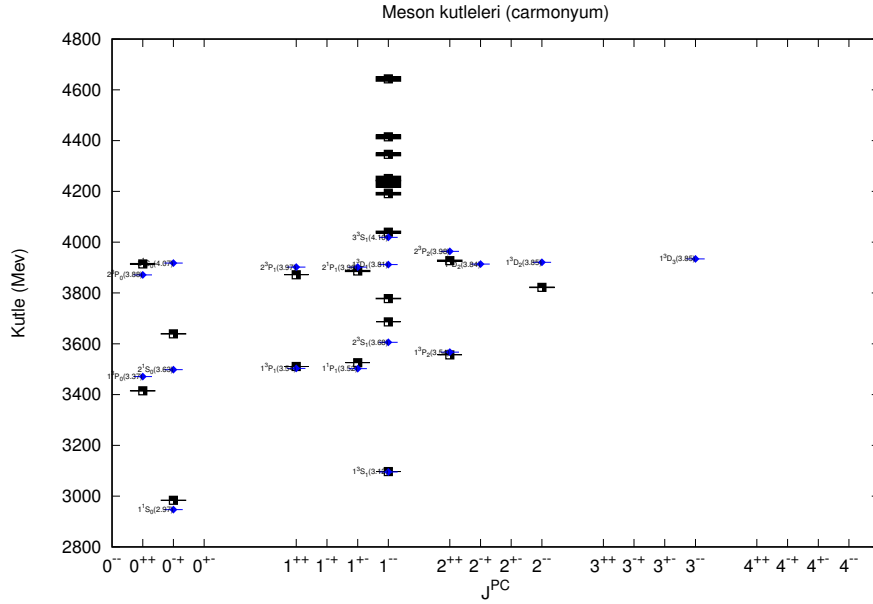


Figure 5: Ebert, Galkin ve Faustov'un modelinden elde edilen çarmonyum ailesi sonuçları. Siyah dikdörtgenler deney verilerini, mavi elmas şekilleri Ebert, Galkin ve Faustov'un yöntemiyle elde edilen sonuçları gösteriyor.

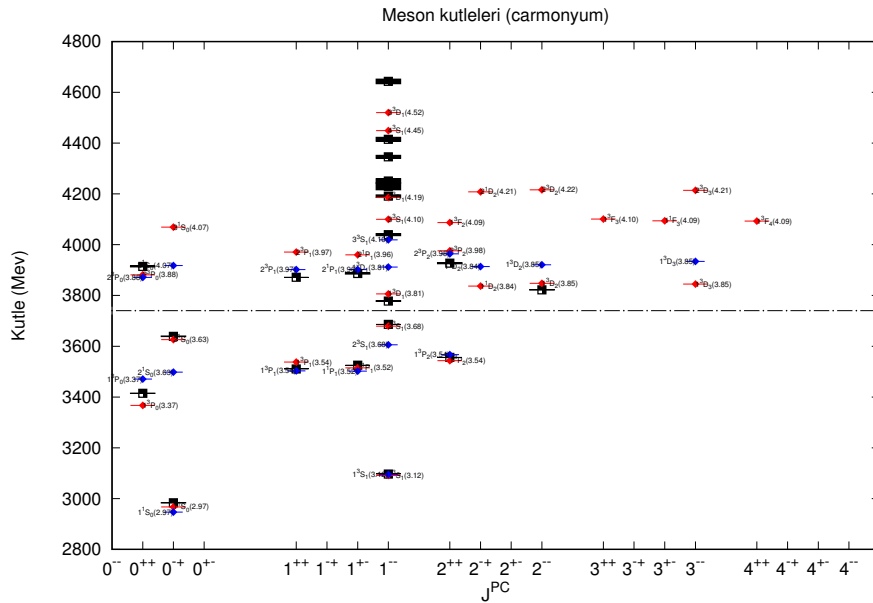


Figure 6: Çarmonyum ailesi, iki modelin sonuçlarının karşılaştırılması. Siyah dikdörtgenler deney verilerini, kırmızı (açık) elmas şekilleri Godfrey ve Isgur'un yöntemi ile elde edilen sonuçlarını (bunlar için J^{PC} değerleri sağda bulunmaktadır), mavi (koyu) elmas şekilleri Ebert, Galkin ve Faustov'un yöntemiyle elde edilen sonuçlarını (bunlar için J^{PC} değerleri solda bulunmaktadır), kesikli çizgi $D\bar{D}$ eşik enerjisini gösteriyor.

1'inci modelin parametreleri	2'inci modelin parametreleri
$m_C = 1628MeV$	$m_C = 1550MeV$
$b = 0.18GeV^2$	$A = 0.18GeV^2$
$c = -253MeV$	$B = -160MeV$
$\Lambda = 200MeV$	$\Lambda = 168MeV$
$\alpha_S^{critical} = 0.60$	$\alpha_S = 0.314$
$\alpha_k = 0.25, 0.15, 0.20$	$\epsilon = -1$
$\gamma_k = 1, 10, 1000$	$\kappa = -1$
$\sigma_0 = 1.80GeV$	
$s = 1.55$	
$\epsilon_c = -0.168$	
$\epsilon_t = 0.025$	
$\epsilon_{SO(V)} = -0.035$	
$\epsilon_{SO(S)} = 0.055$	

Table 2: Sol tarafta Godfrey ve Isgur'un modelinin, sağ tarafta ise Ebert, Galkin ve Faustov'un modelinin parametreleri bulunmaktadır.

sonuçlar çizge halinde Fig.5'da gösterilmiştir. Çizgeden görüldüğü üzere bu modelde başarılı sonuçlar vermektedir. Daha önce belirttiğimiz gibi burada hızlı bir özet yaptığımız için ayrıntılar için özgün makalelere bakmak gereklidir. İki çözümü kıyasladığımızda Fig.6'de olduğu gibi önemli bir benzerlik görüyoruz.

İki modeli de gözden geçirelim. Godfrey ve Isgur'un modeli temel olarak pozitronyum düşünülerek yazılmış bir potansiyelin çarmonyuma uyarlanması şeklindeydi. Uyarlama yapılırken renk etkileşiminin özelliklerini göz önünde bulundurma yapılması gereken şeylerden biriydi ve bu temelde potansiyel için denklem 1 düşünülerek yapılmıştı. Tabii bu potansiyel kuarkların görelî hareketi düşünülürken yöneyle kısmî denklem 3, sayıl kısmî da denklem 4 şeklinde yaygınlaştırılmıştı. Bu yaygınlaştırma potansiyelin momentuma bağımlılığı düşünülerek yapılmıştı ve gerekli limitler düşünülerek yaygınlaştırmayla ilgili sabitler elde edilmişti. Yaygınlaştırmanın yanı sıra, denklem 7 ile verilen görelileştirmenin de yapılması gerekiyordu, bu aynı zamanda gluonların düşünülmesinden kaynaklı kütle enerji arasında bir belirsizliği de içeriyordu. Bahsettiğimiz etkilerin pozitronyum potansiyelinden yola çıkılarak sisteme uyarlanması sonucunda tablo 2'de verilen parametre çokluğu ile karşı karşıya kalıyorduk. Parametrelerin çok olmasına rağmen bizim burada örnek olarak gösterdiğimiz çarmonyum ailesinin dışında kalan mezonlar için de gayet tutarlı sonuçlar verdiği için oldukça başarılı bir model olarak nitelendirilebileceğimiz bir modeldi.

Ebert, Galkin ve Faustov'un modeline baktığımızda potansiyel kuark antikuark etkileşiminden doğrudan hesaplanmış haliyle kullanılıyordu. Ama farklı makalelerde kullandıkları potansiyellerde bazı farklılıklar bulunuyordu ve bu farklılıkların nedeni yeterince açık belirtilmemişti. Bu farklılıkların dışında doğrudan kuark antikuark etkileşimi için elde edilen potansiyelin kullanılması önceki yöntemle göre oldukça önemli bir ilerlemeydi, ve bu ilerleme tablo 2'ye bakıldığında parametre sayısının azalmasıyla kendisini göstermişti. Burada özetlediğimiz çalışma daha eski bir çalışmanın özetiydi, daha yakın tarihli çalışmalarında sonucu görelî olmayan potansiyeli kullanmadan elde ediyorlardı[13], ve bu modelin geliştirilmesi açısından bakıldığında önemli bir adımdı. Ama bunların dışında yapılan çalışmanın nedensel açıklamaları düşünülürken, yeterince temellendirilmiş açıklamalar yapılmadığı için düşünsel yönden bazı eksikliklerin olduğu söylenebilir. Bu eksik açıklamalardan biri hemen hemen potansiyel denkleminin kullanımı ile

ilgilidir, bu denklem kullanılırken atıfta bulunulmuş olmasına karşın durum ile ilişkisi yeterince iyi temellendirilmemiştir.

Tarihsel ve bazı noktalarda varsayımsal olarak süreci yeniden gözden geçirelim. Deneysel olarak bulunan mezonlar benzerlikleri ve farklılıkları kullanılarak anlaşılmasına çalışıldığında birçok şeyi anlamamıza yol açacak şekilde bilgiler edinmiştik. Bunları yapmadan kuark modeli öngöremez, çarmonyum ailesi ile pozitronyum arasında benzerliği fark edemezdik. Pozitronyum ile benzerliği fark etmemiz bir adım ileri gitmemizi sağlayacak ve pozitronyum etkileşiminden yola çıkarak başarılı bir model oluşturabilecektik. Eğer bu model başarılı olmasaydı kuşklar artacak ve başka şeyler aramaya başlayacaktık, ama modelin başarısı modelin geliştirilmesine giden yolu daha avantajlı hale getirmişti. Tabi pozitronyum benzeri etkileşim yerine kuark antikuar etkileşimini düşünmek gerekecekti, ve bu gereksinim kendi ihtiyaçlarını doğuracak ve onlara çözüm yöntemleri geliştirmek gerekecekti. Etkileşim için düşünülen potansiyelin ikinci modelde başka bir durumla analogi yapılmadan doğrudan kuark antikuar saçılımı düşünülerek elde edilmiş olması ikinci modelin ilkine göre daha düzgün bir temel üzerinde oturduğunu göstermektedir. Bu durum parametre sayısının ikinci modelde azalmasıyla da kendini göstermektedir. Ama hala ikinci modelin düşünsel altyapısı yeterince iyi temellendirilmediği için düşünülmesi gereken noktaların olduğu açıktır.

Pekala bu haliyle problem tamamen çözüldü mü? Hayır. Daha yapılması gereken çok şey var. En açık noktalardan birisi burada verilen örnekte rahatlıkla görülebileceği üzere standart modelde verilen c kuark kütlesi ile bahsettiğimiz modellerde kullanılan ve tablo 2'de görülen kütle değerleri arasındaki farktır; standart modelde c kuarkın çıplak kütlesi 1290MeV olarak verilirken, örnek olarak verdiğimiz modellerde 1500MeV'in üzerinde değerlere sahip. Bu farkın nereden geldiği tam olarak açıklığa kavuşmayan noktalardan biridir.

Şimdi de grafik 6'da yer alan kesikli yatay çizgiyle gösterilmiş $D\bar{D}$ için eşik enerjisiyle ilgili konuya bir bakalım. Bu çizgi mezon molekülleri veya dört kuark yapıları üzerine çalışmaya başlamamız ile de ilgilidir. $D\bar{D}$ 'in eşik enerjisinin üzerinde başka c kuarkı içeren mezonlar için de eşik enerjileri bulunuyor. Bu durum o çizginin üzerindeki mezonların bazılarının sadece c kuark ve anti c kuarktan oluşmuş olmayabileceği, başka kuarkları da içeren yapılar olabileceği olasılığını düşünmemizi gerektiriyor. Tabi ki grafik 6'da siyahla gösterilen ve eşik enerjisinin üzerinde kalan mezonların çoğu için bu olasılıktan bahsedilebilir. Ama bunların içinde bazıları, bir c kuark ve bir anti c kuarktan oluşan mezonların sahip olamayacağı kuantum sayılarına sahiptir. Klasik mezon tanımı bir kuark ve bir antikuaraktan oluşan yapılar için verilen isimdir, ve bunların dışında kalan mezonlar egzotik olarak isimlendirilirler. Klasik mezonların sahip olabileceği kuantum sayılarını biliyoruz, ve grafikte gösterilen ve klasik mezon kuantum sayılarına sahip olmayan mezonlar egzotik mezonlar olarak düşünülüyor. Bu egzotik mezonların mezon molekülleri veya dörtlü kuark yapıları olabileceği ihtimali üzerine çalışmalar yürütülüyor. Günümüzde bu problem üzerine yapılan çalışmalar oldukça mesafe kat etmiş olsa da henüz bu mezonların mezon molekülleri mi yoksa dörtlü kuark yapıları mı olduğunu hakkındaki tartışmalar bitmemiştir.

Bahsettiğimiz egzotik yapının dışında bildiğimiz mezonlardan bazılarının sahip oldukları kuantum sayıları onların egzotik olmak zorunda olmadığını gösterse de egzotik mezonlar olabilir. Elimizdeki mezon modelleri geliştirildiğinde ve mezonların kütlelerini daha iyi veren tekniklerimiz olduğunda bu yapıları anlamak için daha fazla yol kat etmiş olacağız. Bunu anlayabilmek için çok daha iyi sonuç veren modeller geliştirmemiz gerekiyor. Eğer mezon kütlelerini veren modellerimiz yeterince geliştirilirse ve çok iyi sonuçlar verirse, mezonlardan bazıları bu modellere uymadığında bahsettiğimiz ikinci türden egzotik mezonları da keşfedebiliriz.

Yapılması gerekenler sadece kuramsal şeyler değil, aynı zamanda deneysel olarak da yapılması gereken şeyler var. Çarmonyum ailesindeki bazı mezonlar henüz tam anlaşılmamış durumda; deneysel veriler J^{PC} değerlerini ortaya koymak için yeterli değil. Hala daha iyi anlayabilmek için

hem kuramsal hem de deneysel düzlemde atılması gereken adımlar var.

Tabii bu bahsettiğimiz konuların yanı sıra çözülmesi gereken büyük problemler arasında saymamız gereken konular da var. Yukarıda değindiğimiz konulardan biri de renk etkileşiminin enerjiye bağlı değişen çiftlenim sabitydi. Günümüzde bile hala cevabını tam olarak veremediğimiz kuantum renk dinamiğinin beta işlevini kullanarak üzerinde çalıştığımız konulardan biri bu enerjiye bağlı değişen çiftlenim sabitidir. Bunun cevabını bulan bilim insanları çok büyük olasılıkla Nobel ödülü ile ödüllendirilenler arasında yerlerini alacaklardır.

V. BİLİMİN İLERLEYİŞİ VE STANDART MODEL

Bilimsel yöntem, bilimin ilerleyişinin yapısını tarif eder. Bilimin ilerleyişi ile ilgili iki temel görüş vardır[14, 15], bu görüşler hakkında bilgi sahibi olmak aşağıdaki değerlendirmeleri daha iyi anlamaya yardımcı olabilir. Bilimin ilerleyişindeki gelişmelerin çoğu bilimsel yöntemle açıklanabileceği için kısaca bilimsel yöntem değerlendirmesi yapmak ve tıkanıklığının olup olmadığını bunun üzerinden anlamaya çalışmak daha iyi anlamamızı sağlayacaktır.

Bilim, bilimsel yöntemde tanımlanan aşamalar üzerinden işleyen bir sistematiktir. Büyük oranda İbni Heysem'in çalışmalarıyla yapısı ortaya çıkan bilimsel yöntem sekiz aşamalı bir süreç olarak tanımlanabilir;

- Problemin tanımlanması,
- Bilgi ve kaynakların toplanması,
- Açıklayıcı bir hipotezin oluşturulması,
- Hipotezin test edilmesi,
- Verilerin çözümlenmesi,
- Verilerin yorumlanması ve bu verilerden sonuçlar çıkarılması,
- Sonuçların yayınlanması,
- Yayınlanan sonuçların (genellikle başka bilim insanları tarafından) yeniden elde edilmesi.

Bu aşamaların her biri bilim için çok önemlidir ve bu aşamaları geçmiş çalışmalar genellikle bilimsel bilgi olarak nitelendirilir. Bu aşamaları geçmeyen süreçler henüz tam olarak bilimsel bilgi aşamasına geçmemişlerdir. Bilimsel yöntemin aşamaları gayet açık olmasına rağmen bilimin işleyişinde birçok karmaşık durum oluşur. Bu durumları incelediğimizde yaşanan süreçleri ve yapılması gerekenleri daha iyi fark edebiliriz.

İnsanlarda bu sürecin bir tek bilim insanı tarafından yürütülmesi gerektiğine dair önyargı bulunabiliyor. Aslında bu süreç çoğunlukla birden fazla bilim insanı tarafından gerçekleştirilir. Bazı durumlarda iki basamak arasında uzun yıllar bulunabilir. Kimi durumlarda ise bir hipotezin test edilmesi bile başlı başına on yıllar, kimi zaman yüzyıllar alabilir. Higgs bozonunun tahmin edilmesinden CERN'in duyurusuna kadar geçen süre yaklaşık 50 yıldır. Işık hızının sonlu olduğu fikri İbni Sina, Biruni ve İbni Heysem tarafından 11'inci yüzyılda dile getirilmişti, farklı bilim insanları ölçmeyi denedi ama başarılı sonuçlar elde edemediler. İlk çok hassas olmayan ama başarılı sonuç ise ancak 17'inci yüzyılın sonunda Danimarkalı bilim insanı Römer tarafından Jüpiter'in uydusu Io'nun gözlenen periodunun değişimi kullanılarak yapılmıştı. İlk sonlu olduğu düşüncesinin ortaya çıkışından ölçülerek sonlu olduğunun ortaya konması arasında altı yüzyıldan fazla bir zaman bulunuyordu. Ortaya konulmasından yeniden hesaplanıp bilim insanlarının çoğunluğu tarafından kabul edilmesine kadar 50 yıldan daha fazla bir zaman daha geçmesi gerekmişti.

Öncelikle bilimsel yöntem ışığında bilimsel bakış açılarının, bilimsel terminoloji ile hipotezlerin, nasıl oluşturulduğunu inceleyelim. Durum hakkında bilgi toplamak ilk yapılması gereken işlemidir. Bilgi toplama aşamasına deneyimlerimiz üzerinden başlarız. Bu deneyimlerimiz çoğunlukla ders

kitaplarına, derslere ve çalıştığımız bilimsel makalelere dayanır. Tabii bu durum bazı avantajlara ve dezavantajlara yol açar, dersler sayesinde hızlıca öğrendiğimiz bilgiler ile bilimin işleyişindeki fark bunların kaynağında yer alır. Bilgi toplamak için ilgili deneylerle ve kaynaklara başvururuz. Bu durum, bilgi topladığımız sürecin ne kadar çalışıldığına bağlı olarak zamansal ve içeriksel olarak değişiklik gösterir. Günümüzde bir çok konu çok iyi çalışılmış konular olduğu için bilgi toplama süreci uzun yıllar yapılan çalışmaları ve deneyleri öğrenerek geçirilmesi gereken bir süreçtir. Eğer üzerinde çok çalışılmamış bir konuyla karşılaşsak, bilgi toplarken farklı bir zorlukla karşılaşırız; birçok şey bilinmemektedir ve bu bilinmeyen şeyler bizi oldukça belirsiz bir durumla karşı karşıya bırakır. Bu bilinmezlik durumunda bilim insanlarının en basit şeyleri deneyerek öğrenmesi gereken süreçler yaşanabilir. Toplanan bilgilerin çözümlenmesi ve bu çözümleme üzerinden olası açıklamaların değerlendirmesi gerekir. Bu değerlendirmenin sonunda açıklama olabilecek farklı hipotezler geliştirilebilir, ve deney bu hipotezler arasında ayırım yapmak veya hipotezlerin doğru olup olmadığını ayırt etmek için kullanılabilir. Parçacık fiziği açısından düşünersek; kimi zaman deneyle parçacıkları gözlemleriz, ve bu deney sonuçları topladığımız bilgiye karşılık gelir. Bunun üzerinde çalışarak kuram veya model geliştiririz. Parçacık fiziğinin gelişim aşamasında yüksek enerjilerde deney yaptıkça yeni parçacıklar keşfettik ve bu keşifler sayesinde standart model bugün bildiğimiz haline geldi. 1960'larda geliştirilen kuramlarda 3 aile yoktu, ve J/Psi ile Upsilonun keşfi 3 aileli modeli geliştirmemize olanak sağladı. Günümüze kadar da yüksek enerjilere çıktıkça yeni parçacıklar keşfettik. Standart modelin gelişim sürecinde yüksek enerjilere çıkmak oldukça önemliydi.

Hipotezler eksik olabilir, bu eksiklikler durum ile ilgili çalışmalar ilerledikçe daha iyi fark edilmeye başlanır. Bunun sebebi ise başlangıçta durumla ilgili bilgilerin çeşitliliğinin az olması veya limit durumlarının bilinmemesidir. Örnek vermemiz gerekirse, zayıf etkileşim üzerine Fermi'nin geliştirdiği bakış açısı düşük enerjiler için başarılıydı, ama bu birçok şeyi bilmeden geliştirilmiş bir modeldi. Hipotez geliştirilmesi genellikle çıkarımsal (inductive) şekilde veya hipotezden türetim yöntemi (hypotho-deductive method) ile olur. Çıkarımlar, durumla ilgili bilgilerin ve verilerin incelenmesi sonucunda ulaşılan düşüncelerdir. Bu düşünceler hipoteze dönüştürülebilir ve bu hipotezlerin test edilmesi ile bilimsel ilerlemeler olur. Eğer 4 tane lepton varsa 4 tane de kuark olmalıdır şeklinde geliştirilmiş bakış açısı çıkarımla geliştirilmiş bir hipotez olarak değerlendirilebilir. Elimizde leptonlar ve kuarklar arasında bir simetri olduğuna dair bir kuram olmadan bunu söylediğimiz için bunu çıkarımsal süreçte değerlendirmek gereklidir. Aynı zamanda daha yüksek enerjilerde keşfedeceğimiz kuarklar o zamanlar bilinmediği için bu hipotezin nasıl eksik olabileceğine dair de bir örnektir. Hipotezden türetim yönteminde ise önceki hipotezler doğru kabul edilerek yeni hipotezler türetilir, ve bu hipotezlerin test edilmesi ile bilimsel ilerlemeler meydana gelir. İkisinin arasındaki temel farkı şu şekilde düşünebiliriz: birincide birçok bilgi ve olay kullanılarak olayı gerekli kılan bir kuram olmadan çıkarım yapılır, herhangi bir şey mutlak doğru veya mutlak yanlış olarak değerlendirilmek zorunda değildir; ikincide ise bir bakış açısı doğru kabul edilir, ve bu kabulden yola çıkılarak eğer bu doğruysa şu da doğrudur veya şöyle olmalıdır şeklinde bir türetim yapılır. Bazı mezonların öngörülmesi ve öngörülen mezonlar üzerine yapılan çalışmalar hipotezden türetim ile yapılan çalışmalara örnek verilebilir.

Bu oluşturulan bakış açılarının kimi zaman o bakış açısını geliştiren kimi zaman da başka bilim insanları tarafından test edilmesi gereklidir. Testler deneysel, kuramsal ve düşünce deneyleri şeklinde geliştirilebilir. Deneysel testler de ortaya konan hipotezin deneysel bir tahmini vardır, ve bunu gözlemek için deney yapmak o hipotezin testidir. Düşünce deneyleri konusunda ise en iyi örnek Einstein'ın çok bilinen özel görelilik ve kuantumla ilgili geliştirdiği düşünce deneyleridir. İbni Heysem ve Galile'nun da düşünce deneyleri konusunda verdikleri çok değerli örnekler mevcuttur. Kuramsal testler biraz daha karmaşıktır, ve birçok çeşitlilik gösterebilir. Burada bazı

yönlerden daha iyi anlaşılması için bir örnek verelim. Önceki atom modellerinde elektronların atomun etrafında döndüğü düşünülüyordu. Bu düşünce elektromanyetik kuram ile test edildiğinde elektromanyetik kurama uygun çıkmadığı için başka bir yola gidilmesini gerekli kılmıştı. Bu örnekte olduğu gibi bazen kuramlara çok güvenebiliriz ve kuramlarla hipotezleri doğru veya yanlış şeklinde teste tabi tutabiliriz. Tabi bu şekilde kuramsal testlerin kabul edilmesi kuramın güvenilirliğine ve deneylerin neyi gösterip göstermediğiyle veya deneyleri düzgün yorumlayıp yorumlayamadığımızla da ilgilidir. Bazen de bizim önyargılarımız bir şeyin doğru olduğunu söylerken, bu önyargıları test ettiğimizde başka bir şeyin doğru olduğunun ortaya çıkmasına yol açar testler.

1950'lere gidelim, ve o zamanlarda yapılmış bir testi değerlendirelim. O zamanlar ayna simetrisi (parity) elektromanyetik ve kuvvetli etkileşim için korunan bir simetriydi, ve simetriten bizim için önemliydi. Enerjinin korunumu ve momentumun korunumunu simetri olarak ifade edilebiliyorduk, ve biz bu korunum yasalarını kullanarak doğa üzerinde çalışıyorduk. Ayna simetrisi de bunlardan biri olarak görülüyordu. Lee ve Yang bunun her zaman geçerli olup olmadığını merak ettiler ve bunun üzerine çalışmaya başladılar. Bu konularda deneysel olarak çalışan Wu ile iletişime geçip bunu test etmek istediklerini belirttiler. Wu 1956 yılında kobalt-60'u kullanarak ayna simetrisinin korunup korunmadığına baktı. Sonuçlar ayna simetrisinin zayıf etkileşim için korunmadığını gösteriyordu, ve bu durum Lee ve Yang'ın Nobel ödülü almasını sağlamıştı. Yaptıkları şey "Evet biz böyle düşünüyoruz ama gerçekten öyle mi?" diye sormaktı, ve sonuç Nobel ödülüne götüren bilimsel yenilikti. Biz de hem kendi düşüncelerimizi hem de kuramsallaşmış düşünceleri test edecek deneyler tasarlamalıyız, ancak bu şekilde yeniliklerin önünü açabiliriz. Geliştirilen bir hipotezinin doğru olup olmadığına yönelik deney tasarlanması, Wu deneyinde ve başka birçok önemli deneyde olduğu gibi, bilimin ilerlemesini sağlayan en önemli etkenlerden biridir. Bu, bazen CERN'de olduğu gibi uluslararası birlikteliği ve büyük yatırımları gerektirdiği gibi bazen Victor Hess gibi balona binip balonda ölçüm yapmayı düşünecek yaratıcılığı gerektirir.

Burada bir durum üzerine düşünmek faydalı olacaktır. Deney yapmak önemlidir, deney yapmadan birçok şeyi yeterince iyi ayırt edemeyiz. Ama deneylerimizin düzgün belirlenmiş amaçları olması tercih edilen bir durumdur. Deneyin öngörümüzü, bilgimizi veya algımızı arttıracak şekilde düşünülmesi ve tasarlanması gereklidir. Tabi ki katot ışınları üzerinde çalışırken x-ışınlarını keşfetmemize benzer bazı durumlarda bir şeyle ilgili deney yaparken başka bir şey keşfedebiliriz. Bilgimizin artabilmesi için hipotezle uyumlu olanlar kadar çelişebilecek süreçlerin de değerlendirildiği ve mümkünse farklı hipotezler arasında ayırım yapabilecek şekilde deneyler geliştirmemiz daha iyi sonuçlanır. Bu sadece deneyler için de geçerli değildir, kuramsal testler ve düşünce deneyleri de iyi düşünülmesi ve bilgimizi arttıracak şekilde olmalıdır. Mümkün olduğunca, farklı hipotezleri ayırt edebilecek şekilde geliştirilmelidir. Bu kadar iyi test tasarlayabilmek zordur, bu bilimin yapısıyla ilgilidir ve o yüzden bilim insanlarının çok çalışması gerekir. Kuramsal olarak iki farklı hipotezi ayırt edebilecek durumların daima var olacağını iddia edebiliriz, eğer bu kuramsal iddia doğruysa yapılması gereken tek şey çalışarak bu testleri geliştirmektir.

Şimdi de testlerin nasıl geliştirilebileceği üzerine düşünelim. Testler için geliştirilecek yöntemler de çıkarımsal veya hipotezden türetim şeklinde yapılabilir. Ayırt edici testlerin geliştirilmesi için önceki hipotezlerin kaynağı iyi öğrenilmeli, bu hipotezler ne gibi durumlarda doğrudur ne gibi durumlarda yanlıştır şeklinde kuramsal veya kurgusal süreçler izlenmelidir. Bu süreçler önyargıyla değil, Wu deneyinde olduğu gibi "Biz böyle düşünüyoruz ama gerçekten böyle mi?" sorusunu da içerebilecek şekilde düşünülmalıdır. Ayırt edici testler hipotezden türetim yöntemi ile geliştirilebilir; eğer bir hipotez doğruysa bunun sonucunda şu olayın olması gerekir, yanlışa bunun olması gerekir şeklinde veya iki hipotez üzerinden düşünüyorsak eğer birinci hipotez doğruysa şu olay olmalı yok ikinci hipotez doğruysa başka bir olay olmalıdır şeklinde ayırt

edici test düşünülür, ve bu test yapılarak iki hipotez arasında farklılık bulunur. Eğer ayırt edici testler tasarlanmazsa farklı hipotezler arasında ayırım yapamayız ve bu karmaşaya sebep olur. Karmaşanın hakim olduğu durumlar ise çoğunlukla çok çalışkan ve düşünce dünyasını iyi şekillendirebilmiş bilim insanları tarafından çözümlenebilir. Bu çözümler genelde çelişkili bir durumun incelenmesi veya bilinen durumların derinlemesine incelenmesi ile çelişkilerin ortaya çıkarılması ve bu çelişkilerin hipotezleri ayırt etmek için kullanılması ile yapılabilir.

Günümüzde parçacık fiziği açısından testlerin önemli bir kısmı yüksek enerjilerdeki öngörülerle ilgilidir, ve bilim insanlarının yüksek enerjilerde deney yapmayı istemelerinin sebebi bu testlerin yapılmasıdır. Bunun yanı sıra daha düşük enerjilerde de çalışılabilecek ve farklı şekillerde test edilebilecek bir çok konu vardır. Günümüzde yapılan araştırmalar hem yüksek enerji hem de düşük enerji seviyesinde çok yönlü yapılmaktadır. Gelişmiş veya ileri düzeydeki kurumlar için yüksek enerjiler daha elverişli bir çalışma konusu olabilirken, diğer kurumlar veya geniş olmayan gruplar için daha düşük enerjiler daha iyi çalışma konuları olabilir. Bulduğumuz yere uygun konular seçmek ve bunlar için kuramsal, düşünce deneyi veya deneysel testler geliştirmek bizim bilime daha iyi katkı yapmamızı sağlar. Önceden kuramsal testlerin karmaşık olabileceği konusuna değinmiştik, biz test gibi düşünmesek de kuramsal çalışmaların büyük çoğunluğu kuramı farklı durumlar için denemektir, yani yürütülen kuramsal çalışmaların çoğunluğu testtir veya testin değişik parçalarıdır. Farkında olmasak da bazı kuramsal çalışmalar ise düşünce deneyi diyebileceğimiz şekildedirler.

Testlerimizi hazırlarken veya kuramların/deneylerin sonuçlarını yorumlarken dikkat etmemiz gereken bir konu daha vardır: dögüsel akıl yürütme (circular reasoning). Bazen bir hipotezden başlayıp bir sonuç elde ederiz, elde ettiğimiz sonucun başladığımız hipotezi ispatladığını düşünebiliriz. Bu, her zaman böyle değildir. Başladığımız hipotez ve elde ettiğimiz sonuç kimi durumlarda aynı şeye denk olabilir, ve biz sadece başladığımız noktaya denk başka bir noktaya dönüp daire çizmiş olabiliriz. Bu durumu tarihsel bir örnek ile açıklayabiliriz. Öklit'in beşinci aksiyomu tarihsel olarak bilim insanlarının en çok üzerinde çalıştığı konulardan biridir, ve bu bilim insanları beşinci aksiyomun ispatını elde ederek aksiyom sayısını dörde indirmeyi amaçlıyorlardı. Öklit'in kendi ifadesiyle beşinci aksiyomu "Eğer iki doğru ile kesişen bir doğru çizilirse, iki doğrunun birbirine bakan tarafında yer alan ve onları kesen doğrunun bir tarafında kalan iki açının toplamı iki dik açıdan küçükse bu iki doğru açılarının toplamının iki dik açıdan az olduğu tarafta uzatılmaya devam ederlerse ilerde bir noktada kesişecekleri doğrudur." şeklindedir. Bu aksiyom Öklit'in ispatını vermediği beş aksiyomdan biridir. Tarih boyunca birçok bilim insanı Öklit'in beşinci aksiyomunu ispatlamaya çalıştılar, ve sadece Öklit'in beşinci aksiyomunun değişik hallerine veya ona denk olan başka aksiyomlara ulaştılar. Bunlardan biri olan John Playfair 18'inci yüzyılda "Bir doğruya dışarıdaki bir noktadan sadece bir tane paralel doğru çizilebilir." şeklinde bir aksiyom kullanmıştı. Yapılan iş beşinci aksiyomun ispatı değildi. Playfair'in bakış açısı paralel tanımı yapılarak, çakışan doğruların aynı doğru olduğu düşüncesi kullanılarak rahatlıkla Öklit'in aksiyomundan çıkarılabilir. Bu da bize birinden diğerinin elde edilebileceğini ve bu yapılanın bir aksiyomu başka bir aksiyomla değiştirmekten ibaret olduğunu gösterir. Öklit'in aksiyomu daha kapsamlı ve paralel tanımını gerektirmediği için aslında daha uzun olsa da daha sadeydi, çünkü tanımlanması gereken yeni bir terim içermiyordu. Ayrıca paralel doğru tanımını yapmaya kalkıştığımızda da Öklit'in beşinci aksiyomundan faydalanmamız gerekecekti. Öklit'in aksiyomundan başlayıp Playfair'in aksiyomuna veya 10'dan fazla denk aksiyoma gereken işlemleri yaparak ulaşabiliriz. Playfair'in ve diğerlerinin yaptığı bir adım atmaktır, bazı şeyleri daha iyi anlamamızı sağlar, bazen algımızı böyle artırırız. Ama bu birinin diğerini ispatladığı anlamına ve beş olan aksiyom sayısının dörde düştüğü anlamına gelmez. Görüldüğü üzere, Öklit'in aksiyomu yerine başka aksiyom koyarak ispatlandığını düşünmek dögüsel akıl yürütmedir; çünkü ikisi birbirine denk olabilecek şeylerdir ve biri diğerinin ispatı değildir, sadece başka bir halidir.

Günümüzde biliyoruz ki Öklit'in beşinci aksiyomu her durum için geçerli değildir; eğri uzayda bu aksiyom doğru değildir, bu da ispatının olmadığına göstergesi olarak yorumlanabilir. Bazı durumlarda bahsettiğimiz gibi döngüsel akıl yürütmeye karşılık gelen durumlarla karşılaşabiliyoruz. Bu şekilde çalışmalar da yapılabilir ve gereklidir, ama bunların ispat olduğunu iddia etmenin döngüsel akıl yürütme olduğunu bilmemiz gerekir.

Bilimde en çok başvurduğumuz yöntemlerden biri modellemelerdir. Modellemeler bilimin ilerleyişine katkı sağlayan en önemli unsurlardan biridir. Bu modellemeler çoğunlukla modellenilen olayın veya şeyin nedensel açıklamasından ziyade, incelenen durumun deneysel verilerini yeniden üretebilen ilişkisel durumların basit denklemlerle veya kavramlarla ortaya konması şeklinde olabilir. Bu basit ilişki kurmayı akışkanlar mekaniği üzerinden düşünebiliriz. Akışkanlar mekaniğinde ağırdalılığı (viscosity) sadece bir parametreyle düşünüp akışkanın hareketini modelleyebiliriz, bu parametreyi de deney ile belirleriz. Ama bu modelde ağırdalılığın doğrudan bir açıklaması yoktur, sadece model çerçevesinde bir parametredir. Açıklama yapmak için daha temel bilim dallarına başvururuz, ve atomlar veya moleküller arası etkileşimleri kullanarak açıklarız.

Modellemeler genellikle deneysel veriler üzerinden oluşturulmuştur ve üzerlerinde çok çalışıldığına model daha başarılı hale getirilir, ve doğal olarak deneysel verilerle çelişmezler. Çelişmedikleri için de yanlış şekilde değerlendirilmezler. Ama bu modellemeler, bazı durumları nedensel şekilde açıklayabilirken bazı durumlar için herhangi bir nedensel açıklama sunmazlar. Ptolemik model çembersel yörüngeleri ve küçük çemberleri (epicycle) kullanarak gezegenlerin, Ay'ın ve Güneş'in hareketini ve belirli bir hassasiyete kadar gezegenlerin hangi konumda olacağını tahmin edilebiliyordu, ve hatta neden olarak da "gök cisimlerinin çembersel hareket yapmak zorunda olduğu" öne sürülüyordu. Ptolemik modelin başarısı modelin uzun yıllar çalışılması ve yeterince parametreyle gözlem sonuçlarıyla uyumlu hale getirilmesinde yatıyordu. Aynı zamanda "gök cisimlerinin çembersel hareket yapması gerektiği" gibi o yıllar için neden olarak görülebilecek "nedensellik" ilkesini içeriyordu. Tabi bunun gerçek olmadığı yüzyıllar boyunca devam eden bir çok bilim insanının ortaya koyduğu çalışmalarla ortaya çıkacaktı. Bu çalışmaların zeminini hazırlayan şeyin İbni Heysem'in çelişkileri ortaya koymasındır diyebiliriz, ve bu çalışmaların en önemlileri olarak da Kopernik'in modeli, Kepler'in hassas hesapları ve Galileo'nun gözlemlerle elde ettiği verilerle ayırt edici şekilde durumu değerlendirmesi diyebiliriz. Model olarak değerlendirmesek de, bu duruma örnek olarak Newton'un kütleçekim yasasını da düşünebiliriz. Newton'un kütleçekim yasası gezegenlerin eliptik yörüngelerini nedensel şekilde açıklayabilmesine rağmen, gök cisimlerinin birbirlerini uzaktan neden etkilediklerini açıklamaz. Newton'un kendisine sorulduğunda da, bu soruya cevap verebilecek düzeyde olmadığını ve cevabı okuyucularına bıraktığını ifade etmişti. Kütleçekim örneğinde olduğu gibi elimizdeki kuramlar veya modeller bazı şeyleri nedensel şekilde açıklayabilirken başka şeyleri açıklamayabilirler. Bu çoğunlukla daha temel düzeyde bilinmeyen şeylerin olduğunun bir göstergesi olarak yorumlanabilir.

Modeller olmadan birçok bilimsel çalışma yapılamaz. Bilimin ilerlemesi için modellemeler gereklidir, ama modellemelerle yetinmek ve başka şeyler olabileceği düşüncesini kabul etmemek sorunlu bir bakış açısidir. Modellemeler üzerinden bilimsel çalışmalar yürütmek kadar, modellemelerin veya daha önceki kuramların temelinde yatan şeylerin ne olduğunda dair bilimsel ve nedensel açıklamalar bulmak için çalışmak da bilimin parçasıdır. Bu nasıl ve neden soruları arasındaki fark ile açıklanabilir. Kütleçekim kuramının gelişimi üzerinden bu durumu kavrayabiliriz. Gezegenleri nasıl modelleyebiliriz sorusuyla yetinseydik, kütleçekim kuramını geliştiremezdik, kütleçekim yasasını geliştiremeseydik bugün üzerine çalışılan birçok konuyu keşfedemezdik. Eğer daha temel bir şey olacağı düşüncesi üzerine çalışmasaydık ve sorgulamasaydık, kütleçekim yasasına ulaşamamış ve hala Ptolemik model ile gezegenlerin hareketini açıklamaya çalışıyor olabirdik. Ama neden sorusunun cevabını bulmak her zaman kolay değildir, öncelikle nasıl cevap vermemiz ve olayların nasıl olduğunu anlamamız gerekebilir. Olayların nasıl gerçekleştiğini

kavramak için de önce modellemeler yapmamız gerekir. Bu modelleri geliştirdikçe sorguladıkça daha ileriye gidebiliriz. Hakikate ulaşmak istiyorsak yol biraz uzun ve zahmetlidir, bu uzun yol Ptolemik model ile kütle çekim kuramının gelişimine bakarsak kimi zaman yüzyıllar alabilir. Yüzyıllar alması ise bazı soruları sadece hemen cevaplayamayacağımızın göstergesidir, düşünemeyeceğimizin değil.

Modellemelerimizin bazıları o kadar başarılıdır ki tamamen birçok deneyle örtüşürler ama neden sorusuna cevap vermezler. Neden sorusuna cevap vermemesine rağmen deney sonuçlarıyla örtüşmesinin nedeni kullanılan parametrelerdir. Bazen o kadar çok parametremiz vardır ki birçok sonucu o parametrelerden yola çıkarak elde edebiliriz. Godfrey ile Isgur'un modellemesi birçok mezonun kütlelerini oldukça başarılı şekilde vermekteydi. Ama çalışmalarında birçok parametre kullanmışlardı. Mezonların kütlelerini tahmin etmesi ve tutarlı sonuçlar vermesi başarılıdır ama modellemenin her şeyi tam olarak açıkladığı anlamına gelmez. Gerçeğe ulaşmamızda bir adım olarak değerlendirilmesi daha yerinde olur. Böyle adımların olması bazı şeyleri daha kolay yapmamıza yardımcı olur. Bu şekilde modellemeler yapmadan kimi durumları yeterince iyi anlayamayabiliriz. Ebert, Galkin ve Faustov'un modeli ise verdiği sonuçlar açısından Godfrey ve Isgur'a benzer olmasına rağmen yöntem olarak daha başarılıdır. Ama hala elle koyulmuş parametreleri olduğu için çalışmaya devam edilmesi gereken konulardan biridir. Bir veya birkaç tane modelin deney sonuçlarıyla tutarlı sonuç vermesi o konunun artık farklı bakış açısıyla çalışılmayacağı anlamına gelmez. Aksine farklı bakış açılarıyla çalışılması konuların daha iyi anlaşılmasına yol açacak bir süreç olduğu için daima farklı bakış açılarıyla elde edilen sonuçlar değerlidir.

Bazı durumlarda çok parametrelili modeller o kadar başarılıdır ki kimi zaman insanlar soru sormayı bırakabilirler. Bu ilerlemenin önünde engel teşkil eden bir bakış açıdır. Parametrelerimiz çok oldukça, nedenini açıklayamadığımız şeyler var oldukça çalışmaya devam etmeliyizdir. Yoksa olduğumuz yerde daireler çizer ve ilerleyemeyiz. Hakikate ulaşmak için çalışmamız gereken, düşünmemiz gereken oldukça çok konu, çalışılması ve anlaşılması gereken oldukça çok problem vardır. Bu problemlerin bazılarını genellikle basit bir kaç soruyla fark edebiliriz. Bir bilim insanı çalışma alanını ve kullandığı parametreleri göz önüne getirdiğinde bu durumu daha iyi fark edebilir.

Süpersimetri geçtiğimiz yılların en çok makale yazılan konularından biriydi. Parametrelerin çokluğu ve deneyin sınırlayıcılığı olmadığı için makale yazmanın kolay olduğu bir alandı. İnsanlar makale sayısının önemli olduğunu düşünüyorlardı ve ellerinin altında önemli bir olasılık vardı. Birçok insan bu olasılığı değerlendirdi ve bu konu üzerine iyimser bir rakamla binlerce makale yazdı. Süpersimetri tabii ki çalışılabilir konulardan biriydi, çalışılması bilimsel bakış açısıyla uyumluydu. Ama yazılan makalelerin önemli bir kısmı makale sayısının önemli bir gösterge olarak düşünülmesinden kaynaklıydı, bu amaçla yazılan makalelerin bilime katkısı doğal olarak oldukça sınırlı oluyordu. Tabii ki bu tercih ile ilgili bir durumdur. Günümüzde ise bu yazılan makalelerin önemli bir kısmının yanlışlandığını biliyoruz. Şu an süpersimetri tamamen yanlışlanmasa da deneysel olarak ispatlanmasının çok düşük olasılığa sahip olduğunu biliyoruz.

Makale yazmak tabii ki önemlidir, ama yazarken yazılan makalenin bilime katkısı olup olmadığı sorusunu düşünerek olaya yaklaşmamız daha yerinde bir tavır olur. Çok küçük de olsa katkı önemlidir, eğer çok küçük de olsa yaptığımız çalışmanın katkısı olabileceğini düşünüyorsak çalışmamızı devam ettirmeliyiz. Ernst Ising doktora tezinde ferromanyetizmayı açıklamak için basit bir model üzerine çalıştı, çalışmasında bu modellemenin faz geçişlerini vermediği sonucuna vardığını ifade etti ve çalışmanın başarısız olduğunu düşündü. 1936 yılında Rudolf Peierls iki boyutlu uzayda Ising modelle hesaplamalar yaptı ve faz geçişlerini verdiğini gösterdi. Ising ise geliştirdiği modelin ulaştığı başarıyı ancak yıllar sonra öğrenebildi. Ising, kullandığı basit modeli ferromanyetizmayı açıklamak için başarısız bir model olarak değerlendirmişti; ama geçen

yıllar o modelin daha iyi çalışıldığında başarılı sonuç verdiğini göstermişti. Bu durum bize; hem gerektiğinde geçmişte yanlış olarak düşünülüp kenara bırakılmış bakış açılarını yeniden değerlendirmenin faydalı olabileceğini, hem de basit ve küçük şeyler üzerine çalışmanın bilim için önemli olduğunu gösteren güzel bir örnektir.

Problemler bilim insanları tarafından tartışıldığı durumlarda problemlerin çözümleri genellikle daha kolay bulunur. Özellikle problemleri bilerek yetişen bilim insanları problemleri çözmekte daha başarılıdırlar. Gençlerin olası problemler hakkında fikir sahibi olması, olası problemleri bilmesi onların daha iyi yetişmesine yardımcı olur. Ama eğitimlerinin erken dönemlerinde, bilimin nasıl işlediğini henüz öğrenmedikleri aşamada problemlerden bahsetmek onları çalışmaktan uzaklaştırabilir. Açık problemlerin bilimsel makale okuyacak olgunluğa erişmiş bilim insanı adaylarının erişimine sunulması önemlidir, çünkü her bir alanda farklı bir çok açık problem bulunabilir ve bunların hepsinden öğrencilere bahsedebilmek imkansızdır. Bazı bilim insanları bu problemlerden bahsetmeyi tercih etmeyebilirler, ama her alanda bunlardan bahseden bilim insanlarının olması o alanın daha sağlıklı gelişmesine olanak sağlayacaktır.

Problemler daha iyi anlaşılması için genelde çelişkiler şekline ortaya koyulması gereken durumlardır. Eğer problemlerin üzerini örtmeye veya onları gizlemeye çalışırsak bu onların çözülememesine yol açabilir. Bazı durumlarda bu çelişkiler aykırılık (anomaly) olarak da ifade edilebilmektedir. Aykırılık ismi verilmesi için genellikle çok uzun yıllar çözümsüz kalmış olması ve o konuyla ilgili temel kuramların açıklayamadığı bir şey olması gerekir. Çelişkili durumlarda yapılması gereken nedir? İbni Heysem'in tavsiye ettiği şeyi yapmalıyız; çelişkileri deneylerle farklı hipotezleri ayırt etmek için kullanmalıyız. Eğer bir alanın uzmanı isek veya olmak istiyorsak çelişkileri bulup ortaya çıkarmak ve bu çelişkilerin hangi hipotezielediğini, hangi hipotezi doğruladığını ortaya koymak için çalışmalıyız. Bazı çelişkili durumlarda konuyla ilgili hipotez yoktur, o zaman bilimsel yöntemin ilk adımlarına dönmek ve yeni hipotez üretmek gerekir.

Çelişkili durumlar bilimin ilerlemesini sağlayan, doğrulara ulaşmamız için yol gösteren şeylerdir. Çelişkiler üzerine gidildikçe, anlaşılmaya çalışıldıkça yenilikler ve ilerlemeler çıkaran durumlardır. Bu çelişkilerin ne zaman üzerine gidileceği ne zaman akılda tutulacağını bilmek önemlidir, çünkü her çelişkili durumun elimizdeki imkanlarla çözülme olasılığı olmayabilir. Bazı insanların "yeni fizik" (new physics) olarak tanımladığı durumların önemli bir kısmı çelişkili olabilecek ve henüz açıklığa kavuşmamış durumlarla ilgilidir. O yüzden yeni fizik olarak nitelendirilen durumlar ilgi çeker. Bu ilgi genellikle o alanda kendini iyi yetiştirmiş bilim insanlarının o alanda yürüttüğü çalışmalarla kendisini gösterir. Aynı zamanda bu durumlar yeni hipotez geliştirmeyi gerektirebilecek konulardır, ve bilim insanları her zaman bu imkanı bulamayabilirler. Çelişkili durumları ele almadan, onları anlamaya ve çözmeye çalışmadan birçok şeyi keşfedemezdik. O kadar çok bilimsel gelişmede çelişkili durumlar rol oynamıştır ki nereye baksak izlerini görebiliriz. Bilim insanları çoğunlukla burada çelişkili veya geleneksel bakış açısıyla uymayan bir şey vardır der ve çalışmaya başlarlar. Bu İbni Heysem'in Ptolemik sistemi eleştirisinden ve ondaki çelişkilerinden bahsetmesinden, atom kuramının gelişmesine ve hatta günümüzdeki birçok yeniliğe kadar dikkatli insanların fark edebileceği şeylerdir. Rutherford'un atom üzerine çalışması ve atom modelinin gelişmesine katkıları bu durumun en bilinen örneklerinden biridir. Altından geçirmeye çalıştığı parçacıkların bazılarının geri tepmesi ondan önceki bakış açısıyla çelişkili bir durumdu, ve Rutherford bu durumu kullanarak atomun çekirdeğin olduğunu fark etti. Bazen bu çelişkiler ortadadır, bazı durumlarda ise geleneksel bakış açısını beklenen durumlar için test etmekle ortaya çıkarlar. Bu ortaya çıkış da bilimsel yeniliğin habercisidir.

Sorgulamak önemlidir, ama doğru sorular sormayı bilmek daha da önemlidir. Ama her zaman doğru soruları sormayı beceremeyebiliriz. Bazen yanlış sorular sorup onların cevabını bulmaya çalışırız. Kepler'in "Neden altı gezegen var, buları harmonik şekilde açıklayabilir miyiz?" sorusu bunlardan biridir. Yanlış bir soru sormuş olsa da Kepler'in bu soru ile ilgili çalışmaları doğru

soruyu sorabilecek tecrübeye sahip olmasını sağladı, ve Kepler yasaları olarak bildiğimiz yasaları keşfedebildi. Evet, insan olmaktan kaynaklı bazen yanlış sorulara cevap aramaya çalışabiliriz ama bu süreç bile öğreticidir ve bu gibi süreçlerin sonucunda doğru soruları keşfetme olasılığına sahibizdir. Bunu yapabilmek için İbni Heysem gibi olaylara yaklaşmalı ve zamanı geldiğinde, kendi bakış açılarımız da bir şeyler ile uyuşmadığında onları da sorgulamayı bilmeliyiz. Bu gibi tecrübeler sayesinde daha iyi düşünmeyi, daha iyi değerlendirmeyi ve daha doğru sorular sormayı öğreniriz. Tabi bilim tarihinden bazı olayları bilmek, geçmişimizin bilgilerinden faydalanmak bazı konularda bizi daha avantajlı hale getirir. "Geçmişteki bilim insanları neler düşündü, ne gibi konularda hata yaptı, eğer o hatalar olmasa biz yine bugünkü kadar çok bilgi sahibi olur muyduk, yoksa o hatalar olmadan birçok şeyi başaramaz mıydık?" gibi konularda bilgi sahibi olmamız öngörümüzü artıracak ve olaylara daha düzgün yaklaşmamızı sağlayacaktır. Tabi doğru sorular sorabilmek için problemleri fark edebilecek alt yapıya sahip olmak ve fark edebilmek gerekir. Öncelikle çalıştığımız alanın genel tarihini, uzmanlık alanımızın ayrıntılı gelişimini bilmemiz gereklidir. Bu ancak çok çalışmakla yapılabilecek bir şeydir. Gerekli alt yapıya sahip olmak için eğitim hayatımız boyunca ezberci yapılardan uzak durmalı mümkün olduğunca sorgulayıcı şekilde olaylara yaklaşmalıyızdır. Bu durum aslında ders aldığımız eğitim süreci bittiğinde de geçerli olmalıdır. Eğer neden sonuç ilişkisi kuramıyorsak, doğru nedenleri belirleyecek, ilişkileri algılayabilecek bir şekilde olaylara yaklaşmıyorsak problemi fark edemeyebiliriz. Kendi uzmanlık alanlarımızda neyin neden kaynaklandığını çok iyi bilmeliyiz, bakış açılarımızın nelere cevap verebileceğini nelere cevap veremeyeceğini çok iyi kavramalıyız. Çalıştığımız alanları sorgulamaktan kaçındığımız sürece çelişkili olabilecek yerleri gözden geçiririz ve sonunda kendimizi geleneksel düşüncenin içinde buluruz. Bu da bizi yenilikleri düşünemeyecek hale getirir. Diğer taraftan sorgulamaların peşine düştüğümüzde aynı zamanda risk almış da oluruz. Risk almak ile bilimsel çalışmaya devam etmek arasındaki dengeyi kurmayı bilmeden bu riski almak zorluklara yol açar. Bu gibi riskler alınmadığı takdirde önemli yenilikler ortaya koyma ihtimalimiz azalır. Ama bu önceki çalışmalarını sürdürmememiz gerektiği anlamına gelen şeyler de değildir. Bu ayrımı iyi yapabilecek olgunluğa ancak denedikçe kazanabiliriz.

Bizim doktorada veya genel olarak bir problemle ilgili çalışmalarımızda ilgilendiğimiz konular çoğunlukla küçük şeylerdir. Bu işimizin doğasının bir parçasıdır. Çok büyük şeyler yapmayı deneyerek değil, bizim küçük problemlerimizin büyük problemlerdeki yerini bilerek bilim yapmalıyız. Bu yeri bildiğimizde küçük problem üzerine olan araştırmamızın büyük konularla ilişkisini daha iyi kavrayabilir ve büyük soruları daha iyi değerlendirebiliriz. Parçacık fiziği camiası için en iyi örnek olarak CERN gösterilebilir, belki herhangi bir doktora öğrencisinin çalışması kendi başına önemsizmiş gibi durabilir, ama bütün bu çalışmalar birleştiğinde CERN'de yapılan çalışmaları oluşturur. Bu çalışmaların algılarımızı genişlettiği, doğayı daha iyi anlamamızı sağladığı ve hakikate biraz daha yaklaştırdığı kaçınılmaz bir gerçektir.

Olgunluğa erişmiş bilim insanları "love of truth" yani "hakikat aşkı" ile hareket ederler. Bizim kuramlarımızda eksik veya yanlış bakış açıları olabilir. Bunları ayrıştırabilmek her zaman mümkün değildir. Tarihin bize öğrettiklerinden biri Ptolemik modelin sorgulanmadan yüzlerce yıl bir çok bilim insanı tarafından doğru olarak kabul edildiğidir. Bunları sorgulayan insanlar arasında yer alan İbni Heysem bazı şeyleri doğru olarak kabul etsek de düşüncelerimizi deney ile test etmeden düşüncelerimizin doğruluğu konusunda ilerleme kaydedemeyeceğimizi ve hatta biz deney yaparak bir sonuca ulaşırsak da bundan yüzde yüz emin olamayacağımızı Dünya'nın başka yerinde yaşayan bilim insanlarının da bizden bağımsız şekilde aynı sonuca ulaşabiliyor olması gerektiğini ifade etmiştir. Ancak bu şekilde olaya yaklaştığımızda "hakikat aşkı"na daha uygun bir tavır sergilemiş oluruz ve yanlışları eleyerek doğruya bir adım daha yaklaşmış oluruz.

Önceden bahsettiğimiz "Neden elektron ile proton'un yükleri aynıdır?" ile başlayan soruları düşünürsek henüz anlayamadığımız çok şey olduğunu görebiliriz. Bilimin gelişiminin bize

gösterdiği de doğrudan bu sorulara cevap aramanın çok zor olabileceği ve bazılarının belki çok uzun zaman boyunca cevap bulamayacağımız şeklindedir. Bu soruların çoğunun cevabını bulmak için önce küçük soruların ve çelişkilerin cevaplarını bulmamız gerekiyor. Çarmonyum mezonlarını daha ayrıntılı incelediğimiz için onlardan daha rahat örnek verebiliriz:

- Nasıl daha iyi bir model geliştirebiliriz?
- J^{PC} değerlerine göre potansiyel modellemeleri ile hesap yaptığımızda elde ettiğimiz enerji dağılımına (spektrum) uymayan mezonlar mezon molekülleri midir veya dörtlü kuark yapıları mıdır?
- Yoksa kaçırdığımız başka bir şey mi var?

Buna benzer sorular neredeyse bütün çalışma alanları için bulunabilir. Bu soruları cevapladıkça daha çok öngörü sahibi olabileceğiz ve başka sorulara daha iyi cevaplar verebileceğiz. Çözmemiz gereken oldukça çok sorun var ve bunları çözmek için her birimiz küçük problemlerimizi çözmek için çabalamalıyız. Tabii büyük problemleri çözmek için çabalamak isteyenler de olabilir, onlar da bu tarz problemleri çözmek için çabalayabilirler. Ama tarihin bize gösterdiği bazı küçük problemleri çözmeden büyük problemleri çözemeyeceğimizeyizdir. Günümüzde bazı konularda yeterince küçük problem çözmüşken bazı konularda yeterince küçük problem çözmemiş bir durumda bulunuyor olabiliriz. Yapmamız gereken ister büyük problem olsun ister küçük problem olsun, onlara çözüm bulmak veya modelleyebilmek için çabalamaktır. Seçtiğimiz probleme göre çözüm bazen kolay, bazen zor, bazen çok zor olabilir.

Yaptığımız çalışmaların bilime ne şekilde katkı sağladığını veya sağlayacağını düşünerek çalışmalarımızı yürüttüğümüzde daha iyi işler yaparız. Bilim insanları bilinmeyenleri keşfeder, açıklanmamış olayları, gizemli şeyleri açıklığa kavuşturmak için çalışır. Bilim insanları aynı zamanda insanların yanlış bildikleri şeyleri de ortaya çıkarır ve insanların yanlıştan uzaklaşmasını sağlar. Doğal olarak bilim insanlarına düşen sorgulamak, neyin doğru neyin yanlış olduğunu ortaya çıkarmak için çalışmaktır. Bu her bilim insanı için farklı zorluklarla dolu bir süreçtir. Zorlukların çoğu kendi önyargılarımızdan kaynaklanan şeylerdir. Daha önceden belirttiğimiz İbni Heysem'in "kendi düşüncelerimizin yanlış olabileceği ihtimalini aklımızda tutmamız ve onları da sorgulamamız gerektiği" önerisini uygularsak bu zorluklar biraz daha hafifleyebilir. Yanlış bilgileri ortaya çıkardıkça, bilinmeyen şeyleri bilinir kıldıkça, gizemleri aydınlattıkça, doğrulara daha çok yaklaşıyoruz. Bilim insanı olarak görevimiz bu yolda yapılacak ilerlemelere katkı sağlamak için çalışmaktır.

VI. SONUÇ

Standart modelin bazı başarılarından burada bahsettik, aslına bakılırsa başarıları bu kadar kısa bir yazıda bahsedemeyeceğimiz kadar çoktur. Diğer taraftan hem bazılarında bahsettiğimiz cevabı bulunmamış büyük problemlere hem de çok azından bahsettiğimiz cevabı bulunmamış küçük problemlere sahiptir. Bu haliyle parçacık fiziği için tıkanıklıktan ziyade belirli bir olgunluğa erişmiş ama hala cevap bekleyen bir çok probleme sahip bir alan diyebiliriz. Olgunluğun getirdiği durumu tıkanıklık olarak değerlendirmek olandan fazlasını söylemektir. Biri kuram diğeri model olduğu için birebir durumlar örtüşmese de elektromanyetik teoriyi bu olgunluğa benzer düşünebiliriz. Elektromanyetik teori gelişim aşamasındayken birçok önemli buluş oluyordu, ama olgunluğa ulaştıktan sonra farklı problemler bu kuram ile çözülür hale gelmişti. Tıkanıklık olarak tanımlamamıza bir gerekçe de günümüzde farklı birçok konuda gelişmesidir. Bu gelişmelerden biri yukarıda bahsettiğimiz mezon molekülleri ile ilgili konudur.

Bilimin ilerlemesi değişik zamanlarda değişik yöntemlerle olmuştur. Bunların bazılarında yukarıda bahsettik. Biz farkında olsak da olmasak da bu değişik yöntemlerin hepsinin temelinde

de "hakikat aşkı" olmuştur. Hakikat aşkıyla hareket etmediğimiz sürece problemlere çözüm getiremeyebiliriz. Hakikat aşkıyla olaya yaklaşmak için İbni Heysem'in belirttiği gibi kendi düşüncelerimiz de dahil bütün düşüncelerden ve kuramlardan şüphe duymalıyız. Ama bunu uygun şekilde yapabilmek için çok bilgi ve tecrübe sahibi olmak gereklidir. Uygun şekilde bu şüpheyile olaylara yaklaşmayı başaramadığımızda bu soruna yol açar. Tabi şüpheyile yaklaşmayı gerektiren durumlarda sadece kendi çalıştığımız alan için yapmalıyız, eğer çelişkili bir durum yoksa diğer insanların çalışmalarından kuşku duymamalı onların çalışmalarına güvenerek yaklaşmalıyız. Çünkü yapabileceğimiz şey birey olarak sınırlıdır ve bu sınırlar içinde çoğunlukla en iyi katkı sağlayabileceğimiz alan kendi alanımızdır. Bazı insanlar her şeyde sorun olduğunu veya çok büyük sorunlar olduğunu düşünebilirler, emin olun ki geçmişte günümüzdekinden çok daha fazla sorun vardı ve sorunların çözümleri günümüze göre çok daha zordu. Bütün bu zorluklara rağmen çalışan, insanlığa katkı sağlamak için uğraşan insanlar sayesinde daha iyi bir haldeyiz, ve aynı zamanda doğa hakkında geçmişle kıyaslanamayacak kadar çok bilgiye sahibiz. Daha iyi yarımlar için bizim de sorunları çözmek için çalışmamız, insanlığa katkı sağlayabilecek şeyler için çabalamamız gerekmektedir. Kimi zaman Galileo gibi küçük bir sarkaçtan, kimi zaman İbni Heysem gibi evin duvarlarına delik açıp evi iğne deliği kameraya çevirip içeri süzülen ışıklardan dersler çıkarmayı bilerek insanlığa katkı sağlamalıyız. Kendi alanımıza kılı kırk yarararak yaklaşmak ve hakikat aşkıyla hareket etmek aydınlık bir yolda ilerlememizi sağlayacaktır.

REFERENCES

- [1] Griffiths, D. J., Introduction to elementary particles, 2nd rev. Ed. Wiley, 2016.
- [2] Sarton, G., Introduction to the history of science, Williams and Wilkins, 1962.
- [3] Godfrey, S., Isgur, N., Phys. Rev. D 32, 189, 1985.
- [4] Ebert, D., Faustov, R. N., Galkin, V. O., Phys. Rev. D 67, 014027, 2003.
- [5] Ebert, D., Faustov, R. N., Galkin, V. O., Phys. Rev. D 79, 114029, 2009.
- [6] CERN, press release, <https://home.cern/news/press-release/cern/new-results-indicate-particle-discovered-cern-higgs-boson>
- [7] Quigg, C. , arXiv:hep-ph/050207
- [8] Eisberg, R., Resnick, R., Quantum Physics: Of Atoms, Molecules, Solids, Nuclei And Particles, 2nd Ed. Wiley, 2014.
- [9] Ley, R., Applied Surface Science 194, 301–306, 2002.
- [10] Fulcher, L. P., Chen, Z., Yeong, K. C., Phys. Rev. D 47, 4122, 1993.
- [11] C. Patrignani et al. (Particle Data Group), Chin. Phys. C, 40, 100001 (2016) and 2017 update.
- [12] Gupta, S. N., Radford, S. F., Phys. Rev. D 24, 2309, 1981; 25, 3430 ,1982; Gupta, S. N., Radford, S. F., Repko, W. W. Phys. Rev. D 26, 3305, 1982.
- [13] Ebert, D., Faustov, R. N., Galkin, V. O., Eur. Phys. J. C 71:1825, 2011.
- [14] Popper, K. R., Bilimsel araştırmanın mantığı, YKY, 2012.
- [15] Kuhn, T. S., The structure of scientific revolutions, The University of Chicago Press, 2012.