

T.C.
İSTANBUL 29 MAYIS ÜNİVERSİTESİ
SOSYAL BİLİMLER ENSTİTÜSÜ
FELSEFE ANABİLİM DALI

MODERN METAFİZİKTEN ÇAĞDAŞ FİZİĞE İÇİNE
GİRİLMEZLİK SORUNU

(YÜKSEK LİSANS TEZİ)

Sümeyra YILMAZ

Danışman:

Prof. Dr. Ahmet Ayhan ÇİTİL

İSTANBUL-2020

T.C.
İSTANBUL 29 MAYIS ÜNİVERSİTESİ
SOSYAL BİLİMLER ENSTİTÜSÜ
FELSEFE ANABİLİM DALI

**MODERN METAFİZİKTE ÇAĞDAŞ FİZİĞE İÇİNE
GİRİLMEZLİK SORUNU**

(YÜKSEK LİSANS TEZİ)

SümeYra YILMAZ

Danışman:

Prof. Dr. Ahmet Ayhan ÇİTİL

İSTANBUL-2020

TEZ ONAY SAYFASI

T.C.

İSTANBUL 29 MAYIS ÜNİVERSİTESİ
SOSYAL BİLİMLER ENSTİTÜSÜ MÜDÜRLÜĞÜNE

Felsefe Anabilim Dalı, 010216YL06 numaralı Sümeyra YILMAZ'ın hazırladığı *Modern Metafizikten Çağdaş Fiziğe İçine Girilmezlik Sorunu* konulu yüksek lisans tezi ile ilgili tez savunma sınavı, 15/09/2020, Salı günü 10:00-12:00 saatleri arasında yapılmış, sorulan sorulara alınan cevaplar sonucunda adayın tezinin başarılı olduğuna oy birliği ile karar verilmiştir.

Prof. Dr. Ahmet Ayhan ÇİTİL
İstanbul 29 Mayıs Üniversitesi
(Tez Danışmanı ve
Sınav Komisyonu Başkanı)

Doç. Dr. Mehmet Cem KAMÖZÜT
Mimar Sinan Güzel Sanatlar Üniversitesi

Dr. Öğretim Üyesi Selami VARLIK
İstanbul 29 Mayıs Üniversite

BEYAN

Bu tezin yazılmasında bilimsel ahlak kurallarına uyulduğunu, başkalarının eserlerinden yararlanılması durumunda bilimsel normlara uygun olarak atıfta bulunulduğunu, kullanılan verilerde herhangi bir tahrifat yapılmadığını, tezin herhangi bir kısmının bu üniversite veya başka bir üniversitedeki başka bir tez çalışması olarak sunulmadığını beyan ederim.

Sümeýra YILMAZ

15/09/2020

ÖZ

Bu çalışma, “madde içsel olarak nasıl bir yapıya sahiptir?” sorusu bağlamında maddenin yapısını anlamamızda kilit rol oynayacağı düşünülen içine girilmezlik (*impenetrability*) kavramının fiziksel ve metafiziksel yapısını ve sonuçlarını bir süreç içerisinde ele almaktadır. Bu kapsamda öncelikle modern felsefede içine girilmezlik sorununun nasıl ortaya çıktığı ve ele alındığı incelendikten sonra kuantum mekaniği ile birlikte geliştirilen alan teorileri bağlamında özellikle Pauli dışarlama ilkesine odaklanılmaktadır. Böyle bir seyir içinde ilerleyen çalışma nihai olarak Kant’ın klasik mekanikte ortaya koyduğu doğa bilimlerinin saf ve metafiziksel zemininin bir benzerini kuantum mekaniği için de ortaya koymanın imkanını tartışmaya açmayı hedeflemektedir.

Anahtar Kelimeler: İçine Girilmezlik, Kuantum Mekaniği, Pauli Dışarlama İlkesi

ABSTRACT

This thesis tackles the physical and metaphysical structure and consequences of the concept of impenetrability which is thought to play a key role in understanding the structure of matter in the context of the question “what is the internal structure of matter?”. In this sense, after examining how the problem of impenetrability has emerged and been addressed in modern philosophy, the study focuses particularly on the Pauli exclusion principle in the context of field theories developed within quantum mechanics. In this thesis proceeding in such a course, it is ultimately aimed to open up for discussion that there is possibility of propounding a similar one of the pure and metaphysical grounds of natural sciences, which Kant has put forward in classical mechanics, for quantum mechanics as well.

Keywords: Impenetrability, Quantum Mechanics, Pauli Exclusion Principle

ÖNSÖZ

“İnsan dünyayı belli belirsiz görse bile sürekli ona dadanır.”¹ Bu çalışma böyle bir dadanmanın verdiği motivasyonla ortaya çıkmıştır. Bu araştırma bu sebeple maddenin özelliği olarak ele alınan içine girilmezlik kavramı üzerinden modern metafiziksel yaklaşımlardan çağdaş fiziğe kadar uzanan bir sürecin okumasını sunmakta ve atomaltı dünyaya bir uzanış gerçekleştirmektedir. Böyle bir çalışma yoğun, zor ve bir o kadarda keyifli bir hal içerisinde yazıldı ve belli belirsiz olan dünyaya yakınsama düşüncesi insana olan yakınsama hissine neden oldu. Bu süreçte bana yaşamının değerini yaşantısıyla öğreten kıymetli hocam, danışmanım Prof. Dr. A. Ayhan Çitil’e her daim yanımda olduğunu hissettirdiği ve yardımları için teşekkürlerimi arz ederim. Bununla birlikte tez konumu belirleme sürecinde destek aldığım Doç. Dr. Baha Zafer hocamıza da müteşekkir olduğumu belirtmek isterim. Tez sürecimin öncesinde ve sonrasında çok şey öğrendiğim kıymetli İstanbul 29 Mayıs Üniversitesi Felsefe Bölümü hocalarıma teşekkür ederim. Buna ek olarak teze getirdikleri eleştirilerle tezimi daha anlamlı hale getiren Doç. Dr. Mehmet Cem Kamözüt ve Dr. Öğretim Üyesi Selami Varlık’a teşekkürü bir borç bilirim. Bu süreçte benden hiçbir desteğini esirgemeyen çok kıymetli aileme sonsuz teşekkürlerimi sunarım. Nihayetinde hep desteklerini hissettiğim dostlarım Hasan Remzi Eker’e, Melike Sultan Yılmaz’a, Hayriye Özlem Sürer’e ve Zeynep Kaptan’a çok teşekkür ederim.

¹ Maurice Merleau-Ponty, *Algılanan Dünya*, çev. Ömer Aygün, (İstanbul: Metis Yayınları, 2014), s.36.

İÇİNDEKİLER

Sayfa No.

TEZ ONAY SAYFASI.....	İİ
BEYAN.....	İİİ
ÖZ	İV
ABSTRACT.....	V
ÖNSÖZ	VI
İÇİNDEKİLER	VII
KISALTMALAR.....	İX
TABLOLAR LİSTESİ.....	X
ŞEKİLLER LİSTESİ	Xİ
SEMBOLLER LİSTESİ	Xİİ
GİRİŞ.....	1

BİRİNCİ BÖLÜM

MODERN FELSEFEDE İÇİNE GİRİLMEZLİK KAVRAMININ ORTAYA ÇIKIŞI

I. DESCARTES, UZAM VE FİZİKSEL NESNE	4
II. ATOMCULARIN İTİRAZLARI VE SPIRIT / FIELD (ALAN) KAVRAMININ DEVREYE GİRİŞİ.....	13
III. KANT'IN İTİCİ VE ÇEKİCİ KUVVETLER ÜZERİNDEN CİSMİ KURMA DENEMESİ	17
IV. GENEL GÖRELİLİK VE KARTEZYEN RÜYAYA DÖNÜŞ.....	30

İKİNCİ BÖLÜM

KUANTUM MEKANİĞİ BAĞLAMINDA İÇİNE GİRİLMEZLİĞİN ELE ALINIŞI

I. KUANTUM MEKANİĞİNİN ORTAYA ÇIKIŞI.....	35
II. KUANTUM MEKANİĞİNİN FORMALİZASYONU VE İLKELERİ.....	39
III. KUANTUM MEKANİĞİNİN ORTODOKS FORMALİZASYONU	44

A. VEKTÖRLER VE TEMSİLİ	44
B. OPERATÖRLER, ÖZVEKTÖRLER (<i>EIGENVECTORS</i>) VE ÖZDEĞERLER (<i>EIGENVALUES</i>).....	46
IV. KUANTUM MEKANİĞİNİN YORUM İHTİYACI	48
A. EPR PARADOKSU	55
B. BELL EŞİTSİZLİKLERİ VE DENEYLERİ.....	59
V. TEMEL PARÇACIKLAR VE KUVVETLER.....	64
VI. PAULİ DIŞARLAMA İLKESİ.....	68
A. PAULİ DIŞARLAMA İLKESİNİN MATEMATİKSEL FORMALİZASYONU.....	71
B. DIŞARLAMA İLKESİNİN FİZİKSEL SONUÇLARI	73
VII. KUANTUM ALAN TEORİLERİ.....	75
A. KUANTUM ELEKRODİNAMİĞİ VE ELEKTROZAYIF ETKİLEŞİM TEORİLERİ	77
B. KUANTUM KROMODİNAMİĞİ	84
C. STANDART MODEL	86
GENEL DEĞERLENDİRME VE SONUÇ.....	88
BİBLİYOGRAFYA	91
ÖZGEÇMİŞ	94

KISALTMALAR

bkz.	: Bakınız
CERN	: European Organization for Nuclear Research (Avrupa Nükleer Araştırma Merkezi)
çev.	: Çeviren
ed.	: Editör
EPR	: 1935'te Einstein, Boris Podolsk ve Nathan Rosen yazdığı " <i>Can Quantum-Mechanical Description of Physical Reality Be Considered Complete?</i> " makalesi
LEP	: The Large Electron-Positron Collider (Büyük Elektron-Pozitron Çarpıştırıcısı)
LHC	: The Large Hadron Collider (Büyük Hadron Çarpıştırıcısı)
M.Ö.	: Milattan Önce
M.S.	: Milattan Sonra
QED	: Quantum Electrodinamic
QM	: Quantum Mechanics
s.	: Sayfa
vb.	: Ve Benzeri
vd.	: Ve Devamı
yy.	: Yüzyıl

TABLÖLAR LİSTESİ

Tablo 1: Fotonların Polarizatörden Aynı-Farklı Geçme Durumları	61
Tablo 2: Fotonun Üç Farklı Polarizatörden Sekiz Farklı Şekilde Geçmesi.....	61
Tablo 3: Tarihsel Olarak Keşfedilen Parçacıklar.....	68
Tablo 4: Bir Feynman Diyagramının Denklemsel İfadesi.....	81
Tablo 5: Fermiyonlar, Bozonlar ve Etkileşimleri	85



ŞEKİLLER LİSTESİ

Şekil 1: Çift Yarıık Deneyi	43
Şekil 2: Feynman Diyagram Örneği	80
Şekil 3: Nötronun Protana Bozunmasını Temsil Eden Feynman Diyagramı	82
Şekil 4: SU (3) Kuantum Kromodinamiği Lagrangian Denklemi	85



SEMBOLLER LİSTESİ

h	: Planck Sabiti
$\hbar$	: Plank Sabitinin 2π 'ye bölümünmesi
ν	: Işık Frekansı
$\prod^c$	: Bir Klasik Sistemin Sabit Özelliklerini Temsil Eden Küme
$\prod^v$	: Bir Klasik Sistemin Değişen Özelliklerini Temsil Eden Küme
Λ	: Parçacıklar Arasındaki ve Çevreleriyle Olan Etkileşimini Yöneten Kanunlar Kümesi
q	: Konum
p	: Momentum
L^2	: Lebesgue Uzayı
i	: Sanal Sayı
Ω	: Faz Uzayı
$U(1)$	: Birimsel Rotasyon Grubu
$\uparrow z \downarrow z$	: Yukarı ve Aşağı Spin
$\langle A B \rangle$	: Bra-Ket Notasyonu
$A v\rangle = a v\rangle$	: A Bir Operatörü, $ v\rangle$ A'nın Özvektörünü Temsil Ederken a ise A'nın Özdeğeridir

GİRİŞ

Bilim ve felsefe arasındaki ilişkinin bütünsel bir ilişkiyi temsil eden antikçağdan bilimin deneysel, felsefenin ise spekülatif alanı temsil ettiği düşünülerek birbirinden ayrıştırıldığı 19. yüzyıla kadar uzanan gerilimli süreci ortadadır. 20. yüzyılda çağdaş fiziğin gelişmesiyle birlikte bilimlerin bütünlüğü yani kimyanın, biyolojinin fizik temelli açıklanabiliyor olması hepsinin de ötesinde bütün bilimlerin temelini fizik oluştururken onu oluşturan dil olan matematik onu da önceleyen bir konuma sahip olmaya başlamıştır. Böyle bir çerçevede doğa üzerine eserlerinin yazıldığı pre sokratik dönemler dönüşü çağrıştırmaya bilim ve felsefe arasında açılan uçurumun bir yanılısına olduğu bir kez daha anlaşılmış oldu. Felsefe bir bütün olarak evreni anlamaya devam etmektedir. Kuantum mekaniği ile beraber makrokozmoza dönük olan felsefe-bilim ilişkisi atomaltı parçacıklarla beraber mikrokozmoz zemine kaymıştır. Başlangıç ve anlam mikrokozmoz zeminindedir artık. Evreni oluşturan maddenin hatta canlıyı oluşturan yapının cevabını da orada aramak gerekmektedir.

Algı ve nesnenin tekabüliyetini zorunlu gören klasik yaklaşımda madde bizim algımız dışında gerçekliğini olduğu gibi muhafaza etmektedir. Buna karşın çağdaş fiziğin gelişmeye başlaması ve atomaltı dünyaya girişle kuantum mekaniği algı ve nesne arasındaki tekabüliyetin tekrar sorgulanmasına ve nesnenin görüldüğü gibi olmadığı hatta gerçekliği üzerine konuşmanın bile buharlaştığı bir zemine akmıştır. Böylece fiziksel gerçeklik sorunsalı ortaya çıkmıştır çünkü doğrudan müdahil olduğumuz ve gözlemleyebildiğimiz bir dünya yoktur artık. Bunun yerine kuantum nesneleri ve onları gözlemleyen yani ölçüm yapan makinaların matematiksel örüntülerinden oluşan mantıksal çerçeve söz konusudur. Felsefeye gelince bilimin geldiği bu noktayı anlayıp ontolojik ve epistemolojik bir çerçeve sunabilmiş gözükmemektedir. Bu bağlamda bu tezin konusu modern felsefe ve kuantum mekaniği çerçevesinde maddenin yapısını anlamamızı kolaylaştıracak içine girilmezliğin (*impenetrability*) fiziksel ve metafiziksel yapısını ve sonuçlarını ele almaktır. Tez klasik mekanik kapsamında içine girilmezlik sorununun nasıl ortaya çıktığını ve ele alındığını gözden geçirdikten sonra kuantum

mekaniği sonrası geliştirilen alan teorileri üzerinden Pauli dışarlama ilkesine odaklanmaktadır. Tez içine girilmezlik üzerinden kuantum mekaniğinin metafiziksel bir alana kapı aralayıp aralamadığını görmeyi amaçlamaktadır. Tezin önemi içine girilmezlik kavramı üzerinden tarihsel ve çağdaş okumalar sonrasında maddenin doğasına dair bir soruşturma alanı açmak ve en azından mevcut yapıyı ve maddenin doğasının henüz çözülmeye devam eden bir süreci işaret ettiğini göstermektir. Maddenin yapısına dair karanlık yapıların çözülmesi bizi canlılık ve evrene dair daha net bir resme ve anlam dünyasına götüreceği açıktır ancak felsefenin anlama görevini yerine getirmesiyle bunun mümkün olacağı kanaatindeyiz bu sebeble tez konumuz maddenin doğasının belki de çok küçük bir kısmını teşkil eden fermiyonların bir ilkesini yani Pauli dışarlama ilkesini konu almaktadır.

Çalışmamız iki bölümden oluşmaktadır. İçine girilmezliğin modern dönemde okunmasının nasıl yapıldığına ışık tutmak için modern felsefede içine girilmezlik kavramının ortaya çıkışı üzerinde durmuştur. Bu noktada Descartes, Newton, Kant, Einstein gibi önemli isimlerin sistemlerine başvurulmuştur. İkinci bölümde ise atomaltı dünyanın fiziği olarak geliştirilen kuantum mekaniği bağlamında içine girilmezlik kavramı yakalanmaya çalışılmıştır. Çağdaş fizikte tam olarak modern dönemin içine girilmezlik kavramı değilse de kuantum mekaniksel bağlamda Pauli dışarlama ilkesinin fermiyonlar için ortaya koyduğu ilke bu minvalde incelenmiştir.

Maddenin içine girilmezlik ilkesinin ele alındığı bu tezde yöntem olarak kavramın ele alınışı çerçevesinde tasvir edici yöntemden, klasik ve kuantum mekaniğine dair açıklamalarda zaman zaman karşılaştırma yönteminden ve kuantum teorisinin gelişim süreci izlenirken de kronolojik yöntemden faydalanılmıştır.

Araştırmamızda kaynak olarak Descartes'in madde anlayışını ele alırken *Felsefenin İlkeleri* eseri, Newton'un anlayışını ele almak için *Doğa Biliminin Matematiksel İlkeleri* eseri, Kant'ın madde anlayışını ele almak içinde *Doğa Biliminin Metafiziksel Temelleri* eseri temel alınmıştır. Klasik ve modern dönemin doğa anlayışına dair geniş bir perspektif sunan Ivor Leclerc, *The Nature of Physical Existence* kitabından oldukça istifade edilmiştir. Kuantum mekaniğinin tarihsel gelişimi ele

alınırken Max Jammer, *The Philosophy of Quantum Mechanics: The Interpretation of QM in historical perspective*, James Cushing, *Fizikte Felsefi Kavramlar Cilt:2* temel alınmıştır. Kuantum mekaniğinin matematiksel yapısını ele almak için ise R.I.G. Hughes, *The Structure and Interpretation of Quantum Mechanics* ve Leighton, Sands ve Richard Feynman, *Feynman Fizik Dersleri Cilt 3- Kuantum Mekaniği* kitaplarına başvurulmuştur. Kuantum alan teorisi ele alınırken de Gerhard Ecker, *Particles, Fields, Quanta: From Quantum Mechanics to The Standart Model of Physics* ve Wouter Schmitz, *Particles, Fields and Forces* eserlerinden oldukça faydalanılmıştır. Pauli dışarlama ilkesinin hem ortaya çıkış sürecini hem de ortaya çıkışından sonraki gelişmeler sonrasındaki çalışmalarda ilkenin reddi ya da yeni teorilerle açıklanmaya çabasını ele almakta olan Michela Massimi, *Pauli's Exclusion Principle: The Origin and Validation of a Scientific Principle* eserinden istifade edilmiştir.

İçine girilmezlikle ilgili Kant üzerinden ya da Pauli dışarlama ilkesi açısından ele alınmasına karşın epistemolojik ve ontolojik bir zemine çekilerek tartışıldığı metin eksikliği ortadadır. Çalışmamız en azından bu eksikliğe ve kuantum nesnelerinin ontolojik zemini sorunsalına işaret etmekle yetinecektir.

BİRİNCİ BÖLÜM

MODERN FELSEFEDE İÇİNE GİRİLMEZLİK KAVRAMININ ORTAYA ÇIKIŞI

I. DESCARTES, UZAM VE FİZİKSEL NESNE

Descartes (1596-1650), kendi dönemine kadar etkili olan düşünce sistemini ciddi oranda sarsan yeni bir anlayış geliştirmiştir. Sisteminin temelleri metafiziğe dayanmakta, fizik bir sonraki adımı göstermekte ve devamında ise diğer bilim dalları gelmektedir. Descartes, *Meditasyonlar*, *Yöntem Üzerine Konuşmalar* ve *Felsefenin İlkeleri* kitaplarında şüpheciliği metot olarak seçtiğini ve her şeyden şüphe edildiğinde şüphe edilmeyecek tek şeyin şüphe eden şeyin kendisi olduğunu yani şüphe eden ben olduğunu belirtmektedir. *Cogito ergo sum*, düşünüyorum o halde varım cümlesi Descartes'in epistemolojik zeminini oluşturan cümledir. Ancak buradan bir adım atabilmek Tanrı'nın varlığının ispatıyla çözümlenebilmektedir. Tanrı ispatı için sonlu bir ben olarak sonsuzluk ideasına sahip olmak sonsuzluğun kaynağının ben dışında bir şey olması gerektiğini belirtmektedir. Bu kaynakta ancak Tanrı olabilir ve Tanrı varsa o mükemmel ve iyi olduğu için beni yanıltmayacak ve kandırmayacaktır. Bundan dolayıdır ki açık ve seçik bilgi mümkündür.

Descartes, fizik açıklamalarının zeminine metafiziği yerleştirmektedir. Böyle bir metafizikte bütün açık ve seçik olan bilginin kaynağı sonsuz olan Tanrıdır ve sonlu olan bene de sonsuzluk ideası vermiştir. Descartes madde anlayışını bu temel üzerine inşa etmesine karşın tanrıbilimle ilgilenme yoluna girmeyip fiziksel olanın açıklamasını matematiksel bir dizgede sunmaya odaklanmıştır ve sonsuzluk kavramı böylece ön plana çıkmıştır. Birçok pre-sokratik filozoftan, Hristiyan felsefesinin gelişimine kadar ki süreçte yaygın olarak kabul edilen sonsuzluğun mükemmellik karşıtı, bir kusur olarak olduğu yönündeydi. Uzun yüzyıllar düşünce üzerinde etkisini korumuş Aristoteles (M.Ö. 384-322), sisteminde evrenini sonlu olarak tasarlamış ve hareketinde sonlu olduğunu belirtmiştir. Çünkü sonsuz sonu olamayan demektir ve sonu olmayan ise

hiçbir zaman gerçekleşmesi mümkün olmayandır.² Aristoteles'e göre sonlu uzamlı olan sonlu sayıdaki varlıktan sonsuz bir uzanım ve varlık kümesi elde edilemez ki Descartes'te bunu desteklemektedir. Aristoteles *dynamis- energeia* (bilkuvve- bilfiil) ayrımı yapar ve sistemini bu ayrım üzerine inşa eder. Madde *bilkuvve* olan form ise *bilfiil* olandır. *Hyle* (madde) tam olarak belirlenmemiş olandır form ise belirlenmiş olandır ve *bilfiil*dir. Tanrı ise tam belirlenmiştir, saf fiildir ve mükemmel olduğu için sonludur. Aristoteles olanak halinde sonsuzluğun olabileceğini kabul etmesine karşın bu kuvvenin *bilfiil* hale gelmesindeki anlamda değildir. O sadece bir anlamda zamanda, bir anlamda insanların ve bir anlamda ise büyüklüklerin bölünmesi açısından düşünülebilmektedir.³

Neoplatonizmin kurucusu olarak kabul edilen Plotinus (M.S. 205-270), Tanrı'nın madde ve forma sahip olmadığını ve bunların ötesinde yer aldığını belirtmektedir. Parmenides'te varlık, bir iken, Platon'da idealar, Aristoteles'te sonlu ve belirli olan *ousia*'dır. Plotinus'ta ise Tanrı sonsuz ve yaratıcı bir konumdadır. Yaratığı evrenler ise başı ve sonu olduğu için sonludur. Sonlu bir varlığın düşünmesi ise ancak onu olumsuzlama yoluyla mümkündür. Tanrı belirlenmiş olmayandır, sonu olmayandır gibi. Ivor Leclerc (1915-1999), Henry Ghent'in (1217-1293) sonsuzu olumsuzlamanın olumlu bir anlam oluşturduğundan bahseden ilk isim olduğundan bahseder. Bu adım Duns Scotus (1266-1308) tarafından sonsuzu olumlayarak düşünme daha ileri taşınmıştır ancak Cusali Nicholas tarafından felsefi bir görüş olarak inşa edildiğini belirtmektedir.⁴

Cusali Nicholas, Descartes'in sonsuzluk anlayışını ve fizik- matematik anlayışını etkilemiş bir isimdir. Cusanus (Cusali Nicholas) sonlu bir aklın sonsuzu pozitif anlamda bilebileceğini savundu. Bunu matematiksel anlayışımız üzerinden açıklamayı denedi. Matematiksel anlayışımız her ne kadar sonlu figürler üzerinden olsa da sayıların sonsuz olabileceğini düşünebiliriz. Cusanus, Tanrının mutlak sonsuz varlığını sonsuz hiçbir şeye bağlı olmayan geometrik bir uzantıyla uyumlu hale getirmeyi denedi ve böylece

² Aristoteles, *Fizik*, çev. Saffet Babür, (İstanbul: Yapı Kredi Yayınları, 2014), 241b 8-13, s. 303.

³ Aristoteles, *Fizik*, 206 a-b, s. 123-125.

⁴ Ivor Leclerc, *The Nature of Physical Existence*, (İngiltere: George Allen & Unwin Ltd., 1972), s. 65-69.

evren kavramının felsefi temelini matematiksel bir yapı olarak sundu bu da modern bilimin gelişmesinde temel bir rol oynadı ve dolayısıyla sadece Descartes'in değil aynı zamanda Spinoza (1632-1677), Leibniz (1646-1716) gibi isimleri büyük ölçekte etkiledi ve modern uzay kavramının gelişiminde büyük bir rol oynadı.⁵

Cusanus'a göre evren ne sonludur ne de sonsuz, evren sınırsızdır (*interminatum*), sonsuz olan (*infinitum*) Tanrıdır ve her şey ona boyun eğmektedir. 16. yy. daki bu görüşte evren Tanrı'ya giden bir yoldur ve bu görüş 17. yüzyılın evren şemasını Aristotelesçi olmaktan kurtarmıştır⁶ ve Descartes'in evreni oluşturan uzamlı özdeğin sınırsız olduğunu belirtmesinde etkili olmuştur.⁷ Kopernik devrimiyle birlikte dünyanın merkez olmadığı ileri sürülerek geleneksel yapı bozulmuş olsa da Kopernik (1473-1543)'in evreni sonlu bir resim çizmektedir. Lucretius ve Cusanus'tan büyük ölçüde etkilenen Giordano Bruno (1548-1600)'nun evrenin sonsuz olduğunu iddia etmesinde belirleyici bir rol oynamıştır.⁸ Böylece fiziksel olan ile matematiksel olanın özdeşliğine dair önemli bir adım atmıştır ve 17. yüzyılın kahramanları olan Descartes, Gassendi (1592-1655), Galileo (1564-1642), Newton (1642-1727) ve Leibniz büyük ölçüde fiziksel olan ile matematiksel olan arasındaki ilişkiyi açıklamaya çalışmışlardır diyebiliriz. Bu isimlerin matematiksel ve fiziksel arasındaki kurduğu ilişkinin seyri maddenin ele alınışını etkilediği gibi onun özelliklerinden biri olan içine girilmezlik ilkesinin nasıl açıklanacağını da etkilemiştir.

Koyre (1892-1964) “yeni bilimin ve yeni matematiksel evrenbilimin ilkelerini açık ve seçik formüle eden” kişinin Descartes olduğunu söylemektedir.⁹ Buna göre hem Bruno hem de Galileo'dan etkilenmiş ancak görüşleri bir sisteme dönüştüren Descartes olmuştur. Galileo'nun görüşlerine yakından baktığımızda matematiksel olanın sonsuz bölünebilir olduğu hususunda ve boşluğun hiçbir uzamı olarak kabul etmeme hususunda Aristoteles'i takip etmekte olduğu görülmektedir. Buna rağmen Bruno'nun maddenin formdan bağımsız bir fiziksel varlığa sahip olduğu bir madde kavramını kabul etmiştir. -

⁵ Leclerc, *Nature*, s. 82.

⁶ Leclerc, *Nature*, s. 92.

⁷ Descartes, *Felsefenin İlkeleri*, (İstanbul: Say Yayınları, 2018), 2/17, s. 126.

⁸ Alexandre Koyre, *Kapalı Dünyadan Sonsuz Evrene*, çev. Aziz Yardımlı, (İstanbul: İdea Yayınları, 1998) s. 34.

⁹ Koyre, *Sonsuz*, s. 81.

Galileo'ya göre i) maddenin temel davranışı onun geometrik yayılımıdır. Uzam sürekliliği içerir bu yüzden madde olmayan boşluk olamaz. ii) sürekli uzam sonsuz bölünebilir.- Buna ek olarak atomculuğa karşı olan Aristoteles'e katılmamaktadır ve atomlar sonsuz küçüklerse boşluğa gerek yoktur, çünkü akışkan bir yapı oluşturmaktadırlar.¹⁰

Galileo'nun gerçek anlamda bilimi başlatan kişi olarak zikredilmesinde bir beis yoktur çünkü ölçüm ve gözlem yaparken araç kullanması bunda bir numaralı faktördür. Zamanı bir şekilde ölçmek için sarkacın kullanılmasını önermiş yine gökyüzünün gözlemlenmesinde *perspicillum* teleskobunu kullanmıştır. Buna ek olarak bir cisme uygulanan kuvvetin hızı değil ivmeyi belirlediğini ortaya koymuştur. İvme hızın zamanla değişimini göstermektedir. Dolayısıyla kuvvet olmadığında hız sabittir eylemsizlik ilkesinin temelini oluşturmaktadır. Descartes'in ileri sürdüğü doğa yasalarında da bu ilkeyle karşılaşılmalıdır. Buna ek olarak Galileo göreliliği ve enerji korunumuyla ilgili de açıklamalarda bulunmuştur.¹¹

Descartes, Aristotelesçi ve skolastik sistemin reddini ilk olarak mantığın oluşturduğu kurallar yerine geometricilerin kullandığı her türlü düşünceye uygulanabileceğini belirttiği yeni bir yöntem ileri sürerek gerçekleştirmektedir. Bu kuralların ilki, doğru olduğu açık ve seçik şekilde bilinmeyen hiçbir şeyi doğru kabul etmemeyi, ikinci kural, ele alınan problemi çözmek için gerektiği kadar bölümlere ayırmayı, üçüncü kural, araştırma sürecinde en basit ve bilinmesi en kolaydan başlayarak adım adım zor ve daha karmaşık olana yönelmeyi, sonuncusu ise yapılan bütün süreçleri tekrardan ele alıp kontrol etmeyi içermektedir.¹² Herkesin her noktada yanılabilmesine dair bir gözlemini dile getiren Descartes aynı yanlışlara kendisinin de düşebileceğinin farkında olarak hiç değişmeyen ve kendini olduğu gibi koruyan bir gerçeklik ararken bir bedene sahip olmadan ve içinde bulunulan bir dünya olmadan kendinin var olmadığını hayal edemediğini ve herhangi bir şeyin yanlış olduğunu hayal etmenin ve düşünmenin var olduğuna kanıt olduğunu söylemektedir. Benin

¹⁰ Leclerc, *Nature*, s. 176-78.

¹¹ Roger Penrose, *Kralın Yeni Usu II- Fiziğin Gizemi*, çev. Tekin Dereli, (Ankara: TÜBİTAK, 2000), s. 17-21.

¹² Descartes, *Yöntem Üzerine Konuşma*, çev. Çiğdem Dürüşken, (İstanbul: Alfa Yayınları, 2015), s. 51.

düşünmekten ibaret olduğunu ve “bedenle bağı olan bir şeyim, yani bir tözüm.” cümlesini düşünen ben ve beden ayrımını vurgulamaktadır.¹³

Descartes’in epistemolojisi ve yöntemini ele alınması ve doğa felsefesini ele alırken kendinden önce kabul görmüş madde, mekân, boşluk, zaman ve hareket/devinim kavramlarına da yukarıda yer verilmesi maddenin içine girilmezlik özelliğine mekanik sisteminde yer vermeyen Descartes’in maddeye yaklaşımını daha anlaşılır kılma hedefi güdülmektedir. Platon’un *Timaios* diyalogunda Tanrı Demiorgos sonsuz formlar ve kaplarla (*receptacle*) dünyayı oluşturduğunu ifade etmektedir. Platon’a göre dört temel unsur birbirlerine dönüşebilmektedir ve bunların dönüşümlerinin gerçekleştiği yer ve değişimlerin öznesi olan kap, epodekhe khora, yer olarak adlandırılmaktadır. Khora, hiçbir özelliğe ve yapıya sahip değildir. Hiçbir özelliği olmayan bu şey ve her şey olabilmektedir ve khora ancak olumsuzlama yöntemiyle düşünülebilir.¹⁴ Aristoteles’te madde hem var olma hem de var olmama imkanına sahiptir ve bu imkana madde ismini vermektedir¹⁵ ve doğası gereği bilinemez olduğunu da vurgulamaktadır. Aristoteles’in maddesi belli noktalardan Platon’un khorasına benzediği görülmektedir. Form (*eidos*) ise maddeyi belirleyen şeydir. Cevher (*ousia*), madde ve formun birleşmesinden oluşmaktadır ve form *ouisanın ousiasıdır*. Dolayısıyla cevherde olmazsa olmaz yani öz formdur. Aristoteles maddenin duyusal ya da akılsal olabileceği ayrımına gitmektedir. Duyusal olan madde tuncun, tahtanın maddesi vb. olurken, akılsal madde matematiksel varlıklarda olan maddedir.¹⁶ Böyle bir geleneksel çerçevenin aksine Descartes, maddeyi uzamla özdeş olarak kabul eden radikal tanımı şu şekildedir: “Cismin özünü sert, ağır, renkli olması değil, yalnız uzunluk, enlilik ve derinlikçe uzamlı olması oluşturur”.¹⁷ Sürekliliği matematiksel ve fiziksel olarak ayrı olarak değerlendiren Aristoteles’in aksine onu matematiksel ve fiziksel olanın özdeşliğini gösteren uzamın cisimle aynı şey olduğunu kabul etmektedir Descartes. Koyre bu özdeşliği gereksiz görmekte ve

¹³ Descartes, *Yöntem*, s. 71.

¹⁴ Platon, *Timaios*, çev. E. Güney, L. Ay, (İstanbul: Sosyal Yayınları, 2001), 50a- 51b,52b.

¹⁵ Aristoteles, *Metafizik*, çev. Ahmet Arslan, (İstanbul: Sosyal Yayınlar, 2014), 1032a 15-25, s. 328.

¹⁶ Aristoteles, *Metafizik*, 1036a 10-15, s. 347.

¹⁷ Descartes, *Felsefe*, 2/4, s. 118.

Descartes'in on yedinci yüzyıl biliminin sorunlarına doğru çözümler sunmasını engellediği noktasında eleştirmektedir.¹⁸

Descartes'in cisim ve uzamı özdeş kabul etmesinin sonucunda yer kavramı da değişmektedir. İç yer ve bu iç yerde bulunan cisim ayrımı ancak düşüncede gerçekleşmektedir. Çünkü uzamı oluşturan uzunluk, enlilik ve derinlik maddeyle aynıdır. Dolayısıyla içinde töz bulunmayan bir yer mevcut değildir.¹⁹ Yine Aristoteles'e dönecek olursak yeri cismi saran mekân olarak tanımlamakta ve dolayısıyla cisim ve yer ayrı şeyleri temsil etmektedir. Yer maddeden ayrılabilir ve aynı zamanda onu sarabilir.²⁰ Aristoteles, yer ve cisim arasında sınır ve sınırlanan ilişkisi kurmaktadır.²¹

Descartes atomcuların ileri sürdüğü gibi bölünmez atomlar ya da cisimin bölümlerinin bulunmayacağı fikrini uzamlı olabilen cisimlerin ancak bölünmesinin mümkün olmasından dolayı yanlış kabul etmektedir. Ona göre Tanrı böyle bölünmez bir şey yaratsa bile kendi onu bölebilecektir. "Dünyada var olabilen uzamlı en küçük bölüm, özü gereğince, her zaman bölümlere ayrılabilir."²² Dolayısıyla hem cevher fikri hem de bölünmez atomlar fikriyle ortaya konulan maddenin içine girilmezlik (*impenetrability*) özelliği Descartes'in madde anlayışında yer almamaktadır.²³ Çünkü madde hiçbir direnç göstermeden sonsuzca bölünebilmektedir. Buna karşın atomcu olarak nitelendirilen Leukippos ve Demokritos, maddenin nihai yapıtaşları bölünmez olan atomlar olduğunu ileri sürmüşlerdir. Madde bölünebilir ancak bu sonsuza kadar gitmez matematiksel açıdan sonsuzdan söz edilebilir ancak fiziksel bölünmenin bir sınırı vardır. Bu sınır ise atomlardır. Bu sınır maddenin içine girilmezlik (*impenetrability*) özelliğini kurmaktadır. Dolayısıyla matematiksel olanın fiziksel olanla özdeşliği maddeyi açıklarken içine girilmezlik ilkesine başvurmasına gerek olmamasına karşın matematiksel ve fiziksel olanın farklı olması sınır kavramını ve aynı zamanda içine girilmezlik ilkesini doğurmaktadır.

¹⁸ Koyre, *Sonsuz*, s. 81.

¹⁹ Descartes, *Felsefe*, 2/13, s. 123-124.

²⁰ Aristoteles, *Fizik*, 211a1-5, 212a1, s. 147-153.

²¹ Aristoteles, *Fizik*, 212a28-30, s. 155.

²² Descartes, *Felsefe*, 2/16, s. 125.

²³ Leclerc, *Nature*, s. 198.

Atomculara göre eğer boşluktan varlığın içindeki boşluk kastediliyorsa böyle bir boşluk söz konusu olamaz ancak eğer tözleri birbirinden ayıran onların dışındaki boşluktan bahsediliyorsa boşluğun varlığından söz edilebilmektedir. Boşluk dolu olmayandır ve gerçektir. Descartes' göre ise içinde bir cevher bulunmayan bir yerin var olması mümkün değildir. Yer ve cismin uzamı ayrımlı değildir.²⁴Boşluğun reddi konusunda Descartes, Aristoteles²⁵ aynı fikirdedir dolayısıyla ikisine göre de evren doludur birinde sonlu bir doluluk diğesinde sınırsız bir doluluk söz konusudur.

Descartes, sınırsız evrende sonsuz bölünebilen maddenin sonsuz hareketini ele aldığı felsefesinde hareketi, bir yerden başka bir yere yapılan devinim olarak tanımlamakta ve bundan başka da hareket olmadığını belirtmektedir.²⁶ Cismin taşınmasını

Şunu çıkarmak zorundayız, aynı zamanda birlikte hareket eden tüm bir madde dairesinin ya da cisimler halkasının olması gerekir; şöyle ki bir cisim, kendisini iten bir cisme kendi yerini bırakınca, başka bir cismin yerine, o başka cisim de yine başka bir cismin yerini alır ve böylece bu süreç sonucu cisme değin sürer, o da aynı zamanda birincinin bıraktığı yeri doldurur. Bu hareketi tam bir dairede kolayca anlıyoruz.²⁷

şeklinde açıklamaktadır. Yer değiştirmeden başka hareketleri kabul eden Aristoteles'tir. Aristoteles'te değişme (*metabole*), oluş-bozuluş (*genesis-phthora*) ve hareket (*kinesis*) (hareket) olmak üzere iki farklı hareket türüne ayrılır. Genesis- phthora cevher bakımından değişmeyi imlerken *kinesis*, nicelik bakımından, nitelik bakımından ve yer bakımından değime olmak üzere üç tür değişmeyi imlemektedir.²⁸ Hareket olanak halindeki nesnenin etkinlik açısından kendini gerçekleştirmesidir.²⁹ Aristoteles sisteminde hareketin kaynağını “devinen nesnelerin ilkesi, kendi kendini devindiren devinenler içindedir, ama hepsinin ilkesi devimsiz olan bir şey” hareket etmeyen

²⁴ Descartes, *Felsefe*, 2/13, s. 123.

²⁵ Aristoteles'e göre boşluk olması durumunda cisim devinemez. Aristoteles, *Fizik*, 214b 30, s.169.

²⁶ Descartes, *Felsefe*, 2/20, s. 127.

²⁷ Descartes, *Felsefe*, 2/29, s. 133-34.

²⁸ Aristoteles, *Fizik*, 200b 30-35, s. 95.

²⁹ Aristoteles, *Fizik*, 201a 25-30, s.97.

hareket ettiricidir.³⁰ Descartes ise hareketin kaynağı sorununu ilk neden olarak Tanrı'yı işaret etmekle açıklamaya çalışmıştır ve hareketin dairesel olarak sınırsız bir şekilde devam etmesinin niceliksel anlamda bir hareket korunumu olduğunu da eklemektedir:

İlk nedenin Tanrı'dan başka bir şey olmadığı açıktır sanırım. Tanrı, büyük gücüyle özdeği hareket ve durgunluğu saklar. Zira her ne kadar hareket, hareket eden özdeğin bölümlerinden bir kısmında bazen az, bazen çok bulunsa da onda hiçbir zaman artıp eksiltmeyen belli nicelikte bir hareket vardır.³¹

Descartes'ın sisteminde Tanrı ilk neden olarak hareketi başlatandır ancak hareketin devamı Tanrı'nın koyduğu kurallara göre hareket etmeye devam etmektedir. Dolayısıyla sürekli hareketin yaratıldığı bir durum yerine hiç değişmeyen Tanrının değişmeyen yasalarına göre hareket eden bir evren anlayışı hakimdir:

Böylece, mademki yaratıcı, özdeğin birçok bölümünü harekete geçirmiştir ve yine onların tümünü aynı biçimde ve yarattığı zaman bağladığı yasalarla sürdürmektedir. Öyleyse bu özdek de eşit ya da durağan bir hareket gücünü durmadan saklamaktadır.³²

Descartes üç temel yasadaki bahsetmektedir, ilki Galileo'nun etkisi olduğu açık olan eylemsizlik ilkesidir. Bu yasaya göre hareket eden bir cisim onu başka bir şey değiştirmedeği sürece bulunduğu durumda kalmasıdır. Cisim hareket ediyorsa hareket etmeye, duruyorsa da durmaya devam etmektedir. Buna karşın Descartes doğanın ilkesinin böyle olmasına rağmen bulunduğumuz yerin yapısı ve duyularımızla algılayamadığımız nedenlerden ötürü böyle olmadığını düşünmeye yatkındır. İkinci yasa, cisim ve bölümleri sadece doğru çizgiler doğrultusunda hareket etmektedir. Buna karşın bölümler sürekli farklı şeylerle karşılaştığı için eğri çizgiler çiziyor gözükmektedir. Üçüncü yasa ise hareket eden cisim başka bir cisimle karşılaştığında doğrusal olarak hareket etmek için diğer cisimden daha az direnç gününe sahipse hareketinden bir şey yitirmeksizin yönünü değiştirmektedir, eğer daha çok güce sahipse

³⁰Aristoteles, *Fizik*, 259a 30-35, s. 379.

³¹Descartes, *Felsefe*, 2/32, s. 136.

³²Descartes, *Felsefe* 2/32, s. 137.

onu kendi hareketine katmakta ve bunu yaparken de kendi hareketinden yitirmektedir.³³ Bu yasalara ek olarak Descartes deneyimlerde tam tersi gözükmesine karşın aklın çıkarımlarına güvenmeye davet ettiği yedi hareket kuralını³⁴ açıklamaktadır.

Descartes, uzam ve maddeyi özdeş olarak kabul etmesine karşın fiziksel olan özünde cisimsel (*corporeal*) değildir ve fiziksel olan matematiksel olandır. Descartes, Cusanus'tan itibaren ileri sürülen matematiksel olan ile fiziksel olanın özdeşliğini kabul etmektedir. Res extensa ve res cogitans ayırımına son olarak dönecek olursak tamamen iki tözün farklı olduğunu göstermez, matematiksel alanda her ikisi de birleşmektedir. Res extensa matematiksel varlığı bilfiil uzamda, res cognitansın matematiksel varlığı ise entelektüel olarak ortaya çıkmaktadır. Lecler'e göre, Descartes'ın sistemindeki zorluklar düalizmin ileri sürülmesinden ötede matematiksel olan fiziksel nesnenin ve hareketinin açıklanmasında ortaya çıkmaktadır.³⁵

³³Descartes, *Felsefe*, 2/33-36, s. 137-140.

³⁴ Hareket Kuralları:

1. Kural: B ve C cisimleri eşit büyüklükte ve eşit hızdadırlar, bu iki cisim çarpıştığında hızlarından bir şey kaybetmeden geldikleri yöne doğru geri gidecek ve sıçrayacaklardır.
2. Kural: B, az da olsa C'den büyük olunca ve aynı hızla birbirleriyle karşılaşınca, bu kez yalnız C geldiği yöne doğru geri sıçrar ve sonra ikisi bir arada aynı yönde hareketine devam ederler. Zira, B, C'den daha çok güze sahip olduğu için C tarafından itilemez.
3. Kural: Eğer B ve C cisimleri aynı büyüklükteyseler, ancak B, C'den biraz daha hızlıysa, bu durumda, birbirleriyle karşılaştıktan sonra, C yalnız geri sıçramakla kalmaz, ikisi birlikte C'nin geldiği yöne doğru giderler; aynı zamanda B'nin fazla hızının yarısını da ona vermesi gerekir; çünkü C onun önünde olduğu için B'den daha hızlı gidemez.
4. Kural: Eğer C cismi B'den büyükse ve C görünürde durağansa, B hızla C'ye çarptığında ne kadar hızlı gelirse gelsin onu hareket ettiremez. Eğer C, B'nin iki katı olsun ve B otuz hızla C ye çarptığında B hızın yirmisini C'ye vermek zorundadır. Ve C yirmi derece hızı almaya on kere direnç gösterecektir. ... Böylece, B, C'yi harekete geçirme gücüne hiçbir zaman sahip olmayacaktır.
5. Kural: Eğer C cismi, B'den küçük olduğu zaman, B'nin hızının derecesinin önemli olmadığı açıktır yani C'yi itebilecektir. B'nin itmeyi gerçekleştirebilmesi ve aynı hızla gidebilmek için ise C'ye hareketinin gerekli kısmını vermesi gerekmektedir.
6. Kural: Eğer C cismi durağan ve B cismi hızla ona çarparsa, hızının bir kısmını ona verecek ve geri sıçrayacaktır. Diyelim B cisminin dört derece hızı var diyelim bir derecesini C'ye verecek ve üç derece hızıyla da geri sıçrayacaktır.
7. Eğer B ve C aynı yöne gidiyorlarsa ve B, C'ye yetişecek biçimde, C, B'den daha yavaş gidiyorsa, bu durumda, B hızının bir kısmını C'ye verecektir ve onu kendi önünde itecektir. Ona bir şey vermeden, geldiği yöne doğru tüm hareketiyle geri sıçraması da olasıdır.

³⁵ Leclerc, *Nature*, s. 194-96.

II. ATOMCULARIN İTİRAZLARI ve SPIRIT / FIELD (ALAN) KAVRAMININ DEVREYE GİRİŞİ

17. yüzyıl fiziği hareketin ele alındığı fiziktir ve genel olarak fiziksel olanı cisimsel olanla tanımlamaktadır. Buna karşın Descartes'te daha önce de ele aldığımız üzere fiziksel varlık cisimsel olanla değil matematiksel olan uzamla tanımlanmaktadır. Modern bilim hem hareketi hem de cisimlerin birbirine olan etkisini ele alıyordu bu nedenle cismin matematiksel uzamla tanımlanması fikri yerini cismin sertliği ve içine girilmezlik özelliklerinin kabul edilmesine yol açtı ve Gassendi doktrini kabul edildi.³⁶ Henry More (1614-1687), ilk dönemler Descartes taraftarıyken daha sonra onu birçok hususta eleştiren bir konuma geçmiştir. İlk eleştirisi uzamsız ruhun, uzamlı bir nesneyle nasıl ilişki kurduğu üzerineydi. More bu problemin çözümünü ruhun da uzamlı olduğunu kabul etmek gerektirdiğini ileri sürdü. Doğanın ruhu bir ve tektir, bütün maddelerin hareket ilkesini oluşturmaktadır. Descartes'in uzam ve cismi özdeş kabul etmesini reddedip uzam kavramının daha geniş bir anlama sahip olduğu için cismi duyu üzerinden tanımlama yoluna gitmektedir. Descartes'te matematiksel yapıya sahip madde fikrini, More da özdeklerin birbirine değmemeleri üzerinden ve uzam ve cismin ayrıklığı üzerinden içine girilmezlik niteliği maddenin özelliği olarak kabul etmektedir. More ruhu uzamsal olarak kabul etmesine karşın cismin özelliği olan içine girilmezlik ruh için geçerli değildir.³⁷

Ruhun da cisim gibi uzamsal olması gerektiği düşüncesi doğanın ruhunun bir ve tek olmasıyla cisim olmasa da doğanın varlığından bahsedilebilme imkanını doğurmuştur. More'un uzam ve özdeğin ayrık şeyler olduğunu kabul etmesi, boşluk fikrini de tekrar ele almasına neden oldu. Ona göre boş uzaydan bahsedebiliriz ancak bu mutlak bir boşluk değildir. More Tanrıyı da melekler gibi uzamlı kabul ettiği için boşluğu dolduranın her yerde olan Tanrının uzamıyla dolu olduğunu belirtmekte ve böylece boşluk problemine çözüm getirmektedir. Doğanın ruhu hareketsizdir ve

³⁶ Leclerc, *Nature*, s. 198.

³⁷ Koyre, *Sonsuz*, s. 90.

sonsuzdur. Hareketsiz olan ruh hareket içinde meydana gelir.³⁸ Yeni-Platonist More atomcuların bir savunucu olmamasına karşın atomcu gelenekten oldukça etkilenmiştir.³⁹

More ve Descartes arasında mektuplaşmalar gerçekleşir ve bu yazışmalarda Descartes cismi duyularla tanımlamanın ancak bir yanılgıdan ibaret olduğunu ifade etmektedir. Cisim oldukça küçük parçalara ayrıldığında duyumsanamaz bu nedenle cisme içine girilmezlik özelliği eklemek anlamsızdır çünkü Descartes'e göre içine girilmezlik cismin yani uzamın bir sonucudur.⁴⁰ Aristoteles ve Descartes'te uzam bağımsız bir varlığa sahip değildir. Aristoteles'te uzam *ousia*'dan bağımsız düşünülemezken Descartes'te uzam ve cisim bir ve aynı şeylerdir. More ise uzamı fiziksel olandan ayırmakta ve uzamı hareketsiz ve sonsuz olarak ele almaktadır. Her yerde olan sonsuz uzamlı ruh anlayışı modern dönemin son aşamasını oluşturan Newton için temel oluşturmaktadır.⁴¹

More ruhsal uzanım ve cisimsel uzanım arasında bir ontolojik ayrımı ileri sürmekteydi ancak Descartes'i eleştirdiği düalizmle tekrar karşı karşıya kalmaktadır ve matematiksel ve fiziksel olan arasındaki ilişkiyi açıklarken de maddenin bölünebileceğini ancak bunun sonsuza kadar olmayacağı şeklinde çözümlemeye başvurmaktadır. Felsefi açıdan More'dan etkilenen Newton da matematiksel olan ile fiziksel olanın ontolojik ayrımını savunmuştur. Bununla birlikte Bruno ve Descartes gibi sonsuz uzamlı bir varlığın bir, homojen ve sonsuz olduğunu düşünmeyi sürdürmüştür. Bu varlık Bruno'ya göre fiziksel olandan türemiştir, Descartes'a göre fiziksel olanla özdeştir, Newton'a göre ise bu varlık ruhsaldır ve maddi olandan farklıdır.⁴²

Newton ile doğayı anlamak için ortaya konan temel kavramların nicel bir şekilde tanımlanmasına şahitlik ediyoruz. Newton, *Philosophia Naturalis Principia Mathematica* (Doğa Felsefesinin Matematiksel Temelleri) eserinin Tanımlar bölümünde

³⁸ Leclerc, *Nature*, s. 202.

³⁹ Koyre, *Sonsuz*, s. 91.

⁴⁰ Koyre, *Sonsuz*, s. 93.

⁴¹ Leclerc, *Nature*, s. 206.

⁴² Leclerc, *Nature*, s. 210.

madde miktarının tanımını vererek başlamaktadır. “Madde miktarı yoğunluk ve hacmin birleşimiyle ortaya çıkan maddenin bir ölçüsüdür”.⁴³Bununla birlikte hareketinde miktarının tanımını verir ve içsel kuvvet, etkileyen kuvvet, merkezci çekim kuvveti gibi kuvvetlerin de tanımlarını vermektedir.

Newton’a göre, uzay, zaman, yer ve hareket kavramlarını herkesin biliyor olmasına rağmen peşin hükümler doğmasına neden olacak duyum nesneleri üzerinden anlaşılmaktadırlar. Bu önyargıları ortadan kaldırmak için ise mutlak ve görelî, gerçeklik ve görünüş, matematiksel ve alışıldık olan olarak bir ayrıma gitmektedir. Bununla birlikte mutlak, gerçek ve matematiği özdeşleştirmektedir.

Mutlak, gerçek ve matematiksel zaman, kendiliğinden ve kendi doğallığından, dışsal hiçbir şeyle ilişkisi olmaksızın homojen bir şekilde akar ve diğer ismi de süredir.

Görelî, görünürde ve alışıldık olan zaman ise sürenin duyumsal ve dışsal ölçümüdür. Bu tarz bir ölçüm- örneğin bir saat, bir gün, bir ay, bir yıl-yaygın olarak gerçek zamanın yerine kullanılır.⁴⁴

Mutlak zaman kavramıyla Newton, zamanı devinimin ölçüsü olarak tanımlamaktan çıkarmakta ve kendi başına bir nicelik olarak ele almaktadır. Bu tanımlama hem Aristoteles’in hareketinin ölçüsü zamanından hem de Descartes’in cisimsel dünyaya ait olan zaman kavramından oldukça farklıdır. Uzay için de mutlak ve görelî ayrımını yapmıştır:

Mutlak uzay, dışsal hiçbir şeyle ilişkisi olmayan kendi doğası daima homojen ve hareketsizdir. Görelî uzay ise bu mutlak uzayın hareket edebilir ölçüsü ya da boyutudur.⁴⁵

Newton’un mutlak uzayı, Descartes’in cisimlerle özdeş gördüğü uzay değildir. Descartes’in uzayı ancak görelî olandır. Newton mutlak ve görelî uzayın tür ve

⁴³ Isaac Newton, *The Principia*, çev. I. Bernard Cohen ve Anne Whitman, (İngiltere: University of California Press, 1999), s. 403.

⁴⁴ Newton, *The Principia*, s. 408.

⁴⁵ Newton, *The Principia*, s. 408-409.

büyükölük açısından aynı olduklarını ancak sayısal olarak aynı olmadığını ekler. Descartes'in uzayı bir nevi mutlak uzayın içerisinde hareket etmektedir.⁴⁶

Newton'da yer kavramı cisimle hareket eden bir yapı değildir ona göre bir cismin tuttuğı uzayın parçasıdır ve cismin konumu ya da dış yüzeyi de değildir. Uzayına göre yer mutlak ya da görelî olabilmektedir. Uzayın mutlak ve görelî ayrımı hareketin de mutlak ve görelî olarak ayrılmasını gerektirmektedir.

Mutlak hareket, bir cismin konumunun bir mutlak uzaydan diğerine değişmesidir, görelî hareket ise bir görelî yerden diğerine konum değişikliğidir.⁴⁷

Sonuç olarak Newton, Descartes ile sonsuz uzamsal ve matematiksel cisim noktasında benzerlik göstermelerine rağmen aralarındaki temel fark, Descartes'in mutlak uzamsal varlığı fiziksel olanla özdeş olarak kabul ederken Newton maddî olanı cisimle özdeş görüp, sonsuz uzamsal varlığı ruhsal olanla özdeşleştirmiştir.⁴⁸

Newton'un sisteminde uzayın ve cismin farklı şeyler olduğu açıktır ve hareketten ve esneklikten bahsedebilmek için boşluğu kabul eder. Newton'da Bruno ve Kepler gibi esir (*ether*) fikrine başvurmuştur ancak onun esiri ince ve esnek bir tözdür ve uzayı tamamen doldurmaz. Newton cismin tanecikli bir yapısı olduğunu kabul ederek atomculuk anlayışını da savunmaktadır.⁴⁹

Newton'un cisminin ya da maddesinin özsel özelliklerini *Optik* kitabının 31. Query'sinde "katı, ağır(kütleli), sert, içine girilmez, hareket eden parçalar vb." olarak açıklamakta ve Tanrı'nın başlangıçta maddeye böyle biçim verdiğinin düşünülebileceğinden bahsetmektedir.⁵⁰ Buna karşın yer çekimi kuvvetini, içsel kuvveti (*inertia/eylemsizlik*) cismin özsel özellikleri arasında kabul etmemektedir. Descartes,

⁴⁶ Koyre, *Sonsuz*, s. 126.

⁴⁷ Newton, *The Principia*, s. 409.

⁴⁸ Leclerc, *Nature*, s. 210.

⁴⁹ Koyre, *Sonsuz*, s. 131-33.

⁵⁰ Newton, *Optics*, (New York: Dover Publications, 1952), s. 400.

Huygens (1629-1695) ve More'da olduğu gibi cismin kendiliğinden uzaktan etki edebileceğini Newton da kabul etmez.⁵¹

III. KANT'IN İTİCİ VE ÇEKİCİ KUVVETLER ÜZERİNDEN CİSMİ KURMA DENEMESİ

Kopernik devrimiyle başlayıp Newton'ın *Principia*'sı ile taçlanan bilimsel dönüşümüyle I. Kant (1724-1804), nesne ve kavramsal dünyaların tekabül yetlerini hem rasyonalist hem de empirist felsefelerden etkilenecek ve aynı zamanda onlardan sıyrılarak transandantal bir felsefe projesi geliştirdi. Bu projede nesneler bize oldukları gibi görünmemekte teorik aklın onları kurduğu şekliyle ancak bilinilebilmektedirler. Kant, duyu yoluyla aldığımız veriyi; uzay, zaman saf görüleri ve nicelik, nitelik, bağıntı ve modalite kategorileri altında biçimlenen fenomene nesne demektedir. Dolayısıyla Kant'ın felsefesinde hem duyu yetisi hem de anlama yetisi nesnenin kurulumunda rol almaktadır. Bu şekilde kurulan nesne gerçekte öyle midir sorusunun cevabı Kant için ulaşılamazdır.⁵² Kant felsefesi, Yunanca sınır çizmek anlamındaki kritik kelimesini hareketle epistemoloji ve ontolojiye, numen ve fenomen ayrımı yaparak yeni sınırlar çizme yoluna gitmektedir.

Kant kritik felsefesinde birçok ayrım yapmaktadır bunlardan biri de a priori ve a posteriori ayrımıdır. Bu ayrım felsefe tarihinde analitik önermeler a priori, sentetik önermeler de a posteriori olmaları yönünde bir ayrım kalıbına sahipti ancak Kant a priori sentetik önermelerin kabulüyle yeni bir bilgi türü ortaya koymuş oldu: a priori sentetik önermeler. A priori olması yönüyle evrensel, zorunlu olurken sentetik olması yönüyle genişleyen bilgileri içermektedir. Arı matematik, geometri, fizik ve metafizik sentetik a priori önermelere sahip evrensel ve zorunlu bilgiler sunmaktadırlar⁵³ ve sentetik bilgilerin a priori olarak türetildiği saf görünümün biçimleri ise uzay ve zamandır ona göre.

⁵¹ Koyre, *Sonsuz*, s. 136.

⁵² Doğan Özlem, *Kant Üstüne Yazılar*, (İstanbul, Notos Kitap Yayınevi, 2015), s. 17.

⁵³ Kant, *Prolegomena*, çev. Aziz Yardımlı, (İstanbul: İdea Yayınları, 2015), s. 20-23.

Kant'ta fizik, matematik, geometri gibi bilimlerin sentetik a priori bilgiler sunması yönündeki ortaklığa rağmen Kant matematik ve doğa bilimleri arasındaki farkı da Prolegomena'da vurgulamaktadır:

Arı Matematiğin ve arı Doğa Biliminin kendi güvenlik ve pekinlikleri uğruna daha önce her ikisi için ortaya çıkardığımız türden tündengeline gereksinimleri yoktu. Çünkü birincisi kendi kanıtı üzerine dayanırken, ikincisi ise, anlağın arı kaynaklarından doğmasına karşın, gene de deneyim ve onun yaygın doğrulaması tarafından desteklenir. Doğa Bilimi deneyimin tanıklığını bütünüyle reddedemez ve ondan vazgeçemez, çünkü (doğal) felsefe olarak tüm pekinliğine karşın, gene de matematiğe denk olamaz...⁵⁴

Böylece Kant matematik ve fizik arasındaki ayrımı vurgulayarak matematik-mekanik ve metafizik-dinamik ayrımın da metafizik-dinamik ilişkisi içinde doğa bilimlerini okuyacağının zemini sunmuş bulunmaktadır diyebiliriz. Bu bölümün temel kaynağı olan *Doğa Biliminin Metafiziksel Temelleri* adlı eserde de bu yönde incelemesini sürdürmektedir. Kant bu eserinde fiziksel etkileşim ve madde anlayışını kuvvetler üzerinden kurarak dinamik yönü metafiziksel olarak temellendirmeyi hedeflemektedir.

İlk olarak Kant'ın çalışmalarına eğilecek olursak onun doğa bilimleriyle hayatının her döneminde ilgilenmiş olduğu gözümüzden kaçmayacaktır. Kritik öncesinde *Canlı Kuvvetlerin Doğru Tahmini Üzerine Düşünceler* (1746), *Metafiziksel Bilişin İlk İlkeleri Üzerine Yeni Bir İzah* (1755), *Evrensel Doğa Tarihi ve Gökler Kuramı* (1755) ve *Fiziksel Monodoloji* (1756) gibi eserlerle fizik anlayışını kurmaya çalışmıştır. Özellikle *Fiziksel Monodoloji*'de Leibniz'in büyük etkisi kendini göstermektedir. Kritik döneme ait fizik anlayışını ele alan *Doğa Biliminin Metafiziksel Temelleri* adlı eseri ise 1786'da yayınlandı ancak kritik dönemindeki diğer eserleri kadar bilinen bir eser değildir. Bu eserinde Kant, Newton ve Newton sonrası bilimsel gelişmelerin felsefi temellendirmesini sunmaya çalışmaktadır. Kant kritik döneminin ilk eseri *Saf Aklın Eleştirisi*'nin (1781) ilk basımı yapıldıktan ve *Prolegomena* (1783), *Ahlak Metafiziğinin Temeli* (1785) ve *Saf Aklın Eleştirisi*'nin (1781) ikinci basımı yazılmadan önce *Doğa Biliminin Metafiziksel Temelleri* adlı eserini yazmıştır. Bu da

⁵⁴ Kant, *Prolegomena*, s. 92.

gösteriyor ki Kant'ın madde anlayışını ortaya koymak için faydalanacağımız *Doğa Bilimin Metafiziksel Temelleri* eseri Kant'ı ve kritik dönemi anlamak adına önemli bir noktadadır. Son olarak da ölümünden sonra 1793-1803 yılları arasındaki çalışmalarının bir kısmını içeren *Metafizik Temellerinden Fiziğe Geçiş*'in tamamlanmamış bir halini içermekte olan *Opus postumum* da anmak yerinde olacaktır. Metnimizde büyük ölçekte Metafizik Temeller ile sınırlandırmış bulunsak da *Opus Postumum* da başvurduğumuz bir nokta olacaktır.

Hem *Doğa Biliminin Metafiziksel Temelleri*'de hem de kritik dönem öncesi bilimle ilgili yazdığı eserlerde bilim olarak etkilendiği eserlerden biri muhakkak Newton'ın *Principia* adlı eseridir. Bu eserin önsözünde doğanın materyal anlamının iki ilkesel yanı vardır; biri dışsal görüşümüzden gelen cisim doktrini diğeri ise içsel görüşümüzden gelen ruh doktrini. İlkesel olarak doğanın metafiziğini bu iki farklı şekilde yapabilmek mümkündür. Bu nokta da Kant genel ve özel metafizik ayrımına gitmekte ve gerçek bir bilim için cisimsel doğanın özel metafiziği ancak hizmet edebilmektedir çünkü cisimsel olan ancak deneyime konu olmaktadır.⁵⁵

Doğanın cisim doktrininde ancak matematik varsa gerçek bir bilim vardır. Kant'a göre çünkü doğa bilimin saf bir yanı olmalı ve doğal şeylerin a priori bilgisi üzerine kurulu olmalıdır. Ona göre doğanın, özel doğal şeylerin (ruh ya da cisim doktrini gibi) saf bir doktrinini ortaya koyabilmek ancak matematikle mümkündür. Kant, Leibniz ile fizik için metafiziksel temel gereklidir düşüncesini paylaşırken matematiğin öne çıkmasını Newton etkisinin bir sonucu olarak düşünebiliriz. Bu şartlar altında Kant'a göre kimya görüde a priori temsil edilemediği için ve tamamen deneysel olduğu için bilim değildir. Bu durum psikoloji söz konusu olunca daha olumsuz bir hal almaktadır çünkü ruhun deneysel çalışması imkandır çünkü içsel görüye dayanan fenomene ve kurallarına matematik uygulanmaz (süreklilik hariç). Bununla beraber geometri de içsel görünün nesnesine uygulanamaz. Sonuç olarak Kant'ın özellikle ruha

⁵⁵Kant, *Metaphysical Foundations of Natural Science*,
<https://www.earlymoderntexts.com/assets/pdfs/kant1786.pdf>, 470-478, s. 3-7.

uygulanan doğa biliminin metafiziksel temelleri yoktur. Bu nedenle Kant doğa bilimi genel adını, cismin doktrininden konuşmak için kullanmaktadır.⁵⁶

Kant'ın *Doğa Biliminin Metafiziksel Temelleri* genel olarak tanımlayacak olursak: eser dört bölüm içermektedir ve her bölümün ilk tanımı olan madde sırasıyla her kategoriye (nitelik, nicelik, ilişki ve modalite) göre tekrar tanımlanmaktadır. İlk bölümünde yani *Fronomi*'de maddeyi uzayda hareket edebilen şey olarak tanımlamakta ve maddeyi nicelik kategorisiyle açıklanmaktadır. İkinci bölümü olan *Dinamikte* madde bir uzayı doldurduğu müddetçe hareket edebilir ve nitelik kategorisiyle ilişkilendirilmektedir. Üçüncü bölüm olan *Mekanikte*, madde hareket ettirici bir kuvvete sahip olduğu müddetçe hareket edebilir ve bağıntı kategorisiyle açıklanmaktadır. Son bölüm olan *Fenomenolojide* ise madde deneyim nesnesi olabildiği müddetçe hareket edebilir ve modalite kategorisi üzerinden açıklanmaktadır. *Metafiziksel Temeller*, tanımların, önerme ve kanıtların yer aldığı oldukça yoğun anlatıma sahip bir metindir.

Kant eserinin ilk bölümünde maddeyi hareket edebilirliği üzerinden tanımlarken 5 tanım ve bu tanımların açıklamaları, bir ilke ve bir de önermeden oluşan bir yapıda ele almaktadır. Kant ilk tanımda bir şeyi ancak ve ancak hareket edebilir olduğu müddetçe materyal olduğunu belirtmekte ve herhangi bir uzay hareket ediyorsa da onu materyal ya da görelî uzay olarak adlandırmaktadır. Maddeyi hareket üzerinden ele almakta ve ebatı önemli görememekte ve içsel bütün özellikleri *fronimi* açıklamasında dışarıda tutmaktadır. Maddenin hızı ve yönüyle ilgili nicelikler üzerinden incelemektedir. Bu noktada yön kavramı vurgu yapmakta ve oldukça önemli görmektedir çünkü 180 derecelik dönüşlerde yön de değişmektedir.

Kant birinci tanımı açıklarken maddenin bir yüklem olmadığını vurgulamakta ve dilden metafiziğe geçişi eleştirmektedir ve madde dışsal duyuların her nesneye uygulanarak açıklanması ona göre maddenin metafiziksel tanımıdır. Madde tamamıyla a priori olarak verilmiş bir şey değildir bu nedenle uzay algılanabilir ve deneyimde kurulabilir olmalıdır. Bu uzaya deneysel uzay denmektedir. Eğer böyle bir uzay

⁵⁶ Kant, *Metaphysical Foundation*, 471, s. 3.

materyal ve kendi kendine hareket edebiliyorsa bütün hareket, deneyimin nesnesidir ve görelidir. Eğer uzay hareket etmediği için materyal değilse buna mutlak uzay denmektedir ve mutlak uzayı algılayamadığı için aslında o bir hiç konumundadır. Buna karşın Kant'a göre deneyim imkânı için mutlak uzayı varsaymamız gerekmektedir. Dolayısıyla bu varsaymaya karşın Kant'ın uzayı görelî uzaydır.⁵⁷ Newton mutlak/gerçek hareketi temellendirmek için mutlak bir uzayın varlığını kabul etmekteydi ancak Kant şeyleri düşünmemize yardım ettiği için mutlak uzaydan bahsetmekte olduğunu belirtmektedir.

Kant, “Bir şeyin hareketi, ona verilen yerle dışsal ilişkisinin değişmesidir” şeklinde hareketi tanımlarken maddeyi, hareket üzerinden tanımlamasının sebebinin maddeyi uzamla özdeş olarak açıklayan kartezyenci görüşten kaçınmak olduğunu belirtmektedir. Bundan dolayı maddeyi nokta olarak düşünmenin faydalı olacağını düşünmektedir. Kant yer değişme olmadan da hareketin olabileceğini belirtmekte ve dünyanın kendi etrafında dönmesini örnek göstermektedir ve bu durumda sadece yön değişmektedir.

Kant ikinci açıklamasında ise hareketi sınıflandırmaya tabi tutmaktadır. Temelde iki sınıfa ayrılır hareket: 1) İlerleyen hareketler, uzayını genişletir; kendi etraflarında dönmeyen doğrusal hareket ve eğimli hareket. 2) Rotatif hareketler, ilerlemeyen ve sınırlı bir uzaya ya da kendi etraflarında dönen hareketler. Bu hareketleri de ikiye ayırmaktadır: i) gezegenlerin güneş etrafında dönme hareketi, yani dairesel hareketler. ii) Osilatörsel hareketler, örneğin sarkacın yaptığı hareket.

Kant ikinci tanımın üçüncü açıklamasında hız ve yön dışında maddenin niteliklerini dışarda tuttuğunu tekrar vurgulamaktadır. Hız ve yön faktörlerini açıklamayı hedeflediğini ancak yön söz konusu olduğunda belli sınırlamaların olduğundan bahsetmektedir. Bu noktada şekli hatta boyutu eşit ancak birinin başı sağa diğerinin ki sola doğru olan iki salyangozu düşünmemizi ister. Bütün özellikler açısından özdeş gözükken şeyler olmalarına rağmen yönlerinin farklı olması dolayısıyla

⁵⁷Kant, *Metaphysical Foundations*, 482, s.8.

özdeş değillerdir (yön kavramı ikinci bölümde kuantum dünyasının zayıf kuvvetine dair araştırmalarda tekrar karşımıza çıkacaktır). Yönü açıklamadaki sınırlamanın sebebi yönün içsel bir farklılık olması ve kesin bir yolla bunu ortaya koymanın güç olmasında yatmaktadır. İki dairesel hareket aynı olsa da yönlerinin farklı olmasıyla farklılık kazanmaktadırlar.

Üçüncü tanıma göre durma “aynı uzayda zaman alarak bulunmadır”. Kant aynı zamanda zaman alma kavramını da kullanmaktadır: “bir şey için zaman almak bir zaman boyunca aynı yerde bulunma demektir.” Hareket eden bir cisim çizginin her noktasında durmakta mıdır yoksa hareket mi etmektedir? Bu soruyu Kant osilatör hareket, doğrusal hareket ve yukarı aşağı hareket üzerinden incelemektedir. İlk olarak Osilatör harekete bakalım A noktasından B noktasına salınan bir sarkaç hiç durmadan mı A’dan B’ye, B’den de A’ya hareket etmektedir? Hayır, A’dan B’ye salındığında B’de kısa süreli olarak durmakta ve sonra A’ya ulaşmaktadır ve bu durum AB ve BA arasındaki mesafenin eşit olmadığını göstermektedir. Şimdi ise doğrusal olan bir hareket düşünelim ve A, B noktalarına bir de C noktasını ekleyelim. Cisim doğrusal olarak A’dan B’ye geldiğinde durur mu? Hayır, çünkü doğrusal hareketten bahsediyoruz ve sürekli hareket söz konusu, cisim C’ye doğru yol alır. Üçüncü hareket türü ise yukarı-aşağı hareketidir. Bir cisim A’dan yukarı B’ye doğru hareket ettiğinde B’de durur mu? Bunun cevabı yukarı aşağı hareketinin B noktasında durduğu şeklindedir. Yer çekimi dolayısıyla aşağıya doğru hareket gerçekleşecektir. Yerçekiminden dolayı durma anlık olarak kaybolur. Bundan dolayı Kant’a göre durma, “hareket yoksunluğu” demek değildir, çünkü böyle bir tanım negatiftir ve inşa edilemez. Durma aynı yerde zaman alarak bulunmak olarak tanımlanmalıdır. Duran şey sonsuz küçüklükte hıza sahiptir. Bu ancak matematiğin doğa bilimine uygulanması ile kullanılabilir.

Kant dördüncü tanımda ise iki ya da daha fazla hareketin tek bir hareket edebilir şey de birleşmesi sonucunda görüde a priori sunması sonucunda bileşik hareketin kurulmasından söz etmektedir. Fronomi, hareketlerin hızıyla, yönüyle ve bileşkeleriyle ilgilidir. Hareketlerin nasıl fiziksel nedenler aracılığıyla (kuvvetler vb.) birbirine bağlandığını genel olarak bileşikliğin ilkesinin matematiksel olarak inşa edilene kadar açıklanamamaktadır. Hareket edebilen maddenin ilkesi:

Deneyimin nesnesi olan her hareket ya duran bir uzayda hareket eden bir cisim şeklinde ya da eşit hızda zıt yönde hareket eden bir uzayda duran bir cisim olarak görülebilir.⁵⁸

Hareket ancak hem cisim hem de uzay materyal olduğunda gerçekleşebilir. Mutlak uzay ise daha önce de belirttiği gibi materyal olmayan şeydir. Ancak materyal olan hareket ve durma özelliğine sahiptir.

Fronominin son tanımı iki ya da daha fazla hareketle özdeş olan bir noktanın hareketinin temsili olan bileşik harekettir. Kant maddeyi nokta olarak almasının sadece uzayın geometrisiyle ilgilenmediği anlamına gelmediğini aynı zamanda buna zamanı ve uzay boyunca noktaların hareketinin de eklendiği Fronomi sadece hareket miktarının saf bir doktrindir.

Kant'ın maddenin hareketiyle ilgili önermesinde mutlak uzayı deneyimde olmamasına rağmen düşünsel olarak sistemine dahil etmektedir. Bu öneriye göre tek bir noktanın hareket bileşkesi olarak iki hareketi, ikisinden birini mutlak uzayda gerçekleştiriyor olduğunu, diğerinin ise zıt yönde göreceli uzayın hareketine dayandığı şeklinde temsil ederek düşünmek mümkündür. Dolayısıyla Kant iki hareketten birini mutlak almayı önermektedir. Bütün hareketler iki hareketin bileşimine iner. Üç durum var 1) aynı yönde doğrusal hareket 2) zıt yönde doğrusal hareket 3) farklı çizgilerde bir hareketin diğerine açısı var.

Birinci durumda iki hareket, aynı çizgide ve yönde iki eşit hızda, uzayın iki farklı çizgisinde temsil edilmektedir. Bir doğrultudaki iki hızın eklenmesi görüsel olarak aynı uzayda bulunamaz. İkinci durumda aynı çizgide eşit hızlarda ancak zıt yönlerde olan iki hareketin hızını eklemeye çalıştığımızda sıfıra eşit olmalı yani durma hali. İkinci durumu tek bir uzay üzerinden düşünmek olanaksızdır. İlk durumda hızların eklenmesi mümkünken, ikincisinde iki zıt yönlü aynı hızdaki hareketin toplamı hareket yoksunluğu yani durma değildir. Üçüncü durumda ise verili bir noktanın verili bir

⁵⁸Kant, *Metaphysical Foundations*, 487, s.12.

açından oluşan iki eşit hıza sahip iki farklı yönde olan hareketlerin toplamını içermektedir. Bu durum modern vektör temsiline benzer özelliktedir. Bir noktadan çıkan iki vektör aynı noktadan paralel kenarın köşegeni olarak üçüncü bir vektör ortaya çıkmaktadır. Eğer iki vektör hızı temsil ediyorsa üçüncü vektör bu iki hızın toplamını temsil etmektedir. Kant’a göre iki eşit hızın bir cisimde birleşmesi ancak dışsal hareket ettirici bir kuvvetle olabilir. Üçüncü durumda tek uzaya referansla düşünülemez. Kuzey tarafından iten bir kuvvetle, batıdan iten bir kuvvetle hareket ettirilen cisim iki kuvvet arasında doğu-batı yönünde bir hareket üretirler. Ona göre bu mekaniksel bir inşadır, matematiksel inşa değildir çünkü matematiksel inşa hareketi neyin oluşturduğunu sadece görüsel olarak ele alır onun nasıl üretildiğiyle ilgilenmez.⁵⁹

Metafiziksel Temeller’in ikinci bölümünü Dinamik oluşturmaktadır ve Kant bu bölümde hareket eden maddeyi uzayı dolduran niteliği üzerinden açıklamaya çalışmaktadır. Bu bölüm aynı zamanda Kant’ın içine girilmezlik (*impenetrability*) kavramını nasıl anladığına dair bize fikir verecek bölümdür. Bölüm altı tanım ve kanıtlarıyla verilen sekiz önerme içermektedir. Maddenin uzayda belirli bir bölgeyi nasıl doldurabilmektedir? Bölümün sorunsalını oluşturmaktadır. Kant’a göre “madde bir uzayı dolduran ve hareket eden şeydir.” Bir uzayı doldurmak ise bir uzayda hareket etmek isteyen nesnenin diğer hareket edebilir nesneye direnç göstermesi demektir. Sözü edilen “uzay ise boş bir uzaydır”.

Kant’a göre uzay maddenin kendi varlığıyla dolan bir şey değildir, uzayı doldurmak ancak “özel hareket ettirici kuvvet” tarafından doldurulmalıdır ifadeleri ilk önermeyi oluşturmaktadır. Kuvvetten bahsettiğimizde özellikle uzanım konusuna değinmek gerekmektedir. Descartes, Newton ve Locke için uzanım maddenin özsel bir özelliği iken Leibniz uzayın sonsuzca bölünmesinin kabul edilmesinin cevherin basitliğine zarar verdiği düşüncesiyle eleştirmekte ve Newton ve Locke’u da uzayın sonsuz bölünmesini kabul ederken atom fikrini savunabiliyor olmaları noktasından eleştirisini sürdürmektedir. Uzamın anlaşılmasında sonsuz bölünebilirliğin ancak matematiksel bir yaklaşım sunduğunu metafiziksel bir boyut kazandırılması gerektiğini

⁵⁹Kant, *Metaphysical Foundations*, 494, s.17.

belirtmektedir. Bu metafiziksel boyut Leibniz’a göre kuvvet kavramıydı.⁶⁰ Kant bu kavramı korumakla beraber Newtoncu anlamda kuvvete yaklaşmayı da sürdürmektedir. Bu çerçevede kuvvet, hareketin bir sonucunu değil nedenini temsil etmektedir.

Kant, Lambert ve diğerleri olarak belirttiği grubun müphem bir kavram olan katılık kavramı üzerinden maddeyi uzayı dolduran şey olarak açıklamalarını reddetmektedir ve ona göre içine girilemezlik cisimler arasından dinamik ve nedensel bir ilişki olduğundan bir cismin katılık özelliği onun sabit bir özelliğini göstermektedir yani katılık, içsel ve sabit bir özelliği olduğu için bağıntısal, dinamik özelliğine sahip içine girilmezliği açıklayamaz bu yüzden atomist konum cismin bu önemli özelliğini açıklayamamaktadır.⁶¹ Buna karşın Kant uzayı doldurmayı açıklamak adına çekici kuvveti ve itme kuvveti ikinci tanımda vermektedir.

Çekici kuvvet, maddenin bir bölümü aracılığıyla diğer bölümünün ona doğru hareketinin sebebi olabilecek hareket ettirici kuvvettir.
İtme kuvveti, maddenin bir bölümünün diğer bölümünü uzaklaştırdığı hareket ettirici kuvvet.⁶²

Kant, *Fiziksel Monadoloji* (1756) eserinde de maddeyi çekme ve itme kuvvetlerinin aracılığıyla uzayı dolduran fiziksel noktalardan oluştuğunu belirtmektedir ve Leibniz etkisi olduğunun açık olduğu metafiziksel düşüncenin sonucu olarak monadlar basit tözler olarak tanımlamaktadır. Buna karşın *Metafiziksel Temeller* önerme 4’te madde sonsuzca bölünebilmektedir. Maddenin bölünemez noktalardan oluştuğunu savunan monadistlerin uzayın matematiksel olarak sonsuza bölünebileceğini ve bunun fiziksel olarak da sonsuza bölünebileceğini ve bölünen her bir parçanın materyal bir töz olduğu kanıtıyla görüşlerini değiştirmektedir.⁶³ Kant’a göre bölünemeyen cevher fikri a priori bir açıklaması getirilemediğinden mümkün değildir. Böylece Kant, klasik cevher anlayışından da uzaklamıştır.

⁶⁰Eric Watkins, “Kant on Extension and Force: Critical Appropriation of Leibniz and Newton”, Wolfgang Lefevre(ed.), *Philosophy and Science in The Eighteenth Century Between Leibniz, Newton and Kant*, (Boston: Springer,2001), s. 113-114.

⁶¹Watkins, “Kant on Extension and Force”, s. 118.

⁶²Kant, *Metaphysical Foundations*, 498, s.20.

⁶³Kant, *Metaphysical Foundations*, 504, s.24.

Leibniz ve Kant'ın kuvvet kavramına verdiği anlamları incelemek faydalı olacaktır. Kuvvet Leibniz'a göre durumun değişmesiyle bil fiil olmanın ilkesidir ve durumun değişiminde neden ve etkidir. Leibniz, kuvvetleri aktif ve pasif kuvvetler, birincil kuvvetler ve ikincil kuvvetler, yaşayan ve ölü kuvvetler olarak ayırmaktadır. İkincil aktif kuvvet bir cismin hızına ve ivmesine neden olurken, ikincil pasif kuvvet ise bir cismin direncine, içine girilmezliğine ve uzamına neden olmaktadır. Birincil aktif kuvvet bir cevherin fiili, özdeşliği ve birliğinden sorumluyken birincil pasif kuvvet cevherin hareketsizliğinden sorumlu olmaktadır. Bununla birlikte fizikte kapsanan kuvvetler metafiziksel bir temele dayandırılır. İkincil kuvvetler cisimlerin temel fiziksel özelliklerinden (hız, uzam, içine girilmezlik) doğrudan sorumludur ancak ikincil kuvvetler birincil kuvvetlere dayanmaktadır. Dolayısıyla bir cismin temel fiziksel özellikleri cevherin birincil kuvvetlerine dayanmaktadır. Leibniz'a göre birincil kuvvetler, cevherin temel metafiziksel bileşenleridir. Birincil aktif kuvveti bir cevherin cevheresel formuna yani ruhuna denk gelmektedir.⁶⁴ Kant fiziğin metafiziğe duyduğu ihtiyaç konusunda katılmakla beraber Leibniz'ın basit monadlarını reddettiğini buna karşın cevherlerin var olduğuna katılmakta ve bu cevherlerin nedensel güçleri ya da kuvvetlerinin bir cevherin özelliklerinin değişmesinde etkili olduğuna katılmayı sürdürmektedir.

Metafiziksel Temeller'e geri dönecek olursak, Dinamik bölümü önerme 2 de itici kuvvetlerin sonsuz dereceler kabul edebileceğini belirtmektedir. İtici kuvvet bir anlamda genişleme kuvvetidir ve “maddenin bu genişleme kuvveti elastisite olarak adlandırılmaktadır”. Uzayı doldurma bütün maddelerin özsel bir özelliği olduğu içinde Kant bütün maddelerin aynı zamanda elastisiteye sahip olduğunu da belirtmektedir.⁶⁵

Uzayın sonsuz bölünmesini ve uzamı cismin özsel özelliği olarak kabul etmesine karşın ne kuvvetleri ne de katılığı kabul etmektedir ve bu nedenle bir cisim diğer bir cismin içine neden girilemez olduğunu açıklayamadığını hatırlayalım. Newton'un mutlak uzay, zaman, hareket anlayışı içine girilmezlikte de maddenin sertliği üzerinden mutlak bir durumu işaret etmekteydi. Kant'a göre ise madde sonsuza

⁶⁴Watkins, Kant on Extension and Force, s. 119.

⁶⁵Kant, *Metaphysical Foundations*, 500, s.21.

kadar sıkıştırılabilse de içine girilebilirliği imkansızdır (önerme 3). Bununun sebebi sonsuz güçlü baskılayan kuvvetin var olmamasıdır ve maddenin bir bölümü diğerinin içine girememesidir.⁶⁶ Kant maddenin içine girilmezliğinin onun sıkışmaya gösterdiği dirençte yatmakta olduğunu belirtmektedir. Bununla birlikte ona göre mutlak bir içine girilmezlikten ancak matematiksel olarak bahsedebiliriz. Görelî içine girilmezlik ise dinamiksel bir kavrama işaret etmektedir.

Kant'ın uzayın doldurulmasının temel şartı itici kuvvettir hatta bu sebeple temel kuvvettir. Ancak itici kuvvet çekici kuvvet olmadığında madde kendini sınırlandıramaz aynı zamanda uzayın kendisi tarafından da bir sınırlandırma getirilemeyecektir. İtme kuvveti olmadığında sadece çekici kuvvet etkili olduğunda ise madde matematiksel bir nokta oluncaya kadar kendine çekilecektir. Dolayısıyla maddenin yeri doldurması hususunda itme kuvvetine öncelikli bir konum verilse de her iki kuvvet Kant'ta maddenin özüne ait kuvvetlerdir.⁶⁷

Kant'ın en önemli öngörülerinden bir tanesi uzaktan etkiyi temellendirmeye çalışmasıdır. Tanım 6 da fiziksel anlamdaki ilişkiyi içine girilmezliğin etki ve tepkisi olarak tanımlamaktadır. Maddenin bir bölümünün diğer bölümüyle ilişki olmadan etkileyebilmesine uzak mesafe etkisi denmektedir. Eğer bu iki bölüm arasında madde aracı yoksa yani uzay boşsa buna aracısız uzaktan etki denmektedir. Bir maddenin bölümünün diğerinin boş uzayda aracısız etki etmesi için temel şart çekim kuvvetidir (önerme 7). Maddenin uzaktan etkisinde bir araç ya da temas yoluyla olması bile maddenin kendi dışına hareket etmesini içermektedir. Bu bölümde Kant Newton'u uzaktan etkiyi sadece matematiksel olarak açıklamakla eleştirmektedir.⁶⁸ Hatırlayacağımız üzere Newton kuvvetlerden bahsetmesine karşın maddenin özsel nitelikleri içerisinde saymamıştı. Sonuç olarak, Kant bütün bir madde anlayışını kuvvetler üzerine hatta itme ve çekme kuvveti arasındaki dengenin sonucunda maddenin uzayı doldurabilmesi üzerinden açıklayarak kuvvet özsel bir özelliğe gönderme yapmaktadır.

⁶⁶ Kant, *Metaphysical Foundations* 501, s.22.

⁶⁷Kant, *Metaphysical Foundation*, 508-511, s.27-30.

⁶⁸Kant, *Metaphysical Foundation*, 512-515, s.31-33.

Metafiziğin üçüncü bölümü olan Mekanik, maddenin hareket ettirici kuvvete sahip olan olarak nasıl hareket ettirici olduğunu (maddenin üçüncü tanımı) yani başka bir maddeye nasıl hareketi aktardığını incelemektedir. Dinamikte hareketler dynamis yani kuvve üzerinden ele alınırken mekanikte bilfiil olarak ele alınmaktadır. İkinci tanımında hareket miktarını belirleyebilmenin 1) ne kadar madde hareket etti ve 2) ne kadar hıza sahip olmak üzere iki faktörün etkili olduğunu belirtmektedir.

Mekanığın üç kanunundan bahsetmektedir: ilk mekanik kanunu, “cisimsel doğanın bütün değişimleri boyunca maddenin toplam miktarı aynı kalmaktadır”. İkinci kanun, maddedeki tüm değişimler dışsal nedenlere dayanmaktadır. Üçüncü kanun ise, hareketin iletilmesinde etki ve tepki eşittir. İlk kanun açık olarak maddenin korunum yasasına işaret etmektedir ve üçüncü yasa da alışık olduğumuz her etkinin aynı ölçüde bir tepkisi vardır kuralıdır. Bunlara karşın ikinci mekanik yasası mutlak içsel durumlara sahip olmayan maddenin hareketinin sebebi de dışsal bir nedene dayandırılmasına karşın *inertia* yani eylemsizlik kuvvetinin doğa bilimlerinden kaldırılması gerektiğini belirterek Newton’ın eylemsizlik kanununa farklı bir yorum getirmektedir. Bunun gerekçesi olarak maddenin herhangi bir etkiyle karşılaşmadığı sürece duruyorsa durmaya, hareket ediyorsa hareket etmeye devam etmesi maddenin cansız olduğunu ileri sürmek olacağını ancak bu mekanik bir evrende nasıl canlı var olur problemini daha da çıkmaza götürmektedir.⁶⁹

Metafiziğin Temelleri’nin son bölümü maddenin hareketinin modalite yani imkan, fiil ve zorunluluk açısından ele alınan fenomenoloji bölümüdür.⁷⁰ Bir tanım ve üç önermeden oluşmaktadır. Dördüncü tanımda madde, “deneyim nesnesi olabilen ve hareket edebilen şeydir” olarak ifade edilmektedir. Deneysel uzayla ilişkili olan bir doğrusal hareket sadece mümkün bir yüklemidir (önerme 1) çünkü doğrusal harekete sahip sabit hızla hareket eden cisim gerçekten hareket etmeyebilir ve yanılsama olabilir

⁶⁹ Kant, *Metaphysical Foundations*, 541-550, s.51-57.

⁷⁰ “Kant Ampirik Düşüncenin Postülaları A218-219/B265-266’da modaliteleri şöyle tanımlamaktadır:

1. Tecrübenin temel koşullarıyla (görü ve kavramlara göre) uyumlu olan olanaklıdır.
2. Tecrübenin maddi koşullarıyla (duyu) bağlantılı olan fiilidir.
3. Fiili olanla bağlantısı tecrübenin evrensel koşullarıyla uyumlu olarak bilinen zorunludur (zorunlu olarak mevcuttur).” bkz. Micheal Friedman, *Kant ve Kesin Bilimler*, (İstanbul: Alfa yayınları, 2015), s. 240.

bu sebeple mümkündür (görelî hareket). x maddesinin dairesel hareketi, x'in bilfiil bir yüklemidir (önerme 2) çünkü bu hareket dışsal bir hareket ettirici bir kuvvet dolaylı ya da dolaysız olarak maddeye etki etmediği bir sürece gerçekleşmez. Bir maddenin bir diğerine göre eşit ve zıt yönde hareketi maddenin zorunlu bir yüklemidir çünkü bu mekaniğin üçüncü yasasının sonucudur ve cisimlerin hareketi ancak bu iki hareket yoluyla meydana gelebilir.⁷¹

Kant bu bölümde, mutlak uzay kavramının anlama kavramı olamayacağını belirtmektedir çünkü mutlak uzay daha önce de bahsedildiği doğrultuda deneyim nesnesi değildir. Buna karşın aklın zorunlu gördüğü bir kavramdır. Hatta kavram da değildir o bir ideadır. Görelî bir uzayı düşündüğümde ya da görelî uzayları ve cisimleri düşündüğümde aklım mutlak uzay ideası üzerinden görelî hareketi düşünebilmektedir.⁷²

Görelî uzay, zaman ve içine girilmezlik olarak örülmüş doğa felsefesinin önemli ve açıklama isteyen diğer bir konusu mutlak boşluk var mıdır? sorusudur. Kant, *Metafiziksel Temeller*'inde boş uzayın olanaksız olduğu çelişmezlik ilkesi gereğince kanıtlanamacağını belirtmesine karşın fiziksel olarak maddenin bağıllığının açıklanmasında çekim aracılığıyla meydana geliyorsa boş uzay olanaksızdır. Böylece Kant çekimi ve maddenin bağıllığını açıklamada esir kavramına başvurmaya ihtiyaç duymaktadır. Büyük cisimler esirle çevrilidir ve çekme kuvveti tarafından yayılmaktadır. Bu açıklamalar üzerinden baktığımızda Kant'ın atomcu ve boş uzay fikrini reddini ve a priori zeminde olmasa da esir maddesinin maddenin bağıllığını ve çekimi açıklamada kabul ettiğini göstermektedir.⁷³

Yukarda bahsettiğimiz üzere Kant'ın doğa felsefesiyle ilgilenmesinin son noktası *Metafiziksel Temeller*'i olmamaktadır. Metafizikten fiziğe geçişi açıklamayı amaçladığı hayattayken yayınlanmamış eseri *Opus Postumum*'da birçok konuyu yeniden ele almaktadır. Bunlardan ilki kimyanın gerçek bir doğa bilimi olup olmadığı sorusunu fiziğin kimyayı kapsadığı şeklinde açıklama sunarak tekrar gündeme

⁷¹Kant, *Metaphysical Foundations*, 553-558, s. 59-61.

⁷²Kant, *Metaphysical Foundations*, 559-560, s. 60-63.

⁷³Kant, *Metaphysical Foundations*, 563, s. 65.

getirmektedir. İkincisi esir kavramı merkezi bir rol almakta ve maddenin halleri ve ısıyla genleşme hallerini ele almaktadır. Dolayısıyla Kant bilime özellikle fiziğe felsefi bir zemin oluşturmaya ve kritik felsefesinde kurduğu sistemde oluşabilecek boşlukları gidermeye devam etmiş olduğunu görüyoruz. Dolayısıyla bu çaba günümüz bilimini anlama ve açıklama çabalarımıza ışık tutacağı düşünülebilir. Friedman ise Kant'ın katkısı için şunları söylemektedir:⁷⁴

... Newton'un temel katkısı, böyle dinamik, uzay zamansal bir yapıda saf geometrinin iş görmesini ilk olarak olanaklı kılan, uygun dinamik kavramları – kütle, kuvvet ve etkileşim kavramları-biçimlendirmektir. Bununla birlikte Kant'ın temel katkısı Newton'ın başarısının felsefi göndermelerini; özellikle de doğa ve metafiziğin geleceği için göndermelerini, başka herkesten daha ileri bir biçimde görmesiydi.

IV. GENEL GÖRELİLİK VE KARTEZYEN RÜYAYA DÖNÜŞ

Fizik yasaları hem simetrik hem de eş dönüşümlü yani tüm eylemsiz referans sistemlerinde aynı olmak zorundadır. Maxwell denklemleriyle ortaya konan ışık hızı ne ışığın kaynağından ne de yayılma yönüne bağlıdır ve ışık hızının sabit olduğu ortaya konulmaktadır. Bununla birlikte diğer fizik yasaları gibi elektromanyetik yasalar da tüm eylemsiz referans sistemlerinde aynı olmak zorundadır. Einstein bu açıklamayla çelişen bir örneği ele almaktadır. Bu örneğe göre raylar üzerinde giden bir vagonun hızının v olduğunu ve ışıkla aynı yönde yol almaktadır. Vagona göre ışığın hızı nedir? sorusunun cevabı vagona göre ışığın hızı w olarak belirlenmektedir. Bu durumda $w = c - v$ sonucunu elde ettiğimizde ışığın hızının c den küçük olduğuna ulaşılmaktadır. Görelilik ilkesine (Galileo) göre ışığın boşlukta yayılma hızı referans cismi ister vagon ister raylar seçilmiş olsun iki durumda da aynı olmak zorundadır. Buna karşın bu örnekte durum çelişkilidir çünkü referans cismi değişince ışığın hızı c den büyük ya da küçük olabilmektedir. Einstein ışığın boşlukta yayılma hızının sabit olması ve görelilik ilkesiyle çelişmesinin klasik mekanikteki iki hipotezden kaynaklanmakta olduğunu belirtmektedir:

⁷⁴Friedman, *Kant*, s. 281.

1. İki olay arasındaki zaman aralığı, referans cisminin hareket durumundan bağımsızdır.
2. Sabit bir cismin üstündeki iki nokta arasındaki uzay aralığı, referans cisminin hareket durumundan bağımsızdır.⁷⁵

Mevcut çelişkiden kurtulmak için ya görelilik ilkesinden vazgeçilmesi gerekmektedir ya da ışık hızının boşlukta yayılmasının sabitliğinden... Einstein göreliliğe duyulan güven dolayısıyla ondan vazgeçilmeyeceğini, ışık hızının sabit olmasının ise Lorentz'in kuramının zorunlu bir sonucu olmasıyla ondan da vazgeçilemeyeceğini ifade etmekte ve bu durumun bir sonucu olarak da bu iki yasa üzerine kendi teorisini inşa etme çabasına girişmiştir.

Görelilik, koordinat sistemine göre simetrililiği ifade ederken özel görelilik fizik yasalarının tüm eylemsiz koordinat sisteminde aynı olmayı ifade etmektedir. Herhangi bir hareketli sisteme, hareketsiz bir sistemde saatin iki vuruşu arasında geçen zaman bir saniyeden daha uzun ve bir metre gözükten uzunluk daha kısa görünmesi Özel göreliliği ortaya koymaktadır. Özel göreliliğin sonuçları nelerdir? Kuram Einstein'ın ifadesiyle "özel görelilik kuramı elektrodinamik ve optikten gelişmiştir". Einstein bu teorisıyla Maxwell-Lorentz kuramını açıklığa kavuşturmuştur. Bununla birlikte görelilik öncesinde kütle korunumu ve enerji korunumu iki farklı fenomen olarak ele alınırken artık görelilik teorisıyla birleşmiş olmaktadır çünkü "bir sistemin kütlelerinin korunumu yasası, enerji alışverişinde bulunmaması koşuluyla geçerlidir"⁷⁶.

Klasik mekaniğin üç boyutlu uzayında zaman mutlak olduğu için bağımsız bir varlığa sahipken Minkowski 1908 yılında zamanı ekleyerek dört boyutlu uzay fikrini ortaya koydu. Zaman artık bağımsız üç boyuttan bağımsız değildir ve uzay-zaman açısından dünya dört boyutlu bir uzayla (x, y, z, t) temsil edilmektedir. Uzayzaman kavramı Einstein'ın teorisine için önemli bir rol oynamaktadır ve hocasının bu katkısı olmasa görelilik ilkesinde ilerleyemeyeceğini de itiraf etmektedir.⁷⁷ Çünkü özel

⁷⁵ Albert Einstein, *İzafiyet Teorisi*, çev. Gülen Aktaş, (İstanbul: Say Yayınları, 2020), s. 33.

⁷⁶ Einstein, *İzafiyet*, s. 46.

⁷⁷ Einstein, *İzafiyet*, s. 54.

görelilik asıl olarak elektromanyetik olgularla ve onların dayandığı uzayzaman ile ilgilenmektedir.

Uzayzamanın birbirine bağlı olması ve ışık hızının boşlukta yayılma hızının sabit olması açıklamalarından sonra uzaktan etki konusuna da değinmek yerinde olacaktır. Güneşle Dünya arasındaki kütle çekim sonucunda yörünge oluşmaktadır böyle bir durumda bir an için güneşin sistemden koptuğunu düşünelim. Newton'a göre Güneş ve Dünya arasındaki nedensel bağ Dünyanın da aniden savrulmasıyla sonuçlanmaktadır. Buna karşın Einstein'a göre Güneşin ortadan kaybolmasından sonra bu bilginin maksimum ışık hızında iletilmesi gerekmektedir. Dolayısıyla uzaktan etki Einstein'ın teorisine göre aniden olamaz. Nedenselliğin iletimi de bir süre sonrası meydana gelmektedir. Tezin 2. Bölümünde Einstein ve Niels Bohr arasındaki tartışmalarda özellikle kuantum dolanıklıkta, Einstein'ın ani uzaktan etkiyi eleştirirken görmemizin temelini oluşturacaktır bu açıklama.

Genel görelilik Einstein'ın 1907-1915 yılındaki çalışmaları sonucunda görelilik çerçevesinin içine kütle çekim kanununu eklediği bir kuramdır. Genel görelilik teorisi, özü eylemsizlik kütlesi ve çekim kütlesinin eşitliğidir. Bu eşitlik klasik mekanikte bir rastlantı olarak ele alınırken Einstein bunu yasa olarak kabul etmektedir.⁷⁸ Hans Reichenbach, eşdeğerlik ilkesini Einstein'ın kutu deneyi üzerinden örneklendirdiği şu şekildedir:

İçinde bir fizikçinin bulunduğu bir oda büyüklüğünde kapalı bir kutu hayal edelim, tavandan sarkan bir spiral ucuna demir bir m ağırlığı bağlıdır. Fizikçi ağırlığın tavana olan mesafesini ölçer, yani yayın geriliminin ayarlandığı mesafeyi. Kutunun hiçbir penceresi yoktur... şimdi eğer fizikçi sadece dinamik yer çekimi alanlarını hesaba katarsa kutu içerisindeki mekanik deneylerin kesin olmadığını bulacaktır. Böylece fizikçi yayın uzamasını iki yolla açıklayabilir.
i) Kutu yukarıya doğru, b doğrultusunda ivmelenerek hareket eder; m ağırlığı eylemsizlikten dolayı arkada kalır, yay gerilir.

⁷⁸ James T. Cushing, *Fizikte Felsefi Kavramlar 2*, (İstanbul: Sabancı Üniversitesi, 2006), s. 105.

ii) Kutu sabit durur ama çevreleyen kütleler ivmelenerek aşağı hareket eder; dinamik bir yer çekimi alanı g üretirler; m ağırlığı ağırlığından dolayı aşağı çekilir, yay gerilir.⁷⁹

Her iki durumda nesnel bir ayırım söz konusu değildir. Fizikçinin olduğu kutunun ivmelenen bir hareketle yukarı çıkmasından ya da alttan gelen kütle çekiminden hangisini yaşadığını fark edememesi, eylemsiz kütle ve çekim kütlelerinin kavramlarının eşdeğer oldukları sonucuna götürmektedir.

Eşdeğerlik ilkesiyle birlikte Einstein ışık ve kütle arasındaki ilişkiyi ele aldığında, kütle çekiminde herhangi bir kütle yakınından geçen ışığın yörüngesi değişmesi gerektiğini öngörmüştür. Uzayzamanla örülü olan evren dolayısıyla gezegenler birbirlerine kütle çekiminin bir sonucu olarak birbirlerine çekilmemekte uzayzamanın kütleyle etkileşiminin bir sonucu olan eğriliği tüm bu kütle çekimin sebebini oluşturmaktadır. Dolayısıyla tüm referans sistemlerinin göreliliği olduğunu belirten genel göreliliğin sonuçlarından biri, ışık ışınları kütle çekim alanlarından geçerken eğrisel olarak yayılmasıdır. Einstein genel göreliliğin tam ifadesinin “Bütün Gauss koordinat sistemleri genel doğa yasalarının formülasyonunda temel olarak birbirine eşittir”⁸⁰ olduğunu ifade etmektedir.

Einstein, klasik dönemin uzay kavramını muğlak bulmakta ve onun için “yeterince katı bir referans cisminde göre hareket” olarak yeni bir tanım sunmaktadır. Bununla birlikte genel görelilikte uzay hem geometrik özelliklere sahip hem de maddeyle belirlenmektedir ve ancak maddenin durumuna dayanarak geometrik yapısından sonuçlar elde edilebilmektedir. Einstein, Descartes’in uzay ve cismi özdeş görüp maddeyi önceleyen ve boş uzay fikrini reddedişinin genel görelilik teorisi üzerinden başka bir şekilde doğrulandığını belirtmektedir. Şeylerden bağımsız uzay fikri yerine “birbirine göre hareket halinde sonsuz uzayın varlığı” etkilidir. Einstein bu noktada alan kavramını öne çıkarmaktadır çünkü alan kavramından bahsedebilmek için maddenin olması gerektiğine işaret etmektedir. Bununla birlikte esir fikri, boş uzay

⁷⁹ Hans Reichenbach, *Kopernik’ten Einstein’a Uzay, Zaman ve Hareket*, (Ankara: Fol Yayınları, 2020), s. 67-68.

⁸⁰ Einstein, *İzafiyet*, s. 85.

kabul edilmesine rağmen bir biçim olarak ileri sürüldü. Faraday ve Maxwell araştırmalarında elektromanyetik teoriyi alanlar üzerinden ele almaktaydılar ve esir kavramı elektromanyetik alanlardaki etkileşimi açıklamak için ortam olarak sisteme eklendiyse de esir maddesinin varlığının ispatlanamamasıyla bu açıklama biçiminden vazgeçilmiştir. Genel göreliliğe göre uzay, madde ya da alanlardan bağımsız bir varlığa sahiptir ancak “uzayı dolduran ve koordinatlardan bağımsız olan şeye karşı ayrı bir varlığı yoktur.” İfadeleriyle Descartes’in, maddesiz uzay ya da boş uzay yoktur fikirleriyle genel görelilik ilkesinin alansız uzayın olmayacağı görüşleri ortak bir zemine sahiptir.⁸¹ Böylece içine girilmezliğin muğlaklaştığı Newton öncesi döneme bir dönüş söz konudur diyebiliriz.

⁸¹ Einstein, *İzafiyet*, s. 141.

İKİNCİ BÖLÜM

KUANTUM MEKANİĞİ BAĞLAMINDA İÇİNE GİRİLMEZLİĞİN ELE ALINIŞI

I. KUANTUM MEKANİĞİNİN ORTAYA ÇIKIŞI

Yüzyıllardır insanlar fiziksel dünyayı anlamaya çabalamışlardır, sistematik olarak bunu yapan klasik mekanik fiziksel dünyayı sağduyunun ağırlıkta olduğu bir anlayışla ele almıştır. Newton (1643-1727)'un hareketi ve kuvveti açıklama çabası ve ortaya koyduğu yasalar, Lagrange (1736-1813), W. Hamilton (1805-1865) ve Jacobi (1804-1851) tarafından farklı matematiksel zeminde geliştirilmeye çalışmış versiyonları, Maxwell denklemleriyle elektromanyetik kuvvetin ortaya konulması ve Einstein'ın özel ve genel göreliliği, doğayı deterministik ve nedensellik barındıran bir tabloyla tanımlamaktadırlar. Klasik mekaniğin her şeyi açıkladığının düşünüldüğü bir dönem sonrasında klasik mekaniğin açıklamakta yetersiz kaldığı ve farklı bir teoriye ihtiyaç duyulan gelişmeler yaşandı. Penrose'a göre klasik fiziğin bu gelişmelere cevap veremeyişi ve problemlerle karşılaşmasının temel sebebi farklı fiziksel nesnelerin bir arada olma zorunluluğunda yatmaktadır. Bu fiziksel nesneleri sonlu sayıda değişkenle temsil edilen parçacıklar (üç konum ve üç momentum değişkenli) ve sonsuz sayıda parametreden oluştuğu düşünülen alanlar oluşturmaktadır. Bu sistemde parçacıkların ve alanların dengede olması için eş enerji dağılımından⁸² söz edilmekte ve parçacıkların sahip olduğu enerji alanlara yayılmaktadır buna karşın sınırlı sayıda oluşan parçacıkların sonsuz parametrelerden oluşan alanlara enerji aktarımında bulunması parçacıklarda neredeyse hiç enerji bırakmayacak bir duruma dönüşmektedir. Bu problematik durumun ilk örneğini 1911'de Ernest Rutherford (1871-1937) tarafından ileri sürülen “güneş sistemi” modeli olarak tasarlanan atom modeli üzerinde ele alabiliriz. Bu modele göre çekirdek merkezde, elektronları ise çekirdeğin etrafında hareket etmektedirler. Bu yapıyı bir arada tutan kuvvet ise elektromanyetik kuvvet

⁸² “Maxwell- Boltzmann eşbölüşüm teoremi, ısı alışverişine ulaşmış bir sistemde her özlük derecesinin mevcut enerjiyi eşit olarak paylaşmak zorunda olmasıdır.” James Cushing, *Fizikte Felsefi Kavramlar*, Cilt: 2, (İstanbul: Sabancı Üniversitesi, 2006), s. 138.

olarak adlandırılmaktadır. Maxwell denklemlerine göre elektronların çekirdeğin üzerine sarmal bir yapıda hareket ettiği ve sonsuza doğru artan elektromanyetik dalgalar ortaya çıkarması gerekmektedir. Buna karşın yapılan gözlemlerde elektronun sonsuza giden bir elektromanyetik dalga üretmediği ve atomların kararlı bir yapıya sahip olduğu ortaya konulmuştur.⁸³

Klasik mekaniğin açıklamada yetersiz kaldığı diğer önemli olay ise siyah cisim ışıması (*black body radiation*) dır. İlk olarak Robert Kirchhoff (1824-1887), siyah cisim ışıması yapan maddelerin farklı bir özelliğinden değil maddenin sıcaklığına ve dalga boyuna bağlı olduğunu belirtti. Kirchhoff'un bu yaklaşımı termodinamiğin ve moleküler fiziğin önemli problemlerinden olan enerji ve sıcaklık arasındaki ilişkinin daha derinlikli ele alınmasına olanak tanıdı.⁸⁴ 1900 yılında Rayleigh ve Jeans belirli bir ısıda, bir cisim üzerine deney yaptılar. Bu deney sonucunda bütün enerjinin elektromanyetik alan tarafından emileceğini iddia ettiler. Enerjinin sürekli artarak alana yönelmesi morötesi felaket denilen felakete neden olması beklensine karşın doğa buna izin vermiyor gözükmemektedir. Rayleigh ve Jeans'ın yaptığı hesaplamalar düşük alan salınım frekanslarında hesapladıkları gibi olsa da yüksek frekanslarda enerji dağılımının sonsuz artmadığı hatta frekans arttıkça sıfıra yaklaştığı ortaya konulmuştur.⁸⁵ Buna göre ışımanın enerjisi yükseldikçe dalga boyu sıfıra yaklaşmaktadır. Max Plank (1858-1947) her ne kadar klasik mekanikle durumu bir şekilde açıklayabileceğini düşünse de sonraki deneyler de klasik fiziğin sürekli enerji anlayışıyla tezat bir durumun ortada olduğunu kabul etmek zorunda bırakmıştır ve ışığın sürekli dalgalar olmadığı, aksine, kesikli/süreksiz enerji paketleri gibi hareket etmekte olduğunu ispatlamıştır ve enerjinin $E = h \cdot \nu$ formülüyle belirlenebileceğini belirlemiştir. (Bu ifadede h , Plank'ın $6.626 \cdot 10^{-34}$ j. s olmak üzere belirlediği evrensel bir sabiti, ν ise ışığın frekansını temsil etmektedir.) bütün bunlar sonucunda ışığın dalga boyu ile frekansı arasında ters orantı olduğu ortaya konulmuş oldu. Örneğin, frekansı yüksek olan x-ışınları gibi ışınlarda dalga boyu 0'a yaklaşmaktadır. Plank sabiti, Leibniz (1646-1716) ve Newton'un sonsuz küçükler hesabıyla nedensel ilişkileri süreklilik üzerine kurulu yapısını radikal bir

⁸³Roger Penrose, *Kralın Yeni Usu II: Fiziğin Gizemi*, (Ankara: TÜBİTAK, 2000), s. 98-100.

⁸⁴Max Planck, *Modern Doğa Anlayışı ve Kuantum Teorisine Giriş*, (İstanbul: Alan Yayıncılık, 1987), s. 137.

⁸⁵Penrose, *Fiziğin Gizemi*, s. 100.

biçimde değişmeye zorlayacak süreksiz bir enerji paketçiklerinden oluşan bir resim ortaya koyan bir niceliği temsil etmektedir.⁸⁶

Max Plank'ın yeni bir evrensel sabitle ışınım yasasını keşfetmesinin sonrasında ikinci adımı A. Einstein (1879-1955) attı ve ışığın parçacıksal yapısını yani ışık kuantası fikrini ortaya koydu. Enerji ve momentuma sahip kuantalaşmış bu ışınım foton adı verildi ve elektromanyetik alanın kendisinin de kuantize özellikler gösterdiğini belirtildi. Bu noktada Einstein çok kritik bir soru sordu: eğer ışık parçacıklardan oluşuyorsa dalga optiği parçacık resmiyle nasıl bir araya getirilebilir?⁸⁷

Niels Bohr (1885-1962) 1911-1913 yılları arasında Plank'ın enerjii $h\nu$ nin katları üzerinden kuantumlanması fikriyle uyumlu bir atom modeli geliştirdi. Elektronların bir yörüngeden diğerine geçiş yaparken ışımaya ya da soğutmaya neden olduğu varsayımını takip eden bu modele göre fotonun $h\nu$ enerjisinin son yörüngedeki enerji şöyle gösterilmektedir:

$$-E = \frac{n}{2} h\nu \quad n = 1, 2, 3, \dots$$

Bohr ortaya koyduğu atom modeliyle hidrojen atomundaki elektronun izin verilen değerlerini hesaplamaktadır. Buna karşın bu yarı klasik atom modeli tek elektronlu atomlar (sadece H, He⁺, Li⁺⁺) için sadece çalışmakta olduğu görülmektedir. Bohr atom modelinde üç aşama söz konusudur, ilk olarak sistemin olası hareketlerini belirlemek için klasik mekanik kullanılmakta, ikinci adım olarak verilen yörüngeleri belirlemek için kuantum koşulları ortaya konmakta ve son adım olarak kuantum frekanslarını sabitlemek için enerjinin korunumu kullanılmaktadır. A. Sommerfeld (1868-1965) bu üçlü tekniği kullanarak hidrojen atomunun çekirdeğinin yakınından geçen bir eliptik yörüngedeki elektronun kütle değişimine izin vererek özel görelilik kuramına göre hesaplamalarda bulundu. Ancak Sommerfeld'in görelilik hesaplamaları yalnızca belirli spektrum çizgileri için doğru sonuçlar vermekteydi.⁸⁸

⁸⁶ Planck, *Kuantum Teorisine Giriş*, s. 144.

⁸⁷ Herbert Capellmann, *The Development of Elementary Quantum Theory*, (İsviçre: Springer, 2017), s. 9.

⁸⁸ Cushing, *Kavramlar*, s. 145-48.

Bohr, ilk başta Einstein'ın ışık kuantası fikrini ve elektromanyetik alanın kuantum doğasını reddetti ve alanların sürekli karakteri konusunda ısrarcı oldu çünkü onun için girişim gözlemi ışığın dalga olması dışında açıklamak mümkün değildi. Bu tartışmalar sonrasında 1922 de A. Compton (1892-1962), elektronla çarpıştıktan sonra saçılan x-ışınlarının dalga boylarının değişmekte olduğunu keşfetti. Sonraki yıl ise bu etkinin enerji ve momentum korunumuna tabii olduğunu açıkladı. Böylece Compton etkisi ile Einstein'ın ışık kuantası fikrini destekleyen bir açıklama getirilmiş oldu ancak çoğunluk özellikle Neils Bohr ve takipçileri ikna olmadılar.⁸⁹

Kuantum mekaniğinin oluşmasını etkileyen diğer önemli olay olarak 1922 yılında Otto Stern (1888-1969) ve Walter Gerlach (1889-1979) çeşitli atomların manyetik özellikleri üzerine ilkinin gerçekleştirmiş oldukları bir dizi deney yaptılar. Stern-Gerlach deneyi olarak bilinen bu deneyde bir fırın içinde gümüşü buharlaştırdılar, gümüş atomlarının bazılarının kaçmasına izin verdiler ve diyaframlar sayesinde ince bir ışın olarak yol almasını sağladılar. Işın özel şekillendirilmiş mıknatıs uçlarından geçti ve biraz uzaklaştıktan sonra cam bir yüzeye çarptı. Atomun yüzeye bıraktığı izler ışığın ikiye ayrıldığını yarısının aşağı yarısının da yukarı doğru yön değiştirdiğini gösterdi. Sonuç olarak her bir atomun manyetik bir momentuma sahip olduğu deney sonucunda elde edildi. Daha sonrasında Stern-Gerlach deneyine farklı araçlar engeller kullanılmış olsa da ışının ikiye bölünerek aşağı ve yukarı yönlerde ikiye ayrılmaya devam ederek manyetik özellik sergiledi.⁹⁰ Elektronların bu özelliğini açıklamak adına 1925 yılında Samuel Goudsmit (1902-1978) ve George Uhlenbeck (1900-1988) elektronların spin özelliğini postule ettiler.

Plank'ın 1900 yılında enerji paketçikleri ve h planck sabitiyle beraber tohumları atılan kuantum teorisini 1925 yılına kadar ki süreci yukarıda resmetmeye çalıştığımız şekliyle eski kuantum mekaniği olarak adlandırılmaktadır. Eski kuantum teorisinde uzay ve zamanın devamlılığı bütün süreçlerde sürdürüldü, elektromanyetik

⁸⁹ Capellmann, *Quantum Theory*, s. 22.

⁹⁰ R.I.G. Hughes, *The Structure and Interpretation of Quantum Mechanics*, (Londra: Harvard University Press, 1989), s. 1-8.

alan tamamen klasikti ve kararlılık durumları kuantum şartları tarafından seçilmiş ve kararlılık durumlarında ışıma olmaz fikirleri sürdürülmüştür.⁹¹

Yeni kuantum mekaniği kurulmadan önce Max Born (1882-1970), klasik mekaniğin sürekli ve deterministik kavramlarını sorguladı. Bu hususta W. Pauli (1900-1958) ve Einstein arasında yapılan yazışmalar da buna kanıt olarak gösterilebilir. Born, 1919 da Pauli'ye yazdığı mektupta yaygın deneyimin, makroskopik dünyanın dört boyutlu uzay zaman kavramının atom dünyasına aktarılmaması gerektiğini atom dünyasının farklı bir tür çokluğa ihtiyaç duyduğunu belirtmektedir. 1920 yılında Einstein ile yaptıkları yazışmada fikirlerini Einstein ikna edici bulmamıştır ve kuantum probleminin süreksizlikle çözülebileceğine inanmadığını belirtmiştir. Buna karşın Born klasik mekaniğin kavramlarından kökten bir ayrılmanın zorunluluğuna inanmaya devam etmiştir.⁹²

Bu çerçeveye çağdaş fiziğin doğuşunu biraz olsun açıklanmaya çalışıldı. Bunun akabinde kuantum mekaniğinin matematiksel ve kavramsal yapısı ele alınacaktır. Tüm bu açıklamalar çağdaş fiziği açıklamak ve biraz olsun anlaşılır kıldıktan sonra içine girilezliğin çağdaş fizikteki açıklaması olarak ele alacağımız Pauli dışarlama ilkesi için bir hazırlık mahiyetindedir. Çünkü çağdaş fiziğin yapısı anlaşılmadan içine girilmezlik kavramını tartışmak güç olacaktır.

II. KUANTUM MEKANİĞİNİN FORMALİZASYONU VE İLKELERİ

Kuantum mekaniğinin matematiksel yapısını ele almadan önce kavramsal yapısının ele alınması faydalı olacaktır. Bir klasik sistem ya tek parçacıktan ya da parçacık kümesinden oluşmaktadır ve bir sistemi ve onun davranışlarını tam olarak tanımlayabilmek için onun sabit özellikleri olan Π_c kümesi (kütle vb.) ve zamanla değişen özellikleri Π_v kümesini (konum vb.) bilmek gerekmektedir. Bunun yanında parçacıklar arasında ve çevreleriyle olan etkileşimini yöneten kanunlar Λ kümesini

⁹¹ Capellmann, *Quantum Theory*, s. 21.

⁹² Capellmann, *Quantum Theory*, s. 24.

bilmek gerekmektedir. Dolayısıyla bir fiziksel sistemi ele almak için durumlar, gözlenebilirler ve etkileşimi yöneten kanunları bilmek gerekmektedir.

Her parçacığın momentum ve konumu Γ_v kümesinin önemli elemanlarıdır. (Parçacığın momentumu onun kütlesi ile hız çarpımına eşittir. t zamanda her parçacığın belirli bir momentumu ve konumu bize t zamanda sistemin durumunu vermektedir. Örneğin bir parçacık sistemini düşünelim; t zamanda sistemin elektrostatik potansiyel enerjisini hesaplamak için; i) t zamanda parçacığın görelilik kanunu, ii) her parçacığın yükü, iii) Elektrostatik kuvvetin Kolomb kanunları ile belirlenmektedir.

Klasik mekanik genellikle deterministik olarak ele alınmaktadır. Verili bir zamanda tamamen tanımlanmış Γ_c ve durum, diğer zamanlardaki Γ_v değerlerini belirlemektedir. Fiziksel uzay 3 boyutlu olduğu için her parçacığın üç konum koordinatına q_x, q_y, q_z , benzer şekilde momentumunu belirlemek için hem parçacığın hızının ne olduğu hem de hangi yönde olduğunu belirlemek için p_x, p_y, p_z momentum üç koordinatına ihtiyaç duyarız. Sonuç olarak n parçacıklı bir sistemin durumu $6n$ elemanlarıyla belirlenmektedir. Soyut $6n$ boyutlu uzay bütün olası $6n$ reel sayıları dizisinden oluşur. Buna faz uzayı (*phase space*) denir. Ω ile gösterilir. Sistemin durumu ise ω ile gösterilir ve $\omega \in \Omega$.

Kuantum mekaniğinde ise saf durum (*pure state*) ve birleşik durum (*mixed state*) ayrımı söz konusudur. Kuantum teorisinde bir sistemin durumu Hilbert uzayındaki vektörlerle gösterilmektedir. Bir Hilbert uzayı, lineer pozitif iç çarpım uzayı (kompleks sayılar alanı) soyut olarak von Neumann (1903-1957) tarafından tanımlandı. Bu uzayın elementleri vektörlerden oluşmaktadır. David Hilbert (1862-1943) bu uzayın iki realizasyonu üzerine çalıştı bunlardan ilki Lebesgue uzayı L^2 , lebesgue integral fonksiyonu bir diğeri de l^2 kompleks sayılar dizisidir. Riesz-Fischer teoremi bu iki uzayın izomorfik yapıları olduğunu gösterdi. Görünüşleri benzer olmasa da aynı uzaydırlar. Bu izomorfizm Heisenberg'in matriks mekaniği ile Schrödinger'in dalga mekaniğinin eşitliğini gerektirmesi, von Neumann'ın kuantum mekaniğinin

matematiksel formülasyonu için Hilbert uzayının öneminin farkına varmasını sağladı.⁹³ Buna ek olarak Hilbert uzaylarında belli amaçlar doğrultusunda vektörün bütün bileşenlerini bilmeye gerek duyulmaz. Örneğin sadece bir elektronun spiniyle⁹⁴ ilgileniyorsak sadece iki bileşene ihtiyacımız var. Eğer konum ve momentuma bağlı bir gözlenebilirlerle ilgileniyorsak spine atfedilen bileşenlerle ilgilenmemize gerek yoktur. Bunun sebebi bir elektronun durumunu temsil etmek için bir kompleks sayı çifti kullanılırken elektron dışı durumlar fonksiyonlarla temsil edilmektedir. Bir elektron hem spine hem de konum durumuna sahip ve durumlar da saf olduğunda onların her biri bir vektörle temsil edilebilir. Spin durum vektörü iki boyutlu Hilbert uzayında, konum vektörü ise sonsuz boyutlu bir uzayda gösterilir ve iki vektör de normalize⁹⁵ edilmiştir çünkü spin- durum ve konum- durum birbirinden bağımsızdır. Klasik mekanikte elektromanyetik alan teorisi dışında bir uzayda durumlar noktalarla temsil edilir ve bu faz uzayı sonlu boyutluyken kuantum mekaniğinde Hilbert uzayı sonsuz boyutlu olabilir.

Klasik mekanikle kuantum mekaniği arasındaki radikal farklar gözlenebilirin temsil edilme şekliyle bariz farklılıklar ortaya çıkarmaktadır. Klasik teori reel değerli fonsiyonları kullanılırken kuantum mekaniğinde gözlenebilirleri temsil etmek için Hilbert uzayında Hermitsel operatörler kullanılmaktadır. Bunun tipik örneği bir fermiyon spin bileşenlerini temsil etmek için 2x2 matrisleri kullanılmasıdır.

Klasik mekanikten kuantum mekaniğine geçişi ve aralarındaki farkı ortaya koyan en önemli deney çift yarık deneyidir. Newton, ışığın parçacıksal bir yapıya sahip olduğunu düşünüyordu ancak daha sonra yapılan deneylerle dalga gibi davrandığı keşfedildi. Bunun sonrasında ise ışığın zaman zaman parçacık gibi zaman zaman da dalga gibi davrandığı gözlemlendi. Işığa dair bu durum, atomaltı parçacıklar (elektron, proton, nötron vb.) içinde söz konusudur. Feynman'a göre onlar "parçacık dalgalarıdır".

⁹³ Max Jammer, *The Philosophy of Quantum Mechanics: The Interpretation of QM in historical perspective*, (Kanada: John Wiley & Sons, 1974), s. 3.

⁹⁴ Büyük ölçekli bir sistem de spin bir sistemin kendi çevresinde dönüşünü ifade ederken bu kavramsal anlayış atom altı parçacıklar noktasal oldukları için geçerli değildir.

⁹⁵ Tüm uzayda bulunma olasılığının 1'e eşit olma durumu.

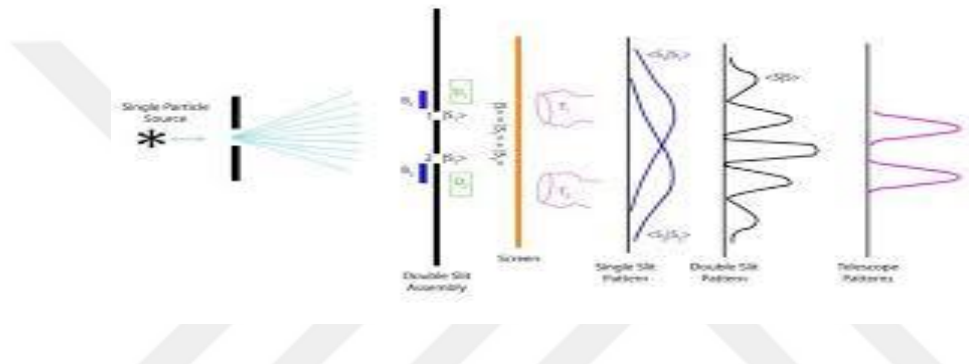
Klasik mekaniğin esas alındığı dönemde ışığın doğasına dair tartışmalar sürüyordu ve dalga mı parçacık mı olduğu dönemin bilimsel yaklaşımına ve deneylerine bağlılık gösteriyordu. 1801 yılında Thomas Young tarafından yine ışığın doğasını anlamak ve ışığın parçacık olduğu mevcut görüşünün aksini yani dalga olduğunu ispatlamak için yaptığı deneylerden biri olan çift yarık deneyini yaptı. Bu deney düzeneği şöyledir: ışık saçan bir kaynak, kaynağın önünde ışığın geçebileceği iki yarıkla bir duvar, duvarın ötesinde ise ışığı durduracak bir perde (soğurucu) yer almaktadır ve perdenin üzerinde de dedektör bulunmaktadır. Yarıklardan biri kapatılarak deney yapılmaya başlandığında perdenin üzerindeki ışık dalgasal olduğunu göstermemekte ve parçacıksal ancak duvardaki iki yarık açık olduğunda perdede bir aydınlık bir karanlık bölgelerden oluşan bir girişim deseni oluşmaktadır. Işığın hem dalga hem de parçacık özelliğine sahip olduğunu gösteren bu deney diğer atomaltı parçacıklarla da yapılmıştır. Bu deney elektronlarla tekrarlandığında bu sefer kaynak elektron tabancasıdır. Deneyin sonucunda elektronun da ışıkla aynı doğaya sahip olduğu gözlenir çünkü duvardaki iki yarık açık olduğunda elektronlarda girişim deseni oluşturmaktadır. Elektronlar, perdeye x mesafesinde hangi göreceli uzaklıkla ulaştığını hesaplamak için ϕ_1 ve ϕ_2 (bir ve ikinci yarıktan geçme olasılığını temsil etmektedirler) olarak isimlendireceğimiz iki karmaşık sayı ile temsil edildiğinde ϕ_1 , $P = |\phi_1|^2$ birinci yarığın açık olmasındaki etkiyi verirken, ϕ_2 , $P = |\phi_2|^2$ ikinci yarığın açık olma etkisini vermektedir (P : olasılık, ϕ : olasılık genliği). Her ikisinin açık olma etkisini iki olasılık genliğinin toplamının mutlak karesi olarak ifade etmektedir yani $P_{12} = |\phi_1 + \phi_2|^2$ 'dir. Bu deneyin sonucunda elektronların parçacıkların perdeye varma olasılığı, bir dalganın şiddet dağılımına uymaktadır ve hem yarıkların tek açık durumu hem de çift açık durumu elektronların belirli durumlarda zaman zaman parçacık gibi davranırken zaman zaman da dalga gibi davranmakta olduğunu göstermektedir.⁹⁶

Bahsedilen elektron deneyinde, elektronlar hangi yarıklardan geçmektedir sorusuna birinci yarıktan mı yoksa ikinci yarıktan mı geçtiğini gözlemlemek için bu deney düzeneğine iki yarığın bulunduğu duvarın arkasına bir ışık kaynağı eklenmelidir.

⁹⁶ Leighton, Sands ve Richard Feynman, *Feynman Fizik Dersleri Cilt 3- Kuantum Mekaniği*, (İstanbul: Alfa Yayınları, 2014), s. 1-1 – 1-6.

Elektrik yüklerin ışığı saçmasından faydalanılarak birinci yarığa yakın bir ışık saçılması olduğunda elektron birinci yarıktan, ikinci yarığa yakın bir konumdaki saçılmada ise elektronun ikinci yarıktan geçtiği tespit edilebilmektedir. Perdedeki duruma bakıldığında ise artık iki yarık açık olmasına rağmen girişim deseni oluşmamaktadır. Elektronları izlemek için eklediğimiz ışık kaynağının sonucu olarak elektronları izlediğimizdeki ve izlemediğimiz süreçteki deney sonuçları farklıdır. Feynman'ın ifadesiyle “belki ışık kaynağı açmak her şeyi tedirgin ediyor” denebilir.⁹⁷

Şekil 1: Çift Yarık Deneyi



Kaynak: https://www.researchgate.net/figure/Single-quantum-Youngs-double-slit-experiment-A-source-shoots-quanta-one-at-a-time_fig1_332176126

Bu deney atom altı dünyanın ikili yapısını gözler önüne sermekte ve dolayısıyla kuantum mekaniğinin hayati deneyini temsil etmektedir çünkü bazen parçacık bazen de dalga olarak hareket eden “dalga parçacıkları” bize kuantum mekaniğinin ilkelerinden en temelini yani süperpozisyon ilkesini vermektedir. İki farklı kuantum durumunun aynı anda bulunma olasılığını ifade eden süperpozisyon kuantum mekaniğinin matematiksel formalizasyonundaki temel motivasyondur ve eski kuantum mekaniği sürecinden bahsedilen Stern-Gerlach deneyinde spinin %50 ihtimalle yukarı %50 ihtimalle aşağı spin gösterme olasılığına sahip olması da bu ilkeyi temsil eden deneylerden biri olduğunu söyleyebiliriz. Bu deneyin diğer bir sonucu belirsizlik ilkesidir çünkü hem elektronun geçtiği yarığı belirleyebilmeyi hem de elektron girişim desenini bozmamayı sağlayan bir düzenek tasarlamak mümkün değildir.⁹⁸

⁹⁷ Leighton, Sands ve Feynman, *Fizik*, s. 1-7.

⁹⁸ Leighton, Sands ve Feynman, *Fizik*, s. 1-9.

III. KUANTUM MEKANİĞİNİN ORTODOKS FORMALİZASYONU

Klasik mekanik atom ve moleküllerin kararlılığında etkili olan kuvvetleri açıklamakta yetersiz geldi ve yukarıda da ifade ettiğimiz üzere doğayı ifade edecek yeni bir dile ihtiyaç doğdu. Kuantum mekaniği doğayı temsil etmek için geliştirilmiş her olay için bir genlik veren soyut bir yapıyla bu ihtiyaca cevap vermeye çalıştı. Bu yeni dilin matematiksel ve kavramsal yapısına yakından bakalım.

A. Vektörler ve Temsili

Durumların süperpozisyon özelliğini uzay vektörleri temsil etmektedir. Bir vektör uzayı, elemanlarının birbiriyle toplanabildiği veya reel ya da kompleks sayılarla çarpılabildiği boş olmayan bir uzayı temsil etmektedir.⁹⁹ Bu iç çarpım ya vektörlerin uzunluklarını belirlenmesinde ya da vektörler arasındaki açı ve uzunlukları ölçmede kullanılmaktadır. $\|\vec{a}\| = \sqrt{\langle A|A \rangle}$ İki vektörün çarpımı 0 ise yani $\langle A|B \rangle = 0$ olduğunda bu ortonormal bir tabanı (orthonormal basis) göstermektedir. Bu tabanı elde etmek için ilk olarak vektörleri normalize etmeli ve sonrasında vektörlerin normal sayısını seçmemiz gerekmektedir. Bir bileşen vektörünün geometrik gösterimi:

⁹⁹ Eğer vektöre uygulanan iki operatör rotasyon operatörü (vektörlerde açısal değişime neden olur) ve $AB=BA$ ise, A ve B için değişme özelliği söz konusudur diyebiliriz.

1. $A(u+v) = Au+Av$

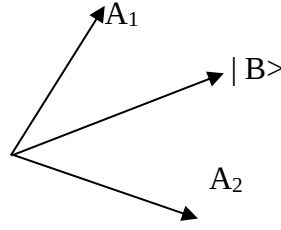
2. $A(cu)=c(Au)$

R^2 de bulunan operatörler reel sayıların 2×2 matrisiyle temsil edilir.

$$\begin{pmatrix} a & b \\ c & d \end{pmatrix}$$
$$v = \begin{pmatrix} x \\ y \end{pmatrix}$$

3. $Av = \begin{pmatrix} a & b \\ c & d \end{pmatrix} \begin{pmatrix} x \\ y \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} ax+by \\ cx+dy \end{pmatrix}$

Bir operatör ve bir vektörün çarpımı ilk satırın sol elemanı (a) vektörün ilk elemanı x'i, operatörün sağ elemanı (b) da vektörün ikinci elemanı (y) çarpıp topluyoruz bu çarpımın ilk satırını oluşturuyor (ax+by). İkinci satır için ise operatörün ikinci satırında yer alan sol elemanı (c) vektörün birinci elemanı x in çarpımı ve yine ikinci satırın sağ elemanı (d) ile vektörün ikinci elemanı y'yi çarpıp topluyoruz (cx+dy).



A_1 ve A_2 taban durumunda vektör $|B\rangle$ vektörlerin bileşenini temsil etmektedir. $|B\rangle = 3 |A_1\rangle + 2 |A_2\rangle$ ya da $\begin{pmatrix} 3 \\ 2 \end{pmatrix}$. Bileşenin sayısı vektör uzayını boyutuna eşittir. Buna göre 2 boyutlu uzayın vektörleri $\begin{pmatrix} 1 \\ 0 \end{pmatrix}$ ve $\begin{pmatrix} 0 \\ 1 \end{pmatrix}$ dir.

İç çarpımın gösterimi ise şu şekildedir:

$$|A\rangle = \begin{pmatrix} a_1 \\ \vdots \\ a_n \end{pmatrix} \quad \text{ve} \quad |B\rangle = \begin{pmatrix} b_1 \\ \vdots \\ b_n \end{pmatrix}$$

$$\langle A|B\rangle = a_1 b_1, \dots, a_n b_n = \sum_{i=1}^N a_i b_i$$

Vektör formalizmi oldukça soyuttur. Kuantum mekaniği gibi deneysel teoriler için deneylerle teoriyi karşılaştırabilmek hayatidir ancak bunu yapmanın tek yolu deneysel sonuçların matematiksel temsidir. Dirac notasyonu olarak bilinen bra-ket notasyonu¹⁰⁰ vektörleri matematiksel olarak ifade etmek için kullanılmaktadır. Örneğin, parçacık bırakılan kaynağa s, parçacıkların vardığı konuma x dediğimizde bu durumun $\langle x|s \rangle$ şeklinde gösterir ve dikey çizginin sağ tarafı başlangıç konumunu ifade temsil ederken sol tarafı son durumu göstermektedir.

Kuantum mekaniğinin matematiksel olarak en can alıcı noktası genel olarak kompleks sayılar¹⁰¹kullanılmasıdır çünkü kompleks sayılı iç çarpımın özel bir anlamı

¹⁰⁰Dirac 1930 yılında *Kuantum Mekaniğinin İlkeleri* adlı kitabında bu notasyonu açıklamıştır. $\langle x|\emptyset\rangle$ braketinde ikinci $|\emptyset\rangle$ olan kısmı ket, ilk kısmı ise bra olarak adlandırılır. Bu tanım durum vektörlerini temsil etmektedirler. Bu formülasyon oldukça kullanışlı bulunulduğundan kuantum mekaniğinin standart formülü oluşturmaktadır.

¹⁰¹ Kompleks sayı, bir reel sayı ile sanal (imaginary) sayının toplamına eşittir.

vardır. $|\langle A|B \rangle|^2$ iç çarpımın mutlak değerinin karesi kullanılabilir reel sayılar verir ve bu sayılar ölçüm değerlerini değil, ölçümle elde edilen sonuçların olasılıklarını temsil etmektedir.

Her bir duruma¹⁰² bir işlem yapıldığında yeni bir durum elde edilmektedir, örneğin $|\emptyset \rangle = A |\psi \rangle$ durumunda bir durum üzerine bir işlemcinin uygulanması üzerine yeni bir durum vektörü elde edilmiştir. x ve $\emptyset$ iki durumu temsil etmektedir ve $\emptyset$ de başlayıp x de son bulma taban durumları toplam olarak gösterilebilmektedir.

$$\langle x|\emptyset \rangle = \sum_i \langle x|i \rangle \langle i|\emptyset \rangle$$

$$\langle \emptyset|x \rangle = \langle x|\emptyset \rangle^*$$

B. Operatörler, Özvektörler (Eigenvectors) ve Özdeğerler (Eigenvalues)

Operatörler deney aracını ya da gözlenebilir niceliği temsil ederken, operatörün¹⁰³ öz değerleri ölçüm sonuçlarını temsil etmektedir. İlke olarak oldukça fazla sayıda farklı operatörler vardır, lineer operatörler özellikle uygulaması kolay operatörlerdir ve bu operatörler geometrik olarak paralelliği de korumaktadırlar. $\hat{O} (\lambda|A \rangle) + (\mu|B \rangle) = \lambda(\hat{O}|A \rangle) + \mu(\hat{O}|B \rangle)$. Kuantum mekaniği için de lineer operatörlerin matematiksel özellikleri kullanışlıdır.

Lineer operatörlerin hermitsel operatör ya da kendine eş (self-adjoint) operatörü olarak adlandırılan özel bir alt-grubu vardır ve kompleks eşlenik kullanılan

a) $z = x+iy$ $i=\sqrt{-1}$ *: kompleks eşlenik
 $|z|^2 = x^2+y^2$
 $z^* = x-iy$
 $z^{**} = x+iy$
 $zz^* = (x+iy)(x-iy)$
 $= x^2+y^2$
 $|z|^2 = zz^*$

b) $|c| = \sqrt{(c)(c^*)}$
 $c = a+ib$ eğer $|c| = 1$ ise $a^2+b^2 = 1$ 'dir.
 $a = \cos\theta$ $b = \sin\theta$

$c = \cos\theta + i \sin\theta = e^{i\theta}$ e: natural logarithm, sonsuz dizilerin toplamı.

¹⁰² Kuvvet kanunları ile uyumlu cisimlerin ya da parçacıkların mümkün hareketlerine sistemin durumu denmektedir. (P.A. M. Dirac, The Principles of Quantum Mechanics, (Londra: Oxford University Press, 1958), s. 11.

¹⁰³ Matematiksel olarak her operatör öz değere sahip değildir. $\hat{O}|A \rangle = |\hat{A} \rangle$

matrisleri simetriktir. Özdeğerlerinin maksimum değerlerinin hepsi reeldir. Bu özdeğerler¹⁰⁴ kuantum- fiziksel ölçüm sonuçlarının matematiksel sonuçlarını temsil etmektedir.

Bazı operatörler hem fiziksel bir anlama sahip olması hem de matematiksel özellikleri sebebiyle özel operatörler olarak isimlendirilmektedirler. Bu operatörlerin hepsi hem lineer hem de hermitseldirler ve özdeğerleri reel olup fiziksel olarak gözlenebilir nicelikler olarak yorumlanabilmektedirler. *İstatiksel operatörü* (density matrix), negatif özdeğeri olmayan lineer ve hermitsel operatörlerdir. Onun özdeğeri P_i , $0 \leq P_i \leq 1$ ve $\sum_i P_i = 1$ dir. Onun özdeğerleri olasılıklar gibi hareket ederler. *Unitary Operatörü*¹⁰⁵ (The time-evolution Operator), kuantum fiziksel sistemlerin dinamiği şimdiye kadar ki bütün ilişkilerinde zaman evrimi olarak aynı kalır. Ortonormalize vektörler ortonormalize olarak kalırlar ve iki vektörün iç çarpımı değişmemek zorundadır. Vektörlerin uzunlukları ve aralarındaki açı aynı kalır. $\hat{U}^* \hat{U} = \hat{I}$ matematiksel olarak bu şekilde temsil edilir. Unitary-zaman evrimli operatörün diferansiyel denklemleri $\hat{U}t = \exp\left(-\frac{i}{\hbar}t\hat{H}\right)$ ve $|\psi\rangle_t = e^{-i/\hbar t H}|\psi\rangle$ şeklindedir. Eğer gözlenebilir nicelik enerji ise $\hat{H} = \hat{E}_{\text{kinetik}} + \hat{E}_{\text{potansiyel}}$ matematiksel olarak $i\hbar \frac{d}{dt}|\psi(t)\rangle = \hat{H}|\psi(t)\rangle$ ve zaman evimli kuantum fiziksel sistem için kullanılan bu diferansiyel denklem Schrödinger denklemi olarak bilinir. Unitary zaman evrimli operatör hermitsel operatör değildir. Bu operatör ne ölçüm aracına ne de gözlenebilir niceliği temsil eder. Unitary operatörü doğrudan gözlenebilir olmayanları temsil etmektedir.

¹⁰⁴ Örneğin,

A $|v\rangle = a|v\rangle$

Bu denklemde A bir operatörü $|v\rangle$, A'nın öz vektörünü temsil ederken a da A'nın öz değerini simgeler.

$A = \begin{pmatrix} 0 & 2 \\ 2 & 0 \end{pmatrix}$ $v = \begin{pmatrix} 3 \\ 3 \end{pmatrix}$ $Av = \begin{pmatrix} (0)(3) + (2)(3) \\ (2)(3) + (0)(3) \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 6 \\ 6 \end{pmatrix} = 2v$

A operatörünün v vektörüyle çarpımının 2 öz değerine sahip olduğu sonucunu göstermektedir.

$w = \begin{pmatrix} -x \\ x \end{pmatrix}$ (A'nın ikinci öz vektörü)

$Aw = \begin{pmatrix} (0)(-x) + (2)(x) \\ (2)(-x) + (0)(x) \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 2x \\ -2x \end{pmatrix} = 2\begin{pmatrix} -x \\ x \end{pmatrix} = -2w$

A'nın ikinci öz vektörüyle çarpımını ise -2 öz değerini vermektedir.

Dolayısıyla

A $|v\rangle = 2|v\rangle$

A $|w\rangle = -2|w\rangle$ ve w A operatörünün öz vektörleri, 2, -2 de A'nın öz değerleridir.

¹⁰⁵ Zaman, konumun aksine bir gözlenebilir değildir bir parametredir. Görelî alan teorisine göre konum da bir parametredir.

Bir kuantum mekaniksel sistemin matematiksel olarak zaman bağıl değişimi doğrudan gözlemlenemez ve ölçüm sırasında doğrudan gözlenebilir dinamikler matematiksel olarak tanımlanamazlar dolayısıyla bu durum kuantum mekaniğinin yorumunda bir zorluk doğurur.

Konum ve momentum operatörleri, kuantum mekaniğinde konum ve momentum eşölçülemez niceliklerdir bir parçacığın momentumu ne kadar az bilinirse parçacığın konumu o kadar daha kesin olarak bilinir. Kuantum mekaniksel nesnelerin hareketi kesiklidir ve zıplama serileri ortaya çıkar. Konum operatörü $\hat{Q}$, momentum operatörü $\hat{P}$ ile temsil edilmektedir.

$\hat{Q}|q\rangle = x|q\rangle$, burada x parçacığın olası konum koordinatlarını temsil etmektedir. Konum özdeğerleri olarak isimlendireceğimiz bu olası koordinatlar devamlıdır. $|\psi(x)\rangle = \int \psi(x')\delta(x-x')dx'$, hilbert uzayındaki bir vektörün konumunu temsil etmektedir. Schrödinger formülasyonundaki dalga fonksiyonu ile uyumludur. Momentum operatörü konuma nispetle üretilmiş gibi hareket eder, $\hat{P}_x = -i\hbar \frac{\partial}{\partial x}$. Konum ve momentum arasındaki belirsizlik ilişkisi ise şu şekildedir, yani Heisenberg belirsizlik ilkesinin matematiksel ifadesi: $\Delta x \cdot \Delta p_x \geq \hbar/2$ dir. Standart yoruma göre genel anlamda kuantum nesneleri yörünge boyunca hareket etmezler.

$\hat{E}_{kin} = -(\hbar^2/2m) \partial^2/\partial x^2$ ve $\hat{E}_{pot} = V(x)$ bunu zaman evrimi takip eder ve konum temsiliinde zaman bağımlı Schrödinger denklemi:

$$\frac{i\hbar}{\partial t} \psi(x, t) = -(\hbar^2/2m) \partial^2/\partial x^2 \psi(x, t) + V(x)\psi(x, t)$$

şeklindedir.

IV. KUANTUM MEKANİĞİNİN YORUM İHTİYACI

Matematiksel yapısı sunulmuş olan bir teori fiziksel gerçeklikle uyumlu mudur ya da ne kadar uyumludur? Klasik mekanikte felsefi problemler genellikle zamanda kalıcılık (*persistence*) problemi, nedensellik vb. konular üzerine iken kuantum mekaniğinde matematiksel formalizasyonun fiziksel gerçeklikle ilişkisinin kurulup kurulamayacağı

problemlerin yönünü belirlemektedir.¹⁰⁶ Çünkü ortaya konan matematiksel formalizm oldukça soyuttur, somut gerçekliğe dair net bir şey söylememektedir. Hilbert uzayı, tamamıyla soyut bir vektör uzayıdır ve bu nedenle bu uzaya ait vektörler ve operatörler gerçek dünyadaki şeylerle doğrudan eşleştirilememektedir. Bu durum bu ilişkinin nasıl kurulacağı yönünde yorumsal bir alan açmaktadır ve yorumlamalar sonucunda fiziksel gerçeklik anlayışı seçilmektedir. Dolayısıyla kuantum mekaniğinde karşılaşılan en önemli problem yorumlama problemidir diyebiliriz.

Yorumlama konusunda her şeyin başlangıcı sayabileceğimiz çift yarık deneyine tekrar dönmemiz gerekmektedir. Atomaltı gözlenebilir niceliklerinin parçacık mı yoksa dalga mı olduğu sorusuna her ikisi de ya da hiçbiri cevapları verilerek ölçüm sürecinin kendisinin de yoruma ihtiyacı olduğu ortaya konulmuştur. Kuantum mekaniği olasılıksal bir yapıya sahip olmasına rağmen ölçüm sürecinde olasılık genliklerinin çöktüğü ve böylece formalizmde bahsedilen özdeğerlere yani ölçüm sonucuna ulaşıldığı gözlenmektedir. Çift yarık deneyinde elektronları hangi yarıktan geçmekte olduğunu belirlemek adına duvarın arkasına ışık kaynağını yerleştirdiğimizde olanları hatırladığımızda böyle bir izlemeyi yapmadığımız zamandan farklı bir sonuç alınmıştı. İki yarık açık ve izlenme yapılmadığında elektronlar dalga şeklinde hareket etmişti ancak izlediğimizde yani deneye müdahale ettiğimizde ise elektronların dalga özelliği çökmüş ve elektronlar parçacık olarak gözlemlenmiş ve girişim deseni oluşmamıştı. N. Bohr'un bu noktada sorduğu soru “doğa nasıl oluyor da çelişkilerden kaçabiliyor” olmaktadır. Ancak matematiksel formalizm buna net bir cevap sunamamaktadır.¹⁰⁷

Formalizasyon ve deney üzerinden yorum ihtiyacını doğuran soruları şu şekilde bir araya toplayabiliriz. Kuantum mekaniğinde klasik mekanikte olduğu gibi ölçüm sürecinin kendisi hakkında neler söylenebilir ve net bir resmi çizilebilir mi? Olasılık genliklerine sahip bir mekaniğin ölçüm araçları kullanılarak yapılan ölçümlerde olasılık genliklerinin çökmesi bize ne söyler? Ölçüm araçları, gözlenebilir nicelikler (atomaltı parçacıklar) ve gerçeklik arasındaki bağ nasıldır? Gözlenebilirler nicelikleri

¹⁰⁶ Cord Riebe, Meinard Kuhlmann, Holger Lyre, vd., *The Philosophy of Quantum Mechanics*, (İsviçre: Springer, 2018), s. 41.

¹⁰⁷ Abraham Pais, *Niels Bohr's Times in Physics, Philosophy and Polity*, (New York: Oxford University Press, 1991), s. 302.

izlemeye koyulduğumuzda neden farklı sonuçlar alıyoruz? İki farklı mekanik olan klasik ve kuantum mekaniği hangi noktalarda ayrılır? vb.

1925 yılında W. Heisenberg (1901-1976)'in kuantum mekaniğinin formalizmini ortaya koyması sonrası Heisenberg ve Bohr bu formalizmin tutarlı bir yorumunu yapmaya koyuldular. Bu yorumun iki önemli temsilcisi olan Bohr ve Heisenberg Kopenhag'da kuantum mekaniğine dair tartışmalar yürüttüler ve birçok hususta fikir ayrılığına düştüler. Yoğun tartışmalar sonrası Bohr dinlenmek için Norveç'e gitti. Heisenberg bu ayrılış sonrasında yalnızken doğanın nasıl çelişkilerden uzak durabildiğini ve formalizmin yorumunun cevabının belirsizlik (*uncertainty*) ilkesi olacağını keşfetti. Ancak geliştirdiği formülasyonu ilk olarak Pauli ile paylaştı çünkü Heisenberg, Bohr'un yine kendisini desteklemeyeceğini düşünerek Pauli'den destek almayı amaçlamaktaydı. Bohr, Kopenhag'a döndüğünde o da tamamlanabilirlik (*complementarity*) kavramını bulmuştu. Heisenberg, Bohr ile olan ayrılıklarının temel noktasının Bohr'un temel problem olarak dalga-parçacık ikiliğini merkeze almış olması olduğunu belirtmektedir. Bohr bu dualiteyi bütün hikâyenin merkezine koyarken Heisenberg, "tutarlı bir matematiksel şemaya sahibiz ve bu tutarlı matematiksel şema gözlenebilir her şeyi bize söylemekte" demektedir. Bohr, doğanın matematiksel bir şemayı taklit etmeyeceğini, ancak matematiksel şemaya uyan, sığan şeyler yapmakta olduğundan bahsetmektedir.

Bohr, 16 Eylül 1927'de Como'da gerçekleştirilen toplantıda görüşlerini açıkladı. İlk olarak Bohr, tekabül ilkesini (*correspondence principle*) ortaya kondu ve fiziksel gerçekliğin anlaşılması için klasik kavramları kullanmamızın gerekliliğini, mikroskobik nesne ve ölçüm arasındaki ilişkinin ancak böylece ifade edilebileceğini ileri sürdü. Como'da yaptığı konuşma metni kayıp olmasına karşın arşivinden fikirlerini ileri sürerken fikirlerin kabulünün zorluğunun farkında olduğu gözükmektedir. "Atom hakkındaki bütün bilgilerin klasik kavramlarla ifade edilmesi kelimenin tek anlamıyla zorluklar getirmiştir."¹⁰⁸ yazmaktadır. Buna karşın Heisenberg klasik kavramların kuantum mekaniğini açıklamak için uygun olmadığını belirtti ve klasik kavramlara

¹⁰⁸ Pais, *Niels Bohr*, s. 311.

sıkışıp kalmaktan rahatsızlık duydu. Yeni tutarlı matematiksel şemanın neyin orada olabileceğini ve neyin orada olmayabileceğini söylediğini yani doğanın her nasılsa matematiksel şemayı takip etmekte olduğunu belirtti. Buna karşın Bohr deneysel materyallerin yorumunda klasik kavramlara bağlı olduğunu belirtmekte ısrar etti.

Bohr kompleks sayılara ve yer değiştirme özelliğine sahip olmayan işlemcilerin bir sonucu olan belirsizlik ilkesinin aynı anda konum ve momentumun bilinemeyecek olmasına ve atomaltı parçacıkların hem dalga hem de parçacık özelliklerini aynı anda gösterememesini tamamlanabilirlik ilkesi ile açıkladı. Bu ilkeye göre atomaltı dünya konum- momentum, enerji-zaman, dalga-parçacık vb. özelliklerinin belirli bir andaki ölçümlerinden bahsedebilmeme karşın özellikleri birbirlerini dışlamaktadır ancak aynı zamanda kendi içlerinde bir çelişki barındırmayan özelliktedirler.¹⁰⁹ Ona göre sadece deney yapılırken ne istediğimize karar verip deneysel dizgeyi seçmemiz gerekmektedir. Tamamlanabilirliğin mantıksal dizgesi şu şekildedir. T bir fenomeni D_1 ve D_2 ise bu fenomenin iki farklı tanılamasını temsil etmektedir.

- 1) T en az kendinin iki D_1 ve D_2 olmak üzere farklı tanımlamaya sahip olmalıdır.
- 2) D_1 ve D_2 konuşulan aynı evrende olmak zorundadır.
- 3) D_1 ve D_2 birbirini dışarsayan iki tanımlamadır. Onların birleşimlerinin tek bir tanımı mantıksal olarak çelişkilere yol açmaktadır.

Bu üç özellik, Kopenhag okulunun kabul ettiği şekliyle bir teoremin tamamlanabilirliğin şartlarıdır. Bu yorumun ilkesel sözcülerinden biri olan Leon Rosenfeld'e göre, tamamlanabilirlik, fenomenin tam bir tanımı için birbirini dışlamasına karşın gerekli olduğu iki kavramla karşılaştığımızda ne yaparız? Sorusunun cevabıdır.¹¹⁰

¹⁰⁹Heisenberg, Bohr'un tamamlayıcılık kavramıyla ifade etmek istediğinin, kuantum sistemlerini açıklamaya yarayan bazı imgelerin bazı deneylerde uygulanabilmesine karşın birbirlerini karşılıklı olarak dışlaması olduğunu belirtmektedir. Bir deneyde atomun parçacıksal yapısını dikkate almak daha faydalıyken bazı deneylerde çekirdeği dalgalarla örülü olarak tasarlamak daha faydalıdır. (Werner Heisenberg, *Çağdaş Fizikte Doğa*, çev. Orhan Duru, Vedat Günyol, (İstanbul: Çan Yayınları, 1968), s. 45-46.

¹¹⁰Jammer, *The Philosophy of QM*, s. 104.

Kopenhag yorumun kurucusu olarak kabul edilen Bohr'un merkezi hipotezleri özetle şöyledir:

1. Mikrosistem ile ölçüm aleti arasında kaçılmaz bir ilişki söz konudur.
2. Bütün deneyler klasik fiziğin dilinde tanımlanmalıdır. (*Correspondence Principle*)
3. Uzay-zaman ve nedensel tanımlamaları birbirlerini dışarlamalarına karşın tamamlanabilirlik uzay-zamanı ve nedensel tanımlamaları bir arada tutar (*complementarity Principle*).¹¹¹

Bohr'a göre tamamlanabilirlik ilkesi genel doğanın felsefi tasarısının bir sonucu ve bilime epistemik bir ilişki sunan prensipken, Heisenberg bağıntıları mikrofizikte bu ilkenin sadece matematiksel çıkarımını temsil etmektedir. Aralarındaki yorum farklılıkları ölçüm süresinin tanımlanması probleminde de kendini göstermiştir, bu konuda Bohr susmayı tercih ederken Heisenberg ölçüm sürecini tanımlamak için ikinci bir dinamikten (gözlemci etkisi) söz etmektedir. 1959' da Heisenberg "*The Copenhagean Interpretation of Quantum Theory*" adlı makalesinde tamamıyla izole olmuş bir sürecin ölçülemeyeceğini dolayısıyla gözlemcinin olabildiği alanın ölçülebileceğini belirtmektedir. Bohr'un yorumunda gözlemci etkisinin önemli bir yeri yoktur o daha çok mikro nesne ve ölçüm aleti arasındaki ilişkiye odaklanmaktadır.

Heisenberg'in Kopenhag yorumunda iki zamansal dinamik vardır. Bunlardan ilki $|\psi\rangle$ vektörünün deterministik, geçici, olarak değişebilir üniter(unitary) zaman evrimi olan $i\hbar d/dt |\psi(t)\rangle = H |\psi(t)\rangle$ Schrödinger denklemi ile yönetilmektedir. İkincisi ise $\hat{O}$ ölçümünde $|\psi\rangle$ nün özvektörü $|\psi_i\rangle$ ve ölçüm sonucu λ_i , $|\langle \psi_i | \psi \rangle|^2$ olasılığın çökmesidir. Heisenberg'e göre zaman evrim operatörü hermitsel olmadığı için soyut Hilbert uzayında sadece Schrödinger zaman bağlı denklemi ortaya çıkar ve fiziksel olarak dalga çökmektedir.

Bohr ve Heisenberg arasındaki çekişmeli tartışmalar gösteriyor ki standart yorumun kurucuları olarak görülen bu iki fizikçi bile yorum konusunda ayrı

¹¹¹Friebe, *The Philosophy*, s. 50.

düşmüşlerdir buna karşın standart yorumu ayakta tutan nedenselliğin ve yerelliğin nasıl yorumlandığında yatmaktadır gibi gözükmemektedir. P. Dirac (1902-1984)'a göre eğer bir cisim gözlemlendiğinde cismin üzerindeki etkileşimler üzerinden sistem rahatsız edildiğinde eğer rahatsızlık ihmal edilebiliyorsa makro düzeyde bir cisim gözleniyordur yok eğer sistem rahatsız edildiğinde ihmal edilemiyorsa mikro düzeyde bir cisim gözleniyordur. Nedensellik bağlantısına gelindiğinde nedenselliğin rahatsız edilmeden bırakılan bir sistem için geçerli olacağı varsayımına dayandığı için makro düzeyde yani büyükler düzeyinde nedensellikten bahsedebilirken, mikro düzeyde yani küçükler düzeyinde nedensellikten bahsedilememektedir. Bununla beraber süperpozisyon (üst üste gelme) ve belirsizlik ilkeleriyle klasik fizikte bahsedilen belirli uzayda verilen bir noktanın gelecekteki durumunu mutlak olarak belirlemenin imkânı ortadan kalmıştır.¹¹² Standart yorum kuantum mekaniğinin ontolojik bir mahiyet taşımadığı ve bazı noktalarda açıklamaya hiç girilmemesi önermektedir çünkü atomaltı parçacıklara dair ölçüm öncesi herhangi bir bilgiden söz edilememektedir.

Bohr, Heisenberg, Jordan, Dirac ve diğer fizikçiler yeni kuantum mekaniğini ortaya koyarken Einstein ve takipçileri yeni kuantum mekaniğinin Kopenhag yorumunu sadece geçici bir bilimsel yorum olarak gördüler. 1920'de Einstein- Bohr arasındaki ilk tartışmalar başladı. Einstein mektuplarında kuantum teorisi hakkındaki temel endişesinin nedensellik konusu olduğunu vurgulamaktadır. 1923 Einstein "*Does Field Theory Provide Possibilities for Solving the Problem of Quanta?*" adlı makalesinde kuantum teorisi ile genel alan teorisinin birleştirilemezliği problemini nedensellik, devamlılık temelinde ortaya koydu. Compton etkisinin keşfedilmesiyle Bohr- Einstein arasındaki tartışmalar zirveye ulaştı. Bohr, Compton etkisinin ışık kuantası fikrini destekler nitelikte bulmadığı için enerji ve momentumun istatistiksel korunumu üzerine olasılıkçı bir yaklaşım ileri sürdü.¹¹³

Einstein ve Bohr arasındaki temel tartışma mikrofiziksel fenomenin kuantum mekaniksel tanımının Einstein'ın ileri sürdüğü gibi daha fazla detaya ihtiyaç duyulan yani tamamlanmamış olması mı yoksa Bohr'un iddia ettiği gibi bütün olasılıklar

¹¹² Cushing, *Kavramlar*, s. 161-182.

¹¹³ Jammer, *The Philosophy of QM.*, s.124.

gözlenebilir fenomen için zaten elde edilmiş mi? Hem Bohr hem de Einstein'ın teorilerini ispatlamasının kilit noktası belirsizlik bağıntılarıdır. Bohr kendi tamamlanabilirlik teorisini ispat için belirsizlik bağıntılarını kullanırken, Einstein'da Heisenberg bağıntılarını çürütürse relativiteyle uyumsuzluğu kaldıracak ve kuantum mekaniğinin tamamlanmamış olduğunu ortaya koyabilecekti. Jammer'a göre Heisenberg'i belirsizlik ilkesini formüle etmeye Einstein'ın felsefesi iterken, Einstein'ın bu ilkeyi çürütmek için çabaları ironik bir resim çizmektedir. Beşinci Solvey kongresinde¹¹⁴ Bohr tamamlanabilirlik yorumunu mantıksal tutarlılık içinde savunma konusunda başarılı olsa da Einstein'ı ikna edemedi. Einstein, Bohr'un teorisini bir bilimsel teoriden çok dogmatik bir inanç olarak değerlendirdi.¹¹⁵

Altıncı Solvey Kongresi 20-25 Ekim 1930 da gerçekleşti. Belirsizlik ilkesinde parçacığın aynı anda hem konumunun hem de momentumunun belirlenemeyeceği görüşüne karşı çıkan Einstein altıncı Solvey Kongresinde enerji-zaman, konum-momentum gibi eşleniklerin aynı anda ölçülebileceğine dair bir düşünce deneyi ileri sürdü. Foton kutu deneyi olarak bu düşünce deneyine göre: bir teraziye bağlı içi ışıkla dolu delikli bir kutunun içindeki delik bir saate bağlı ve tek bir foton çıkacak şekilde delik açılıp kapatılıyor bu sayede terazi ve saat sayesinde hem zaman hem de kutunun azalan ağırlığı ölçülmektedir. Bu düşünce deneyi Heisenberg belirsizlik ilkesi ile çeliştiğinden Bohr buna cevap vermeyi amaçladı ve bunu yaparken Einstein'ı kendi silahı olan genel rölativite teorisiyle vurmayı amaçladı. Altıncı Solvey kongresi kuantum mekaniğinin tutarsız oluşu fikrinden çok tamamlanamazlığını kanıtlamak üzerine tartışmaların geçtiği bir kongre oldu.¹¹⁶

¹¹⁴ Beşinci Solvey kongresi 24-29 Ekim 1927 yılında Lorentz başkanlığında gerçekleştirildi. Konferansa çok sayıda fizikçi katıldı. Kongrenin konusu yeni kuantum mekaniği idi. Bohr 1920'de Einstein ile görüştü ve onun nedensellik ve devamlılık hususlarından vazgeçmek istemediğini anladı ancak yine de Einstein'ı tamamlanabilirlik ilkesinin pozitivist öğelerinin onun fikrini değiştireceğine dair bir ümit taşıdı. Buna karşın beklentisinin ve ümidinin gerçekleşmediğini sonraki kongreler ve görüşmelerde de gördü.

¹¹⁵ Jammer, *The Philosophy of QM.*, s. 127-129.

¹¹⁶ Jammer, *The Philosophy of QM.*, s. 136. Einstein'ın kuantum mekaniğinin tutarsız olduğu fikrinden vazgeçerek kuantum teorisinin tam olmadığı yönünde bir fikir değişikliğine gitme sebebi altıncı Solvey konferansında enerji-zaman, konum-momentum gibi eşlenik değerlerin aynı anda ve aynı kesinlikte ölçülebileceğini ispatlamak adına bir düşünce deneyinin Bohr tarafından çürütülmesi yolculuğuna dayanır. Hikâyenin detayı şöyledir: Düşük yoğunlukta elektromanyetik ışımayla dolu olan bir kutu ve bir saat tarafından çalıştırılacak bir kapak yer almaktadır. Kapak çok hızlı bir şekilde açılıp kapanmaktadır ve bu sayede tek bir foton kutudan çıkmaktadır. $E=mc^2$ olduğundan kutudan foton çıkmadan önce ve sonra hassas ölçümle birlikte dışarı çıkan fotonun enerjisi bilinebilmektedir. Enerji ve zaman birbirinden

Bohr ve Einstein'ın tartışmalarının sebebine dair farklı değerlendirmeler söz konusudur. Bunlar özetle şu şekildedir: Hans Naumann, bu tartışmaları materyalizm ve idealizm tartışmasından kaynaklandığını belirtmektedir. Boris Kouznetsov'a göre, tartışmanın temeli felsefi ya da ideolojik değildir. Mevcut fiziğin rölativite ve kuantumu birleştirmekteki başarısızlığında yatmaktadır. Weizsacker, buna ciddi bir yanlış anlaşılmanın yol açtığını ifade etmektedir ve Einstein fizikten gerçekliği elemek isteyen görüşlere karşıydı, Einstein Bohr'u da aynı kategoride değerlendirdi ancak Weizsacker'a göre Bohr, Mach'ın pozitivizmini paylaşıyor da fiziksel gerçeklik fikrini yadsımamıştır. Kurt Hübner, Weizsacker'ın görüşüne katılmamaktadır. Ona göre, bu tartışmanın temelinde iki karşıt ilkenin yansıması yatmaktadır. Einstein da bağıntılar maddeyle/ özlerle tanımlanırken; Bohr'da maddeler, bağıntılarla olan ilişkisi içinde ele alınmaktadır. Einstein'a göre, fiziksel gerçeklik maddelerin başka maddelere ihtiyaç duymadan var olan maddelerden oluşur. Bohr'a göre gerçeklik maddeler arasındaki ilişkidir, bağıntıdır. Ölçüm bu tarz bağıntılarda özel bir durumdur.¹¹⁷

A. EPR Paradoksu¹¹⁸

Einstein her ne kadar eski kuantum mekaniğinin önemli isimlerinden olsa da belirsizlik ilkesi üzerine kurulu kuantum mekaniğinin tam olmayışı üzerine yoğunlaşmıştır hayatının sonuna kadar da kuantum mekaniğine olan soğuk tavrını korumuştur. 1935'te Einstein, Boris Podolsky (1896-1966) ve Nathan Rosen (1909-1995) ile "*Can Quantum-Mechanical Description of Physical Reality Be Considered Complete?*"¹¹⁹ makalesini- kısaca bu makaleye EPR denmektedir- yine aynı amaçla yani kuantum mekaniğinin tam bir teori olmadığını göstermek için kaleme aldılar.

bağımsız olarak ve kesin olarak hesaplanabilmektedir. Einstein bu düşünce deneyi ile belirsizlik ilkesini geçersiz kıldığını ileri sürmesine karşın Bohr, Einstein'a onun genel görelilik ilkesini hatırlatarak ve foton çıktığında kütle çekim alanında $\Delta m = \Delta E/c^2$ kütle kaybı ile meydana gelen değişikliğinin saatin zamanı tutma hızını etkileyeceğini belirterek düşünce deneyine güçlü bir yanıt vermektedir. (Cushing, *Kavramlar*, s. 187-8.)

¹¹⁷ Jammer, *The Philosophy of QM.*, s. 156-157.

¹¹⁸ Jammer, EPR paradoksu kullanmak yerine EPR argümanı olarak kullanmayı tercih etmektedir çünkü ona göre makale yazarlarının bu kelimeyi kullanmadıklarını sonradan sağduyuya aykırı olması anlamında paradoks denmiştir. (Jammer, *The Philosophy of QM.*, s. 186) buna karşın biz paradoks olarak kullanmaya devam etmeyi tercih ediyoruz.

¹¹⁹ "Fiziksel Gerçekliğin Kuantum Mekaniksel Betimlemesinin Tam Olduğu Düşünülebilir mi?"

EPR makalesi, bir fiziksel teorinin başarısı ve doğruluğunun nasıl belirleneceğine dair sınırlarını çizerek başlar. Bir fiziksel teorinin başarısı iki soru ile test edilebilmektedir: 1) teori doğru mu? 2) bu teori tarafından verilen betimleme tam mı? Ancak bu iki soruya cevap pozitif olduğunda teorinin kavramlarının yeterli olduğu sonucuna varılabilir. Teorinin doğruluğunu ise teorinin çıkarımları ve insan deneyiminin arasındaki uyumun derecesi belirlemektedir. Bu deneyim, fizikte teorinin çıkarımları ile deney ve ölçüm arasındaki uyumda yatmaktadır. Makalenin can alıcı noktasına giriş yapılmıştır ve bir fiziksel teorinin tamlık koşulu nedir? Heyecanlı sorusuna cevap, fiziksel gerçekliğin her ögesinin fiziksel teoriyle mukabil olması gerektiğidir. Yazarlarımız gerçekliğin tam bir tanımını vermekten kaçınmakta ve fiziksel gerçekliğin öğelerinin felsefi anlamda a priori olarak belirlenemediğini ancak deney ve ölçümle sonuçlarına başvurularak belirlenebilmektedir ve fiziksel nicelikle, bir fiziksel gerçeklik ögesi vardır diyebilmek için sistemi hiçbir şekilde rahatsız etmeden fiziksel niceliğin kesin bir değerine ihtiyaç vardır.

EPR, Kuantum mekaniksel bir sistemin nasıl olduğuna dair bilgiler vermektedir, belirsizlik ilkesini ele almakta ve operatörler değişme özelliği olmayan iki niceliğe tekabül ederse, bu niceliklerden birine dair kesin bir bilgi diğerinin kesin bilgisine ulaşılmasında engel olduğunu ve deneysel olarak ikinciye belirleme girişimi de ancak sistemi değiştirmekte ve ilk olarak elde edilen kesin bilgiyi geçersiz kılmaktadır. Makale,

Ya 1) dalga fonksiyonu tarafından verilen gerçekliğin kuantum mekaniksel betimlemesi tam değildir veya 2) operatörler değişme özelliği olmayan iki fiziksel niceliğe tekabül ettiğinde, bu iki nicelik eş zamanlı olarak gerçekliğe sahip değildir. Eğer ikisi de eş zamanlı gerçekliğe sahip olsaydı tamlık şartına göre tam bir betimleme olurdu. Eğer dalga fonksiyonu, gerçekliğin tam bir betimlemesini sağlıyor olsaydı bu değerleri içeriyor olurdu.¹²⁰

İki nokta üzerinden kuantum mekaniğinin tam olmadığını ispatlamaya girişmiştir.

¹²⁰ A. Einstein vd. "Can Quantum-Mechanical Description of Physical Reality Be Considered Complete?", *Physical Review* 47 (1935): s. 777.

EPR makalesini kuantum mekaniği için oldukça önemli hale getirmiş olan makalenin ikinci kısmının çözümlemesine odaklanalım. I ve II sistemlerinin $t=0$ anından $t=T$ anına kadar etkileşimde olduklarını ve bu süre sonrasında bu iki sistemin artık etkileşmediğini düşünelim. Bu iki sistemin $t=0$ anından öncesinde bilindiğini varsayalım bu durumda $t>T$ olmak üzere I+II sisteminin birleşim durumunu Schrödinger denklemiyle hesaplayabiliriz. ψ bir dalga fonksiyonu olarak belirlediğimizde iki sistem etkileşmediğinde artık birleşik durum hesaplanamaz. Kuantum mekaniğinde ise bu hesaplama dalga mekaniğinin çökmesi olarak adlandırılan daha ileri bir ölçüm yardımıyla sadece yapılabilmektedir. Dalga fonksiyonunun çökmesi sürecini EPR'ın gözünden ele alalım. $a_1, a_2, a_3, \dots$ birinci sisteme ilişik A fiziksel niceliğinin özdeğerleri ve $u_1(x_1), u_2(x_1), u_3(x_1), \dots$ ise özfonksiyonları olsun. x_1 , birinci sistemi tanımlamak için kullanılan değişkenleri temsil ederken ψ x_1 in bir fonksiyonu olarak düşünüldüğünde

$$\psi(x_1, x_2) = \sum_{n=1}^{\infty} \psi_n(x_2) u_n(x_1) \quad (a)$$

şeklinde ifade edilmektedir ve x_2 , ikinci sistemin tanımlamak için kullanılan değişkenleri temsil etmektedir. Burada $\psi_n(x_2)$, $u_n(x_1)$ ortogonal fonksiyonlarının bir serisinin ψ 'nin kapsamının sadece katsayısı olarak düşünülmelidir. Bu A fiziksel niceliği ölçtüğümüzü ve bir a_k değeri bulunduğunu farz edelim. Ölçüm tamamlanınca birinci sistem dalga fonksiyonu $u_k(x_1)$ olarak verilen durumda kalırken, ikinci sistemin $\psi_k(x_2)$ dalga fonksiyonu olarak verilen durumda kaldı, buna dalga paketinin çökme süreci denmektedir. (a) de verilen sonsuz seriler tek bir $\psi_k(x_2)$ $u_k(x_1)$ terime düşmektedir. Dolayısıyla denklemimiz

$$\psi(x_1, x_2) = \sum_{n=1}^{\infty} \varphi_n(x_2) v_n(x_1) \quad (b)$$

olmaktadır.

$u_n(x_1)$ fonksiyonlar kümesi, A fiziksel niceliğinin seçilmesiyle belirlenmektedir. EPR farklı bir B niceliği üzerinde de benzer süreci ele almış ve ilk sistem üzerine yapılmış farklı ölçümlerin sonucu olarak ikinci sistem iki farklı dalga fonksiyonuna sahip olabilmektedir. EPR'a göre eğer bu iki sistem ilintili değilse, birinci sistemde meydana gelen olay/sonuç ikinci sistemde gerçek bir değişim söz konusu değildir.

EPR verdiği son örneğinde ise P ve Q eş değişme özelliği olmayan iki fiziksel niceliğinin ψ_k ve ϕ_r özfonksiyonu olan iki dalga fonksiyonu olan bir sistemin konum ve momentumu hesaplamaktadır. EPR ölçümüne göre $P=p_1$ seçtiklerinde p_2 'nin değerini öngörebilmektedirler. Eğer $Q=x_1$ seçilseydi bu durumda x_2 'nin değeri de öngörölebilmektedir. Dolayısıyla p_2 ve x_2 her ikisi de fiziksel gerçekliğe sahiptirler ve ψ_k ve ϕ_r dalga fonksiyonları aynı gerçekliğe aittirler. Bu örnekle beraber makalenin ilk sayfalarında bahsedilen paradoksal yapı tekrar ortaya çıkmaktadır.

... Dalga mekaniğinin fiziksel gerçekliğin tam bir betimlemesi sunduğu varsayımıyla başladığımızda, değişme özelliği olmayan operatörlere sahip iki fiziksel niceliğin eş zamanlı gerçekliğe sahip olabileceği sonucuna vardık. Bu nedenle (1)'in değili sadece (2)'nin de değiline yol açmaktadır. Dolayısıyla dalga fonksiyonları tarafından verilen fiziksel gerçekliğin kuantum mekaniksel betimlemesi tam değildir çıkarımını yapmak durumunda kalırız.¹²¹

Sonuç olarak kuantum mekaniğinin tam olmadığını göstermeyi amaçlayan makale yukarıda bahsi geçtiği şekilde düşünce deneyleriyle ortaya konmaya çalışılmıştır. Son paragrafında ise kuantum mekaniğini gerçekliğin ancak ölçüm ve öngörüyle eş zamanlı olarak ortaya çıktığı konusunda eleştirmekte ve değişme özelliği olmayan iki fiziksel niceliğin aynı anda her ikisinin de gerçek olmadığı görüşlerini aktararak gerçekliğin hiçbir makul betimlemesinin bu duruma izin vermeyeceğini dile getirmişlerdir. Dolayısıyla tamamlanmamış böyle bir teorinin ek değişkenlerle desteklenmesi gerekmektedir¹²² böylece teori yerellik ve nedensellik noktasında yenilenebilecektir.

Bohr aynı yıl aynı dergiye EPR makalesiyle aynı ismi taşıyan bir makale yazdı cevap olarak. Bohr EPR'da sözü edilen iki farklı dalga fonksiyonunun aynı gerçekliğe sahip olduğu fikrini farklı dalga fonksiyonlarının ancak farklı deneylerde kullanılabileceğini gösteren deneylerle Heisenberg belirsizlik bağıntısını geçersiz sayıp bir parçacığın momentum ve konumunun eş zamanlı olarak belirlenemeyeceğini

¹²¹ A. Einstein, vd. EPR, s. 780.

¹²² J. S. Bell, *Speakable and Unsayable in Quantum Mechanics*, (Cambridge: Cambridge University Press, 1987), s. 14.

kanıtladı. Temelde ise EPR makalesini fiziksel gerçekliğin kriterlerini vermede müphem olduğunu belirtmiştir ve o da fiziksel gerçekliğin a priori felsefi bir kavramdan çıkarılamayacağını, deney ve gözlemlerle ortaya konan bir ölçümlerin fiziksel gerçekliği ortaya koyduğunu belirtti. Bohr yerel olmama durumunu EPR gibi kabul etmedi ancak fiziksel gerçeklik tanımında kullanılan fiziksel sistemi rahatsız etmemenin açık bir şekilde ifade edilemediği konusunda eleştirilerini sundu. Ona göre kuantum mekaniği kendi çerçevesinde tam bir teoridir.¹²³ Bohr'un bu cevabı bu üç yazarın fikrini değiştirmede onlar kendilerinin kuantum mekaniğinin tam olmadığına dair kesin bir delil sunduklarına daima inandılar.¹²⁴

B. Bell Eşitsizlikleri ve Deneyleri

Kuantum mekaniğine getirilen ve standart yorum olarak kabul edilen Kopenhag yorumu nedensellik içermeyen ve yerel olmayan yorumlarından dolayı eleştirilmeye devam etti. Aslına bakılırsa EPR, standart yorumun çok önemli noktalarına dokundu. Bunlardan biri olan ve yukarda bahsetmiş olduğumuz iki dolanık parçacığın uzaysal olarak ayrıldıktan sonra da etkileşimde olduğunu belirten Kopenhag yorumu eleştirilmişti. Schrödinger'de EPR araştırmalarına destek vermiş bir isimdir hatta birbirinden ayrı fakat dolanık iki parçacığın durumlarına “entangled” yani dolanık durumlar ismini veren de odur.

David Bohm, EPR'da anlatılan ilintili durumları spinler üzerinden tekrar ele alır. Bu ilintili/dolanık sistemleri anlamak için basit bir şekilde bir inceleyelim. Örneğin $\psi_1 \rightarrow \psi_2$ evrilen $\uparrow z \downarrow z$ sistemini düşünelim ayrık durumları içeren bir sistemse birinci sistemin ölçülmesi bize ikinci sistemin durumuna dair bir değer vermeyecektir. Ancak ilintili olan durumlarda ise örneğin $|\psi\rangle = 1/\sqrt{2} (|00\rangle + |11\rangle)$ dolanık durumunda A ve B parçacıklarını düşünelim $|\uparrow\uparrow\rangle + |\downarrow\downarrow\rangle$ durum fonksiyonunda A'yı $\uparrow$ olarak ölçtüğümüzde yani 0, B ölçülmeden onun da $\uparrow$ olduğu bilinir. Bir π^0 mezunun bozunumunu düşünelim bozunduğunda bir elektron bir pozitron ortaya çıkar ve bu iki

¹²³ Neils Bohr, “Can Qunatum-Mechanical Description of Physical Reality be Considered Complete?” *Physical Review* 48 (1935), s. 696-702.

¹²⁴ Jammer, *The Philosophy of QM.*, s. 187.

parçacık zıt yönlerde hareket eder. π^0 , zıt spinlere sahip elektron ve pozitron içerdiği için açısal momentumun korunumu gereği spinini 0'dır. π^0 'ın tekli durumu (*single state*): $\psi(1/\sqrt{2}[(\uparrow)_-(\downarrow)_+ - (\downarrow)_- \uparrow_+])$ 'dır. Eğer ölçüm yapıldığında elektronu spin sonucu yukarı ise pozitronun spin sonucunun aşağı olduğu bilinir. Dolayısıyla dolanık olan bu iki parçacık olabildiğine fiziksel olarak uzaklaştırılırsalar ve ayrık durumlar haline getirilmeye çalışılsa da kuantum mekaniğinin yorumuna göre etkileşimleri sürecektir ve birinin ölçülmesi durumunda diğeri ölçülme de değeri bilinebilecektir.

Dolanık durum sistemleri iki hususta problematik bir alan sunmaktadır. İlk olarak uzaysal olarak uzak bir sistem etkileşmektedir hatta bu etkileşim ani bir şekilde gerçekleşebilmektedir (kuantum mekaniğine göre) bu durumda etkileşim ışık hızından daha hızlı hareket etmektedir. İkinci olarak yine kuantum mekaniğine göre ölçüm yapılana kadar spin değerleri belirsizdir. Bunların sonucunda üç farklı görüş öne çıkmıştır. İlk realist görüş olan Einstein ve taraftarlarının görüşü, kuantum mekaniği tam değildir ve gizli değişkenler (hidden variables) söz konusudur bu parçacığın sahip olduğu öyle bir özelliktir ki ölçümden oldukça önce zaten spin değeri yukarı ya da aşağı olarak belirlenmiştir. Dolayısıyla gizli değişkenlerden dolayı olasılıksal bir resim gözükse de aslında sistem belirlidir ve rastlantısal değildir. Realist bakış açısından özel görelilik gereği ışık hızından daha hızlı bilgi aktarımı olmayacağı için yerellik korunmuş olacaktır. İkinci görüşte ise David Bohm tarafından yerel olmayan gizli değişkenler teorisi ileri sürülmüştür.¹²⁵ Kuantum mekaniğin Ortodoks yorumuna göre ise kuantum mekanik dünyasının klasik dünyanın kurallarına göre hareket etmediğini yerellik ve nedenselliğin kuantum dünyası için geçerli olmadığını savundu.

EPR'ın yayınlanmasından yaklaşık 30 yıl sonra David Bohm'un da gizli değişkenlerin yerel olmayan bir versiyonunu ileri sürdüğü bir ortamda John S. Bell ortogonal olmayan üç (a, b, ve c) farklı yöne sahip spin ölçümleriyle ilgilendi ve yerel

¹²⁵ 1952 yılında David Bohm kendi gizli değişkenler (hidden variable) yorumunu yayınladı ve de Broglie'nin pilot-dalga teorisini genişletilmiş hali olan bu teoriyle uzayın bütün noktalarında ayar alanlarının değerlerini içeren bir gizli değişkenler teorisini ortaya koydu. Bununla birlikte Bohm kuantum ölçüm probleminin çözümünde kendi teorisinin tutarlılığı ve Kopenhag yorumundan daha üstün olduğunu ifade etmektedir.

realistik teorilerin düşüncesi üzerinden bir eşitsizlik üretti. Dolanık bir sistem düşünelim bozunduğunda zıt yönlere foton saçsın ve Bell'in bu üç polarizörüyle iki farklı kişi tarafından ölçümleri yapılsın. Fotonun 3 farklı polarizörden geçmesi $2^3=8$ farklı şekilde gerçekleşmektedir. Polarizörden geçtiğini + geçmediğini - ile gösterelim. İki fotonun ayrı ayrı spinleri ölçüldüğünde polarizörden geçme ve geçmeme durumlarının aynılığını A ile farklılığını F ile gösterelim.

	a	b	c
1	+	+	+
2	+	+	-
3	+	-	+
4	+	-	-
5	-	+	+
6	-	+	-
7	-	-	+
8	-	-	-

Tablo1: Fotonun Üç Farklı Polarizatörden Sekiz Farklı Şekilde Geçmesi

Ab	Bc	Ac
A	A	A
A	F	F
F	F	A
F	A	F
F	F	A
A	F	F
A	A	A

Tablo2: Fotonların Polarizatörden Aynı-Farklı Geçme Durumları

İki fotonun aynı polarizörden aynı anda geçtikleri ve geçmedikleri durumu çıkardığımızda diğer durumların olma olasılığı $1/3$ oranındadır. Gizli değişkenler teorisine göre her şey ölçüm öncesinden belirlendiği için aynı sonuç verisi $1/3$ 'ten büyük ya da eşit olmalıdır. Ancak aynı sonucu alma olasılığı $1/4$ 'ten büyüktür. Bu durumda $0.25 \geq 1/3$ olamayacağından gizli değişkenler teorisi yanlış olmalıdır. Basitleştirerek anlattığımız Bell eşitsizliği şu şekildedir:

$$N(a, \sim b) + N(b, \sim c) \geq N(a, \sim c)$$

$$P(\uparrow 0, \downarrow \theta) + P(\uparrow 0, \downarrow 2\theta) \geq P(\uparrow 0, \downarrow 2\theta)$$

Bell'in ileri sürdüğü eşitsizlik EPR ile uyumludur ancak $\downarrow \theta = \cos(\theta/2) \downarrow 0 + i \sin(\theta/2) \uparrow 0$ olduğunda,

$$P = \sin^2(\theta/2) + \sin^2(\theta/2) \geq P = \sin^2(\theta)$$

$$\left(\frac{\theta}{2}\right)^2 + \left(\frac{\theta}{2}\right)^2 \geq \theta^2$$

Olmayacağı için kuantum mekaniği Bell eşitsizliğini ihlal etmiştir. Eğer kuantum formalizminin bu tarz deneyler için doğru ise fiziksel dünyanın kendisi EPR'ın bahsettiği gibi yerel olamaz ve EPR'ı büyük ölçüde rahatsız eden dolanıklık gerçektir.

Bell 1964 yılında elektron spin kuantumlanması üzerine geliştirdiği eşitsizlik sonrasında tartışmaların seyrini değiştirdi ve deneysel olarak araştırmalar başladı. Eşitsizlik üzerine yapılan ilk deney Innsbruck üniversitesinde yapıldı. Akabinde Bell eşitsizliklerini gerçek deneyler için daha iyi bir forma sokan Clauser-Horne-Shimony-Holt makalesi yayınlandı. Deneylerin ilk serisi bir foton çifti kullanılarak 1970 yılında Berkeley, Harvard ve Teksas'ta gerçekleştirildi. Deney sonuçları kuantum mekaniği ile uyumlu gözüküyordu buna karşın deney şartları ideal olandan uzaktı çünkü sadece + sonucunu veren tek yönlü polarizör kullanılmaktaydı. Lazer fiziğinin ve modern optiğin gelişmesiyle birlikte “Bell teoremi, bu yüzyılın önemli keşiflerinden biridir.”¹²⁶ cümlesinin sahibi Alain Aspect (1947-) ve ekip arkadaşları tarafından gerçekleştirilen oldukça etkili dolanık foton çifti üreten lineer olmayan kaynakla deneyler ortaya kondu. Yine bu deneylerde EPR düşünce deneyine uygun olarak iki polarizör kullanıldı. Sonuç olarak ilk deneylerle de uyumlu olarak kuantum mekaniğinin Bell eşitsizliklerini ihlal ettiğine ulaşılmıştır.

1980'lerin sonunda Maryland ve Rochester'da dolanık EPR foton çiftleri üretmek için lineer olmayan ultraviyole fotonları üreten ve böylece oldukça uzak mesafelerde ölçüm yapmaya izin veren bir kaynak kullanılmaya başlandı. Yapılan bu deneylerde de sonuçlar kuantum mekaniğiyle oldukça uyumluydu. Aspect deneylerin sonucunda dolanık EPR foton çiftinin ayrılmaz tek bir nesne olduğu sonucuna varmalıyız çünkü her bir foton için bireysel yerel bir varlık atfetmek mümkün değildir. Dolayısıyla her iki foton uzay ve zaman aracılığıyla etkileşime devam etmektedirler. Innsbruck ekibi deneysel verilere baktığında polarizörlerden biri değişir değişmez aniden diğer polarizör de dolanık olarak değişmektedir. Kuantum dolanıklılığının en

¹²⁶ Alain Aspect, “Bell’s Inequalities: More Ideal Than Ever”, *Nature* 398 (1999): s. 189.

önemli katkısı ışık hızından daha hızlı iletişimi mümkün gören kuantum teleportasyonunun temellerini oluşturuyor olmasıdır.¹²⁷

Fiziksel dünya ile doğrudan ilişkilendirilemeyen soyut bir vektör uzayına sahip kuantum mekaniği yukarıda ele aldığımız Bohr-Heisenberg, Einstein-Bohr, EPR taraftarları-Kopenhag kuantum mekaniği taraftarları arasında ciddi tartışmalara yol açtığını artık biliyoruz. Atomaltı dünyayı tanımlamak için geliştirilen formalizm deneysel olarak birçok hususta başarı göstermiş ve göstermeye devam ederken yorum yapmaya özgür bir alan bırakmaktadır. Buna karşın kuantum mekaniğine dair farklı yorumlar bulunması fiziksel gerçekliğin nasıl tanımlandığına bağlı olarak iki ana yapı olarak ve bu iki ana yapıyı birleştirme çabaları olarak genel bir bakış elde edebiliriz. İlki fiziksel gerçekliği realist bir yönden ele alarak klasik mekaniğin deterministik, nedensel, yerel özellikleri üzerinden açıklama çabasını, ek değişkenler ya da şu an için gizli olan ve deneysel araçlarımızı ilerlettikçe keşfedebileceğimiz gizli değişkenleri içeren ve ölçüm öncesi atomaltı parçacıkların(varlıkların) fiziksel gerçekliğe sahip olduğu bir yorumdur. İkinci olarak ise atomaltı dünyayı klasik dünyadan oldukça ayrı olduğunu; indeterminist, rastlantısal, belirsiz ve yerel olmayan vb. özellikleri barındıran ve fiziksel gerçekliği ölçümle aynı anda var olmak olarak belirten bir yorumdur. Üçüncüsü ise realist yorum ile anti-realist yorumlar arasında gidip gelen bazen klasik realizme yakın ve onu aşmaya çalışan (Bohm teorisi vb.) ya da antirealist standart görüşe yakın ve onu aşmaya çalışan (Feynman kuantum mekaniği açıklamaları vb.) yorumlar yumağıdır.

Kuantum mekaniği ile birlikte nedensel yasalardan olasılık yasalarına geçiş ve gözlenebilir olarak adlandırılan ama görülemeyen nesnelerin yorumu bizi çağdaş fizikte içine girilmezlik olarak alacağımız Pauli dışarlama ilkesinin modern dönemde belirli ya da kuvvetler üzerine kurulu yapılar üzerinden ele alınamayacağı açıktır.

¹²⁷ Aspect, “Bell’ Inequalities”, s. 190.

V. TEMEL PARÇACIKLAR VE KUVVETLER

Kuantum alan teorisinden bahsedilmeden önce kuantum temel parçacıklarına ve etkileşimlerine bakmak yerinde olacaktır. İlk başlarda elektron, nötron ve proton maddenin temel yapısını oluştururken zamanla müthiş bir parçacık keşfetme çılgınlığı ortaya çıktı. Aşağıda bazı parçacıkların türü, keşfedildiği yıl, kim/kler tarafından keşfedildiği ve nasıl keşfedildiği içeren bir tablo bulunmaktadır. Tabloda sunulan parçacıklar alan teorilerinin birleşimini temsil eden Standart Modelde etkili olan parçacık ve etkileşimleri içermektedir.

Standart model genel bir resmini tasvir edecek olursak parçacıklar yarım spinli fermiyon- ki Pauli dışarlama ilkesinin etkili olduğu parçacıklardır- ve tam spinli bozonlardan oluşmaktadır. Fermiyon grubu, doğada serbest halde bulunmayan ve birleşimleriyle parçacık oluşturan kuarklara (yukarı (u), aşağı (d), acayip/garip (s), tılsım (c), üst (t), alt (b) olmak üzere altı tür) ve doğada serbest olarak bulunabilen leptonlara (elektron, muon, tau -muon ve tau, elektronun kütleli olarak daha ağır versiyonudurlar- ve elektron nötrinosu, muon nötrinosu, tau nötrinosu) ayrılmaktadır. Kuark ve anti-kuarklardan oluşan mezon parçacıkları, üç kuarkın etkileşimiyle oluşan baryon parçacıklarını ortaya çıkarırken kuarkların genel adı hadronudur. Bozonlar doğada etkili olan dört kuvvetin (elektromanyetik kuvvet, zayıf kuvvet, yeğin kuvvet ve kütle çekim kuvvet) taşıyıcısıdır, dolayısıyla fermiyonlar arasındaki etkileşimi sağlamaktadırlar. Elektromanyetik kuvveti taşıyan foton, zayıf kuvveti taşıyan W^+ , W^- ve Z^0 bozonları, yeğin kuvveti taşıyan gluon, kütle çekim kuvvetini etkileyen graviton ve son olarak parçacıklara kütle kazandıran Higgs bozonudur.

Parçacık	Türü	Keşfedildiği Yıl	Kim Tarafından keşfedildi	Nasıl Keşfedildi
Elektron e^-	Lepton	1897	J. J. Thomson	Katot Işın Tüpü
Proton P	Baryon uud	1911-19	E. Rutherford	Çekirdeklerden alfa saçılımı

Foton Γ	Ayar Bozon	1923	A. Compton	Atomsal elektronlardan X-ışınları saçılması
Nötron N	Baryon uud	1932	J. Chadwick	Alfa parçacıklara sahip Berilyum Bombardmanı
Positron (Anti-Elektron) e^+	Lepton	1932	C. Anderson	Kozmik ışıma
(Anti-) Muon μ^+, μ^-	Lepton	1937	C. Anderson & S. Neddermeyer	Kozmik ışıma
Pion π^+, π^-	Meson $u\bar{d}, d\bar{u}$	1947	C. Powell & Grup	Kozmik ışıma
Kaon K^0	Meson $d\bar{s}, s\bar{d}$	1947	G. Rochester & C. Butler	Kozmik ışıma
Kaon K^+, K^-	Meson $u\bar{s}, s\bar{u}$	1947	G. Rochester & C. Butler	Kozmik ışıma
Pion π^0	Meson $u\bar{u}, d\bar{d}$	1949	R. Bjorkland & ekip	Proton Hızlandırıcı (Kiklotron)
Lambda Λ^0	Baryon uds	1951	C. Butler & grup	Kozmik ışıma
Xi Ξ^-	Baryon dss	1952	R. Armenteros & ekip	Kozmik ışıma
Sigma Σ^-	Baryon dds	1953	W. Fowler & ekip	Hızlandırıcı- Kaon ışıma

Sigma Σ^+	Baryon uus	1953	G. Tomasini & Milan-Genova ekibi	Kozmik ışıma
Anti- Proton p^-	Baryon $\bar{u}\bar{u}\bar{d}$	1955	E. Segre & ekip	Hızlandırıcı-Proton etkileşimleri
Anti- Nötron $\bar{n}$	Baryon $\bar{d}\bar{d}\bar{u}$	1956	B. Cork & ekip	Hızlandırıcı-Proton etkileşimleri
Sigma Σ^0	Baryon uds	1956	R. Plano & ekip	Hızlandırıcı-Kaon ışıını
Elektron Nötrino $\nu(e)$	Lepton	1956	C. Cowan & F. Reines	Nükleer Reactör
Anti- Lambda $\bar{\Lambda}$	Baryon $\bar{u}\bar{d}\bar{s}$	1958	D. Prowse & M. Baldo- Ceolin	Hızlandırıcı-Pion ışıını
Xi Ξ^0	Baryon uss	1959	L. Alvaraz & ekip	Hızlandırıcı-Kaon ışıını
Muon Nötrino $\nu(\mu)$	Lepton	1962	L.Lederman, M. Schwartz, J. Steinberger	Hızlandırıcı-Pion bozunumu
Omega Ω^-	Baryon	1964	V. Barnes & ekip	Hızlandırıcı-Kaon ışıını
(Anti-) Yukarı ($\bar{u}$), u	Kuark	1964-72	Gell-Mann & Zweig (teorisi)	Elektron saçılımı/ Nötrino saçılımı
(Anti-) Aşağı ($\bar{d}$), d	Kuark	1964-72	Gell-Mann & Zweig (teorisi)	Elektron saçılımı/ Nötrino saçılımı
(Anti-) Garip	Kuark	1964-72	Gell-Mann &	Elektron

$(\bar{s}), s$			Zweig (teorisi)	saçılımı/ Nötrino saçılımı
J/ Psi J/ψ	Meson $c\bar{c}$	1974	B. Richter & ekip/ S. Ting & ekip	Hızlandırıcı- $e^- /$ e^+ yokoluşu
(Anti-) Tılsım $(\bar{c}), c$	Kuark	1974	B. Richter & ekip/ S. Ting & ekip	J/ψ 'den çıkarılan
(Anti-) Tau τ^+, τ^-	Lepton	1975	M. Perl'in ekibi	Hızlandırıcı- $e^- /$ e^+ yokoluşu
Tılsımlı Labda Λ_c	Baryon udc	1975	N. Samions & Ekip	Hızlandırıcı Nötrino ışını etkileşimleri
D^0, D^+	Meson $c\bar{u}, c\bar{d}$	1976	G. Goldhaber & Ekip	Hızlandırıcı- $e^- /$ e^+ yokoluşu
Upsilon Y	Meson $b\bar{b}$	1977	L. Lederman & Ekip	Hızlandırıcı- proton etkileşimi
(Anti-) Alt $\bar{b}, b$	Kuark	1977	L. Lederman & Ekip	Upsilon'dan ortaya çıkan
Gluon	Ayar Bozonu	1979	TASSO& DESY'deki diğer deneyler	Hızlandırıcı- $e^- /$ e^+ yokoluşu
B^0, B^-	Mezon	1983	Cleo Ekibi	Hızlandırıcı- $e^- /$ e^+ yokoluşu
W^+, W^-	Ayar Bozonu	1983	CERN, UA1 ve UA2 ekipleri	Hızlandırıcı- $p /$ p^- yokoluşu
Z	Ayar Bozonu	1983	CERN, UA1 ve UA2 ekipleri	Hızlandırıcı- $p /$ p^- çarpışması
Lambda-B Λ_b	Baryon udb	1991	CERN ISR, R422 Ekibi	Hızlandırıcı- $p /$ p^- çarpışması

(Anti-) Üst $\bar{t}, t$	Kuark	1995	Fermilab, CDF & D0 Ekipleri	W ve b'ye bozunan parçacıktan çıkarılan
Tau Nötrino $\nu(\tau)$	Lepton	2000	Fermilab, DONUT ekibi	Nötrino ışıınımı
Higgs H	Boson	2012	CERN, ATLAS ve CMS deneyleri	Hızlandırıcı- p / p ⁻ çarpışması

Tablo 3: Tarihsel Olarak Keşfedilen Parçacıklar

Kaynak: Wouter Schmitz, *Particles, Fields and Forces*, (İsviçre: Springer, 2019), s. 194-196.

VI. PAULİ DIŞARLAMA İLKESİ

Kuantum mekaniğinde maddenin yapısını anlamak için hayati öneme sahip olan Pauli dışarlama ilkesi 1920 yılında spektroskopik anomalileri anlama adına verilen mücadelenin sonunda ortaya çıktı. Pauli, Zeeman etkisi üzerine yaptığı ilk çalışmalarda alkali spekturumunun ikili yapısını basit bir şekilde açıklamaya çalıştı. Bunun akabinde Zeeman¹²⁸ ve Paschen-Back¹²⁹ etkileriyle ortaya çıkan çelişkili spektrum resmi eski kuantum teorisini¹³⁰ değişime zorladı. 1920-1924 yılları arasında Alfred Lande, Werner Heisenberg, Niels Bohr geleneksel spektroskopik modeli kurtarmaya çalışmalarına karşın bu kördüğüm Pauli'nin elektron için serbestliğin dördüncü derecesini tanıtması ve atomun eski çekirdek modelinin sonuç olarak geçersiz olmasıyla çözüldü. 1924 Aralık ayında Zeeman etkisi üzerine yazdığı makalede Pauli alkali atomların K

¹²⁸ Zeeman etkisi anomalisi, 1896'da Zeeman elektromanyetik kutupların arasında yer alan sodyum alevinin spektrum çizgilerini incelemektedir. Elektromanyetik alana tabi olmayan atomun elektronun iki ya da üç farklı yayılım gösterirken, manyetik alan etkisinde kalan elektronların spektrum çizgileri tuhaf bir şekilde artmaktadır. Zeeman döneminde henüz spin kavramı geliştirilmediği için bunu bir anomali olarak kabul etmiştir. Bohr, Heisenberg ve Pauli bu anomaliyi açıklamaya çalıştılar. Michela Massimi, *Pauli's Exclusion Principle: The Origin and Validation of a Scientific Principle*, (New York: Cambridge University Press, 2005), s. 47-52.

¹²⁹ Paschen-Back etkisi, eğer manyetik alan yeterince genişse, orbital ve spin açısal momentum çifti arasında bir yarıllma yaşanır ve bu da farklı bir yarıllma modeline sebep olur.

¹³⁰ 1900-1924 yılları arasındaki süreç, Heisenberg'in matris mekaniğini geliştirmesi ile yeni kuantum mekaniği dönemi başlanmış kabul edilmektedir.

kabukları gibi kapalı kabukların yok olmayan açısal momentuma sahip olduğunu belirten Bohr'un çiftli yapı (*doublet structure*) teorisinin yanlış olduğunu ve dolu kabuğun açısal ve manyetik momentuma sahip olmadığını belirtmiştir.¹³¹ Pauli aynı yıl Alferd Lande'ye yazdığı mektupta "son derece doğal bir perspektif kuralı" olarak belirttiği dışarlama ilkesini henüz bir modele sahip olmamasına karşın ilkeye dair adımlar atılmaya devam etti. 1925 dolaylarında Pauli daha sonra elektron spini olarak adlandıracağı elektronların açısal momentumunun iki yönlülüğünü (*twofoldness/Zweideutigkeit*) ortaya koydu ve bu kuralı "doğanın bir emri" olarak okudu. Pauli'in fikirlerinden etkilenen Lande ve Heisenberg atomun *zweideutig* açısal momentumunu dallanma (*branching*) ilkesi üzerinden tekrar yorumladılar ve bütün açısal momentumların iki mümkün yarı integral değerlere ayrıldığını ileri sürdüler. Haziran 1924 Heisenberg branching ilkesini yeni kuantum ilkesine dönüştürdü ve Aralık 1924 Pauli sonunda değerlik elektronun gözlemlenen spektroskopik anomalilerin tek sebebi olduğunu ortaya koydu. Fizikçiler ilk olarak dışarlama ilkesini bir modelinin olamamasından kaynaklı olarak anlaşılmasını güç buldu. Bu boşluk Uhlenbeck ve Goudsmit'in elektron spini modeliyle sunmasına karşılık Pauli spinin klasik mekaniksel bir kavramı temsil etmesi sebebiyle onda şüphe uyandırdı ve Pauli, Thomas'ın hesaplamalarını kullanarak spin kavramını dönüştürdü.¹³²

Kuantum teorisine göre durumlar ayrık sayılarla yani kuantum sayıları ile tanımlanmaktadır. Bu sayıların (dört kuantum sayısı n, l, m, s 'dir. n , elektronun enerji seviyesini, l açısal momentumu ölçer, m manyetik kuantum sayısı elektronların yörüngelerinin manyetik alana göre yönlerinin olasılığını temsil eder, son kuantum sayısı ise spindir- Burada ifade edilen kuantum sayıları Pauli'nin makalesinde kullandığı spin matrislerinden farklıdır.-) karakterize ettiği bir atomda birbirine bağlı iki elektron aynı dinamik durumda olma olasılığını dışlamaktadır.¹³³ Bir yıl sonrasında birbirinden bağımsız olarak Fermi ve Dirac kuralı, antisimetrik durum fonksiyonları ile sınırlayarak matematiksel bir formülasyon geliştirdiler ve böylece Fermi-Dirac

¹³¹ İlya G. Kaplan, "Pauli Exclusion Principle and Its Theoretical Foundation", (y.y.), s. 2.

¹³² Wolfgang Pauli, *Exclusion Principle and Quantum Mechanics*, Nobel Lecture (1946), s. 30.

¹³³ Henry Margenau, "The Exclusion Principle and Its Philosophical Importance", *Philosophy of Science* 11/4 (1944): s. 189.

istatistiklerinin sonuçlarıyla özdeş olan parçacıkların Pauli ilkesince elektronların antisimetrik durumlarla ifade edilmesi gerektiği ortaya konulmuş oldu.

Pauli dışarlama ilkesinin teorik çerçevesi yıllar geçtikçe büyüme gösterdi. 1926 Fermi-Dirac istatistiklerinin akabinde 1927 manyetik elektronun rölativistik olmayan spin matris yaklaşımını Pauli ileri sürdü. Wigner ve von Neumann'ın spin matrislerinden grup teoriksel çıkarımları olan parçacıkların ortaya çıkması ve yok olması operatörlerini yeniden yorumladı ve bu yorumla kuantum alan teorisine Jordan (1928) kapı araladı. Teorik çerçevenin kurulmasında en önemli adım ise rölativistik olmayan bir kuantum mekaniği anlayışından rölativistik olan bir anlayışa geçişi sağlayan 1928 Dirac'ın elektronlar için geliştirdiği rölativistik denklemleridir. Dirac hole teorisini¹³⁴ ileri sürdü ve boşlukta(*vacuum*) anormal negatif enerjiyi açıklamaya ve parçacıkların bu halini delik olarak ifade ederek aslında antiparçacık fikrini temellendirmeye çalıştı buna karşın Pauli, Dirac'ın teorisi uzun bir süre eleştirdi.

1940'lara gelindiğinde Pauli teorisini geliştirmeye devam etti ve spin-istatistikleri teoremini kanıtladı ve artık ilkesinin sadece elektronlar için değil yarı-integral spinli parçacıklar olan fermiyonlar için Fermi-Dirac istatistiklerine uyduğunu ispatladı. Elektron, pozitron, nötron ve protonların dışında yeni yarı-integral spinli parçacıklar keşfedilmeye başlandı. 1956'da Cowan ve Reines, Pauli'nin 1931 yılında β bozunumunu açıklarken varlığından bahsettiği parçacığı yani nötrinoyu keşfettiler. 1964'e gelindiğinde Ω^- yarı-integral spinli parçacık keşfedildi. Bu parçacığın keşfi ile kuarkların yarı-integral spinli ve antisimetrik olmalarından dolayı dışarlama ilkesine tabi olarak düşünülse de baryonların antisimetrik durumlar yerine simetrik durumlar

¹³⁴Rölatif elektronlar için Dirac denkleminin öngördüğü anormal negatif enerji kuantum durumlarını açıklamak için geliştirilmiş bir teoridir. E: enerji, p: momentum, $s = \pm 1/2$, Q: yük
Vakum durumu: Pauli ilkesine göre bütün negatif enerji seviyeleri doludur. Bütün pozitif enerji seviyeleri de boştur. Vakum durumunda E: $-\infty$ iken renormalizasyon sonrası E= 0, p=0, s=0, Q=0
Bir parçacık durumunda: bütün negatif enerji seviyeleri dolu, pozitif enerji düzeyinde bir elektron eklenir. E= + Ep, p=p, s=s, Q= $-\infty + e$ renormalizasyonla Q= e< 0
Tek delik durumu: bütün pozitif enerji seviyeleri boş, bütün negatif enerji seviyelerinde bir elektron yok. Renormalizasyon ile E= +Ep, p=p, s=s, Q= -e> 0
Bir parçacık durumu ile bir delik durumu aynı enerji, momentum ve spine sahipken yükleri zıt yönlüdür. Bu delik durumu sonrasında antiparçacıklar olarak düşünülmektedir. Bu durumda bu delik elektronun antiparçacığı olan pozitronudur.

sergiledikleri bilindiği için bir uyumsuzluk doğurmuştur yarı spinli ancak simetrik bir fonksiyon nasıl dışarlama ilkesine tabi olabilir sorusunu ortaya çıkardı.¹³⁵

Dışarlama ilkesinin bu krizi, araştırmaların 1960lardan 1970lere kadar ki süreçte renklendirilmiş kuarklar, kromodinamiğin gelişmesinde yeni yollar açtığı görülmektedir. 1960larda iki alternatif program geliştirildi ilki, dışarlama ilkesinin geçerliliğini reddetti ve kuarkların paraistatistiksel bir yorumunu keşfederken ikincisi bunun aksine dışarlama ilkesini negatif bir kanıtla birleştirerek ilkeyi kabul etmeye devam etti. Dolayısıyla bu iki rakip program dışarlama ilkesinin kuark teorisinin içinde kabul edilip edilmeyeceğini tartışmaktadır. Genel kabulün Kromodinamiğin açıklamalarını göz önünde bulundurarak Pauli dışarlama ilkesinin ilkesel rolünü koruduğu yönündedir ve Pauli Dışarlama ilkesi yüksek enerji fiziğinde kullanılmaya devam edilmektedir.¹³⁶

A. Pauli Dışarlama İlkesinin Matematiksel Formalizasyonu

Yukarıda da bahsi geçtiği üzere parçacıkları özdeş olanlar ve olmayanlar diye iki grupta ele alınılmaktadır. Bu ayrımı matematiksel olarak ifade etmek için a ve b olmak üzere iki parçacık düşünelim 1 ve 2 de ibre yönleri olsun. Bir durum fonksiyonu yazacak olursak a,1'i b' de 2'yi gösterdiğinde $\psi(1,2) = \psi_a(1) \psi_b(2)$ a,2'yi b'de 1'i gösterdiğinde ise $\psi(2,1) = \psi_a(2) \psi_b(1)$ olarak gösterilir ve eğer iki durum fonksiyonu $\psi(1,2) \neq \psi(2,1)$ ise bu durum fonksiyonları özdeş olmayan parçacıkların fonksiyonudur.

Özdeş olan parçacıklar için durum fonksiyonları için yine bir a parçacığının, 1'i gösterdiği b parçacığının da 2'yi gösterdiği bir durum fonksiyonu $\psi(1,2) = \frac{1}{2} [\psi_a(1) \psi_b(2) \mp \psi_a(2) \psi_b(1)]$ şeklinde ifade edildiğinde a'nın 2'yi b'nin 1'i gösterdiği durumda fonksiyon $\psi(2,1) = \frac{1}{2} [\psi_b(1) \psi_a(2) \mp \psi_a(1) \psi_b(2)]$:

1. $\psi(1,2) = + \psi(2,1)$
2. $\psi(1,2) = - \psi(2,1)$

¹³⁵Massimi, *Exclusion Principle*, s. 145-146.

¹³⁶Massimi, *Exclusion Principle*, s. 173-174.

1. eşitlik simetrik dalga fonksiyonunu gösterirken 2. Antisimetrik bir dalga fonksiyonunu göstermektedir. Simetrik durum fonksiyonuna sahip simetrik parçacıklara bozon, antisimetrik parçacıklara fermiyon denilmektedir. Dolayısıyla bozonlar:

$$\psi(1,2) = \frac{1}{2} [\psi a(1) \psi b(2) + \psi a(2) \psi b(1)]$$

iken fermiyonlar:

$$\psi(1,2) = \frac{1}{2} [\psi a(1) \psi b(2) - \psi a(2) \psi b(1)]$$

fonksiyonlarıyla ifade edilmektedir.

Antisimetrik durum fonksiyonunda a ve b parçacıklarının 1'e giderlerse

$$\psi(1,2) = \frac{1}{2} [\psi a(1) \psi b(1) - \psi a(1) \psi b(1)]$$

$$\psi(1,2) = 0$$

olmaktadır.

Dolayısıyla iki fermiyonun aynı kuantum durumunda olması dalga fonksiyonunun 0 olmasından dolayı imkansızdır. Bozonlarda ise simetrik bir durum fonksiyonuna sahip olduğu için aynı kuantum durumunda olmaları mümkündür.¹³⁷

Dışarlama ilkesi genel anlamıyla birbirine bağlı aynı spin durumuna sahip iki fermiyonun aynı kuantum durumunda bulunamamasıdır. Örneğin elektronlar gibi spine sahip parçacıklar için sadece parçacıkların konumunu bilmek yeterli değildir aynı zamanda spinin yönünü de bilmek gerekmektedir dolayısıyla iki elektronun bir kuantum durumunda bulunabilmesi için birinin yukarı spin (*spin up*) iken diğerinin aşağı spin (*spin down*) olması gerekmektedir.

¹³⁷ Feynman olasılık genlikleri üzerinden özdeş parçacıkları şöyle anlatır: “zdeş parçacıklar dendiğinde elektron gibi birbirinden hiçbir şekilde ayırt edilemeyen parçacıklar kastedilmektedir. Eğer bir süreç iki özdeş parçacık içeriyorsa bir parçacığın sayaca geldiği durumla parçacığın diğer sayaca tersine çevrilmiş durumundan ayırt edilemez ve ilk durumla tersine çevrilmiş durum girişim deseni oluşturur. İki adet a ve b parçacıklarını düşünelim, a 1 yönünde b de 2 yönünde saçılmaktadır ve iki parçacığın çarpışmasını ele alalım, bu sürecin genliği $f(\theta)$ olsun, bunun gibi bir olayın P1 olasılığı $|f(\theta)|^2$ olur. Eğer durum böyleyse bu süreçte ise b 1, a ise 2 sayacı yönünde saçılabilir. Bu ikinci süreç için P2 olasılığı $|f(\pi - \theta)|^2$ olur. Olasılık genliği ise $e^{i\delta} f(\pi - \theta)$ biçiminde ifade edilir. Bu tarz bir genlik $|f(\pi - \theta)|^2$ değerine eşittir. a ve b nin özdeş parçacıklar olduğunu düşündüğümüzde ise yukarda bahsedilen iki süreç ayırt edilemez. Bu süreçlerin genliği iki sürecin genlik toplamına eşittir. Bu iki genliği toplarken evre faktörü iki parçacığın rolleri değiştirildiğinde genliği belirli bir evre faktörüyle çarpmamız gerekmektedir. İki kez devre faktörü işleme dahil edilirse bizi başladığımız noktaya geri götürür. Sadece iki olasılık vardır: $e^{i\delta}$, +1 ya da -1 e eşittir. Pozitif işaretili girişim yapan parçacıklara Bose parçacıkları, negatif işaretili girişim yapan parçacıklara da Fermi parçacıkları denir...

Boson parçacıkları: (Doğrudan Genlik) + (Değiş-tokuş Genliği)
Fermi parçacıkları: (Doğrudan Genlik) - (Değiş-tokuş Genliği)” (Feynman, vd., *Fizik* , s. 4-1 – 4-3.)

B. Dışarlama İlkesinin Fiziksel Sonuçları

Pauli'nin yeni kuantum mekaniği kurulmadan önce bu ilkeyi ortaya koyabilmiş olması onun sezgisel yanının ne kadar kuvvetli olduğunu ortaya koymaktadır. Öyle ki dışarlama ilkesi maddesel dünyanın özünü teşkil etmekte ve element çeşitliliğinin sebebini oluşturmaktadır.

Pauli dışarlama ilkesinin fiziksel sonuçlarını konuşuyor olmak maddenin içine girilmez özelliğinin sonuçlarını konuşmak anlamına gelmektedir. Bunlardan ilki maddenin kararlılığını sağlıyor olmasıdır. Belirsizlik ilkesi her ne kadar konum ve momentumdaki yoğunluğu dengede tutmayı imlese de neden iki hidrojen atomunu istediğimiz kadar yakınlıştırıp sıkıştıramayacağımızın ve neden çekirdekteki protonun etrafındaki elektron bulutuyla bir araya getirilemediğinin cevabı bu ilkede gizlidir. Dolayısıyla iki zıt spinli elektrondan daha fazlasının aynı durumda yer alamaması maddenin kararlılığının fermi parçacıklarının yapısının bir sonucu olduğunu göstermektedir.

İlkenin ikinci fiziksel sonucu, iki atomun dıştaki elektronlarının zıt olduklarında yakınlatabiliyor olmaları ve kimyasal bağı ortaya çıkarıyor olmasıdır. Ancak spinler zıt olduğu müddetçe elektronlar iki çekirdeğin arasına girip en güçlü bağı oluşturmaktadır. Yine dışarlama ilkesine göre iki atom arasına daha fazla elektron giremediğinden en güçlü bağlanma şekli oluşabilmektedir.

Dışarlama ilkesinin üçüncü önemli sonucu daha büyük çekim gücü ortaya çıkarıyor olmasıdır. Örneğin helyum atomunun her iki elektronun çekirdeğe yakın olabilmesi için spinleri zıt yönlü olmalıdır. Bu iki elektronu aynı spin yönüne getirmek için elektronları büyük bir manyetik alana konulduğunda aynı spin yönüne sahip elektronlar aynı durumda bulunamayacaklar ve elektronlardan biri farklı bir duruma geçecektir. Çekirdekten uzaklaşan bu elektron daha az bağlanma enerjisine sahiptir.

Dışarlama ilkesinin dördüncü önemli sonucu ise iki elektronun bir arada olduklarında spinlerin zıt yönlü olmasını gerektiren güçlü bir kuvvet ortaya çıkarmalarıdır. Bu kuvvet serbest elektronlara dolaylı olarak etki ederek ferromanyetizmadan¹³⁸ sorumlu hizalama kuvvetinin ortaya çıkmasını sağlamaktadır.

Nükleer kuvvet, nötron ve proton, proton proton, nötron ve nötron arasındaki kuvvettir. Bir proton ve bir nötrondan oluşan bir döteryum çekirdeği oluştururken neden iki proton ya da nötrondan oluşan bir çekirdek mevcut değil? Bu sorunu cevabı iki etkiyle açıklanabilir bunlardan ilki dışarlama ilkesi ve ikincisi de nükleer kuvvetlerin spin yönüne duyarlı olmasıdır. Bir proton ve bir nötronun olduğu durumda spinlerin paralel olduğu durum spinlerin zıt olduğu durumdan kuvvetçe daha büyüktür. Nötron ve protonun spinleri yarım ve aynı yönlü olduğu için, döteronun spini 1'dir. Dışarlama ilkesi gereğince spinleri paralel iki protonun birbirlerinin üzerine yerleşmesi mümkün değildir. Dolayısıyla dışarlama ilkesi olmasaydı iki proton bağlanabilirdi ancak aynı durumda aynı spin yönleriyle bağlanamayacakları için He^2 çekirdeği oluşamazdı. Protonlar spinleri zıt olduğunda bir araya gelebilir ancak kararlı bir çekirdek oluşturacak kadar büyük bir bağlanma enerjisi meydana getirmez çünkü zıt spin için nükleer kuvvetler bir çift nükleonu bağlamak için çok zayıftır.¹³⁹

... Neden yarım-tamsayı spinli parçacıklar, genliği eksi işareti veren Fermi parçacıklarını ve neden tam sayılı spinli parçacıklar, genliği artı işaret veren Bose parçacıklarını oluşturmaktadır? Bu soruya temel bir cevap veremeyeceğimiz için üzgünüz. Bu sorunu Pauli, kuantum alan kuramı ve göreliliğin karmaşık parametrelerini kullanarak açıklamaya çalışmıştı. Pauli iki başlığın uyumlu olması gerektiğini göstermişti fakat şu ana kadar açıklamalarını temel düzeyde yeniden üretecek bir yol bulamadık... Muhtemelen bu fiziğin temel ilkelerini tam olarak kavrayamadığımız anlamına gelmektedir. Şimdilik bunu doğanın bir yasası olarak kabul etmek zorundayız.¹⁴⁰

Feynman Pauli dışarlama ilkesinin kökenine dair sorunun gizemli kalmasının aslında bütün yasalar için ortak bir özellik olduğunu belirtmektedir yani doğa yasaları

¹³⁸Ferromanyetik maddenin (örn. demir) mıknatıs manyetik alana maruz kaldıklarında maddenin, mıknatıs manyetik alan çizgileriyle aynı yönde mıknatıslanmasıdır.

¹³⁹Feynman, vd. Fizik, s. 4-12 -4-15.

¹⁴⁰Feynman, vd., Fizik, s. 4-3.

hem matematiksel, korunum ilkeleri ve simetrilere sahip ve tam olarak doğru olmayan yapılardır hem de gizemli kalan bir yanıları vardır. Kuantum elektrodinamiğini anlatırken bahsedeceğimiz alfa sayısını da buna ekleyebiliriz. Neden 137 sayısı sorusu şimdilik gizemli kalacaktır. Bu durumun sebebi bilgi ve donanım açısındaki eksikliğimizden mi yoksa doğanın kendinde olan bir özellikten mi kaynaklandığı net değildir.

VII. KUANTUM ALAN TEORİLERİ

Kuantum mekaniğinin tam olup olmadığına dair tartışmalar ilerlerken ve deneysel olarak tam olduğuna dair bir resim gözümüzde canlanmasına karşın teorik ve deneysel anlamdaki gelişmeler kuantum mekaniğinin bazı fenomenleri açıklamada yani atom-altı dünyada ışık hızına yakın hızda hareket eden parçacıkların hareketlerini açıklamada yetersiz olduğunu göstermiştir. Bazı teorisyenlere göre kuantum mekaniğinin standart yorumu tek parçacıklı bir teoridir ve bu çerçevede parçacıkların ortaya çıkması ya da yok olması süreçlerine izin vermemektedir çünkü parçacıkların oluşma ya da yok olma süreçleri parçacıkların çarpıştırılması gibi elastik olmayan süreçlerde hesaplanması prensip olarak kuantum mekaniği için ulaşılabilecek değildir. Bu tarz çarpışmalarda en önemli nicelik enerji olduğundan Enerji $E > 2mc^2$ şartını sağlandığında hem parçacık hem de anti-parçacık üretilmektedir. Bu tarz bir saçılma göreceli olmayan bir parçacık teorisine uymamaktadır. Dolayısıyla oldukça hızlı ve yüksek enerjili parçacıkları incelerken kuantum mekaniği görelilik teorisinden bağımsız olamamış ve göreceli çoklu parçacık teorisine ihtiyaç duymuştur¹⁴¹. Bu ihtiyaca oldukça fazla sayıda parçacığın keşfedilebilmesine anlam verilebilmesini de ekleyebiliriz. Tezimiz açısından kuantum alan teorisinin önemi Pauli dışarlama ilkesine uyumlu bulunmayan parçacıkların ortaya çıkmasını açıklamada yetersiz kaldığı süreci tamamlamak için kuantum kromodinamiğinin ileri sürülmesine dayanmaktadır.

1928 yılında Dirac ilk olarak özel görelilik ve kuantum teorisini birleştiren bir denklem yazdı ve elektronun spin yapısını ortaya koydu. Böylece görelilik ve kuantum

¹⁴¹ Gerhard Ecker, *Particles, Fields, Quanta: From Quantum Mechanics to The Standard Model of Physics*, (İsviçre: Springer, 2019), s. 34.

teorisinin birleştirilmesini amaçlayan kuantum alan teorisinin temellerini atmış oldu. 1929 yılında Heisenberg ve Pauli kuantum görelili alan teorisinin genel teorisini sundular.¹⁴² Kuantum alan teorisine göre doğa artık hem dalgalar hem parçacıklardan oluştuğu yönündeki düalist görüşten uzaklaşıp “her şey alanlardan meydana gelmektedir” görüşü kabul görmeye başladı. Bu görüşe göre parçacık dediğimiz şeyler aslında alanda meydana gelen enerji ve momentum demetlerinden başka bir şey değildir. Bir dalga ise bir alanın rahatsızlığı ya da hareketlenmesidir. Parçacıkların dalgalar olarak tanımlanması birinci kuantizasyon olarak adlandırılırken kuantum alan teorisinde dalgaların bir alanda oldukları ikinci kuantizasyon olarak anılmaktadır.

Kuantum alan teorisinde gerçekliği oluşturan alanlar *vakum* adı verilen ortamda taşınmaktadır. Vakum boş değildir, dalgalanan alanları içermektedir ve anlık var olup sonra yok olan madde ve anti-madde parçacıklarından oluşmaktadır. Bu ortam, 19. Yüzyılda esir olarak tanımlanan ortamı akla getirmektedir. 1887 yılında Michelson ve Morley’in ışık hızını ölçerek esir kanıtlamaya çalıştıkları deneyi hatırlayalım her ölçümde ışık hızı aynı sonucu vermekte ve esire nisbetle mutlak hız belirlenememekteydi. Kuantum alan teorisine göre vakum doğrudan ölçülemez ve mutlak bir hızı tanımlamaz. Bir çeşit elastisiteye sahiptir ve dalganın maksimum hızını ışık hızı (c) olarak belirlemektedir. Işık hızı doğanın bir kanunu olarak kabul edilir. Bir referans çerçevesinin hızı ne olursa olsun o çerçeveye göre ışık hızı hep aynıdır. Esir ve vakum her ikisi de ortam olsa da ışık hızı ve elastisite söz konusu olduğunda farklılıklar ortaya çıkmaktadır. Buna ek olarak vakumdaki bütün dalgalar farklı alanlarda ortaya çıkar ve her parçacığın (kuantize olmuş dalganın) kendine has bir alanı vardır.¹⁴³ Bir dalganın kaynağı ise potansiyel enerji ve onun kinetik enerjiyle yer değiştirmesidir. Vakumun elastisitesi maksimum hızı ışık hızı olarak belirlenmesine karşın bir grup dalgaların faz hızında daha hızlı olduğu bilinmektedir. Peki bu nasıl mümkündür? Kütsesiz parçacıklar vakumun elastisine uygun hızda hareket etmektedir, kütseli parçacıklar grup halindeyken daha az hıza sahip olurken bireysel dalgalar ışık hızından

¹⁴² Ecker, *Quanta*, s. 38.

¹⁴³ Schmitz, *Particles*, s. 24.

daha hızlı olabilir ve bu da yine vakumun özelliğinden kaynaklanmaktadır. Vakumun elastisitesi bireysel dalgalara izin vermektedir.¹⁴⁴

Bir dalga kütleli ve kütsüz olabilmektedir. Bir dalgayı kütleli hale getiren potansiyel farktır ve her bir alan kendi yapısına göre farklı potansiyel farklılık üretmektedir. Potansiyel farklılıkları deneyimleyen alandaki bir dalganın yüksek esneklikte kütsesi artar, yüksek eylemsizlik ve düşük hız ortaya çıkar. Helyumun çekirdeğinin, ayrı ayrı proton ve nötrondan kütsesinin az olması, kütsenin sebebinin Higgs alanı ve potansiyel farklılığı olduğuna örnek olarak gösterilebilir.¹⁴⁵

A. Kuantum Elektrodinamiği ve Elektrozayıf Etkileşim Teorileri

Kuantum alan teorisinin ilk örneğini olan kuantum elektrodinamiği ele almadan önce bütün alan teorilerinin özünü oluşturan simetriler (ve simetri kırılmaları) konusunu ele almak gerekmektedir. Aslında biliyoruz ki doğayı anlamada simetriye başvurma fikri Antik Yunan düşüncesindeki maksimal simetrik cisimler fikrine kadar geri gitmektedir. Dört yüzlü (*tetrahedron*), küp (*cube*), sekiz yüzlü (*octahedron*), on iki yüzlü (*dodecahedron*), yirmi yüzlü (*icosahedron*) olan beş Platonik katıdan bahsedilmektedir. Kepler 1596 yılında yayınladığı eseri “*Mysterium Cosmographicum*” da beş gezegeni beş Platonik katı ile ilişkilendirmeye çalışmıştır. 19. Yüzyıl modern görüşüne göre simetriler, Newton’un hareket denklemlerini değiştirmeyen uzay-zaman biçim değişimleri grubudur. Can alıcı soru bu noktada ortaya çıkmaktadır. Fizikte simetriler neden önemlidir? Bunun cevabı bir matematikçi olan Emmy Noether’in teoremine göre her simetrinin bir koruma yasasına sebep olmasında saklıdır. Maxwell’in elektrodinamiğinin ve görelilik mekaniğinin simetrileri on biçim değiştirme ve on korunum yasası¹⁴⁶ içermektedir.¹⁴⁷ Kuantum mekaniğinde süreksiz simetri, biçim dönüşümleri korunan niceliklere neden olmaktadır. Kuantum mekaniğinde korunan

¹⁴⁴ Schmitz, *Particles*, s. 39-40.

¹⁴⁵ Schmitz, *Particles*, s. 55.

¹⁴⁶Örneğin uzay- zaman üzerine kurulu Einstein’ın görelilik teorisinde enerji ve momentum korunduğunu görülmektedir. Elektrodinamikte ise elektrik yükü korunmaktadır.

¹⁴⁷Ecker, *Quanta*, s. 39.

nicelikleri simetri operatörlerine tekabül etmektedir. Örneğin, bir simetri operatörü ± 1 olmak üzere iki özdeğere sahiptir. Rotasyon gibi simetri grupları kuantum mekaniğinde abelyen olmayan (non-abelian/ değişme özelliği olmayan) gruplardır.

Kuantum mekaniği ve özel görelilik teorisinin birleştirilmesinde ilk başarılı teori kuantum elektrodinamiğidir (*quantum electrodynamics*). Kuantum elektrodinamiği, elektromanyetik alanın yüklü madde parçacıklarıyla (leptonlar ve kuarklar) olan etkileşimini tanımlamaktadır. Yani daha basit ifade edecek olursak parçacıkların fotonla etkileşimini ele almaktadır. Klasik mekanikte elektrodinamik Maxwell denklemleriyle tanımlanmaktadır ve hareket denklemlerinde Lagrange fonksiyonu kullanılmaktadır. Böylece bu fonksiyonla hareket yasaları türetilabilmektedir. Kuantum alan teorisinin standart modelindeki temel etkileşimleri tanımlarken de Lagrange fonksiyonun ortaya koyduğu yarardan faydalanılmaktadır. Bununla birlikte bütün simetriler açısından kuantum elektrodinamiğinde Lagrangian değişmez kalmaktadır. Bu nedenle kuantum elektrodinamiğinin simetri grubu açısal rotasyon simetri operatörü, düzlemde birimsel (unitary) rotasyon grubu $U(1)$ olarak isimlendirilen grupla temsil edilmektedir. Dalga, düzlemdeki bir vektördür ve vektörün açısı değişse de uzunluğu değişmemektedir. $U(1)$ operasyonu dünyayı aynı bırakır ve bu yüzden evrenin bir simetrisidir.

Maxwell denklemlerinde kullanılan ayar (*gauge*) serbestlik dereceleri kuantum elektrodinamiği için de uygulanmaktadır. Ayar bir ölçüm standardı getirmektedir ve bu sebeple kuantum elektrodinamiğinde de ayar serbestlik fotonun iki serbestlik derecesine sahip olduğunu garanti etmektedir. Kuantum elektrodinamiğinde ayar teorisi alfa ince yapı sabiti üzerine kuruludur. Fotonlar ve elektronların etkileşiminde belirli sayıdaki parçacık ihtimali, *alfa* olarak kodlanmaktadır. Alfa doğayı ölçeklendiren bir sayıdır. Deneylerde elde edilen alfa değeri 0,007297'dir. Bu sayı 1'e bölündüğünde ise bir tam sayı değeri çıkmaktadır: yaklaşık 137 sayısı. Doğa dilinin temel kodunu oluşturan bazı fizikçiler tarafından oldukça ilgi görmüştür. Arthur Eddington, W. Pauli bu sayıya çok büyük önem atfetmiş ve bu doğrultuda çalışmalar yapmışlardır. Feynman'da *QED: The*

Strange Theory of Light an Matter kitabında bu sayıya değinmekte ve onu “fiziğin en büyük gizemlerinden biri” olarak nitelendirmektedir.¹⁴⁸

Diğer alan teorilerini incelerken de anlayacağımız üzere ayar değişmezliği (*gauge invariance*) sadece kuantum elektrodinamiği için değil diğerlerinin de temel bir unsurunu teşkil etmektedir. Ayar alanı, genellikle yerel simetri oluşturmak için eklenen simetridir. Dalganın dinamiği, alandaki potansiyel fark ve hareket arasındaki bir salınımdır. Ayar alanı, Higgs ile ilişki içinde olduğunda kütle potansiyeline sahiptir ancak elektrodinamiğin U (1) ayar alanı Higgs ile ilişkili değildir.¹⁴⁹ Bu nedenle faz değişimi, elektron alanında potansiyel farklılığı neden olmaktadır. Elektromanyetik alan kütsesizdir, elektromanyetik alandaki dalga vakumun elastisitesini hisseder ve bu dalganın hızını ışık hızı olmasına neden olur. q yani elektrik yükü -1, 0, +1 olabilir. Ayar değişmezliği matematiksel olarak elektromanyetik alan lokal faz değişimleri altında simetrik olarak ortaya çıkar ve transformasyonlar sonrası aynı kalır. Böylece elektromanyetik alandaki faz değişimi daha fazla elektromanyetik dalgaya neden olmaz.

1930’da Robert Oppenheimer, hidrojenin spektral çizgileri üzerinde kuantum elektrodinamiğin etkisini keşfetti. Hem Schrödinger hem de Dirac denklemlerinde bazı enerji seviyelerinde bozulma olduğunu öngördü. Oppenheimer’a göre kuantum elektrodinamiği bu bozulmaları ortadan kaldırılabilmektedir. Oppenheimer enerji seviyelerinin pertürbatif düzeltmelerini (*perturbative correction*) hesaplamaya çalışırken hem enerji seviyelerinin sıfırdan farklı olduğunu hem de onların aslında sonsuz büyüklükte (*infinitely large*) olduğunu keşfetti.¹⁵⁰ Kuantum alan teorilerinin ilki olan kuantum elektrodinamiğinin en temel problemi sonsuzluk problemidir. Hesaplamaların sonsuz çıkması bilimsel anlamda yol kat edebilmeyi güçleştirmesine karşın çözüm arayışları da gecikmemiştir.

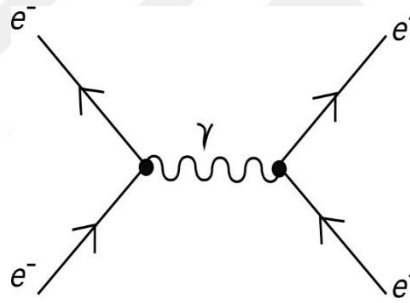
¹⁴⁸Franck Close, *Sonsuzluk Yapbozu: Kuantum Alan Kuramı ve Higgs*, (İstanbul: Alfa Yayınları, 2011), s. 42-43.

¹⁴⁹Schmitz, *Particles*, s. 94.

¹⁵⁰Ecker, *Quanta*, s. 58.

1947 yılında Japon fizikçi Shinichiro Tomonaga ve ekibi pertürbasyon teorisinin (perturbation theory)¹⁵¹ yeni formülasyonunu başlattılar. Bu yaklaşımdan bağımsız olarak Jullian Schwinger ve Richard Feynman Lorentz değişmezliğinin pertürbasyon teorisini 1948 yılında yayınladılar. Feynman'ın makalesi S-matrislerinin¹⁵² hesaplanması için grafiksel kuralların önerisini içermektedir. Bu üç yaklaşım farklı metotlarla ele alınmalarına karşın Freeman Dyson, Tomonaga, Schwinger ve Feynman metotlarının aynı S-matrisleri için kullanıldığını kanıtlamada başarılı oldu. Bu yaklaşımlar arasından en etkili çözüm Feynman diyagramları oldu. Bunun sebebi bu diyagramlar kuantum elektrodinamiğine dair denklemlerin resimsel bir temsilini sunmasıyla hem fizikçiler hem de öğrenciler için hesaplamaları oldukça kolaylaştırmasıydı.

Şekil 2: Feynman Diyagram Örneği



Kaynak: <https://protonsforbreakfast.wordpress.com/2014/04/13/feynman-diagrams-are-maths-not-physics/>

$$(O_1 i e \gamma \mu / 1) (-i g \mu \nu / p^2) (O_2 i e \gamma \nu / 2)^{153}$$

Denklemi Feynman tarafından şekildeki gibi resmedilmiştir.

¹⁵¹ Pertürbasyon teorisi, tam olarak çözülmeyen problemin ya da denklemin yaklaşık bir çözümünün ortaya konulmasıdır. Perturbasyon teorisinin yardımıyla kuantum elektrodinamiği, fiziksel gözlenebilirler için oldukça kesin öngörülerde bulunmuştur.

¹⁵² Saçılım Matrisi (*Scattering Matrix*), parçacıkların yaratımı ya da yok oluşunun mümkün başlangıç ve son durumlarının olasılık genliğinin hesaplanması için kullanılmaktadır ve ilke olarak sınırsızdır. Sonsuz boyutlu olan bu matris belirli olduğunda bu süreçteki etkileşime dair müthiş bir bilgi kaynağını temsil etmektedir. S-matrisleri, kuantum alan teorisinde olan simetriler aracılığıyla sınırlandırılmaktadır.

¹⁵³ İki parçacığın etkileşimini ifade eden matematiksel formül.

Nesne	Sembol
Gelen parçacık	/
Çıkan parçacık	O
Foton	$-ig\mu\nu/p^2$
Nokta (verteks)	$ie\gamma\mu$ ya da $ie\gamma^v$

Tablo 4: Feynman Diyagramının Denklemsel İfadesi

Sonsuzluk problemini çözmek adına yapılan ilk adımları, yani Lorentz değişmezliği metoduyla pertürbatif teorilerin basitleştirilmesi, kesin bir çözüm olmamakla birlikte doğru bir adımı temsil etmektedir. Bu probleme çözümü olan ve sadece kuantum elektrodinamiği değil diğer alan teorilerinde de kullanılacak olan renormalizasyon adını taşıyan yeni bir metot geliştirildi.¹⁵⁴ Renormalizasyon, sonsuzun sonsuzu yok etmesi anlamına gelen ve $\infty - \infty$ yani bir sonsuzdan başka bir sonsuzu çıkardığımızda artık sonlu bir yapı kaldığını öngören bir metottur. 1949 yılında Tomonaga, Schwinger ve Dyson, renormalizasyon pertürbasyon teorilerinin bütün durumlarında çalışmakta olduğunu gösterdiler. Bu nokta da şuna değinmek yerinde olacaktır renormalizasyon, sonsuzluğun çözüm yollarından biri olmasına karşın hem Dirac hem de Feynman tarafından sıcak karşılanmamıştır.¹⁵⁵

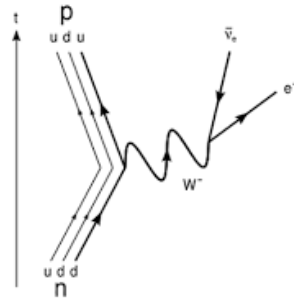
Kuantum elektrodinamiğinin başarısından sonra ayar değişmezliğinin ve renormalizasyonun diğer kuvvetler için uygulanıp uygulanamayacağı denenmeye başladı. Yang ve Mills ayar değişmezliğini baskın kuvvet için uygulamayı denedilerse

¹⁵⁴ Ecker, *Quanta*, s. 59.

¹⁵⁵ Sonsuzluğu çözmedeki başarılarından ve kuantum alan teorilerindeki pertürbatif işlemlere katkılarlarından dolayı Tomonaga, Schwinger ve Feynman 1965 yılında Nobel ödülü aldılar. Dyson'a ise Nobel ödülü verilmedi (en fazla üç kişiye ödül verilmesi sebebiyle).

de mevcut bilgi eksikliğinden dolayı gerçekleştiremediler. Ancak SU (2) grubuna dahil üç yüksüz (W^- , W^+ ve foton) bozonu önerdiler. Bir sonraki adım o yüzden zayıf kuvvet ve zayıf kuvvetin elektromanyetik kuvvetle birleştirilmesine doğru ilerledi. Bir parçacığın başka bir parçacığa dönüşmesini gerçekleştiren kuvvete zayıf kuvvet denilmektedir ve tarihsel süreçte çekirdekte meydana gelen süreçleri anlamaya çalışırken ortaya çıkan beta bozunması zayıf kuvvetin varlığını ortaya koymaktadır. Nötronun bozunması sonucu bir proton bir elektron ve nötrino ortaya çıkmaktadır. Bu durumda etkileşimi sağlayan bozon W^- ayar (gauge) bozonudur.

Şekil 3: Nötronun Protana Bozunmasını Temsil Eden Feynman Diyagramı



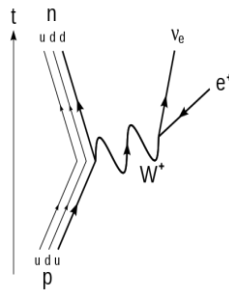
Kaynak: <https://www.physics.uoguelph.ca/superaligned-%CE%B2-decay>

Beta bozunmasında elektronun da ortaya çıkması zayıf kuvvetin radyoaktiviteyle de bağlantısı olduğunu göstermektedir. Kuantum elektrodinamiğinde elektromanyetik kuvvet yüksüz olan foton tarafından iki elektrik yüklü parçacık arasında taşınırken buna karşın zayıf kuvvet hem parçacıkları hareket ederek ve elektrik yükünü de taşıyarak bir parçacığın diğer bir parçacığa dönüşmesini sağlıyor gözükmektedir. Bu durumda elektrik yükünün de aktarılmasından dolayı W^{156} ayar bozonu elektrik yüküne sahiptir.

¹⁵⁶ $W^\pm$, üzerindeki yükü göstermektedir. Nötronun, protona dönüşmesini sağlayan zayıf kuvvetin yükü W^- 'dir. Protonun, nötrona bozunma olayına beta artı bozunumu denir ve zayıf kuvvetin yükü W^+ 'dir. Proton bozununca nötron, pozitron ve nötrino ortaya çıkmaktadır.

Beta bozunumuyla ilgili en önemli problem parite ihlali yapmasıdır. Parite kavramı bir parçacığın kuantum dalgasıyla ayna yansıması arasındaki ilişkiyi açıklamaktadır. Elektromanyetik etki parite ile yani ayna yansıması ile açıklanmakta ve simetriye uyduğu içinde sağ ve sol yönde bir ayırım yapmamaktadır buna karşın beta bozunmasında yani zayıf etkileşimde vakum simetrik olarak hareket etmemektedir. Glashow parite ihlali ve W^+ ve W^- bozonlarını denkleme eklediğinde fotonunda parite ihlali yaptığını gördü. Glashow denklemine elektrik yükü ve kütlesi olmayan başka bir bozon ekledi. Ona göre parite ihlali yapan bozon Z^0 olmalıydı. Zayıf kuvvet SU (2) matematiksel grubuyla ifade edilmektedir. Kuantum mekaniği W^+ , W^- ve Z^0 bozonlarıyla fotonu birbirini bağlamaya izin vermesi elektrozayıf kuvvetin SU (2)x U (1) sayı gruplarıyla hesaplanmasını ifade etmektedir. W^+ ve W^- SU (2) grubuna ait olduğu net bir şekilde bilinebilirken Z^0 ve foton söz konusu olduğunda¹⁵⁷ hem SU (2) hem de U (1) özellikleri taşıdıkları görülmektedir.

Kuantum dünyasında kendiliğinden simetri kırılması fenomeni ilk olarak 1960 yılında Yoichiro Nambu tarafından keşfedildi. Philip Anderson elektromanyetik ışıma, süperiletken veya plazma gibi bir ortamla karşılaştığında ne olduğunu anlamaya çalıştı ve ayar değişmezliği aynı kalmasına rağmen fotonun kütle sahibiymiş gibi davranmasına izin verebileceğini gösterdi. Glashow, Salam ve Ward'un zayıf ve elektromanyetik kuvveti birleştirme çabaları çalışma alanlarını farklı alanlara kaydırmalarıyla sonuçlansa da Tom Kibble, Gerry Guralnik ve Dick Hagen Ekim 1964 tarihinde "Gizli simetri" makalesiyle zayıf kuvvetin sonsuzluk problemini çözmek için önemli bir adım attı. Elektrozayıf etkileşim kuantum alan teorisinin renormalizasyonu ise Hollandalı iki fizikçi Gerard 't Hooft ve Martinus Veltman tarafından 1970'lerin



¹⁵⁷ Z bozonu momentum ve enerjiyi transfer eder.

başında kanıtlandı. Bu teori ve deneyin verimli bir birlikteliği idi. 1980'lerin başında CERN'de, öngörülen W ve Z ayar bozonları bulundu.¹⁵⁸

B. Kuantum Kromodinamiği

Kuantum kromodinamik kuarklar arasında etkili olan yeğin kuvveti inceleyen alandır. Neden Kuantum Kromodinamiğe ihtiyaç duyduk? yeni parçacıkların keşfi süreci bunu tetiklemiştir diyebiliriz. Delta parçacığının keşfi ve çeşitlerine dair açıklamalar kuark fikrini ortaya çıkarmıştır. Daha sonra ortaya çıkan yeni parçacıklar incelendiğinde 1964 yılında keşfedilen Ω^- yarı-integral spinli parçacığının Pauli dışarlama ilkesine uymuyor gözükmesini çözmek adına kuantum kromodinamiği ortaya çıktı.

Kuantum Kromodinamiği, kuantum renk dinamiği anlamına gelmektedir ve kuarkların üç farklı renk (kırmızı, yeşil ve mavi¹⁵⁹) yüke sahip olduğunu belirtmektedir. Böylece aynı elektrik yüküne sahip parçacık aynı yerde bulunmadığı için Pauli dışarlama ilkesinin ihlalini çözdüğü kabul edilmektedir. Kuantum Kromodinamiği diğer alan teorileri gibi Yang-Mills ayar teorisine tabidir: Kuarklar SU (3) simetrisine konudur ve SU (3) simetrisi, SU (2) gibi abelyen olmayan simetrilerdir. Bu kuarkın dönebileceği üç farklı yüze sahip olduğunu göstermektedir ve dönüş sayıları $3^2 - 1 = 8$ 'dir.¹⁶⁰ Aynı zamanda 8-boyutlu uzayı göstermektedir. Sonuç olarak dönmenin farklı her çeşidi için 8 farklı çeşit ayar dalgası olmalıdır. Bu ayar dalgalarına gluon denilmektedir. Gluonlar kendi kendilerine dönüşler yaratabilir. Bu gluonlar birbirleriyle etkileşebilirler anlamına gelmektedir. Bu gluonlar arasında bir potansiyel etkileşimine

¹⁵⁸ Schmitz, *Particles*, s. 72.

¹⁵⁹ Renkler, kuarkların yüklerini analogik olarak barındırırsa da özellikle bu üç rengi seçmeleri kırmızı, yeşil ve mavinin birleşiminin beyaz olmasında kaynaklanmaktadır.

¹⁶⁰ Kırmızı, yeşil ve mavi renkli kuarklara sahibiz.

* kırmızıdan yeşile dönme

* yeşilden kırmızıya geri dönme

* kırmızıdan maviye dönme

* maviden kırmızıya geri dönme

* yeşilden maviye dönme

* maviden yeşile geri dönme

* bir rengin kendi rengine farklı bir renk boyutuyla dönmesi (örn. mavi aracılığıyla kırmızıdan kırmızıya dönme)

* bir rengin kendi rengine diğer ikinci renk boyutuyla dönmesi (örn. yeşil aracılığıyla kırmızıdan kırmızıya dönme).

yol açmaktadır. Elektromanyetik yüke sanal fotonların yaptığı gibi Gluon sanal kuark ve anti kuark üretebilir, ilk olarak bir gluon bir kuarkın rengini değiştirir, ikinci olarak ise yüksek uzaklıklarda gluonlar daha fazla gluon üretirken kısa mesafede ise birkaç gluonun varlığından söz edebiliriz.

Şekil 4: SU (3) Kuantum Kromodinamiği Lagrangian Denklemi

$$\mathcal{L}_{\text{QCD}} = \bar{\psi}_i^{(u)} \left(i\gamma_\mu D_{ij}^\mu - m_u \delta_{ij} \right) \psi_j^{(u)} + \bar{\psi}_i^{(d)} \left(i\gamma_\mu D_{ij}^\mu - m_d \delta_{ij} \right) \psi_j^{(d)} + \sum_{f, f \neq u, d} \bar{\psi}_i^{(f)} \left(i\gamma_\mu D_{ij}^\mu - m_f \delta_{ij} \right) \psi_j^{(f)} - \frac{1}{4} F_{\mu\nu}^a F_a^{\mu\nu}$$

Kaynak: https://www2.physics.ox.ac.uk/sites/default/files/2014-03-31/qcdgrad_rojo_oxford_tt14_2_basics_pdf_40958.pdf

Kuantum kromodinamiğinde her bir kuark için bir dalga ve her gluon için bir ayar dalgasını içermektedir. Kuarkların toplam sayısı 6 çeşni (u, d, s) x 2 yönlülük (ellilik) x 3 renk = 36'dır. 8 gluon ayar dalgalarının bütün çeşitleri aynı güçtedir. Aynı şeyler anti-kuarklar için de geçerlidir. Renk yüküne nisbetle 72 kuark çeşidinin tamamı simetriktir. Kuantum Kromodinamiğinin fermiyon ve bosonları ve etkileşimleri şöyledir:

Tablo 5: Fermiyonlar, Bozonlar ve Etkileşimleri

Alan	Dalga Türü	Kütle	Etkileşim
6 sağ ve 6 sol elli kuarklar (u, c, t, d, s, b)	Fermiyon	Her kuark çeşidi için farklılık gösterir	Gluon, foton, W ve Z ⁰ ile
8 gluon	Ayar bozonu	0	Kuarklarla ve gluonlarla

Kaynak: Schmitz, *Particles*, s. 267.

Gluonların diğer gluonlarla etkileşebiliyor olmasının temel sonucu gluon etkisinin diğer gluonları çektiğinde iki ya da üç kuark arasında yeğin kuvveti ortaya çıkarmasıdır. Bu etki renk hapsi adını alır. Kuantum kromodinamiğinde renk yükü, sıfır uzunluktaki ölçeklerde sonsuza gitmez kuantum elektrodinamiğinin aksine. Uzaklık 0'ya yaklaştığında kuarklar ve gluonlar özgürce hareket edebilirler buna asimtotik özgürlük denmektedir. Diğer alan teorilerinin aksine kuantum kromodinamiğinde sonsuzluk problemi yoktur. *Physical Review Letter*'da Gross ve Wilczek ve Politzer Yang-Mill teorilerinin asimtotik özgürlüğünü kanıtlandı. Kuark ve gluonların abelyen olmayan ayar teorisi sonrasında kuantum kromodinamiği olarak adlandırıldı.¹⁶¹

C. Standart Model

Standart Modele, kuantum alan teorisine dair şu ana kadar anlatılanların toplamı dememiz gerekmektedir. Temel etkileşimlerin Standart Modeli $SU(3) \times SU(2)_L \times U(1)$ ayar grubuna sahip bir Yang-Mills teorisidir. $SU(3)$ Kuantum kromodinamiğini temsil ederken, $SU(2)_L \times U(1)$ elektrozayıf kuvveti temsil etmektedir. $SU(2)$ de ki L ise, zayıf kuvvetin parite ihlaliyle sağ ve solu ayırt ettiğini temsil etmektedir. Dikkatinizi çektiği üzere bu modelde dördüncü kuvvet olan yerçekimi kuvveti yer almamaktadır. Yerçekimi kuvveti gravity tarafından taşındığı belirtilse de bu nokta deneysel olarak tam aydınlatılmış değildir. Einstein'ın son döneminde elektromanyetik kuvvet ve yerçekimi kuvvetini birleştirmeye çalıştığını biliyoruz. Bu nedenle Standart Model, bütün kuvvetleri en basit haliyle hem matematiksel hem de deneysel olarak birleştirmeyi amaçlayan her şeyin teorisi için bir adım olarak düşünülmektedir. Bu yolda ileri sürülen teorilerden biri sicim teorisidir. Bu teoride parçacıklar, bir boyutlu iplikçikler olarak ele alınmaktadır ve teori bütün kuvvetlerin birleştirmeyi bu yolla hedeflemektedir. Bu teori matematiksel düzeyde kalmış yani deneysel olarak ispatlanamamıştır. Bu konuları tezimizin kapsamında olmadığı için detaylandırmayacağız ancak şunun farkında olmalıyız ki teorilerin LEP (*The Large Electron-Positron Collider*), LHC (*The Large Hadron Collider*) vb. büyük parçacık

¹⁶¹Ecker, *Quanta*, s. 81.

hızlandırıcıların etkisiyle deneysel anlamda oldukça başarılı olunmuştur ve doğayı anlama çabası yüzünü büyük patlamaya çevirmesiyle farklı bir boyut kazanmıştır.



GENEL DEĞERLENDİRME VE SONUÇ

Klasik fiziksel dünyada maddenin özsel bir özelliği olarak açıklanan içine girilmezlik ilkesi kuantum dünyasında Pauli dışarlama ilkesiyle tekrar canlılık ve anlam kazanan bir özellik olarak karşımıza çıkmaktadır. Soyut bir matematiğe ve yorumlanma ihtiyacına sahip olan kuantum mekaniğinde Pauli dışarlama ilkesinin ne gibi fiziksel sonuçlarının bulunduğu tez dahilinde ele alınmaya çalışılmıştır. “Madde içsel olarak nasıl bir yapıya sahiptir?” sorusu üzerinden kuantum mekaniğinin çerçevesi açıklanmaya çalışılmıştır.

İçine girilmezlik, Descartes’ta uzay ve cismin özdeşliğinin açıklanmasında uzamın sadece bir sonucu olup maddenin içsel bir özelliğini temsil etmemektedir. 17.yy. a gelindiğinde ise, özellikle Newton’da, madde, katı, ağır, sert, içine girilmez, hareket eden parçalar gibi özelliklere sahip olarak açıklanarak içine girilmezlik maddenin özsel bir özelliğini temsil edilmekte olduğu düşünülmüştür. Kant’ta ise madde kavramı, maddenin bir bölümünün diğer bölümünü uzaklaştıran itici ve maddenin bir bölümü aracılığıyla diğer bölümünün ona doğru hareketinin sebebi olabilen çekici kuvvetlerin dengeli olması durumuyla açıklanmaktadır. Kant’a göre madde “bir uzayı dolduran ve hareket eden şeydir.” Uzay ise maddenin kendi varlığıyla doldurulmamakta ancak özel hareket ettirici kuvvetlerle uzay doldurulmaktadır. Dolayısıyla uzay maddenin özsel bir özelliği değildir ve maddenin özsel özelliği olan kuvvet uzayı dolduran ve maddeyi oluşturan olarak hareketin sonucu değil nedenidir. *Metafiziksel Temeller*’in ikinci bölümü olan dinamikte, içine girilmezlik kavramının katılık üzerinden açıklanamayacağı, çünkü içine girilemezliğin cisimler arasında dinamik ve nedensel bir ilişki olduğundan katılık sadece sabit bir özelliğe işaret ettiği ifade edilmiştir. Kant’a göre sonsuz güçte iten bir kuvvet olamayacağı için içine girilebilirlik söz konusu olamaz. Dolayısıyla Kant’ta içine girilmezlik maddenin sıkışmaya gösterdiği direnç demektir. Bütün bunların sonucunda Newton’un mutlak zaman, mekân ve hareket kavramlarını kabul etmeyen Kant içine girilmezliğin de mutlak olmadığını ancak matematiksel olarak bundan söz edilebileceğini belirtmektedir. Dolayısıyla Kant’ta içine girilmezliğin, maddenin göreceli, nedensel ve dinamik bir özelliğini gösterdiği de ele alınmıştır.

Genel görelilik kuramı ile beraber Descrates'ın uzay madde ilişkisinin bir veçheden tekrar gündeme gelmesi ve olumlanması da söz konusu olmuştur. Böylece Klasik dönemde içine girilmezlik maddenin kimi zaman özsel bir özelliği olarak çıkarken kimi zaman bu durum flulaşmıştır. Kuantum mekaniğinde ise kuantum nesnesinin gerçekliği durumuna dair problemler yaşansa da içine girilmezlik, Pauli dışarlama ilkesiyle tekrar fermiyonların özsel bir özelliği olarak onu kararlı, katı, bağ kurup varlığını ortaya çıkaran bir yapıda tekrar ortaya çıktığı tez metninde matematiksel yapısı da verilerek serimlenmeye çalışılmıştır. Buna karşın içine girilmezlik kavramı modern dönemde ortaya konulduğu şekliyle maddeyi oluşturan yapının ne bütününe temsil etmekte ne de itme kuvveti üzerinden anlaşılabilir.

Tezimizde vurguladığımız gibi Kant'ın içine girilmezlik kavramını *Saf Aklın Eleştirisi*'nde geliştirdiği transandantal metafizik arka planında ele almıştır. Madde kavramını dört farklı kategoriye göre belirlemeye gayret etmiş ve bu itibarla teorik fizik için metafiziksel (kendi tabiriyle saf) bir zemin sağlama yoluna gitmiştir. Yine tezimizde tarihsel seyri içerisinde sunmaya çalıştığımız gibi, Kant sonrasında transandantal düşünce bir kenara bırakılmış ve fizik matematik zemininde, fenomenlerin açıklanmasını veren en iyi teorilerin geliştirilmesi yönünde bir seyir izlenmiştir. Matematiksel olarak iş gören teorik çerçevelere sahip olmakla beraber maddeye ilişkin (kuvvet, alan, uzay vb.) temel kavramların birbirleriyle ilişkilerine dair (Kant'ın kastettiğine benzer) saf veya metafiziksel bir kavrayışımızın olmadığı bir noktaya ulaşmış bulunuyoruz.

Kanaatimizce Kant'ın klasik mekaniği esas alarak oluşturduğu çerçeve kuantum nesnelerinin parça bütün, nedensellik vb. ilişkilerini ele almak için yeterli görünmemektedir. Bunun temel nedeni Kant'ın metafizikte gerçekleştirdiği düşünülen Kopernik Devrimi'nin fenomenal olanı esas alması ve fenomenleri belirlemesi cihetinden tecrübeyi kuran transandantal unsurların teşrihine yönelmesidir. Oysa işin içine kuantum nesneleri girince kendi başına olanın (tezahürlerin kaynağında olanın) düşünülebileceği bir zemine ihtiyaç duyulmaktadır. Burada kendi başına nesne ile Kant'ın kendinde şey kavramının özdeşleştirilebileceğini düşünmüyoruz. Kendinde şey ile tezahürlerin alanı arasında kalan bir nesnellik alanının metafiziğinin nasıl

yapılabileceğinin üzerinde düşünölmeye değör imkanlar içerdüğini düşünöyoruz. Gerek Klasik fiziğın gerekse kuantum fiziğının Kant'ın sözünü ettiğı anlamda bir metafizik teçhiz edilmesinin teorik fiziğın karşı karşıya olduğı problemlerin anlaşılmasında ve aşılmasında önemli bir işlevi olacağını düşünöyoruz.



BİBLİYOGRAFYA

- Aristoteles. *Fizik*. çev. Saffet Babür. İstanbul: Yapı Kredi Yayınları, 2014.
- _____. *Metafizik*, çev. Ahmet Arslan. İstanbul: Sosyal Yayınlar, 2014.
- Aspect, Alain. “Bell’s Inequalities: More Ideal Than Ever”, *Nature* 398 (1999), s. 189-190.
- Bell, J. S. *Speakable and Unspeakable in Quantum Mechanics*. Cambridge: Cambridge University Press, 1987.
- Bohr, Niels. “Can Qunatum-Mechanical Description of Physical Reality be Considered Complete?” *Physical Review* 48 (1935), s. 696-702.
- Capellmann, Herbert. *The Development of Elementary Quantum Theory*. İsviçre: Springer, 2017.
- Close, Franck. *Sonsuzluk Yapbozu: Kuantum Alan Kuramı ve Higgs*. İstanbul: Alfa Yayınları, 2011.
- Cushing, James. *Fizikte Felsefi Kavramlar*, Cilt:2. İstanbul: Sabancı Üniversitesi, 2006.
- Descartes, Rene. *Felsefenin İlkeleri*. İstanbul: Say Yayınları, 2018.
- _____, *Yöntem Üzerine Konuşma*. çev. Çiğdem Dürüşken. İstanbul: Alfa Yayınları, 2015.
- Dirac, P.A. M. *The Principles of Quantum Mechanics*. Londra: Oxford University Press, 1958.
- Ecker, Gerhard. *Particles, Fields, Quanta: From Quantum Mechanics to The Standart Model of Physics*. İsviçre: Springer, 2019.
- Einstein, Albert, vd. “Can Quantum-Mechanical Description of Physical Reality Be Considered Complete?” *Physical Review* 47 (1935): s. 777-780.
- Einstein, Albert. *İzafiyet Teorisi*. İstanbul: Say Yayınları, 2020.
- Feynman, Richard. *Fizik Yasaları Üzerine*. Ankara: TÜBİTAK, 1995.
- Friedman, Micheal. *Kant ve Kesin Bilimler*. İstanbul: Alfa yayınları, 2015.
- Henry Margenau, “The Exclusion Principle and Its Philosophical Importance”, *Philosophy of Science* 11/4 (1944): 187-208.

- Hughes, R.I.G. *The Structure and Interpretation of Quantum Mechanics*. Londra, Harvard University Press, 1989.
- Ilya G. Kaplan, “Pauli Exclusion Principle and Its Theoretical Foundation”.
- Jammer, Max. *The Philosophy of Quantum Mechanics: The Interpretation of QM in historical perspective*. Kanada: John Wiley & Sons, 1974.
- Kant, Immanuel. *Metaphysical Foundation of Natural Science*, <https://www.earlymoderntexts.com/assets/pdfs/kant1786.pdf>
- _____, *Prolegomena*. çev. Aziz Yardımlı. İstanbul: İdea Yayınları, 2015.
- Koyre, Alexandre. *Kapalı Dünyadan Sonsuz Evrene*. Çev. Aziz Yardımlı. İstanbul: İdea Yayınları, 1998.
- Leclerc, Ivor. *The Nature of Physical Existence*. İngiltere: George Allen & Unwin Ltd., 1972.
- Leighton, Sands ve Feynman Richard. *Feynman Fizik Dersleri Cilt 3- Kuantum Mekaniği*. İstanbul: Alfa Yayınları, 2014.
- Massimi, Michela. *Pauli’s Exclusion Principle: The Origin and Validation of a Scientific Principle*. New York: Cambridge University Press, 2005.
- Merleau-Ponty, Maurice. *Algılanan Dünya*. Çev. Ömer Aygün. İstanbul: Metis Yayınları, 2014.
- Newton, Isaac. *Optics*. New York: Dover Publications, 1952.
- _____, *The Principia*. çev. I. Bernard Cohen ve Anne Whitman. İngiltere: University of California Press, 1999.
- Özlem, Doğan. *Kant Üstüne Yazılar*. İstanbul: Notos Kitap Yayınevi, 2015.
- Pais, Abraham. *Niels Bohr’s Times in Physics, Philosophy and Polity*. New York: Oxford University Press, 1991.
- Penrose, Roger. *Kralın Yeni Usu II: Fiziğin Gizemi*. Ankara: TÜBİTAK, 2000.
- Planck, Max. *Modern Doğa Anlayışı ve Kuantum Teorisine Giriş*. İstanbul: Alan Yayıncılık, 1987.
- Platon. *Timaios*. çev. E. Güney, L. Ay. İstanbul: Sosyal Yayınları, 2001.
- Reichenbach, Hans. *Kopernik’ten Einstein’a Uzay, Zaman ve Hareket*. Çev. Berk yayılım. Ankara: Fol Yayınları, 2020.

Riebe, Cord. vd. *The Philosophy of Quantum Mechanics*. İsviçre: Springer, 2018.

Schmitz, Wouter. *Particles, Fields and Forces*. İsviçre: Springer, 2019.

Watkins, Eric. Kant on Extension and Force: Critical Appropriation of Leibniz and Newton. Wolfgang Lefevre(ed.), *Philosophy and Science in The Eighteenth Century Between Leibniz, Newton and Kant*. Boston: Springer, 2001.

Wolfgang Pauli, “Exclusion Principle and Quantum Mechanics”. *Nobel Lecture* (1946): s. 27-43.



ÖZGEÇMİŞ			
Adı, Soyadı	Sümeyra		YILMAZ
Doğum Yeri ve Yılı	Erzurum		02.06.1993
Bildiği Yabancı Diller	İngilizce Arapça		
ve Düzeyi	Çok iyi Orta		
Eğitim Durumu	Başlama - Bitirme Yılı	Kurum Adı	
Lise	2007	2011	Bayburt Anadolu İmam-Hatip Lisesi
Lisans	2011	2016	Marmara Üniversitesi
Yüksek Lisans	2016	2020	İstanbul 29 Mayıs Üniversitesi
Doktora			
Katıldığı Proje ve Toplantılar			
Diğer:			
İletişim (e-posta):	smyr.yilmaz.69@gmail.com		
		Tarih İmza Adı Soyadı	15.09.2020 Sümeyra YILMAZ

