

Müge ile Bilge Kuantum Fiziği ve Atomun Yapısını Tartışıyor

Yılmaz SAĞLAM



Prof. Dr. Yılmaz SAĞLAM

MÜGE İLE BİLGE KUANTUM FİZİĞİ VE ATOMUN YAPISINI TARTIŞIYOR

e-ISBN 978-625-8325-97-3

Kitap içeriğinin tüm sorumluluğu yazarına aittir.

© 2022, PEGEM AKADEMI

Bu kitabın basım, yayım ve satış hakları Pegem Akademi Yay. Eğt. Dan. Hizm. Tic. AŞ'ye aittir. Anılan kuruluşun izni alınmadan kitabın tümü ya da bölümleri, kapak tasarımı; mekanik, elektronik, fotokopi, manyetik kayıt ya da başka yöntemlerle çoğaltılamaz, basılamaz, dağıtılamaz. Bu kitap T.C. Kültür ve Turizm Bakanlığı bandrolü ile satılmaktadır. Okuyucularımızın bandrolü olmayan kitaplar hakkında yayinevimize bilgi vermesini ve bandrolsüz yayınları satın almamasını diliyoruz.

Pegem Akademi Yayıncılık, 1998 yılından bugüne uluslararası düzeyde düzenli faaliyet yürüten **uluslararası akademik bir yayinevidir**. Yayımladığı kitaplar; Yükseköğretim Kurulunca tanınan yükseköğretim kurumlarının kataloglarında yer almaktadır. Dünyadaki en büyük çevrimiçi kamu erişim kataloğu olan **WorldCat** ve ayrıca Türkiye'de kurulan **Turcademy.com** tarafından yayınları taranmaktadır, indekslenmektedir. Aynı alanda farklı yazarlara ait 1000'in üzerinde yayını bulunmaktadır. Pegem Akademi Yayınları ile ilgili detaylı bilgilere <http://pegem.net> adresinden ulaşılabilir.

I. Baskı: Ekim 2022, Ankara

Yayın-Proje: Şehriban Türüldür
Dizgi-Grafik Tasarım: Tuğba Kaplan
Kapak Tasarımı: Pegem Akademi

Baskı: Sonçağ Yayıncılık Matbaacılık Reklam San Tic. Ltd. Şti.
İstanbul Cad. İstanbul Çarşısı 48/48 İskitler - Ankara
Tel: (0312) 341 36 67

Yayıncı Sertifika No: 51818
Matbaa Sertifika No: 47865

İletişim

Macun Mah. 204. Cad. No: 141/A-33 Yenimahalle/ANKARA
Yayınevi: 0312 430 67 50
Dağıtım: 0312 434 54 24
Hazırlık Kursları: 0312 419 05 60
İnternet: www.pegem.net
E-ileti: pegem@pegem.net
WhatsApp Hattı: 0538 594 92 40

Prof. Dr. Yılmaz SAĞLAM

1975 yılında Aksaray'da doğdu. Lisans derecesini Selçuk Üniversitesi Kimya Eğitimi Bölümü'nden aldıktan sonra fen bilgisi öğretmeni olarak bir süre köy okullarında çalıştı. 1999 yılında Milli Eğitim Bakanlığı'ndan yurt dışı mastır ve doktora bursu kazandı. 1 yıl süreyle Ortadoğu Teknik Üniversitesi'nde dil eğitimi aldı. Ardından Amerika Birleşik Devletleri'nde bulunan Missouri Üniversitesi'nden yüksek lisans derecesi ve Purdue Üniversitesi'nden fen bilgisi eğitimi alanında doktora derecesi aldı. 2013 yılında Sosyokültürel Diyalektik Yöntem adında bir öğretim metodu geliştirdi. Yöntemi anlatan kitabı binlerce okuyucuya ulaştı ve önerdiği bu yöntem Türkiye'de geliştirilen ilk öğretim yöntemi oldu. Güncel çalışma alanları arasında sosyokültürel diyalektik yöntem, bilim felsefesi, bilgi felsefesi, diyalojik ve otoriter söylem gibi konular yer almaktadır.

ORCID No: 0000-0002-5076-8339

ÖN SÖZ

Kuantum kelimesi ile hayatımızda sıklıkla karşılaşmaktayız. Fakat bir çoğumuz mesleklerimize ya da yaşımıza bakılmaksızın bu kelimenin ne anlama geldiği konusunda yeterince bilgi sahibi değildir. Kuantum ne demektir? Kuantum kuramı nasıl ve ne zaman ortaya çıkmıştır? Elektronların ve elektromanyetik dalgaların davranışları arasında nasıl bir benzerlik ya da farklılık vardır? Kuantum tanecik ne demektir? Atom içerisinde elektronların durumu ve konumu nasıldır? Günümüzde kabul edilen atom modeli nedir? gibi sorulardan bir ya da birkaçı sizlerin de kendinize sormuş olduğunuz sorulardan bazıları olabilir. Kitap metninde bu soruların yanıtlarını bulacaksınız.

Bununla birlikte elektronun tuhaf davranışlarına metin içerisinde tanıklık edeceksiniz. Yapılan deneylerde elektronun gözlenmediğinde dalgalı bir davranış, gözlendiğinde ise tanecik gibi davrandığını öğreneceksiniz. Elektron yoksa canlı mı? İzlendiğini nereden biliyor? Bu bilimle açıklanabilir mi? Yoksa bu durum metafizik ile ilgili mi? gibi sorular, okurken aklınıza gelebilir. Bu sorulara yanıt vermek gerekirse elektron tabii ki canlı değil. Dolayısıyla izlendiğini bilmiyor. Sadece belirli koşullarda farklı davranışlar sergileyebilen bir kuantum tanecik. Metafizik ise doğaya ait olmayan bir durumdur. Doğada bulunan tüm canlı ve cansız varlıklar bilim kanunları doğrultusunda hareket eder. Bilim, bu kanunları keşfetme ve bu varlıkların davranışlarını açıklayan teoriler geliştirme amacındadır. Eğer dünyamız kaotik olsaydı, bilim öngörüsüz olurdu ve karşılaştığımız sorunlara çözüm bulma hususunda çaresiz kalırdı.

Metin içerisinde elektronun başka tuhaf bir davranışına daha şahitlik edeceksiniz. Bir taşı belirli bir açı ile fırlattığımızda onun tam olarak nereye düşeceğini klasik fizik kanunları ile az bir hata payı ile bulabiliriz. Fakat elektron gibi atom altı bir taneciği belirli bir açı ve hızla fırlattığımızda nereye düşeceği klasik fizik kanunları ile öngörülemezdir. Elektron, karşıda herhangi bir nokta-

ya düşebilmektedir. Bu durumu öğrendiğinizde, doğanın bu atom altı dünyasının oldukça karmaşık olduğunu düşünebilirsiniz. Fakat elektronun nereye düşeceği olasılık hesabı ile bulunabilmektedir. Bu durum insan ırkının açıklama ve öngörme gereksinimini karşılayabilmektedir.

Kitap metni, **öğrenme, bir bilen ile belirli bir bağlam üzerinden kurulan diyaloglar sonucunda ortaya çıkar** teorisine dayalı olarak diyalog tarzında yazılmıştır. Kitap metninde iki kişi arasında geçen konuşma örgülerine şahit olacaksınız. Müge ile Bilge kitabın iki kahramanı ve karakterleridir. Müge, kitap metninde okuyucunun sesi olarak var olmakta ve aklınıza gelebilecek soruları Bilge'ye yönelmektedir. Pasif bir dinleyici yerine Müge, aktif bir katılımcıdır. Hem fiziksel hem de zihinsel olarak öğrenme ortamında vardır. Bilge ise Müge ile diyalog kurmaya çalışmakta ve ona sorduğu birtakım sorularla onu düşünmeye zorlamaktadır. Müge ile Bilge arasında geçen konuşma örgüleri, bilimsel düşünme biçimini görülebilir hale getirmekte ve bu duruma şahitlik eden okuyucu bilimsel olarak nasıl düşünmesi gerektiğini öğrenebilmektedir.

Anlamli öğrenme ancak bir yaşantı sonucu elde edilebilir teorisine dayanarak kitap metninde atomun yapısı ile ilgili deneyler ayrıntılı olarak verilmeye çalışılmıştır. Klasik ve Kuantum fiziği dönemlerinde yapılan deneyler, deneylerin neden ve nasıl tasarlandığı, elde edilen veriler ve bu verilerin nasıl analiz edildiği, deney sonuçlarından yapılan çıkarımlar ayrıntılı olarak kitap metninde yer verilmeye çalışılmıştır. İlâveten, bilim insanlarının nasıl düşündüğü, matematiği nasıl kullandıkları ve bilimsel bulguları nasıl yorumladıkları kitap metninde anlatılmaya çalışılmıştır. Böylelikle okuyucu, bu kitabı okuyarak bilim felsefesi ya da bilimin doğası ile ilgili de bilgi sahibi olabilmektedir.

TEŞEKKÜR

Aileme verdikleri maddi ve manevi destekten dolayı sonsuz teşekkür ederim.

Doktora süresince absürt fikirlerimi sabırla dinleyen, beni anlamaya çalışan ve beni doğru bir şekilde yönlendiren, mükemmel insan, Dr. Mary B. Nakhleh, hanımefendiye teşekkür ederim.

Mastır ve Doktora öğrenimim sırasında bana rehberlik eden ve akademik desteklerini daima arkamda hissettiğim iki güzel insan, Dr. Lloyd Barrow ve aramızdan ayrılan Dr. George Bodner'a teşekkür ederim.

EleŐtiri ve dönütlerle kitaba katkı veren meslektaşlarım, dostlarım Dr. Ali Derya Atik ve Dr. Nihat Altınöz'e teşekkür ederim.

Dilbilgisi kontrollerini yaparak kitaba katkıda bulunan edebiyat öğretmeni, arkadaşım ve dostum Murat İlik'e teşekkür ederim.

GİRİŞ

Bu kitap Platonun metinlerinden ilham alınarak diyalog tarzında yazılmıştır. Kitapta bir doktora öğrencisi olan Müge ile bir bilge arasında geçen diyaloglar görülecektir. Müge, bilgisi sınırlı fakat öğrenmeye meraklı bir öğrenci iken bilge, kuantum fiziği üzerine çalışmalar yapan bir kişidir. Aralarında geçen diyaloglarda 1800'lerden günümüze kadar atomun yapısı ile ilgili bilimsel gelişmeler ayrıntılı olarak tartışılmaktadır. Müge bu süreçte biz okuyucuların aklına gelebilecek soruları bizim yerimize bilgeye sormakta, aldığı yanıtların doğruluğunu sorgulamakta ve süreç içerisinde pasif bir dinleyici olmaktan öteye geçerek aktif bir katılımcı rolünü benimsemektedir. Bu tarzda bir anlatım, kitapta verilmesi hedeflenen bilgilerin okur tarafından daha kolay anlaşılması amacıyla yapılmıştır.

Eğlenerek okumanızı diliyorum.

Prof. Dr. Yılmaz Sağlam

13 Eylül 2022

İÇİNDEKİLER

Ön Söz.....	v
Teşekkür.....	vii
Giriş.....	viii
Kuantum Fiziği ve Atomun Yapısı.....	1
Kaynaklar.....	46

KUANTUM FİZİĞİ VE ATOMUN YAPISI

Müge:



“Bir demir parçası su altında kısa bir sürede paslanmaya başlarken küçük bir altın parçası, uzun yıllar su altında kalsa bile neden paslanmıyor?”

Bilge:



“Demir elementi, suda bulunan oksijen elementi ile bağ kurarak paslanır. Altın elementi ise oksijen ile bağ kurmaz. Altın doğada saf halde bulunabilir.”

Müge: Bağ kurmak ne demek?

Bilge: Elementler çok küçük boyutlardaki atomlardan oluşurlar. Paslanma esnasında 2 tane demir atomu ile 3 tane oksijen atomu bir araya gelir ve sıkı sıkıya birbirlerine tutunurlar. Tek bir atommuş gibi olurlar. Fakat altın atomu, oksijen atomu ile biraya gelmez. Bu nedenle suda bulunan bir demir parçası paslı ve koyu kahverengi bir renge sahipken su yataklarından çıkarılan altın ise paslanmamış parlak sarı rengiyle ışıl ışıdır.

Müge: Demir atomu, oksijen ile bağ kurabilirken altın atomu neden bağ kurmaz?

Bilge: Atom yapıları farklıdır da ondan.

Müge: Bu nasıl bir farklılıktır? Bütün atomlarda bildiğim kadarıyla ortada bir çekirdek ve onun çevresinde elektronlar bulunur.

Bilge: Fakat her bir atomun çekirdeğinde bulunan proton sayısı, çekirdeğin çevresindeki elektron sayısı ve elektronların atom içerisindeki konumları birbirinden farklıdır.

Müge: Tabiatta kaç çeşit element vardır?

Bilge: 92 farklı element vardır ve bu elementlerin hepsi **Periyodik Cetvel** adı verilen bir tabloda toplu olarak gösterilmektedir ². 1 numaralı element hidrojen ve 92 numaralı element uranyumdur. Burada cetvelin bir örneğini görebilirsin (*Bilge periyodik tablonun bir örneğini Müge'ye uzatır*).

Müge: Siz 92 element demiştiniz ama bu tabloda 118 element var^{5,6}.

Bilge: Evet 92'den sonra gelen elementler tabiatta bulunmaz². Bu elementler, laboratuvar ortamında yapay olarak elde edilirler. Fakat uzun süre mevcut yapılarını koruyamazlar¹⁷. Başka elementlere dönüşürler. Bu dönüşme süreci kararlı bir element oluşana kadar devam eder²⁸.

Müge: Tabiatta bulunan elementlerde de böylesi bir dönüşüm olur mu?

Bilge: Evet. Az sayıda element (örneğin uranyum ve radyum) tabiatta bulunmasına rağmen kararsızdır ve başka elementlere dönüşür. Örneğin on dört aşamadan geçen bir dönüşüm süreci sonunda uranyum, kararlı kurşun elementine dönüşür²⁸.

Müge: Atomların yaşı var mıdır?

Bilge: Atomlar için yaştan bahsedilemez. Birçok atomun doğumu, evrenin başlangıcıdır²⁷. Şu an bedenini oluşturan atomlar, bir zamanlar başka bir canlının ya da cansız bir nesnenin parçasıydı. Atomlar, canlı ve cansız varlıkların yapısına katılarak ya da yapısından ayrılarak evrende sürekli bir dolaşım içerisindeyler²⁷.

Müge: Elementlerin atomlardan meydana geldiğini ilk kim söylemiş?

Bilge: Antik kaynaklara göre elementlerin atomlardan oluştuğu ilk olarak M.Ö. beşinci yüzyılda Yunan filozof Demokritos tarafından dile getirilmiş^{6,13}. Demokritos'a göre bütün elementler atom adı verilen çok küçük ve bölünemeyen taneciklerden oluşuyordu. Bu iddiası herhangi bir deneysel veriye dayanmıyordu ve dolayısıyla bilimsel değildi. Fakat 1808 yılında deneysel verilere dayanarak John Dalton (1766-1844) bütün elementlerin atomlardan oluştuğunu bilimsel olarak gösterdi⁶.

Müge: Elementlerin atomlardan oluştuğunu kendi gözlemlerimizle nasıl anlarız?

Bilge: Antik dönemin filozofları maddeyi bir bütün olarak görürdü. Hava, su, odun vb. maddeler bütündü. Onlara göre bir demir ya da tahta parçası tanecikli bir yapıya sahip olsaydı, kum gibi dağılmaları gerekirdi.

Müge: Evet, mantıklı.

Bilge: Mantıklı fakat bu doğru değil. Bir bardak suya, gıda boyası eklediğimizde boyanın su içerisinde dağıldığını görürüz. Eğer

su, bütün bir madde olsaydı, gıda boyasının yoğunluğuna bağlı olarak suyun kenarında, altında ya da üstünde bir yerde kümelenmesi gerekirdi. Boyanın su içerisinde dağılması her ikisinin de tanecikli bir yapıya sahip olduğunu gösterir¹⁶.



Atomun varlığına dair tek delil de bu değildir. Örneğin 1827 yılında Robert Brown (1773-1858) mikroskop altında polen tanelerini incelemekteydi^{7,27}. Gözlemi sırasında ilginç bir durumla karşılaştı. Polen taneleri her yöne, rastgele ve sürekli bir titreşim hareketi yapıyordu. Önce onların canlı olduklarını düşündü. Polen taneleri, hareketli erkek üreme hücreleri (spermiler) olabilir miydi? Fakat *toz ve is taneciklerinin* de su içerisinde aynı davranışı sergilediklerini gözlemledi. Dolayısıyla bu titreşim hareketi taneciklerin kendisinden kaynaklanamazdı.

Müge: Peki neden kaynaklanıyormuş?

Bilge: 1905 yılında Albert Einstein (1879-1955) bu olaya bir açıklama getirdi. Ona göre ısı etkisi ile sürekli hareket halinde olan su molekülleri, su içerisindeki polen tanelerine çarparak onlara hareket kazandırıyor. Görülemeyen su tanecikleri, görülebilen polen tanelerine çarparak onlara hareket kazandırıyor. Bu olay atomların varlığını gösteren bir başka delil olarak görüldü.

Müge: Atomun merkezinde çekirdek ve çekirdeğin etrafında elektronlar olduğunu nereden biliyoruz. Atomun içini görebiliyor muyuz?

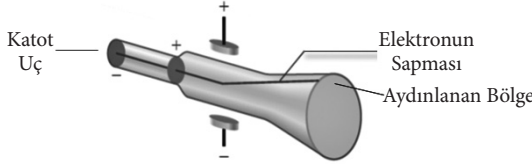
Bilge: Hayır. Henüz bu teknolojiye sahip değiliz. Bu teorik bir bilgi. Bir model.

Müge: Peki bilim insanları nasıl oluyor da atomun yapısı konusunda böylesine uzlaşmışlar.

Bilge: Deneysel veriler atomun yapısının muhtemelen böyle olduğunu bize gösteriyor.

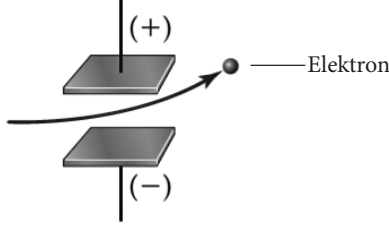
Müge: Örneğin atomun içerisinde elektron olduğunu nasıl oluyor da biliyoruz?

Bilge: 1800'lerin sonlarına kadar bilinen en küçük tanecik hidrojen atomuydu. Ondan daha küçüğü yoktu. Fakat havası alınan ve içerisinde az miktarda hidrojen gazı bulunan cam bir tüp üzerinde yapılan bir deney çok daha küçük ve negatif yüklü bir taneciğin varlığına işaret etti^{3,5,6,28}. Hava sızdırmayan cam tüpün uçlarına bir batarya yardımıyla yüksek voltaj uygulandığında bir ışımaya fark edildi. Tüpün katot ucundan çıkan ve gözle görülmeyen bu ışımaya, çarptığı yerde (fosforla kaplı anot uçta⁶) bir aydınlanmaya sebep oluyordu.



Bununla birlikte elektriksel ya da manyetik alan içerisinde ışımının yolundan saptığı görülüyordu. Bu oldukça şaşırtıcı ve beklenmedik bir gözlemdi. Çünkü elektromanyetik dalgalar (Gama, X ışınları, Morötesi ışık, Görünür ışık, Kızılötesi ışık, Mikrodalgalar, Radyo dalgaları)⁵ elektriksel ya da manyetik alandan etkilenmez ve kütesizdirler. Dolayısıyla bu ışımaya bir elektromanyetik dalga olmazdı. Bu ışımaya, elektriksel alanda negatif levha tarafından itildiği için negatif yüklü ve kütleyle sahip taneciklerden (İleride **elektron** adı verilecekti) oluşmalıydı. Tüpün katot kutbundan çıkan bu ışımaya bu nedenle **katot ışınları** adı verildi. Böylelikle negatif yüklü bir

tanecik (elektron) keşfedildi³. Aşağıda elektronun elektriksel alandaki sapması yakından görülmektedir.



Müge: Elektronun kütlesi nasıl bulundu?

Bilge: J. J. Thomson (1856-1940) bu negatif taneciğin (elektronun) elektriksel alandaki sapma açısının (ΔX), yükü (e^-) ile doğru, kütlesi (m) ile ters orantılı olması gerektiğini düşündü¹.

$$\Delta X \propto e^- / m$$

Thomson e^-/m değerini yaklaşık $-1,76 \times 10^8 \text{ C/g}$ olarak hesapladı. Fakat taneciğin ne yükü ne de kütlesi biliniyordu. Dolayısıyla bu değerden faydalanarak taneciğin yükünü ve kütlesini hesaplanamazdı. Thomson deney sırasında ikinci bir taneciğin varlığını fark etti. Bu tanecik negatif olandan farklı olarak ters yönde ve çok daha az sapıyordu. Pozitif levha tarafından itilen bu tanecik tanıdık biriydi. Bu tanecik tüpte az sayıda bulunan pozitif yüklü hidrojen atomundan başkası değildi. Onun da sapma açısı yükü ile doğru, kütlesi ile ters orantılıydı. İki parçacığın sapma açısının oranı, taneciklerin yük/kütle oranlarına eşit olmalıydı.

$$\frac{\text{Elektronun sapma açısı}}{\text{Hidrojen iyonunun sapma açısı}} = \frac{\text{Elektronun yükü/Elektronun kütlesi}}{\text{Hidrojen iyonunun yükü/Hidrojen iyonunun kütlesi}}$$

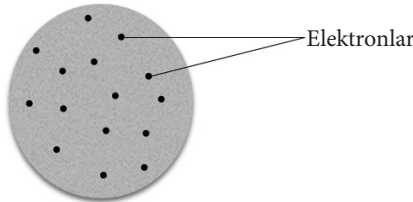
Negatif bir yükün hidrojen atomundan ayrılması, atomu pozitif hale getirebiliyor ya da negatif bir yükün hidrojen iyonuna katılması, onu nötr hale getirebiliyordu. Bu gözleme dayanarak Thomson, bu zıt yüklerin mutlak değerlerinin aynı olması gerektiğini düşündü ve aşağıdaki eşitliği elde etti.

$$\frac{\text{Elektronun sapma açısı}}{\text{Hidrojen iyonunun sapma açısı}} = \frac{\text{Hidrojen iyonunun kütlesi}}{\text{Elektronun kütlesi}}$$

Sapma açıları oranladığında yaklaşık 2000 değeri bulundu. Bu değer, hidrojen atomunun, negatif tanecikten (elektrondan) yaklaşık 2000 kat daha büyük bir kütleyle sahip olduğunu gösteriyordu¹. Böylelikle Thomson, elektronun gerçek kütlesi olmasa bile, hidrojen atomuna göre bağlı kütlesini hesaplayabildi.

Müge: Elektronların atomun bir parçası olduğunu nasıl anladı?

Bilge: Bu negatif tanecikler, bilinen en küçük atomdan (hidrojenden) çok daha küçük olduğundan Thomson'a göre bu tanecikler atomun bir parçası olmalıydı. Katot ışınları (elektronlar) tüpün metalden yapılmış katot kutbundan geliyordu. Katot kutbunda farklı metaller kullanıldığında yine bu ışınlar gözlenmeye devam ediyordu. Dolayısıyla Thomson'a göre katot ışınlarını oluşturan negatif yüklü bu parçacıklar tüm atomların yapısında bulunmalıydı^{3,5}. Atom bir bütün olarak nötr olduğundan negatif yüklerin pozitif yüklerle atom içerisinde dengelenmesi gerektiğini düşündü. Ona göre kütlelerin ve pozitif yükün homojen olarak yayıldığı küresel şekildeki atomun içerisinde, negatif yüklü bu hafif tanecikler tıpkı bir pudingdeki erikler gibi gömülü haldeydi ve atom içerisinde homojen dağılmışlardı^{6,21}. Bu durumu bir meyveli kekteki meyvelerin kek içerisinde homojen dağılmasına benzetebilirsiniz. Böylelikle atomun yapısında negatif tanecikler olduğu ilk defa ifade edildi. Yakın gelecekte bu taneciklerin (elektronların), atomun hem fiziksel hem de kimyasal özelliklerini belirleyen en önemli unsurlar olduğu anlaşılacaktı⁷. Thomson'un zihninde, aşağıdakine benzer bir atom modeli vardı.



Müge: Elektronun yükü ve gerçek kütlesi nasıl hesaplandı?

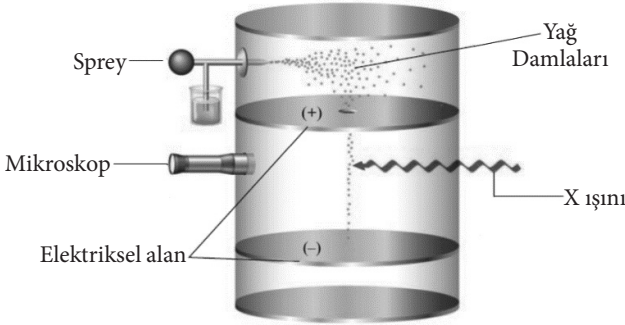
Bilge: 1909 yılında Robert A. Millikan (1868-1953) University of Chicago'da çalışırken elektriksel alan içerisinde yağ damlalarının davranışlarını gözlemledi^{5,7}. Bu gözlemin sonunda elektronun yükünü hesaplayabildi.

Müge: Bunu nasıl yaptı?

Bilge: İki bölümden oluşan aşağıdaki gibi kapalı bir kap yaptı¹³. Kabın üst bölümünden bir spreyle yağ püskürttü. Üst bölümde oluşan yağ damlaları yer çekiminin etkisiyle yere düşüyordu. Bir kısmı ise tabanda bulunan küçük bir delikten alt bölüme geçiyordu.

Müge: Millikan, deneyde neden su yerine yağ kullanmış?

Bilge: Su, yağa göre daha çabuk buharlaşır. Yağın kaynama noktası yüksek olduğundan hemen buharlaşmaz. Yağ damlacığının havada bulunduğu ve asılı kaldığı süre içerisinde buharlaşmaması ya da az buharlaşması gerekir. Bu hesaplamaların doğruluğu için gereklidir.



Kabın alt bölümünde taban ve tavana yerleştirilmiş zıt yüklü iki levha bulunuyordu. Millikan, yağ damlalarının düşme anlarını kabın yan duvarına yerleştirilmiş bir mikroskop ve bir aydınlatıcı ile izleyebiliyordu. Bununla birlikte bu bölümdeki hava molekülleri (azot, oksijen vb.) X ışınlarına maruz kalıyordu. Yüksek enerjili X ışınları hava moleküllerinden elektron koparıyor ve bu elektronlar

havada bulunan yağ damlalarına yapıştıyordu. Böylelikle yağ damlaları negatif yükü yükleniyordu^{7,14}. Millikan, alt bölümdeki levhalar arasında bir gerilim uyguladığında negatif yüklü yağ damlacıkları pozitif yüklü levha tarafından yukarı yönde çekiliyordu¹⁵. Bu olayı mikroskop yardımıyla gözlemledi. Negatif yüklü levha, yağ damlacıklarını itmekte, pozitif levha ise çekmekteydi. Yukarı yönlü olan bu kuvvet, elektriksel alanın gerilimine bağlı olarak düşen yağ moleküllerini yavaşlatıyor, bazılarını havada asılı tutabiliyor ve hatta yukarı yönlü hareket etmelerini sağlayabiliyordu^{6,7,14}. Dolayısıyla havada asılı kalan bir yağ damlacığına iki temel kuvvet etki ediyordu.



Yukarı yönde elektostatik kuvvet (F_e) ve aşağı yönde yerçekimi kuvveti (F_y) yağ damlacığına etki ediyordu¹⁹. Millikan, havada asılı kalan bir yağ damlacığında, bu iki kuvvetin mutlak değerlerinin birbirine eşit olması gerektiğini düşündü.

$$F_e = F_y$$

$$q \times E = m \times g$$

$$q = m \times g / E$$

Damlacıkları asılı tutan elektriksel alan değerini (E) ve yerçekimi ivmesini (g) biliyordu. Yağ damlacığına mikroskoptan bakarak yarıçap değerini belirledi. Yağ damlacığının şeklini küresel kabul ederek hacmini hesapladı ($V = 4/3 \pi r^3$). Yağın yoğunluğu bilindiğinden, kütlelerini $d = m/V$ bağıntısından faydalanarak hesapladı. Son

işlem olarak yukarıdaki bağıntıdan faydalanarak her bir yağ damlasının yükünü (q) hesaplayabildi. (Not: Millikan hesaplamalarında yukarı yönlü havanın kaldırma kuvvetini de dikkate almıştır)

Müge: Bir damlacığın yükü bir elektronun yüküne eşit olmalı, diye mi düşündü?

Bilge: Hayır. Gerçekte her damlacığın kaç tane elektron yakaladığını Millikan bilmiyordu¹⁴.

Müge: Mikroskoptan bir yağ damlacığının kaç tane elektron yakaladığını göremedi mi?

Bilge: Elektron kadar küçük tanecikler mikroskop ile görülemezler. Bu nedenle Millikan her bir yağ damlacığının kaç tane elektron yakalamış olduğunu bilemezdi¹⁵. Bazı yağ damlacıkları sadece birkaç tane, bazıları ise çok daha fazla sayıda elektron yakalamış olabildi.

Müge: O zaman bir elektronun yükünü nasıl bulabildi?

Bilge: Yağ damlacıklarının sahip olduğu yükleri incelediğinde belirli bir değer ($-1,60 \times 10^{-19}$) tam sayılı katları olduğunu fark etti^{7,15}. Dolayısıyla elektronun, bu en küçük yük değerine sahip olması gerektiğini düşündü¹⁹.

Müge: Fakat bir tane elektronun yükü -1 'dir. Yanılıyor muyum?

Bilge: -1 yükü, protonun yüküne ($+1$) göre 1 elektronun bağlı yüküdür. Bir hidrojen iyonu (proton) ile bir elektron birbirini nötrleyebildiği için, hidrojen iyonunun bağlı yükü ($+1$) ile elektronun bağlı yükü (-1) aynı büyüklükte fakat zıt işaretlidir. 1 tane elektronun yükü ise $-1,60 \times 10^{-19}$ Coulomb (C)'a eşittir⁷.

Müge: O zaman 1 tane hidrojen iyonunun (proton) yükü de $+1,60 \times 10^{-19}$ C'a eşittir.

Bilge: Evet. Haklısın.

Müge: Elektronun kütlesini nasıl hesaplamış?

Bilge: Thomson hatırlarsan e/m (elektronun yükü/kütlesi) değerini hesaplamıştı.

Müge: Evet, hatırladım. e/m değeri $-1,76 \times 10^8 \text{ C/g}$ 'dı.

Bilge: Millikan, Thomson'ın bulmuş olduğu bu değerden faydalanarak elektronun kütlesini (m) hesapladı^{7,6}. Elektronun yükünü artık biliyordu.

$$\begin{aligned} e/m &= -1,76 \times 10^8 \text{ C/g} \\ m &= e / -1,76 \times 10^8 \text{ C/g} \\ &= -1,60 \times 10^{-19} \text{ C} / -1,76 \times 10^8 \text{ C/g} \\ &= 9,10 \times 10^{-28} \text{ g ya da} \\ &= 9,10 \times 10^{-31} \text{ kg} \end{aligned}$$

Müge: Elektron çok küçük bir kütleyle sahipmiş.

Bilge: Bu nedenle atomun kütle hesabında elektronun kütlesi ihmal edilmektedir.

Müge: Peki atomun ortasında çekirdek olduğunu nasıl oluyor da biliyoruz?

Bilge: Elektronun keşfinden kısa bir süre sonra çekirdek keşfedildi. 1911 yılında Ernest Rutherford (1871-1937), altından yapılmış bir levhayı kullanarak atomun yapısını anlamaya çalıştı^{3,5,6}.

Müge: Neden altın kullanmış?

Bilge: Altın yumuşak bir metaldir ve dövülerek inceltilmeye çok uygundur. Diğer metallerden demiri döverek inceltebilirsin fakat demir sert bir yapıya sahip olduğundan çok fazla inceltildiğinde kolaylıkla kırılabilir.

Müge: Deneyi nasıl yapmış?

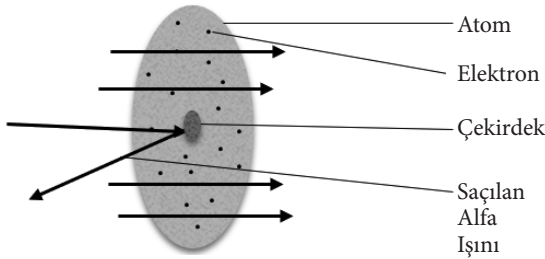
Bilge: İnceltilmiş yaklaşık 10^{-9} m (1 nm) kalınlığında bir altın levha üzerine radyoaktif bir elementten yayılan alfa ışınlarını yollamış¹.

Müge: Alfa ışını bir çeşit elektromanyetik dalga mı?

Bilge: Hayır. Elektromanyetik dalgalardan farklı olarak kütleyle sahiptir. Alfa ışınları helyum atomu çekirdeğine eşdeğer parçacıklardan oluşur. Yaklaşık olarak hidrojen elementinin 4 katı kütleyle sahip pozitif yüklü (+2) tanecikler olarak onları hayal edebilirsin¹⁶. Radium elementi alfa ışınlarına kaynaklık eder¹⁶. Bir başka ifade ile sürekli olarak bu ışınları etrafına yayar. Rutherford, Radium elementinden yayılan bu ışınların altın levhaya çarptığında ne olacağını merak etmiş. Thomson'un atom modeline göre atomun yapısında hafif kütleli elektronlar bulunuyordu. Bir alfa parçacığının kütlesi, elektronun kütlesinin yaklaşık 7300 katıdır⁵. Bu nedenle Rutherford, ışınların atom içerisinde hiçbir engelle karşılaşmadan rahatlıkla karşıya geçecekleri beklentisi içindeymiş.

Müge: Ben öyle düşünmüyorum. Thomson modeline göre kütle ve pozitif yük tüm atomu kaplıyor. Bu nedenle bana göre alfa parçacıklarının hiçbiri karşıya geçemez. Levhanın ön kısmında birikir. Peki ne olmuş?

Bilge: Alfa parçacıklarının çok büyük bir kısmının doğrudan levhayı geçerek karşıya ulaştığını, az bir kısmının ise saptığını gözlemiş.



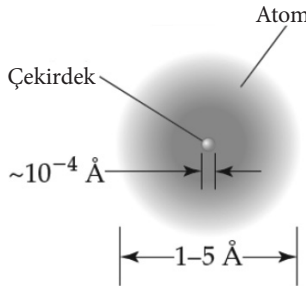
Bu beklenmedik gözlem Rutherford'ü oldukça şaşırtmış⁵. *Atom içerisinde alfa parçacıklarımı yolundan saptıracak ne olabilir ki?* Diye düşünmüş.

Müge: Evet. O, hepsinin karşıya geçeceği beklentisi içindeymiş. Ben ise tersini düşünmüştüm. Yanılmışım. Peki bu gözlem ne anlama geliyor?

Bilge: Alfa parçacıklarının çok büyük bir kısmının hiçbir engel- le karşılaşmadan doğrudan karşıya geçmesi, altın atomunun ve as- lında tüm atomların büyük bir kısmının boşluktan oluştuğunu ve bu boşlukta elektronların bulunabileceğini gösteriyordu^{3,6}. Rutherford'a göre alfa parçacıklarının saçılması ise atomun merkezinde küçük bir bölgede bulunan pozitif yüklü bir kütleyi işaret ediyordu¹⁶. Ancak büyük ve pozitif yüklü bir kütle alfa parçacıklarını bu denli yolundan saptırabilirdi. Ona göre atomun merkezinde küçük bir bölgede ato- mun kütesinin çoğunluğunu oluşturan pozitif yüklü bir çekirdek ve bu çekirdek etrafında uzaklarda dönen elektronlar bulunmaktaydı⁵. Bu tıpkı gezegenlerin güneş etrafında dönmesi gibiydi. Atom nötr olduğundan çekirdeğin yükü pozitif ve elektronların toplam yüküne eşit olmalıydı¹⁶.

Müge: Oldukça mantıklı.

Bilge: Fakat bu açıklama o dönemde hemen kabul görmemiş. Fakat günümüzde atomun merkezinde çekirdek olduğu kabul edil- mektedir. Rutherford ayrıca altın atomunun çekirdeği ile atomun tamamını çapları bakımından karşılaştırmış. Çekirdeğin çapının, atomunkinden yaklaşık 10 000 kat daha küçük olduğunu hesapla- mış¹⁶. Atom ve çekirdeğin boyutları aşağıdaki şekilde düşünülebilir³. Günümüzde yapılan hesaplamalara göre ortalama bir atomun çapı yaklaşık 10^{-10} metre ve çekirdeğin çapı ise 10^{-14} m'dir⁶. (Not: $1 \text{ \AA} = 10^{-10} \text{ m}$)



Müge: Bunu nasıl yapmış?

Bilge: Saçılan alfa parçacığı (Levhayı geçemeyenlerin) sayısını, toplam alfa parçacık sayısına oranlayarak bulmuş. Bu oranın büyüklük bakımından atomun çekirdeği ile atomun bütünü arasındaki oranı vereceğini düşünmüş.

Müge: Oldukça akıllıca.

Bilge: Bununla birlikte, 1919 yılında Rutherford çekirdekte bulunan pozitif yüklü protonları ve 1932 yılında James Chadwick nötronları keşfetmiş³. Böylece atomun yapısında proton, nötron ve elektron olduğunu öğrenmiş olduk.

Müge: Zıt yüklerin birbirini çektiği bilimsel bir kanundur. O zaman negatif yüklü elektronlar, pozitif yüklü çekirdeğe neden yapışmıyor?

Bilge: Evet yapışması gerekiyor. Klasik fizikte Coulomb kanununa göre yüklü iki tanecik arasında bir itme ya da çekme kuvveti oluşur ve bu kuvvet aşağıdaki bağıntıyla hesaplanır⁴.

$$F_E = kq_1q_2/r^2$$

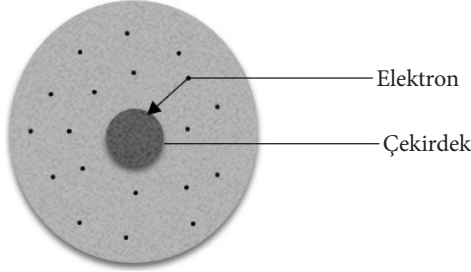
Bu bağıntıya göre yüklü iki tanecik arasındaki çekim kuvveti (F_E), taneciklerin yükleri (q_1 ve q_2) ile doğru, aralarındaki uzaklığın (r) karesi ile ters orantılıdır. Dolayısıyla klasik fiziğe göre örneğin hidrojen atomunda bulunan pozitif yüklü proton ile negatif yüklü elektron arasında bir çekim kuvveti oluşur.

Eğer iki tanecik arasındaki uzaklık sonsuz olursa ($r \longrightarrow \infty$); Çekme kuvveti sıfıra yaklaşır ($F \longrightarrow 0$)

Eğer iki tanecik arasındaki uzaklık sıfıra yaklaşırsa ($r \longrightarrow 0$); Çekme kuvveti sonsuz olur ($F \longrightarrow \infty$)

Klasik fiziğe göre pozitif yüklü çekirdek ile negatif yüklü elektron atom içerisinde birbirine çok yakın olduğundan yüksek bir çekim kuvveti ile birbirlerini çekmeleri gerekir ve iki tanecik arasında kaçınılmaz bir çarpışma meydana gelecektir. Bir başka ifade ile atom

içerisinde aralarında hiçbir engel bulunmayan bu iki zıt yüklü taneciğin (çekirdek ve elektronun) çarpışması Coulomb kanununa göre kaçınılmazdır. Klasik fiziği göre sonsuza yaklaşan çekim kuvveti büyük bir ivmelenmeye sebep olacak ve iki taneciğin bu kısa mesafede çarpışması aşağıdaki şekilde olduğu gibi nanosaniye içerisinde gerçekleşecekti¹. Bu durum tüm atomlar için geçerliydi.



Müge: Gerçekte böyle bir çarpışma oluyor mu?

Bilge: Hayır. Klasik fiziğin bu öngörüsü gerçekleşmemektedir. Öyle olsaydı dünyamız nötr çekirdeklerden ibaret olurdu²⁴. Atomdan ya da kimyasal tepkimelerden söz edilemezdi²⁴. Atom içerisinde elektronlar çekirdekten daima belirli uzaklıklarda bulunurlar ve her element için bu uzaklıklar farklılık gösterir.

Müge: Nasıl oluyor da elektronlar çekirdek üzerine düşmüyor?

Bilge: Bu sorunun yanıtını kuantum fiziği verdi.

Müge: Kuantum da ne demek?

Bilge: Kuantum kelimesi elektromanyetik dalgalar üzerinde yapılan araştırmalar sırasında ortaya çıktı. Elektromanyetik dalgalar bir çeşit enerji yayılmasıdır. Güneşten yayılan elektromanyetik dalgalar (Gama, X ışınları, Morötesi ışık, Görünür ışık, Kızılötesi ışık, Mikrodalgalar, Radyo dalgaları) bize kadar ulaşır. Kızıl ötesi dalgalar bizi ısıtır; görünür dalgalar etrafımızı aydınlatır ve mikro dalgalar yemeklerimizi ısıtır. Bu dalgalar elektriksel ve manyetik alandan etkilenmezler. Kütesizdirler. Bu ışımalara dalga denilmesinin nedeni ise yayılma prensiplerinin su dalgalarına benzemesidir. Su

dalgalarından farklı olarak hepsinin yayılma hızı aynı olup $2,9979 \times 10^8$ m/s'dir⁵. Fakat sahip oldukları enerji birbirinden farklıdır. Gama ışınları en yüksek enerjiye sahipken Radyo dalgaları en düşük enerjilidir. Yapılan deneysel çalışmalarda bu ışımaların oldukça ilginç davranışlara sahip oldukları görüldü. Bu ışımalar çarpıştıklarında birbirlerini yok ederek karanlık bölgeler oluşturmakta ya da birbirlerini destekleyerek parlaklıklarını arttırmaktaydılar. Bu tıpkı su dalgalarının karşılaştıklarında birbirlerini yok etmesi ya da destekleyerek daha yüksek dalgalara sahip olmalarına benziyordu²⁴.

Müge: Su dalgaları mı?

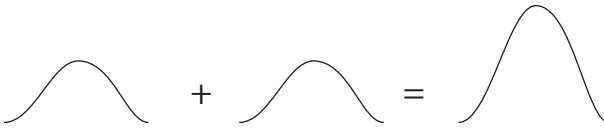
Bilge: (İçerisinde bir miktar su bulunan bir kabı Müge'ye uzatır) Bu kaptaki suya bir damla su damlatıp bana gözlemini anlatır mısın?

Müge: Giderek genişleyen dairesel bir dalga görüyorum.

Bilge: Bu bir dalgalanma örneğidir²⁴. Şimdi de bir tahta parçasını su üzerine bırakıp yakınına yine bir damla su damlatıp bana yine gözlemini anlatır mısın?

Müge: Tahta parçasının yukarı aşağı hareket ettiğini fakat yerinin değişmediğini görüyorum.

Bilge: Dolayısıyla su sadece aşağı-yukarı hareket etmesine rağmen dalga, damlanın düştüğü noktadan dışa doğru hareket eder²⁴. Su dalgasında iki tepe karşılaştığında su iki kat yükselir. İki çukur karşılaştığında ise su iki kat alçalır. Bir tepe ile bir çukur aşağıdaki gibi karşılaştığında ise hem alçalma ve hem de yükselme gözlenir. Fakat su seviyesi değişmez²⁴. Bu durum elektromanyetik dalgalar için de geçerlidir ve aşağıdaki gibi olur.



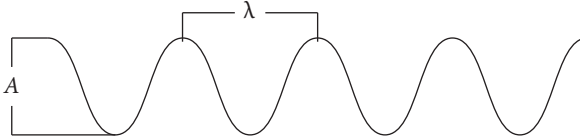
Yukarıdaki gibi *aynı fazda* iki elektromanyetik dalga (iki dalga tepesi) karşılaştığında dalgalar birbirini destekler ve **aydınlık** bir bölge oluşur¹². Buna **yapıcı girişim** denir²⁴.



Yukarıdaki gibi *ters fazda* iki elektromanyetik dalga (bir dalga tepesi ile bir çukuru) karşılaştığında dalgalar birbirini yok eder ve **karanlık** bir bölge oluşur¹². Buna **yıkıcı girişim** denir²⁴.

Müge: İki ışık karşılaştığında karanlık oluşuyor. Bunu mu demek istiyorsun?

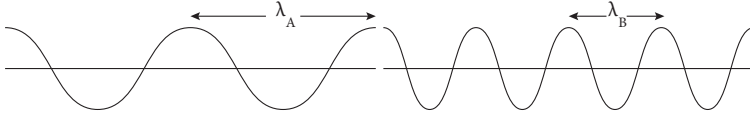
Bilge: Evet. Hiç kimsenin henüz göremediği bu ışımalar bu tuhaf davranışları nedeniyle dalga şeklinde resmedildiler. Elektromanyetik dalgaların bilim insanlarının zihnindeki imajı aşağıdaki gibiydi.



İki tepe noktası ya da iki çukur arasındaki uzaklık dalga boyunu (λ) ve dalganın yüksekliği ise genliğini (A) modellemektedir. 1 saniyede belirli bir noktadan geçen dalga sayısına ise frekans (ν) adı verilmektedir. Işımanın hızı, dalga boyu ile frekans değerlerinin çarpımına eşittir.

$$c = \lambda \nu$$

Elektromanyetik dalgaların hızı ($2,9979 \times 10^8$ m/s) değişmediğinden dalganın frekansı artıkça dalga boyu küçülür. Dolayısıyla iki büyüklük arasında ters bir orantı vardır. Yüksek frekanslı ışımalar kısa dalga boyu ile gösterilirler. Örneğin sarı ışık, kırmızı ışığa göre daha büyük bir frekansa sahiptir. Bu nedenle kırmızı ışığın dalga boyu (λ_A), sarı ışığın dalga boyundan (λ_B) daha büyüktür ($\lambda_A > \lambda_B$). Bilim insanları bu iki ışığı aşağıdaki gibi modellemektedir⁷.



Kırmızı ışığın bilim insanlarının zihnindeki imajı

Sarı ışığın bilim insanlarının zihnindeki imajı

Frekans büyüdükçe ışımının enerjisi artar. Sarı ışığın frekansı (ν_s) kırmızı ışığın frekansından (ν_k) büyüktür ($\nu_s > \nu_k$) ve enerjisi daha fazladır. Örneğin havai fişeklerde bulunan Stronsiyum tuzları ($\text{Sr}(\text{NO}_3)_2$ ve SrCO_3) yüksek sıcaklıkta çevreye 650 nm dalga boyunda kırmızı ışık yayarlar¹³. Bu ışığın frekansını hesaplayalım.

$$c = \lambda \nu$$

$$\nu = c / \lambda$$

$$= 2,9979 \times 10^8 \text{ m s}^{-1} / 650 \times 10^{-9} \text{ m}$$

$$= 4,61 \times 10^{14} \text{ s}^{-1}$$

Sodyum klorür (NaCl) tuz çözeltisine daldırılan platin bir tel, alev üzerinde ısıtıldığında 580 nm dalga boyunda parlak sarı ışık yayar. Bu ışığın frekansını hesaplayalım.

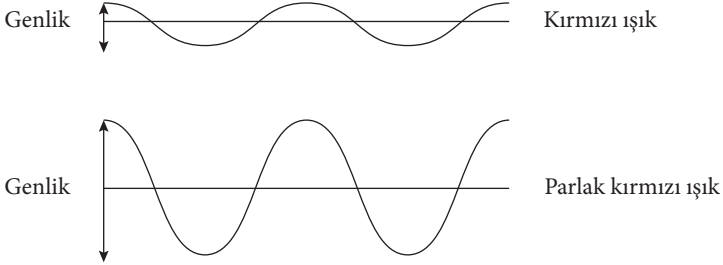
$$\nu = c / \lambda$$

$$= 2,9979 \times 10^8 \text{ m s}^{-1} / 580 \times 10^{-9} \text{ m}$$

$$= 5,17 \times 10^{14} \text{ s}^{-1}$$

Dolayısıyla sarı ışığın frekansı ($5,17 \times 10^{14} \text{ s}^{-1}$), kırmızı ışığın frekansından ($4,61 \times 10^{14} \text{ s}^{-1}$) daha büyüktür. Farklı dalga boyları farklı frekansları gösterirken dalganın genliği, ışımının miktarını ya da parlaklık düzeyini gösterir. Elektromanyetik ışımaların miktarı artırıldığında parlaklığı artar. Örneğin bir fener yardımıyla aydınlatığımız bir bölgeyi ikinci bir fener ile aydınlatsak aydınlanan bölgenin parlaklığı artacaktır. Bu parlaklık artışı dalganın genliğini ya da yüksekliğini arttırarak resmedilir. Örneğin aşağıda kırmızı ışığın

az ve çok olduğu durumlarda bilim insanlarının resmettikleri farklı genlikteki dalgalar görülmektedir⁷.



Dalga modeli elektromanyetik ışınlarla yapılan birçok deneyi başarılı bir şekilde açıklıyordu. 1800'lerin sonunda bilim insanlarının enerji ve madde hakkındaki görüşleri gayet netti⁵:

Madde ve enerji birbirinden ayrıdır^{5,14}. Madde taneciklerden oluşmaktadır. Enerji ise bir çeşit elektromanyetik ışımadır ve kesintisiz/sürekli yayılan bir dalgadır. Maddeye ait taneciklerin bir kütlesi ve belirli bir konumu varken elektromanyetik dalgaların bir kütlesi ya da belirli bir noktasal konumları yoktur.

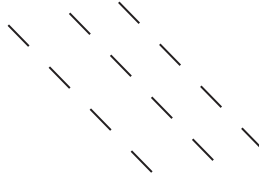
Müge: Bu söylenenlere ben de katılıyorum.

Bilge: Klasik fiziğin bu bakış açısı ışığın bir prizmada kırılmasını ve gezegenlerin hareketlerini başarılı bir şekilde açıklıyordu⁵. Fakat 1900'lerin başında yapılan bir dizi deney bilim insanlarını hayrete düşürdü ve bu bakış açısının doğru olmadığını gösterdi⁵. O dönemde bir ışımanın enerjisinin, genliği/parlaklığı ile doğru orantılı olduğu düşünülüyordu. Işımanın parlaklığı arttıkça enerjisi de artar düşüncesi vardı. 1901 yılında Alman fizikçi Max Planck (1858-1947) içi boş ve siyah renkli bir metal küreyi ısıttı. Kürenin bir noktasında ise bir delik bıraktı. Planck, nesnenin sıcaklığı ile nesneden yayılan elektromanyetik ışınların enerji değerleri arasındaki ilişkiyi bulmayı amaçlıyordu. Bir nesnenin sıcaklığı çevresinden büyük-

se çevresine elektromanyetik dalgalar yayar. Küre belirli bir sıcaklık değerindeyken küredeki delikten yayılan elektromanyetik ışımaların enerji değerlerini ölçtü. Bu değerler beklediği gibi sıcaklık artışıyla doğru orantılı olarak artıyordu. Fakat onu şaşırtan bir şey oldu. Değer artışı sürekli olmayıp $6,626 \times 10^{-34}$ (Planck sabiti) sayısının katlarıydı^{5,16,24}. Arada bir değere rastlamıyordu¹⁶. Ayrıca ışımaların enerji artışı genliği yerine frekansına bağlıydı. Kürenin siyah duvarlarından yayılan enerji (ΔE), Planck sabiti ile ışımaların frekansının çarpımının ($h\nu$) tam sayılı katları ($n = 1, 2, 3, \dots$) şeklindeydi^{5,6,10,16}. Bu enerji değerine **kuantum** adını verdi⁶. Bununla birlikte ışımaların enerjisi, genliği/parlaklığı yerine frekansına bağlıydı. Artan sıcaklıkla birlikte yayılan ışımaların frekansı da artıyordu. Böylelikle enerjiye yeni bir bakış açısı geldi.

$$\Delta E = n h \nu$$

Enerji $1h\nu$, $2h\nu$, $3h\nu$ vb. şeklinde ve ışımaların frekansına bağlı olarak artıyordu³. Işımların enerjisi bu değerler arasında bir değer almıyordu. Her türlü enerji değerini elde etmek mümkündür düşüncesinin artık doğru olmadığı böylelikle anlaşıldı. Bu tıpkı bir pilyoda ancak belirli notaların ya da seslerin çalınabileceğine benziyordu⁷. Bu bulgu, klasik fiziğin enerjinin kesintisiz olduğu iddiasını yanlışlamış ve onun parçacıklı bir yapıda olduğunu ya da kuantalar halinde yayıldığını göstermişti. Isınan bir nesnenin yaydığı enerji kuantalar halinde artıyordu. Kuantum terimi böylelikle ilk defa kullanıldı. 1905 yılında Albert Einstein (1879-1955) bu iddiayı biraz daha ileri götürdü ve elektromanyetik ışımaların kendisinin de kuantalar/parçacıklar şeklinde yayıldığını iddia etti⁵. Ona göre elektromanyetik ışımalar, hızla akan enerji paketlerinden (fotonlardan) oluşuyordu. Bir başka ifade ile elektromanyetik ışımalar bir foton yağmuru gibiydi. Aşağıda, Einstein'ın elektromanyetik dalgalar ile ilgili zihnindeki imajı görülmektedir.



Müge: Hangi deneye dayanarak bunu iddia etti?

Bilge: Fotoelektrik deneyi¹⁰. Bu deney sonunda yaptığı çıkarım-
dan dolayı 1921 yılında Einstein, Nobel Ödülü kazandı⁵. 1900'lerin
başlarında elektromanyetik dalgalarla yapılan deneylerde elektrik
akımı elde edildi. Metal bir levha üzerine yüksek enerjili morötesi
ışınlar gönderildiğinde, elektronlar metal yüzeyden saçılıyordu ve
saçılan bu elektronlar yakında bulunan pozitif bir metal çubuk üye-
rinde bir elektrik akımına neden oluyordu. Bu ilginç deneyi Einstein
1905 yılında tekrarladı ve aşağıda belirtilen durumları gözlemledi^{5,10}:

1. Düşük enerjili (Eşik enerjisinden daha düşük enerjili) ışın-
lar bir elektrik akımına neden olmuyordu.
2. Düşük enerjili (Eşik enerjisinden daha düşük enerjili)
ışınların genliği/miktarı/parlaklığı arttırıldığında yine bir
elektrik akımı oluşmuyordu.
3. Yüksek enerjili (Eşik enerjisinden daha yüksek enerjili)
ışınlar elektronların saçılmasına ve elektrik akımına neden
oluyordu.
4. Yüksek enerjili (Eşik enerjisinden daha yüksek enerjili)
ışının frekansı arttırıldığında elektron sayısı değişmeyip
elektronların kinetik enerjisi artıyordu.
5. Yüksek enerjili (Eşik enerjisinden daha yüksek enerjili) ışı-
nın genliği/miktarı/parlaklığı arttırıldığında saçılan elekt-
ron sayısı da artıyordu.

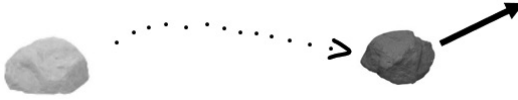
Müge: Bu ne anlama geliyor?

Bilge: Einstein bu gözlemi şu şekilde yorumladı⁵. Klasik fizi-
ğe göre elektromanyetik dalgaların enerjisi genellikle ya da dalgaların

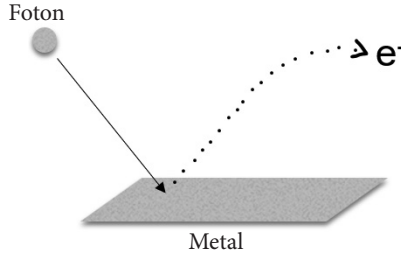
parlaklığı ile doğru orantılıydı⁷. Işımanın parlaklığı arttıkça enerjisinin de aynı oranda arttığı düşünülüyordu. Fakat fotoelektrik deneyi *dalga* modeli ile açıklanamazdı^{8,10}. Eğer ışımalar dalga şeklinde yayılmış olsaydı, düşük enerjili ışınları soğuran elektronların belirli bir süre sonra yerinden oynaması gerekirdi^{7,10}. Fakat deneyde düşük enerjili ışınların parlaklığı artsa bile bir elektrik akımına neden olmadıkları görülmüyordu. Einstein, ışımaların enerjisinin (E), ışımının genliğine (A) bağlı olmayıp frekansına (v) bağlı olduğunu iddia etti.

$$E_{\text{ışınma}} \propto v$$

Deneyde yüksek enerjili ışımının fotonu, elektrona çarparak onu yerinden söküyordu. Einstein'a göre bu ışımalar bu nedenle *enerji paketleri (foton)* şeklinde yayılmalıydı. Tanecikli yapıda ve bir momentuma sahip olmalıydılar. Metal içerisinde bulunan elektronların, metal atomlarının çekim etkisinden kurtularak saçılmasının nedeni de buydu. Bu olay, bir taşı başka bir taşa doğru fırlattığımızda diğer taşı yerinden oynatmasına benziyordu.



Bu tanecikler, klasik, kütleyle sahip tanecikler olmayıp kuantum tanecikleriydi²³. Bir başka ifade ile elektromanyetik dalgalar enerji paketlerinden (fotonlardan)¹² oluşmalıydı. Elektromanyetik dalgalar bir metal üzerine gönderildiğinde, her bir foton metal içerisindeki bir elektrona çarpar ve enerjisini ona aktarır. Eğer fotonun enerjisi yeterince yüksek ise elektron metal atomlarının çekim etkisinden kurtulur ve bir saçılıma uğrar.



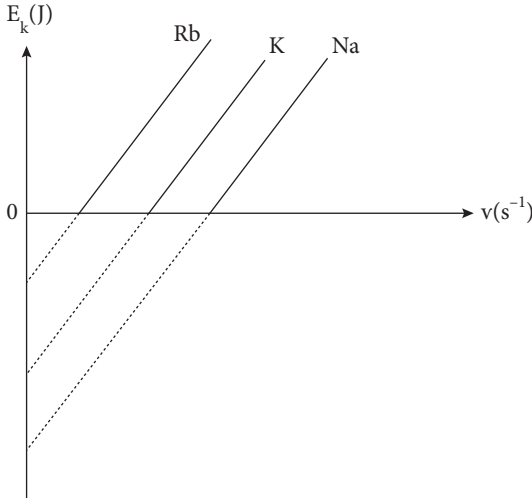
Eğer foton enerjisi düşükse bu durumda elektron metal içerisinde kalır. Işımanın miktarını ya da parlaklığını arttırmak bu durumu değiştirmez. Çünkü ışınım miktarını arttırmak foton sayısını artırırken enerjisini değiştirmez. Dolayısıyla fotonların enerjisi değişmediğinden, elektronların metalden sökülmesini sağlayacak yeterli enerji elektrona aktarılamaz. Buna karşın yüksek enerjili elektromanyetik ışınımın enerjisi artırıldığında, her bir fotonun da enerjisi artar. Böyle bir durumda saçılan elektronların kinetik enerjisi artarken sayıları değişmez. Eğer yüksek enerjili ışının miktarı/ parlaklığı artırılırsa, her bir fotonun enerjisi değişmezken foton sayısı artar. Böyle bir durumda saçılan elektronların kinetik enerjisi değişmezken daha fazla sayıda elektron metalden sökülerek saçılıma uğrar. Bir elektronu metalden sökecek minimum enerji miktarına **Eşik enerjisi** (ϕ) ya da elektronun metale **bağlanma enerjisi**¹² adı verilir. Metale gönderilen ışınımın enerjisi (E_{foton}) ya da foton enerjisi, eşik enerjisi (ϕ) ile saçılan elektronun kinetik enerjisi (E_k) toplamına eşittir¹².

$$E_f = \phi + E_k$$

Einstein, bu eşitlikten faydalanarak metalden saçılan elektronun kinetik enerjisi (E_k) ile metale gönderilen fotonun enerjisi (E_f) arasında aşağıdaki bağıntıyı elde etti:

$$E_k = E_f - \phi$$

Einstein, bazı metallere ait elektronun kinetik enerjisi (E_k) ile ışınımın frekansı (ν) arasında aşağıdakine benzer bir grafik elde etti.



Bilge: Rubidyum (Rb), Potasyum (K) ve Sodyum (Na) elementlerine ait yukarıdaki grafiği lütfen yorumlar mısınız?

Müge: Grafiğe göre saçılan elektronun kinetik enerjisi ile ışımamanın frekansı arasında doğrusal bir ilişki var. Her üç metalde de ışımamanın frekansı arttıkça saçılan elektronun kinetik enerjisi artıyor. Kinetik enerjideki artış her üç metalde de aynı görünüyor. Bu bana ilginç geldi.

Bilge: Bu doğruların denklemlerini matematiksel olarak nasıl gösterebiliriz?

Müge: Genel doğru denklemi $y = mx + n$ şeklindedir. Grafikte dikey eksen (y) elektronun kinetik enerji değerini, yatay eksen (x) ise gelen ışımamanın frekansını göstermektedir. Dikey eksen kesme noktası olan n ise eşik enerjisini gösterir. Dolayısıyla denklemi aşağıdaki gibi tekrar yazabiliriz.

$$E_k = m \nu - \phi$$

Bu grafikteki doğrunun eğimi m değerini verecektir.

$$m = \tan \alpha = \Delta y / \Delta x = \Delta E_k / \Delta \nu$$

Bilge: Einstein eğimi (m) hesapladığında tanıdık ve bir o kadar da şaşırtıcı bir sayıyla karşılaştı. Bu sayı $6,626 \times 10^{-34}$ sayıydı. Bu Planck sabitiydi. Dolayısıyla bir ışımının enerjisi (foton enerjisi) Planck sabiti ile ışımının frekansının çarpımına eşitti. Böylece elektromanyetik ışımaların enerji değerini veren aşağıdaki bağıntıyı elde etti.

$$E_{\text{foton}} = h \nu$$

Klasik fizikte elektromanyetik ışımaların dalga şeklinde yayıldığı ve enerjilerinin genlikleri/parlaklıkları ile doğru orantılı olduğu düşünülüyordu. Fakat Einstein, ışımaların fotonlar şeklinde yayıldığını ve her bir fotonun enerjisinin frekansına bağlı olduğunu ve $6,626 \times 10^{-34}$ sayısının katı olduğunu deneysel verilerle gösterdi. Işımanın genliği ise foton sayısı ile ilişkiliydi. Genlik arttıkça yayılan foton sayısı da artıyordu.

Müge: Grafikte belirli bir frekanstaki ışıma, elektronu metalden sökebiliyor ve ona hareket kazandırabiliyor.

Bilge: Hangi nokta?

Müge: Kinetik enerjinin sıfır olduğu nokta.

Bilge: Evet. Biz bu frekans değerine **eşik frekansı** (ν_0), enerji değerine ise **eşik enerjisi** (ϕ) adı veriyoruz. Dolayısıyla bir metalden bir elektron koparmak için gereken en az enerjiyi aşağıdaki bağıntı ile hesaplıyoruz.

$$\phi = h \nu_0$$

Bilge: Grafiğe göre Rb, K ve Na metallerinin eşik enerjilerini büyükten küçüğe doğru sıralayabilir misin?

Müge: Elbette. Sodyum metalinden 1 elektron koparmak için gereken ışımının enerjisi en büyüktür. Rubidyum metalinden 1 elektron koparmak için gereken ışımının enerjisi ise en küçüktür. Dolayısıyla aşağıdaki gibi bir sıralama olur.

$$\phi_{\text{Na}} > \phi_{\text{K}} > \phi_{\text{Rb}}$$

Müge: Sodyum metali, elektronlarını diğerlerine göre daha sıkıca tutuyor diyebilir miyim?

Bilge: Evet. Bunu söyleyebilirsin. Örneğin¹ çinko metalinden bir elektron koparmak için gereken minimum enerji $6,9 \times 10^{-19}$ J dür. Bu metalin üzerine dalga boyu 700 nm olan kırmızı ışık gönderdiğimizizi farz edelim. Sence bu ışık, bu metalden elektron sökebilir mi?

Müge: Bilemiyorum. Sanırım bu durumda bir hesaplama yapmamız gerekir. Gereken minimum enerji aslında eşik enerjisidir. Dolayısıyla $\phi = 6,9 \times 10^{-19}$ J dür.

Bilge: Sence kırmızı ışığın foton enerjisini nasıl bulabiliriz.

Müge: Bir fotonun enerjisi, Planck sabiti ile ışımının frekansı çarpımına eşitti ($E_f = h \nu$). Frekans ile dalga boyunun çarpımı ise ışık hızını veriyordu ($c = \nu \lambda$). Bu iki bağıntıdan faydalanarak foton enerjisini aşağıdaki bağıntı ile hesaplayabiliriz^{1,5,6}:

$$E_f = h \nu$$

$$E_f = h c / \lambda$$

$$\begin{aligned} \text{Kırmızı ışığın Foton enerjisi} &= 6,626 \times 10^{-34} \text{Js} \times 2,998 \times 10^8 \text{ms}^{-1} / 700 \times 10^{-9} \text{m} \\ &= 2,84 \times 10^{-19} \text{ J değerini buluruz.} \end{aligned}$$

Bir başka ifade ile kırmızı ışığın *bir tane fotonunun* enerjisi yaklaşık bu değere sahiptir.

Bilge: Sence kırmızı ışık çinkodan elektron koparabilir mi?

Müge: Fotonun enerjisi (E_f), eşik enerjisinden (ϕ) daha küçük bir değere sahip ($2,84 \times 10^{-19} \text{ J} < 6,9 \times 10^{-19} \text{ J}$) olduğundan kırmızı ışık **çinko** metalinden elektron koparamaz.

Bilge: Evet haklısın. Yapılan deneylerde kırmızı ışığın çinko metalinden elektron koparamadığı görülmüştür. Peki bu metalin üzerine dalga boyu 254 nm olan morötesi bir elektromanyetik dalga gönderirsek ne olur?

Müge: Benzer bir hesaplama yapalım¹:

$$E_f = h c / \lambda$$

$$\begin{aligned} \text{Morötesi ışığın Foton enerjisi} &= 6,626 \times 10^{-34} \text{ Js} \times 2,998 \times 10^8 \text{ ms}^{-1} / 254 \times 10^{-9} \text{ m} \\ &= 7,82 \times 10^{-19} \text{ J} \text{ değerini buluruz.} \end{aligned}$$

Bir başka ifade ile morötesi ışığın bir tane fotonunun enerjisi yaklaşık bu değere sahiptir.

Bilge: Sence bu ışıma çinkodan elektron koparabilir mi?

Müge: Foton enerjisi (E_f), eşik enerjisinden (ϕ) daha büyük bir değere sahip ($7,82 \times 10^{-19} \text{ J} > 6,9 \times 10^{-19} \text{ J}$) olduğundan morötesi ışık, çinko metalinden elektron koparabilir.

Bilge: Evet haklısın. Yapılan deneylerde morötesi ışığın elektronların saçılımına neden olduğu gözlenmiştir. Peki saçılan bir elektronun kinetik enerjisini hesaplayabilir misin?

Müge: Sanırım bunu yapabilirim. Az önce verdiğiniz bağıntı işime yarayabilir.

Bilge: Hangisi?

Müge: Sanırım şu bağıntı:

$$E_f = \phi + E_k$$

Bu bağıntıda metale çarpan elektromanyetik dalganın foton enerjisi (E_f), eşik enerjisi (ϕ) ile elektronun kinetik enerjisi (E_k) toplamına eşittir. Saçılan bir elektronun enerjisi, gelen ışımının foton enerjisinden eşik enerjisinin çıkarılması ile bulunabilir.

$$E_k = E_f - \phi$$

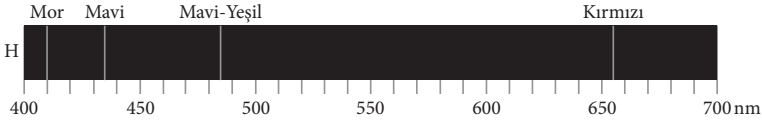
$$\begin{aligned} \text{Saçılan bir elektronun enerjisi} &= 7,82 \times 10^{-19} \text{ J} - 6,9 \times 10^{-19} \text{ J} \\ &= 9,2 \times 10^{-20} \text{ J} \text{ olur.} \end{aligned}$$

Bu değer bize kopan elektronun kinetik enerjisini verir.

Bilge: 1913 yılında Danimarkalı fizikçi Niels Bohr (1885-1962) da enerjinin parçacıklı olması ile ilgili benzer bir durumla karşılaştı¹⁶. Hidrojen atomu sadece belirli enerjileri soğurup yayıyordu.

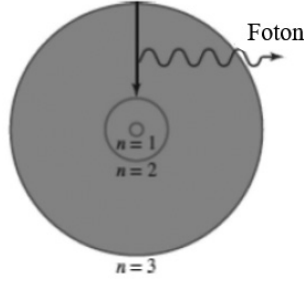
Müge: Nasıl? Anlayamadım.

Bilge: Biliyorsun ki güneşten yayılan elektromanyetik dalgalar (Gama, X ışınları, Morötesi ışık, Görünür ışık, Kızılötesi ışık, Mikrodalgalar, Radyo dalgaları) geniş bir bantta dünyamıza kadar ulaşır. Yağmurdan sonra ortaya çıkan gökkuşağı görünür ışıktaki birbirinden ayrılmış dalgaları gösterir³. Kırmızıdan mor renge kesintisiz tüm renkleri gösteren bu dalga bandına **sürekli spektrum** adı verilir³. 1800'lerin ortalarında içerisinde hidrojen gazı bulunan bir cam tüpün uçlarına yüksek voltaj uygulayarak elektrik akımı verdiğinde tüpün pembe-mor karışımı bir ışık yaydığı gözlemlendi³. Bu ışık bir prizmaya yönlendirdiğinde ise prizmanın karşısında her defasında dört renk bandının oluştuğu görüldü. Bu bantlar sırasıyla Mor (410nm), Mavi (434nm), Mavi-Yeşil (486nm) ve Kırmızı (656nm) renkleri^{3,6,16}. Bu sürekli olmayan dalga bantlarına **kesintili spektrum** adı verilir³. Deney tekrarladığında hep bu dört renk elde ediliyordu. (Not: Hidrojen atomu görünür bölgede olmayan kızılötesi ve morötesi ışınlar da yayıyor⁶)



Her bir renk (bant) bir enerji değerine sahipti. Hidrojen atomu belirli enerjileri soğurup belirli enerjileri (foton ya da renkleri) yayıyordu. (Not: Hidrojen atomu 1 tane proton ve 1 tane elektrona sahiptir). 1913 yılında Danimarkalı fizikçi Niels Bohr, bu durumu hidrojen atomu içerisindeki elektronun birtakım yörüngeler arasındaki seyahati ile açıklamaya çalıştı⁷. Ona göre elektron enerji aldığı anda, atom içerisinde yüksek enerjili bir yörüngeye sığıyordu. Fakat vardığı yörüngede uzun süre kalmadan alt yörüngelere geri dönüyordu. Bu dönüş sırasında elektron bir foton (elektromanyetik ışımaya) yayıyordu^{12,7}. Üst yörüngelerden 1. yörüngeye dönen elektron morötesi ışınlar, 2. yörüngeye dönen elektron görünür ışıklar ve 3. yörüngeye dönen elektron ise kızılötesi ışınlar yayıyordu. Aşağıda, hidrojen

atomundaki bir elektronun 3. Yörüngeden 2. Yörüngeye geçtiğinde çevresine yaydığı bir foton (kırmızı ışık) görülmektedir.



2. yörüngeye dönen elektron görünür bölgede 4 yer değiştirme yapıyor ve bu nedenle 4 bant veriyordu. Görünür bölgede bu bantlar dışında bir ışığa rastlanmıyordu. Örneğin elektron, 3. yörüngeden 2. yörüngeye geçerken kırmızı ışık (düşük enerjili ışık) yayıyordu. Mavi-yeşil ışık 4'ten 2'ye, Mavi ışık 5'ten 2'ye ve Mor ışık (yüksek enerjili ışık) 6'dan 2'ye geçiş sırasında yayılan ışıklardı⁶. Elektronun seyahat ettiği yörüngeler arası uzaklık ne kadar büyükse yayılan enerji de o derece büyük oluyordu. Yayılan her bir fotonun enerjisi geçiş yaptığı iki yörünge arasındaki enerji farkına eşitti⁷. Yayılan fotonların (renklerin) enerji değerleri daima belirli değerlerde oluyordu. Bu enerji değerleri (renk bantları) bir hidrojenden diğerine değişmiyordu. Dolayısıyla Bohr'a göre yörüngelerin atom içerisindeki yerleri de belirli olmalıydı. Bununla birlikte periyodik cetvelde bulunan diğer elementlerin de kendilerine özgü kesikli spektrum ya da renk bantları vardı¹². Her elementin kesikli spektrumu bir diğerinden farklıydı. Dolayısıyla her bir elementin yörüngeleri bir diğerinden farklı olmalıydı. Kimyacılar elementlerin nitel analizinde bu spektrumlarından faydalandılar. Bilinen elementlerin spektrum çizgileri ile bilinmeyen elementin çizgileri karşılaştırılarak bilinmeyen elementin kimliği teşhis edilmekteydi^{12,16}.

Müge: Bu tuhaf bir bulgu. Atom içerisinde böylesine gizemli elektron koridorları var mı?

Bilge: Böyle gizemli koridorlar elbette yok.

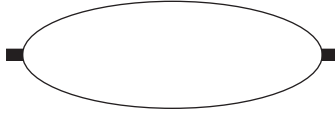
Müge: Peki nasıl oluyor da elektron çekirdeğe düşmüyor?

Bilge: Rutherford, hatırlarsan düşmemelerinin sebebini tıpkı gezegenlerde olduğu gibi elektronların çekirdek çevresinde hızla dönmesinden kaynaklandığını ifade etmişti. Benzer bir düşünceyle Bohr elektronların çekirdek çevresinde belirli yörüngelerde döndüğünü düşündü. Fakat klasik fizikçilere göre bu düşünce doğru olmaz. Çünkü çekirdek etrafında dönen bir elektron sürekli yön değiştirir ve dolayısıyla sürekli ivmelenir. İvmeli hareket eden yüklü cisimler ise çevresine ışına yayar (deneysel bilgi). Bu ışına, elektronun enerji kaybetmesine ve çekirdeğe sarmal bir hareketle düşmesine neden olur. Bu durumda elektronun çevresine sürekli bir spektrum vermesi gerekir¹⁴. Enerji kaybeden elektronun pozitif yüklü çekirdeğe düşmesi ise kaçınılmaz bir sondur^{5,10,16}. Fakat elektronların atom içerisinde kararlı oldukları, ışına yapmadıkları (sürekli bir spektrum vermedikleri) deneysel olarak biliniyordu. Dolayısıyla bu model klasik fizik kanunlarına ters düşüyordu. Elektronun atom içerisindeki bu davranışı bilim insanları tarafından açıklanamıyordu. Sonuç olarak *makro dünyayı başarılı bir şekilde açıklayan klasik fizik, mikro dünyayı (mikro taneciklerin davranışlarını) açıklamada yetersiz kalmıştı.*

Müge: Elektronun pozitif yüklü çekirdek üzerine düşmeden belirli mesafelerle böylesine çekirdekten uzaklaşıp yaklaşabilmesinin bir açıklaması yapılabildi mi?

Bilge: Evet. Yapıldı. 1924 yılında Louis de Broglie tuhaf bir iddiada bulundu. Eğer elektromanyetik dalgalar ya da enerji, tanecik gibi davranabiliyorsa elektron gibi tanecikler de dalga gibi davranabilir¹². Tıpkı elektromanyetik dalgalar gibi bu dalgalar da yansıma, kırılma ve girişim yapabilir¹⁹. Elektron atom içerisinde duran dalga pozisyonundadır. Bu tıpkı bir gitarın teline dokunduğumuzda oluşan dalgaya benzer^{19,8}. Dolayısıyla elektronu, atom içerisinde belirli bir noktadaki tanecik yerine, çekirdeği saran, kütlesi ve yükü yayılmış

bir dalga gibi düşünmeliyiz^{19,8}. Elektronu, atom içerisinde sıkışmış bir ışık gibi düşünebilirsin. Işığın belirli bir konumu olmadığından elektronun da atom içerisinde belirli bir konumu bulunmaz.



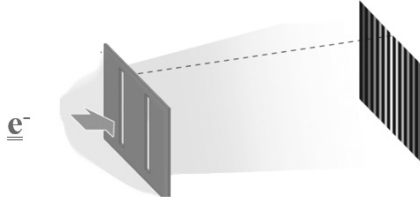
Yukarıdaki gibi yarım dalgalardan ($\lambda/2$) oluşan elektronlar, atomun çekirdeği çevresinde çembersel bir duruş gösterir. Bir elektromanyetik dalga olan elektron sadece belirli enerji değerleri alabileceği için atom içerisinde belirli bölgelerde ancak bulunabilir⁶. Elektron çekirdekten uzaklaştıkça enerjisi artarken dalga boyu küçülür ve dalga sayısı artar. Dalga sayısındaki artış tam sayılı olması gerektiğinden çekirdek çevresinde elektron rastgele bir bölgede bulunmayıp **belirli çembersel bölgelerde** ancak bulunabilir. Bu çembersel bölgelerin çevre uzunluğu ($2\pi r$), yarım dalganın ($\lambda/2$) tam sayılı (n) katları olmalıdır^{5,14,8}.

$$2\pi r = n \lambda/2$$

Bu nedenle atom içerisinde elektron, rastgele her noktada bulunamaz. Ancak belirli bölgelerde bulunabilir. Örneğin ataçlarla yaptığımız bir bileziğin büyüklüğü belirli değerlerde olabilir¹⁹. Ara değerler alamaz. Bu durum atom içerisinde elektronun bulunmadığı birtakım boşlukların oluşmasına neden olur. Bu boşluklara **nod** adı verilir. Elektron, yarım dalganın altında olamayacağı için çekirdeğin üzerine düşmeden çekirdekten belirli bir uzaklıkta kalabilir.

Müge: Fakat bu sadece bir kişinin hayal ürünü. Bilimsel değil.

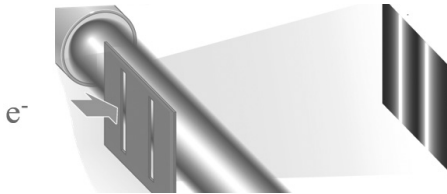
Bilge: Broglie'nin bu iddiasından kısa bir süre sonra 1925 yılında¹ Amerika Birleşik Devletleri'nden iki araştırmacı Clinton Davisson ve Lester Germer ve İngiltere'den G. P. Thomson (J. J. Thomson'ın oğlu) yaptıkları deneyde elektronun dalga şeklinde davrandığını gözlediler^{12,6,14,1}. Böylece elektronun dalga özelliği gösterebildiği deneysel olarak gösterildi.



Yapılan deneyde elektronlar çift yarıktan oluşan bir engelle karşılaştıklarında tıpkı elektromanyetik dalgalar gibi bir girişim deseni oluşturuyordu⁷. Eğer tanecik olsalardı çift yarığın karşısında aydınlık iki çizgi oluşması gerekirdi. Aksine çift yarığın karşısında bir takım aydınlık ve karanlık çizgiler oluşuyordu. Ortada bulunan geniş ve uzun bir parlak çizgi, kenarlara doğru gidildikçe daralıp kısılıyordu. Elektronlar çift yarığa tek tek yollandığında ise yine aynı desen oluşuyordu. Elektron dolayısıyla tıpkı bir elektromanyetik dalga gibi davranıyor, yapıcı ve yıkıcı girişimlerde bulunuyordu⁷. Bir çeşit enerji yayılımı gibiydi⁷.

Müge: Oldukça tuhaf.

Bilge: Daha tuhafı da var. Elektron, bir kamera yardımıyla gözlenmeye çalışıldığında ise aydınlık ve karanlık çizgilerden oluşan bu desenin yok olduğu onun yerine yarıkların tam karşısında sadece iki parlak çizgi oluştuğu görüldü⁷.



Müge: Bu ne anlama geliyor?

Bilge: Görüntüleme, elektronun dalga pozisyonundan tanecik pozisyonuna geçmesine neden olmuştu. Elektronun dalga pozisyonu bozulmuştu. Bir başka ifade ile elektron, klasik bir tanecik gibi davranmıştı.

Müge: Broglie'nin iddiaları bir bakıma doğrulanmış.

Bilge: Evet. Onun bu teorisi elektronun çekirdeğe düşmeden belirli uzaklıkta kalabilmesini açıklayabilmişti. Özetle klasik fizik elektromanyetik ışınmaları bir dalga, elektron gibi maddeleri ise bir tanecik olarak görüyordu. 20. yüzyılın bilimsel gelişmeleri madde ve enerji hakkındaki düşünceleri değiştirdi. 1900'lerden sonra yapılan deneyler madde ve enerjinin birbirinden çok da farklı olmadıklarını gösterdi⁵. Kuantum fiziğine göre enerji ve madde hem dalga hem de tanecik özelliğine sahipti. Büyük cisimler, örneğin bir tenis topu, tanecik olduğu kadar dalgaydı. Fakat o ağırlıklı oranda tanecik özelliği gösteriyordu. Bu nedenle günlük hayatta tenis topu bir tanecik gibi davranır. Dalga özelliği gözlenmez. Kırmızı ışık, dalga olduğu kadar tanecikti. Fakat kırmızı ışık ağırlıklı oranda dalga özelliği gösteriyordu. **Elektron gibi çok hafif bir parçacık ise hem tanecik özelliği hem de dalga özelliğini eşit oranda gösterebiliyordu.** Deney şartlarına bağlı olarak elektron, bazen bir tanecik, bazen de bir dalga gibi davranabiliyordu. O artık sadece bir tanecik değil **kuantum taneciği**ydi²³. Bir başka ifade ile o klasik bir tanecik olmayıp uzayda yayılabilen bir dalga paketi²³. Bununla birlikte elektromanyetik dalgalardan/ışıkta farklı olarak elektron, negatif bir yüke sahipti, kütlesi vardı, manyetik ve elektriksel alandan etkileniyordu ve hızı değişen değerler alabilmekteydi.

Müge: Gözle görebildiğimiz bir nesnenin dalga boyu gerçekten hesaplanabilir mi?

Bilge: Bu elbette mümkün.

Müge: Örneğin bir futbol maçında 400 gram kütleli bir futbol topu, kale sahasının dışından 108 km/h hızla atılmış olsun. Bu futbol topunun sahip olduğu dalganın boyu hesaplanabilir mi?

Bilge: Işık hızındaki bir fotonun enerjisi aşağıdaki bağıntı ile hesaplanıyordu.

$$E_{\text{foton}} = h \nu = h c / \lambda$$

Makro dünyada nesnelere daha yavaştır ve sahip oldukları enerjiye göre farklı hızlarda (V) olabilirler. Bu nedenle bağıntı aşağıdaki gibi gösterilebilir:

$$E_{\text{nesne}} = h V / \lambda$$

Einstein'a göre enerji ile kütle birbirine dönüşebilir²⁶. Bir ışınım sırasında kütle, enerjiye dönüşür ve kütle kaybı, $m = E/c^2$ kadardır^{24,26}. Örneğin bir atom çekirdeği oluşurken (proton ve nötronlar bir araya gelirken) bir enerji yayılması olur²⁶. Yayılan bu enerji atomda bir kütle kaybına neden olur²⁶. Bu nedenle herhangi bir atomun çekirdeğinin kütlesi (1 tane protonu bulunan hidrojen hariç), çekirdekdeki proton ve nötronların ayrı ayrı kütleleri toplamından daima daha azdır²⁶.

Müge: Kimyasal tepkimelerde ısı yayılması olur.

Bilge: Evet. Kimyasal tepkimelerde genellikle kızılötesi ışınlar (ısı yayılması) ve/veya görünür ışık yayılması olur.

Müge: Bu durumda ekzotermik (kızılötesi ışınım yayın) tepkimelerde, kütle azalması gerekmez mi?

Bilge: Evet. Haklısın. Azalır.

Müge: Fakat ders kitaplarımızda kimyasal tepkimelerde kütle korunmuş söylenir ve bu bir kanundur.

Bilge: Tepkime sırasında kütle azalması çok küçük (ölçülmesi güç) bir değer olduğundan ihmal edilir²⁶. Bu nedenle kimyasal tepkimelerde kütle korunmuş varsayılır.

Dolayısıyla, Einstein'a göre enerji ile kütle arasında $E = m c^2$ bağıntısı vardır. Dolayısıyla herhangi bir nesnenin kütlesi ile enerjisi arasındaki bağıntı aşağıdaki gibi olur:

$$E_{\text{nesne}} = m V^2$$

Yukarıdaki iki bağıntıyı birbirine eşitlersek:

$$\frac{hV}{\lambda} = mV^2$$

Hız ifadelerini sadeleştirdiğimizde, aşağıdaki bağıntıyı elde ederiz:

$$\lambda = h / m V$$

Bu bağıntıya göre herhangi bir nesnenin dalga boyu, kütlesi ve hızı ile ters orantılıdır. Az önce sorduğın soruya dönelim. Öncelikle topun hızını, km/h biriminden m/s birimine dönüştürmemiz gerekir.

$$\frac{108 \text{ km}}{\text{h}} \times \frac{1 \text{ h}}{3600 \text{ s}} \times \frac{1000 \text{ m}}{1 \text{ km}} = 30 \text{ m/s}$$

Bağıntıda bu hız değerini yerine koyalım:

$$\lambda = h / m V$$

$$= 6,626 \times 10^{-34} \text{ kg m}^2\text{s}^{-1} / 0,400 \text{ kg} \times 30 \text{ m/s}$$

$$= 5,5 \times 10^{-35} \text{ m}$$

Dolayısıyla topun sahip olduğu bu dalga boyu kendisinden çok çok daha küçüktür. Bu nedenle top kaleye ulaştığında dalga yerine tanecik gibi davranacaktır. Kaleci topu görebilecek ve topu kalesinden uzaklaştırabilecektir.

Müge: Peki bir elektronun dalga boyu bulunabilir mi?

Bilge: Örneğin 4×10^6 m/s hızla hareket eden bir elektronun dalga boyunu hesaplayalım.

Elektronun kütlesi $9,109 \times 10^{-31}$ kg'dır. Bağıntıda yerine koyalım:

$$\lambda = h / m V$$

$$= 6,626 \times 10^{-34} \text{ kg m}^2\text{s}^{-1} / 9,109 \times 10^{-31} \text{ kg} \times 4 \times 10^6 \text{ m/s}$$

$$= 2 \times 10^{-10} \text{ m} = 2 \text{ \AA}$$

Atomların çapları yaklaşık 0,5- 4 Angström arasındadır. Dolayısıyla atom ile elektronun aynı ölçekte olduğu görülüyor. Dolayısıyla elektronun dalga boyu atomun içerisine sığacak büyüklüktedir. Atom içerisinde bu nedenle elektron, teorik olarak dalga özelliği gösterebilir.

Müge: Dalga özelliğindeki bu elektronun atom içerisindeki uzaysal konumu belirlenebilir mi?

Bilge: 1926 yılında Erwin Schrödinger (1887-1961) elektronun bağlanma (eşik) enerjisi ile atom içerisindeki konumu ya da x, y ve z (r, θ ve ψ) düzlemlerindeki koordinatları arasındaki matematiksel ilintiyi gösteren bir bağıntı geliştirdi. Elektronun tanecik ve dalga özelliklerini hesaba katan bu bağıntı ile hidrojen atomu içerisindeki elektronun hareketlerini ve yaydığı enerjileri Schrödinger başarıyla hesapladı. Hesaplar, deneysel verilerle uyumluydu.

Müge: Peki elektronun eşik enerjisini nasıl bulabildi?

Bilge: Fotoelektrik deneyini hatırlıyor musun? Gelen ışımının foton enerjisi, elektronun eşik enerjisi ile saçılan elektronun kinetik enerjisi toplamına eşitti.

Müge: Evet. Hatırladım.

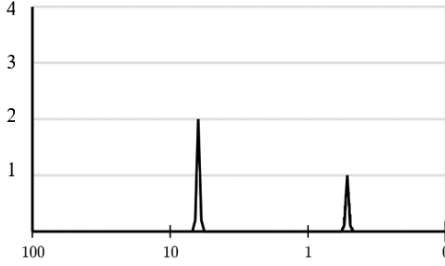
Bilge: Eşik enerjisini nasıl bulabiliriz?

Müge: Aşağıdaki bağıntı ile bu enerji değerini hesaplayabiliriz.

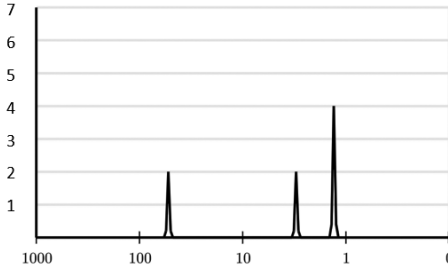
$$\phi = E_f - E_k$$

Eşik enerjisi = Foton Enerjisi – Elektronun Kinetik Enerjisi

Bilge: Bu bağıntı sayesinde atom içerisindeki tüm elektronların sayıları ve eşik enerjileri bulunabildi. Günümüzde Fotoelektron Spektroskopisi (PES)¹¹ adı verilen bir yöntemle bir elementte bulunan elektron sayısı ve eşik enerjileri hesaplanabilmektedir. Eşik enerjisi yüksek olan elektron çekirdeğe yakinken düşük olan çekirdekten uzakta bulunur. Aşağıda lityum elementine ait elektronların sayısı ve eşik enerjileri görülmektedir. Düşey eksen elektron sayısını, yatay eksen ise bağlanma ya da eşik enerjisini (Mega joule/mol) göstermektedir⁹.

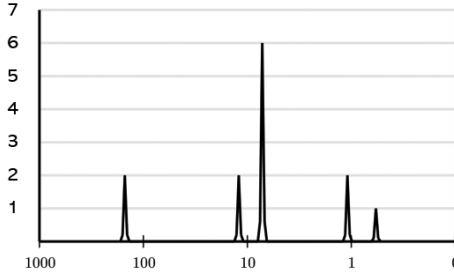


Yukarıdaki grafiğe göre lityum elementinde aynı enerjiye (yaklaşık 8 MJ/mol) sahip 2 elektron ve daha düşük bir enerji (yaklaşık 0,7 MJ/mol) ile çekirdeğe bağlanmış 3. bir elektron daha vardır. Bu 2 elektron çekirdeğe daha yakınken 3. elektron daha uzakta bulunuyor. Aşağıda oksijen elementine ait bir grafik görülmektedir. Bu grafiği yorumlayabilir misin?



Müge: Elbette. Grafiğe göre oksijen atomunda toplam 8 elektron bulunuyor. Elektronlar atom içerisinde 2, 2 ve 4 şeklinde sıralanmışlar. Bu elektronlardan ikisi yaklaşık 80 MJ/mol eşik enerjisine sahip ve görünüşe göre çekirdeğe en yakın olanlar. Diğer ikisi yaklaşık 5 MJ/mol eşik enerjisine sahip ve çekirdekten daha uzaktalar. Kalan dört elektron ise yaklaşık 2MJ/mol enerjisine sahip ve çekirdeğe en uzak şekilde konumlanmış olmalı.

Bilge: Aşağıda bir başka elementin grafiği görülmüyor. Sence bu element ne olabilir?

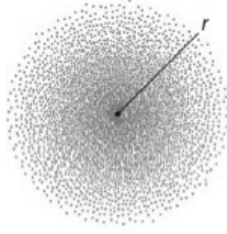


Müge: Bu elementin atomunda elektronların dizilimi en yakından uzağa 2,2,6,2,1 şeklindedir. Toplam elektron sayısı 13'tür. Bütün atomlar nötr olduğundan elektron sayısı ile çekirdekdeki proton sayısına daima birbirine eşit olmalıdır. Bu durumda bu elementin proton sayısı da 13 olur. Proton sayısı bize atomun periyodik cetveldeki atom numarasını verir. Periyodik cetvele baktığımda bu elementin alüminyum (Al) olduğunu görüyorum.

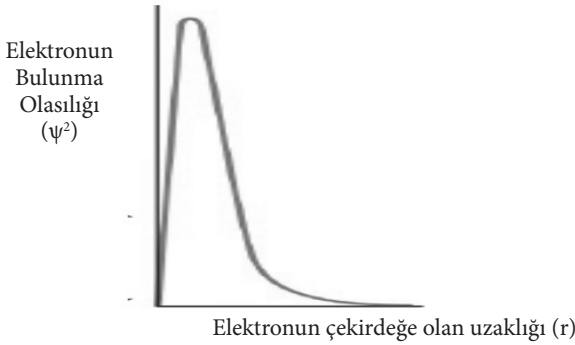
Bilge: Doğru. Haklısın.

Müge: Bu enerji değerleri ile elektronların atom içerisindeki yerleri tam olarak belirlenebilir mi?

Bilge: Bu mümkün olmaz. Fakat elektronların bulunabileceği bölgeler tanımlanabilir. Elektron atom içerisinde dalga fazında olduğundan bulunduğu bölge dalğanın genliği ile orantılı olacaktır¹⁸. Elektron, atom içerisinde genliği kadar bir bölgeyi kaplayacaktır. Fakat bununla birlikte çift yarık deneyinde elektronun perde üzerinde nereye düşeceği öngörüleliyordu. Elektronun perde üzerinde nereye düşeceği ancak olasılık hesabı ile bulunabiliyordu. Bu nedenle atom içerisinde elektronun bulunduğu yer ancak olasılıkla bulunabilir. Elektronun dalga fonksiyonunun karesi (ψ^2), olasılık genliğini ya da elektronun bulunabileceği olası bölgeyi verir^{14,18}. Bu üç boyutlu bölgeye **orbital** adı verilir. Orbitaller atomun şeklini ve büyüklüğünü belirler. Hidrojen atomunun 1 elektronunun bulunduğu orbitali düşünelim. Eğer bu elektronun atom içerisindeki fotoğrafları milyonlarca defa çekilseydi, elektron, dalga fazı bozularak tanecik fazına geçeceğinden aşağıdaki gibi bir resim elde edilirdi¹⁴.



Elektronun çekirdek çevresinde bulunma olasılığı çekirdeğe yakın koyu gri bölgede tavan yaptıktan sonra yarıçap arttıkça azalır ¹⁴. Çekirdek üzerinde ise olasılık sıfırdır.

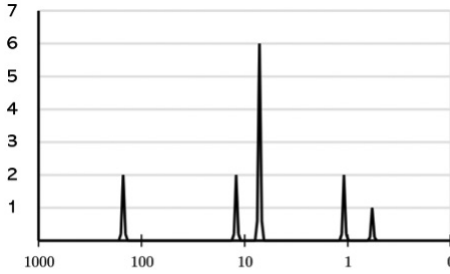


Hidrojen atomunun kararlı olduğu durumdaki elektronun bulunduğu bu ilk orbitale 1s orbitali adı verilir. **1** rakamı bulunduğu yörüngeyi, **s** ise orbitalin küresel şeklini sembolize eder. Çok elektronlu atomlarda atom içerisindeki her bir elektron 4 kuantum sayısı ile tanımlanır: (1) Baş kuantum sayısı (n) elektronun bulunduğu yörüngeyi ya da çekirdeğe olan uzaklığını (r), açısal momentum kuantum sayısı (l) orbitalin şeklini, manyetik kuantum sayısı (m_l) orbitalin koordinat düzlemindeki (x , y ve z düzlemlerindeki) yönelimini ve spin kuantum sayısı (m_s) elektronun dönüş yönünü verir.

Müge: Aklım karıştı.

Bilge: Yukarıda alüminyum atomuna ait PES spektrumunu incelemiştin. Bu spektrumda elektronların eşik enerjileri nasıl değişmekteydi?

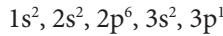
Müge: 2 elektron yaklaşık 200 MJ, 2 elektron 20 MJ, 6 elektron 8 MJ, 2 elektron yaklaşık 2 MJ ve son olarak 1 elektron yaklaşık 0,8 MJ enerjiye sahip görünüyor. 2,2,6,2,1 şeklinde bir enerji sıralaması var.



Bilge: Eşik enerjileri aynı zamanda orbitalin de enerjisini verir¹⁸. Elektronların bulunduğu orbitallerin enerjileri, tıpkı elektronlar gibi çekirdekten uzaklaştıkça artar. Bilim insanları birbirine yakın eşik enerjilerinin olduğu bölgeleri, elektronun bulunduğu yörüngeler (n) olarak tanımladılar. Dolayısıyla alüminyum atomunda 3 tane yörünge bulunuyor.

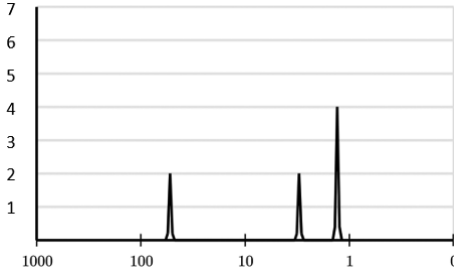
Müge: Grafikte ikinci yörüngede elektron sayısının 2 ve 6 tane olduğu görülüyor. Her bir orbital en fazla 2 elektrondan oluşmaktadır²⁰. Nasıl oluyor da 6 elektron aynı orbitalde bulunuyor?

Bilge: Elektron sayısının 6 olduğu bölgede 3 tane orbital bulunmaktadır. Bu orbitaller birbirine en uzak olacak şekilde koordinat düzleminde x, y ve z eksenleri üzerinde yer almaktalar. Aynı enerjiye sahip olan bu orbitaller çekirdekten aynı uzaklıktadır. Bilim insanları bu orbitallere p orbitalleri (Px, Pz ve Py) adını verdiler. Dolayısıyla alüminyumun elektron dizilimi aşağıdaki gibi olur.



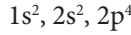
Oksijenin PES grafiğini hatırlıyor musun?

Müge: Evet.



Bilge: Bu grafikteki elektronların dizilimini sırasıyla söyleyebilir misin?

Müge: Elektron dizilimi aşağıdaki gibi olur.



İki elektron, 1. Yörüngede ve s orbitalinde bulunur. 1s orbitali küresel bir şekle sahip. Bir sonraki orbital 2s orbitali ve bu orbital, 1s orbitalini içine alan bir küre şeklindedir. Bir sonraki 2p orbitali ise 3 tane p orbitalinden (px, py ve pz'den) oluşuyor. Bu orbitaller uzayda x, y ve z eksenleri üzerinde birbirlerinden olabildiğince uzak noktalarda konumlanırlar. Bu durumu aşağıdaki şekilde hayal ediyorum¹⁷:



Bilge: Bilim insanları da bu şekilde hayal ediyorlar. Atomların elektron dizilimlerinde dikkatini çeken bir durum var mı?

Müge: Evet. Orbitalerin enerjileri her atomda farklı ama dizilimleri aynı sırayı izliyor.

Bilge: Bilim insanları PES grafiklerinde bu şaşırtıcı durumu fark ettiler. Elektronlar aynı orbital dizilimi ile atom içerisinde yer alıyorlardı. Bu dizilim bazı istisnalar hariç bütün atomlarda hep aşağıdaki sırayı izliyordu:

$1s^2, 2s^2, 2p^6, 3s^2, 3p^6, 4s^2, 3d^{10}, 4p^6, 5s^2, 4d^{10}, 5p^6, 6s^2, 4f^4, 5d^{10}, 6p^6, 7s^2, 5f^4, 6d^{10}, 7p^6$

Sıralama en az enerjili orbitalden en çok enerjili orbitale doğrudur. Aynı zamanda bu dizilim çekirdeğe en yakın orbitalden en uzak olana doğrudur.

Müge: Bu dizilimde ayrıca yeni orbital şekilleri görüyorum: d ve f

Bilge: Sence bu şekiller kaç tane orbitalden oluşuyorlar?

Müge: Her bir orbital 2 elektrondan oluşuyor. d şeklinde 10 elektron olduğuna göre 5 tane orbitali, f şeklinde 14 elektron olduğuna göre 7 tane orbitali olmalı. Bu orbitaller uzaysal düzlemde en uzakta olacak şekilde çekirdek çevresine yerleşmiş olmalı.

Bilge: Sence neden orbital sayısı, çekirdekten uzaklaştıkça artıyor?

Müge: Çekirdekten uzaklaştıkça elektronların bulunabileceği uzaysal boşluk büyüyor. Bunun sonucu olarak bu büyük bölgede orbitaller birbirlerinden uzakta ve farklı şekillerde konumlanabiliyorlar.

Bilge: Evet. Haklısın. Örneğin fosfor atomunda 15 tane elektron bulunmaktadır. Sence bu elektronların atom içerisindeki dizilimleri nasıldır?

Müge: Yukarıdaki dizilime bakılırsa: $1s^2, 2s^2, 2p^6, 3s^2, 3p^3$ şeklinde olmalı.

Bilge: Evet. Haklısın. ${}_3\text{Li}$ (lityum), ${}_4\text{Be}$ (berilyum), ${}_{10}\text{Ne}$ (neon), ${}_{11}\text{Na}$ (sodyum), ${}_{12}\text{Mg}$ (magnezyum) ve ${}_{18}\text{Ar}$ (argon) atomlarının elektron dizilimini gösterebilir misin?

Müge: Atomlar nötr olduğundan atom numaraları (proton sayıları) elektron sayısına eşittir. Dolayısıyla bu atomların elektron sayıları sırasıyla 3, 4, 10, 11, 12 ve 18'dir.

₃ Li: $1s^2, 2s^1$	₄ Be: $1s^2, 2s^2$	₁₀ Ne: $1s^2, 2s^2, 2p^6$
₁₁ Na: $1s^2, 2s^2, 2p^6, 3s^1$	₁₂ Mg: $1s^2, 2s^2, 2p^6, 3s^2$	₁₈ Ar: $1s^2, 2s^2, 2p^6, 3s^2, 3p^6$

Bilge: Şimdi bu atomların kimyasal davranışlarını inceleyelim. Örneğin oksijenle yaptıkları kararlı bileşiklerini inceleyelim.

Li_2O	BeO	Ne tepkime vermez
Na_2O	MgO	Ar tepkime vermez

Bilge: Oksijen ile birleşen elementlerin atom sayıları nasıl bir farklılık gösteriyor?

Müge: 2 tane lityum atomu 1 tane oksijen atomu ile birleşmiş. Sodyum atomu da aynı davranışı gösteriyor. 1 tane berilyum atomu 1 tane oksijen ile birleşmiş. Magnezyum atomu da aynı davranışı gösteriyor. Neon ve argon elementlerinin her ikisi de oksijen ile tepkime vermemiş.

Bilge: Atomların elektron dizilimleri ile kimyasal davranışları arasında sence nasıl bir bağ kurulabilir?

Müge: Son yörüngelerinde bulunan elektron sayıları ile kimyasal özellikleri arasında ilişki var. Örneğin sonu s^2p^6 ile bitiyorsa tepkime vermiyor. s^2 ile bitiyorsa 1 tane oksijen atomu ile birleşiyorlar. s^1 ile bitiyorsa 2 atom, bir tane oksijen ile birleşiyor.

Bilge: Bir atomda bulunan elektronların dizilimi, o atomun kimyasal özellikleri hususunda belirleyici rol oynar^{3,5,21}. Molekül ya da bileşiklerin oluşumunda bu dizilim önemlidir. Son yörüngelerindeki elektron dizilimi benzer olan elementler, benzer kimyasal özellik gösterirler^{5,25}. Periyodik cetvelde atomların dizilimi bu elektronik yapı temelinde oluşmuştur. Son yörüngelerinde elektron sayıları aynı olan atomlar alt alta olacak şekilde periyodik cetvele yerleşirler⁵. Son yörüngede bulunan bu elektronlar *valans* ya da *değerlik elektronları* adını alırlar^{21,25}. Aşağıda aynı grupta bulunan benzer kimyasal özelliklere sahip atomlar görülmektedir²⁵.

IA							VIIIA	
H $1s^1$								He $1s^2$
	IIA	IIIA	IVA	VA	VIA	VIIA		
Li $2s^1$	Be $2s^2$	B $2s^2 2p^1$	C $2s^2 2p^2$	N $2s^2 2p^3$	O $2s^2 2p^4$	F $2s^2 2p^5$	Ne $2s^2 2p^6$	
Na $3s^1$	Mg $3s^2$	Al $3s^2 3p^1$	Si $3s^2 3p^2$	P $3s^2 3p^3$	S $3s^2 3p^4$	Cl $3s^2 3p^5$	Ar $3s^2 3p^6$	
K $4s^1$	Ca $4s^2$							

Yatay satırlar periyotları, dikey sütunlar ise grupları göstermektedir. Örneğin 1A grubu (Hidrojen, Lityum ve Sodyum) elementleri 1 tane değerlik elektronuna sahiptir ve benzer kimyasal özellikleri vardır. 2A grubu elementleri 2 tane değerlik elektrona sahiptir ve benzer kimyasal özellikleri vardır. 3A grubu elementleri 3 tane değerlik elektrona sahiptir ve benzer kimyasal özellikleri vardır. Son olarak 8A grubu elementleri 8 tane değerlik elektrona sahiptir ve benzer kimyasal özellikleri vardır.

Müge: Fakat helyum atomunda değerlik elektron sayısı 8 yerine 2 olarak görülüyor.

Bilge: Evet. Helyum atomu son yörüngesinde 2 elektron olmasına rağmen 8A grubu elementleri ile benzer kimyasal özellikler gösterir. Kararlıdır ve bilinen herhangi bir bileşiği yoktur. Bu özellikleriyle helyum atomu soy gazlara ya da 8A grubu elementlerine benzer.

Müge: Helyum atomu hariç grup numarası bize değerlik elektron sayısını verir diyebilir miyim?

Bilge: Evet. Kimyasal bir tepkime, atomlar arasında ya bir elektron alış-verişi ya da elektronun ortaklaşa kullanımı ile gerçekleşir⁷. A grubu elementleri kimyasal tepkimelerde çoğunlukla bu son yö-

rüngedeki elektronlar ile tepkimeye katılırlar^{6,25}. B grubu elementlerinde ise bu elektronlara ek olarak bir alt yörüngedeki d ya da f orbitallerinde bulunan elektronlar da tepkimelere katılabilmektedirler⁶. Çünkü bu orbitaller, s ve p orbitallerine enerji bakımından oldukça yakındırlar^{6,1}. Sence bu son yörüngedeki ya da son yörüngeye yakın elektronlar neden kimyasal tepkimelere katılıyor olabilirler?

Müge: Bu elektronlar atomun çekirdeğinden en uzakta, diğer atomlar ile etkileşime geçebilecek en dış yörüngede ve çekirdeğe bağlanma enerjileri en zayıftır. Bu nedenlerden dolayı olabilir mi?

Bilge: Evet. Bilim insanları da böyle düşünüyor. Atomların doğadaki davranışları ile sahip oldukları elektron dizilimleri arasında böylesine önemli bir ilişki bulunmaktadır. Bazı atomlar doğada tepkime vererek bileşik ya da moleküller oluştururken bazıları (örneğin altın atomları) tepkime vermeden doğada saf olarak bulunurlar. Konuşmamızın başında bana sorduğın soruyu hatırlıyor musun?

Müge: Evet, altın elementinin oksijen ile bağ kurmamasının nedenini sormuştum.

Bilge: Soruyu kendin yanıtlayabilir misin?

Müge: Elbette. Atomların kimyasal davranışları, elektron dizilimleri ile yakından ilintilidir. Bu nedenle altın atomu bağ yapma konusunda isteksizken demir atomu, farklı bir elektron dizilimi ile oksijen atomu ile bağ yapma konusunda oldukça isteklidir.

KAYNAKLAR

1. MIT open courses: *Wave Particle Duality of Matter; Schrödinger Equation*. Retrieved on August 8, 2022.
2. Gonick, L. & Criddle, C. (2005). *The Cartoon Guide to Chemistry*. New York, NY: Collins
3. Brown, T. L., LeMay, H. E., Bursten, B. E., Murphy, C. J., Woodward, P. M. & Stoltzfus, M. W. (2015). *Chemistry: The Central Science*. (13th edition). New York, NY: Pearson Education
4. Hawkes, R., Iqbal, J., Mansour, F., Milner-Bolotin, M., & Williams, P. (2019). *Physics for Scientists and Engineers: An Interactive Approach*. Canada: Nelson Education
5. Zumdahl, S. S. & DeCoste, D. J. (2017). *Chemical Principles* (8th edition). Boston, MA: Cengage Learning
6. Burdge, J. (2020). *Chemistry*. New York, NY: McGraw Hill Education
7. Tro, N. J. (2020). *Chemistry: A molecular approach* (5th edition). New York, NY: Pearson Education
8. Overby, J. & Chang, R. (2022). *Chemistry* (14th edition). New York, NY: McGraw Hill LLC
9. Khan Academy. Retrieved on August 8, 2022, at www.khanacademy.org
10. Grinter, R. (2005). *The Quantum in Chemistry: An Experimentalist View*. San Francisco, CA: John Wiley & Sons
11. Ellis, A., Feher, M., & Wright, T. (2005). *Electronic and Photoelectron Spectroscopy: Fundamentals and Case Studies*. Cambridge: Cambridge University Press.
12. Overby, J., & Chang, R. (2022). *Chemistry*. New York: McGraw Hill.
13. Zumdahl, S. S., Zumdahl, S. A. & DeCoste, D. J. (2018). *Chemistry* (10th edition). Boston, MA: Cengage Learning
14. Silberberg, M. S. (2003). *Chemistry: The Molecular Nature of Matter and Change* (3rd edition). New York, NY: McGraw Hill
15. Davis, R. B. (2016). *Chemistry and Our Universe: How it all Works*. The U.S.A.: The Teaching Company

16. Griffith, W. T. & Brosing, J. W. (2022). *The Physics of Everyday Phenomena: A Conceptual Introduction to Physics* (10th Edition). New York: McGraw Hill.
17. Gonick, L. & Criddle, C. (2005). *The Cartoon Guide to Chemistry*. New York, NY: Collins
18. Ellis, A. M., Feher, M. & Wright, T. G. (2005). *Electronic and Photoelectron Spectroscopy: Fundamentals and Case Studies*. New York: Cambridge University Press
19. Hewitt, P. G. (2021). *Conceptual Physics* (13th Edition). UK: Pearson Education
20. Klein, D. R. (2005). *General Chemistry as a Second Language*. The U.S.A.: John Wiley & Sons
21. Timberlake, K. (2019). *Chemistry: An Introduction to General, Organic and Biological Chemistry* (13th Edition). New York, NY: Pearson
22. Royne, A. (2020). *Elementler Sayesinde Yaşıyoruz*. İstanbul: Orenda
23. Ridley, B. (2018). *Bilimin Sınırları: Bilimin Doğası Üzerine Soruşturmalar*. İstanbul: Ketebe
24. Hobson, A. (2021). *Kuantum Öyküleri: Fiziğin En Temel Kuramını Anlamak İçin Bir Klavuz*. İstanbul: Say
25. Houk, C. C. & Post, R. (1996). *Chemistry Concepts and Problems: A Self Teaching Guide* (2nd Edition). New York, NY: John Wiley & Sons
26. McMahan, P.E., McMahan, R. F., & Khomtchouk, B. B. (2019). *Survival Guide to General Chemistry*. FL: Taylor & Francis
27. Hewitt, P. G. Suchocki, J. & Hewitt, L. A. (1999). *Conceptual Physical Science* (2nd Edition). The U.S.A.: Addison Wesley Longman
28. Ashall, F. (1994). *Remarkable Discoveries*. Cambridge University Press

