

Katıhal Fiziği Temelleri

Dr. Ercüment AKAT



Türkiye Bilimler Akademisi
2011 Yılı Üniversite Ders Kitapları Telif ve Çeviri Eser Ödülleri Töreni
Haziran 2011

Türkiye Bilimler Akademisi 2011 Yılı
Üniversite Ders Kitapları Telif ve Çeviri Eser Ödülleri Çerçevesinde
Kayda Değer Eser Ödülü

Katıhal Fiziği Temelleri

Dr. Ercüment AKAT

PAPATYA YAYINCILIK EĞİTİM
İstanbul, Ankara, İzmir, Adana

Katıhal Fiziği Temelleri

© Papatya Yayıncılık Eğitim – Ocak 2012
BİLGİSAYAR SIS. SAN. VE TİC. A.Ş.

Ankara Cad. Prof. F. Kerim Gökay Vakfı İşhanı
No:31/3 Çağaloğlu/İstanbul

Tel : (0212) 527 52 96
Faks : (0212) 527 52 97
GSM : (0532) 311 31 10
e-posta : bilgi@papatya.gen.tr
Web : www.papatya.gen.tr
www.papatya.info.tr

Katıhal Fiziği Temelleri – Dr. Ercüment AKAT

1. Basım Kasım 2010
2. Basım Ocak 2012

Yayın Danışmanı : Dr. Rifat ÇÖLKESEN (Post-Edu Enstitüsü)
Türk Dili : Necdet AVCI
Üretim : Olcay KAYA
Pazarlama : Batuhan AVCI ve Ziya ÇÖLKESEN
Satış : Mustafa DEMİR
Sayfa Düzenleme : Papatya - Kelebek Tasarım
Kapak Tasarım : Papatya - Kelebek Tasarım
Basım ve Ciltleme : Pasifik Ofset Ltd. Şti. (Sertifika No:12027) - İstanbul

© Bu kitabın her türlü yayın hakkı yayınevine aittir. Yayınevinden yazılı izin alınmaksızın alıntı yapılamaz, kısmen veya tamamen hiçbir şekil ve teknikle ÇOĞALTILAMAZ, BASILAMAZ, YAYIMLANAMAZ. Kitabın, tamamı veya bir kısmının fotokopi makinesi, ofset gibi teknikle çoğaltılması, hem çoğaltan hem de bulunduranlar için yasadışı bir davranıştır.

Akat, Ercüment

Katıhal Fiziği Temelleri / Ercüment Akat / İstanbul: Papatya Yayıncılık, 2012

xii, 574 s., 24 cm.

Kaynakça ve dizin var.

Sertifika No: 11218

ISBN: 978-605-4220-16-8

1. Kuantum Mekaniği 2. Kırınım 3. Yarıiletken 4. Kutuplanma 5. Manyetik Özellikler
I. Title.

*Fizik Üstadımız
Prof. Dr. Erdal İNÖNÜ'ye
ithaf ediyorum.*

Teşekkür

Herşeyden önce kâğıtlara taslak halinde çizdiğim şekilleri sabır ve beceriyle elektronik ortama aktaran değerli fizikçi arkadaşlarım **Dr. Mehmet ÖZER** (İKÜ) ile **Dr. Ş. İpek KARAASLAN**'a (YÜ) böylesi önemli yardımları için teşekkür ediyorum.

Kitabın uzunca süren hazırlık döneminde zaman ayırmakta zorlandığım, ama beni hep destekleyen aileme de gönül borcumu burada belirtmek istiyorum. Son olarak da, bilim tarihi boyunca yaptıkları özverili çalışmalarla Dünya uygarlığının bugünkü düzeyine gelmesine, fiziğin öteki dallarının yanısıra, Katıhal fiziği alanındaki bilgilerin edinilmesine kuramsal ya da deneysel büyük katkılar sağlamış bulunan fizikçilerin ve bizi her zaman çağdaş uygarlığa ve bilime yönlendiren Ulu Önderimizin anısı önünde saygıyla eğiliyorum.

Dr. Ercüment AKAT

İçindekiler

Önsöz	IX
Kitap Hakkında	XIII
Bölüm 1. Modern Fiziğin Temelleri	13
1.1. Atomun Yapısı	13
1.2. Dalgalar	18
1.3. Elektromanyetik Dalgalar	21
1.4. Süreklilik ve Kesiklilik	25
1.5. Duran Dalgalar	26
1.6. Faz ve Grup Hızı	28
1.7. <i>Debroglie</i> 'un Madde Dalgaları	35
1.8. <i>Compton</i> Olayı	37
1.9. <i>Heisenberg</i> 'in Belirsizlik İlkesi	39
1.10. Siyahcisim Işınımı	45
1.11. <i>Bohr</i> 'un Atom Modeli	52
1.12. Atomdaki Enerji Düzeyleri	56
1.13. Fotoelektrik Olayı	57
1.14. Özet	62
1.15. Sorular	63
Bölüm 2. Kuantum Mekaniğinin Uygulamaları	65
2.1. Dalga Parçacık İkilemi	65
2.2. Dalga Fonksiyonu	66
2.3. <i>Schrödinger</i> Dalga Denklemi	68
2.4. Boş Uzaydaki Özgür Parçacık	72
2.5. Potansiyel Basamağı	75
2.6. Sonlu Potansiyel Basamağı	79
2.7. Sonsuz Derinlikte Potansiyel Kuyusu	81
2.8. Yarı Sonsuz Potansiyel Kuyusu	92
2.9. Sonlu Potansiyel Kuyusu	95
2.10. Tünelleme Olayı	97
2.11. Harmonik Salınıcı	103
2.12. Beklenen Değerler	106
2.13. Hidrojen Atomu	109
2.14. Açısal Momentum ve Spin Kavramı	115
2.15. Periyodik Çizelge	120
2.16. Özet	123
2.17. Sorular	124

Bölüm 3. Kristaller	125
3.1. Kristal Yapısı	125
3.2. Soğutma Hızının Önemi	126
3.3. Tek Boyutlu Kristal	128
3.4. İki Boyutlu Kristal	130
3.5. Üç Boyutlu Kristal	131
3.6. Atomların Kristaldeki Konumları	131
3.7. İlkel Birim Hücre	133
3.8. <i>Bravais</i> Örgüsü	134
3.9. Yaygın Örgü Türleri	138
3.10. Yönler, Düzlemler, <i>Miller</i> İndisleri	142
3.11. Birbirine Paralel (hkl) Düzlemleri Arasındaki Uzaklık	146
3.12. Atomlar ve Moleküller Arasındaki Kuvvetler	147
3.13. Bağlanma	149
3.14. Atomik Doluluk Oranı	159
3.15. Özet	163
3.16. Sorular	163
Bölüm 4. Kırınım	165
4.1. Kristallerde Simetri (Bakışım)	165
4.2. X-ışınlarının Kırınımı, <i>Bragg</i> Yasası	169
4.3. Kristalden Saçılma	175
4.4. Esnek Saçılma	183
4.5. Ters Örgü	185
4.6. Kristallerde Kuşak Kavramı	194
4.7. <i>Brillouin</i> Bölgeleri	198
4.8. Özet	201
4.9. Sorular	202
Bölüm 5. İstatistiksel Fizik	203
5.1. Temel İstatistik Kavramları	203
5.2. Ortalama ve Standart Sapma	205
5.3. Makro ve Mikro Durumlar	209
5.4. İki Durumlu Sistemler	210
5.5. Rastgele Yürüme	212
5.6. Termodinamik Yasaları	223
5.7. Durum Yoğunluğu	231
5.8. Dağılım Fonksiyonları	237
5.9. Özet	261
5.10. Sorular	262
Bölüm 6. Örgü Titreşimleri	265
6.1. Dalga Parçacık	265
6.2. Harmonik Salmıcı	266

6.3.	Isı Sığıması	269
6.4.	<i>Einstein</i> Modeli	272
6.5.	<i>Debye</i> Modeli	277
6.6.	Isıl Genleşme	279
6.7.	Isıl İletkenlik	280
6.8.	Esnek Dalgalar	284
6.9.	Örgü İçerisinden Geçen Dalgalar	293
6.10.	Özet	300
6.11.	Sorular	302
Bölüm 7. Metallerin Elektriksel Özellikleri		303
7.1.	<i>Drude</i> Kuramı	303
7.2.	Elektriksel İletkenlik	304
7.3.	Ortalama Özgür Yol ve Zaman	307
7.4.	<i>Ohm</i> Yasası	311
7.5.	<i>Matthiessen</i> Kuralı	323
7.6.	Değişken Akım (AC) İletkenliği	326
7.7.	<i>Hall</i> Olayı	328
7.8.	<i>Fermi</i> Küresi	334
7.9.	Özet	342
7.10.	Sorular	342
Bölüm 8. Yarıiletkenler		345
8.1.	Enerji Kuşakları	345
8.2.	Yarıiletkenler	349
8.3.	Akım Taşıyıcı Yoğunlukları n ve p	358
8.4.	Katkılama (n -Tipi)	366
8.5.	Katkılama (p -Tipi)	371
8.6.	Fotoiletkenlik	375
8.7.	Birleşme Süreçleri	376
8.8.	Işık Geçirgenliği	380
8.9.	Yayıma	382
8.10.	Özet	387
8.11.	Sorular	387
Bölüm 9. Yarıiletken Aygıtlar		389
9.1.	p - n Eklemi	389
9.2.	İleri ve Ters Yönde Besleme	395
9.3.	Eklem Diyot	397
9.4.	İki Kutuplu Eklem Transistör	403
9.5.	Alan Etkili Transistör	410
9.6.	Lazer	414
9.7.	Özet	424
9.8.	Sorular	425

Bölüm 10. Kutuplanma	427
10.1. Dipol Kavramı	427
10.2. Tork ve Potansiyel Enerji	429
10.3. Yalıtkanlık Sabiti ve Kutuplanma	433
10.4. Kutuplanma Türleri	439
10.5. Yalıtkanlığın Frekansa Bağlılığı	444
10.6. Piezoelektrik Özelliği	449
10.7. Ferroelektrik Gereçler	450
10.8. Kristalleşme-Erime	452
10.9. Kristalde Kusurlar	454
10.10. <i>Amorf</i> Yarıiletkenler	458
10.11. Özet	467
10.12. Sorular	468
Bölüm 11. Manyetik Özellikler Üstüniletkenlik	469
11.1. Giriş	469
11.2. Atomdaki Mıknatıs	472
11.3. Manyetik Tork ve Potansiyel Enerji	477
11.4. Toplam Açısal Momentum J ile Bileşenleri L ve S	480
11.5. Manyetizma Türleri	484
11.6. Manyetizmanın Uygulamaları	487
11.7. Üstüniletkenlik	490
11.8. I. ve II. Türden Üstüniletkenler	496
11.9. <i>Cooper</i> Çiftleri	498
11.10. Özet	501
11.11. Sorular	502
Ekler	503
Karmaşık Sayılar	503
Parçalı Türev	504
<i>Taylor</i> Açılımı	504
Potansiyel Engelinden Geçiş	506
<i>Poisson</i> Dağılımı	509
<i>Fourier</i> Dizileri	510
Kutupsal Bileşenler	513
Küresel Bileşenler	514
Silindirik Bileşenler	515
Önemli Entegraller	516
Ek - Problem Çözümleri	521
Terimler	561
Kaynakça	565
Dizin	569

Önsöz

Bu kitabımda metal, yarıiletken ve yalıtkanların, kısacası katıların ve onların çalışma ilkelerini belirleyen *Katıhal Fiziği* ele alınmıştır. Fizik biliminin *yoğun madde fiziği* adı verilen dalı, katılarla olduğu kadar sıvılarla da ilgilenmektedir. Ağırıklı olarak katıların fiziği üzerinde duracağımız bu kitap, katıhal fiziğine giriş niteliğinde olduğundan atom kuramını, kuantum mekaniğini, elektronların uydukları istatistiksel ilkeleri yüzeysel de olsa, incelemek yararlı olacaktır. Elektronikte kullanılan çeşitli aygıtların davranışları bu konularla doğrudan ilişkili olduğundan, örneğin bir elektronun elektronik bir cihazda neden yer değiştirdiğini, nasıl yol aldığını, bu gereçlerin birtakım özelliklerinin dış parametrelerle, örneğin ışık ya da sıcaklıkla nasıl değiştiğini anlamak, ancak elektronu sınırlı bir ölçüde de olsa tanımak ve onun kristal örgü yapısı ile nasıl etkileştiğini kavramakla olasıdır. Dolayısıyla, önce atomun elektron yapısı ve ışığın soğurulmayla salınması konuları ele alınmıştır.

Yirminci yüzyılın başlangıcından önce katıların fiziğiyle ilgili çok az şey bilindiğine inanmak doğrusu güçtür. Her ne kadar kristal yapı, doğal ve sentetik kristallerin morfolojisinden, yani yapısından yararlanılarak bir parça sezilmişse de, katıların elektriksel, ısıl ve manyetik özellikleri hâlâ tam anlaşılammıştı. Yirminci yüzyıl biliminin önemli bir dalı olan *Katıhal Fiziği*, bu en önemli bilim dalının üzerine oturduğu *kuantum mekaniği*, *elektromanyetizma*, *istatistiksel fizik* gibi temellerden yararlanır ve modern fiziğin çok önemli bir kolunu oluşturur.

Bu kitabın amacı sonuçta bir modern fizik, istatistiksel fizik ya da kuantum fiziği değil, bir *Katıhal fiziği* kitabı olmak ve değindiği konuları okuyucuya olabildiğince anlaşılır biçimde sunmak, ayrıca da gerek konuların içinde yeri geldikçe verilen örnekler, gerekse de bölüm arkalarında sorulan ve çözümleri kitabın arkasında sunulan problemler aracılığıyla bu konuların pekiştirilmesine çalışmaktır.

Kitabımızda yeni kavramlar, ilk geçtikleri yerde koyu renkle yazılıp, kitabın terimler bölümünde İngilizcedeki karşılıklarıyla birlikte verilmişlerdir. Bu yaklaşımın özellikle, hangi terimin İngilizce'deki hangi terim için yazıldığını anlamada aydınlatıcı olacağını umuyorum. Yine yeri geldikçe çoğunlukla günlük yaşamın basit olaylarından seçmeye çalıştığım benzetmeler okuyucunun konuyu özümsemesine ya da belki bilinen bir fiziksel olguyu biraz daha farklı bir açıdaki kameradan izlemesine yardımcı olabilir. Böyle benzetmeler yoluyla genelde çeşitli formüller ve hesapların bulunduğu kitaba popüler bilimin sözel yumuşaklığını katmaya çalıştım.

Dr. Ercüment AKAT

Katıhal Fiziği Temelleri

Kitap Hakkında

Kitabımız toplam onbir bölümden oluşmaktadır. Ayrıca her bölümde kolaydan zora doğru sıralanan çözümlü örnekler vardır. Kitabımızın amacı katıhal fiziği alanına iyi bir giriş yapmak ve temel bilgileri kazandırmaktır:

1. Bölümde 20. yüzyılın başlarında bir avuç fizikçinin olağanüstü çalışmaları sonucunda çok önemli gelişmeler kaydedilen modern fiziğin temellerini gözden geçirecek, bu konularda eksikleri olan okuyuculara kitabın bundan sonrası için bir taban oluşturmaya çalışacağız.

2. Bölümü kuantum mekaniğinin biraz önce belirttiğimiz kadarlık bir bölümüyle sınırlı ama tüm fizik biliminin en önemli bağıntularından biri olan *Schrödinger* denkleminin bir ve üç boyutlu uygulamalarını da içeren bir özeti olarak düşünebiliriz.

3. Bölümde kristal yapısına girerek çeşitli örgü türlerini göreceğiz, atomlardaki bağ türlerini ele alacak ve maddelerin özelliklerinin bu yapılarla ilişkisini kurmaya çalışacağız.

4. Bölümde elektronların ya da x -ışınlarının bir kristal örgüsü içinde nasıl yol aldıklarını, bu ışınlardan yararlanılarak örgü yapısı ile ilgili hangi sonuçlara varılabileceğini göreceğiz ve (kimileri belki biraz soyut gelebilecek) birtakım matematiksel uygulamalar yapacağız.

5. Bölümde önce genel istatistiksel temelleri inceleyip, daha sonra parçacıklar için birbirinden farklı iki temel davranış biçimini izleyen iki aileye, yani *fermiyonlar* ile *bozonlara* değineceğiz.

6. Bölüm bir açıdan 5. Bölümün devamı gibi olup katıların ısı özelliklerini açıklamaya çalışıyor. Burada iki önemli modeli, *Einstein* ve onun eksikliğini gidermeye çalışan *Debye* modellerini göreceğiz.

7. Bölümde, elektriksel özelliklere genel olarak bakıp, iletkenlik, *Ohm* yasası, ortalama özgür yol ve hız gibi temel konuların üzerinden geçecek, durum yoğunluğu, *Fermi* düzeyi gibi önemli kavramlarla tanışacağız.

8. Bölümdeki elektriksel iletkenlik açısından metallerle yalıtkanlar arasında bir yerde olan yarıiletkenlerin iletkenlikleri düşük olup, hatta kimi durumlarda yalıtkanlarınkine yakındır. Ama metallerdekine tersine, bunların iletkenlikleri sıcaklıkla doğru orantılı olarak arttığından ve ayrıca yapılacak katkıyla değeri duyarlı biçimde değiştirilebildiğinden ötürü, uygulamada çok çeşitli kullanım alanı bulurlar. Burada bunların temel işleyiş ilkeleri ele alıyoruz.

9. Bölümde daha önce çalışma ilkelerini gördüğümüz yarıiletkenlerin diyot, transistör, güneş pili gibi uygulama alanlarını gözden geçiriyoruz. Ayrıca lazer de bu bölümde ele alınıyor.

10. Bölüm yalıtkanları ve kutuplanma türlerinin temellerini açıklamamızın yanısıra kristallerde bulunan çeşitli kusurlar ile kristallerdeki gibi periyodik olmayan, atomların yakın komşuları ile sınırlı kalınca düzenli gibi olup, uzun erimli bir düzen göstermeyen amorf maddelerin yapıları ile özelliklerine değiniyor.

11. Bölümde ferro-, ferri-, para- manyetizma gibi manyetik özellikleri inceliyoruz. Bunlardan başka, maddeden maddeye önemli değişiklikler görünmekle birlikte, çok düşük sıcaklıklara inildiğinde, direncin birdenbire ortadan kalktığı ve dışarıdan herhangi bir gerilim uygulanmadan da döngüde bir akımın dolaşmaya başladığı üstün ya da süperiletken olarak davranabilen gereçleri incelemeye çalışıyoruz.

1.

Modern Fiziğin Temelleri

Maddelerin ısı ya da elektriksel iletkenlik, yalıtkanlık ve optik özelliklerinden yararlanarak çalışan çeşitli sistemlerin ve özellikle elektronik aygıtların işleyişini kavrayabilmek için öncelikle atomların yapıları ve bu atomları birarada tutan kimyasal bağlar üzerinde temel bir bilgi edinmek gerekir. O nedenle, biz de bu olguları açıklayan ve temelleri daha çok 20. yüzyılın ilk çeyreğinde atılan modern fiziğin belli başlı konularını gözden geçirmekle işe başlıyoruz.

1.14. Özet

- Bir atom, merkezinde Z tane proton ve N tane nötron içeren bir çekirdek ile onun çevresinde elektronların, kabuk denen değişik yörüngelerde buldukları bir küre olarak düşünülebilir.
- Belirli bir hacimde yoğunlaşmış cisimlere parçacık, suya atılan bir taşın yaratacağı akışa dalga hareketi denir.
- Elektrik alanı $E_z(y, t) = E_m \sin(ky - \omega t)$ ile gösterilen elektromanyetik dalgalar adına tayf denen çok geniş bir frekans (dalgaboyu) yelpazesine yayılırlar ve ortalara yakın, yalnızca çok küçük bir bölümünde görünür bölge vardır.
- Karşılıklı olarak giden dalgaların *genlikleri ve frekansları tıpatıp eşit* olursa, ipte belli sayıda boğumlar oluşur ve bunlara *duran dalgalar* denir.
- L boyundaki ipte olası duran dalga sayısı: $\lambda_n = \frac{2L}{n}$
- Faz hızı (v_f) bir titreşimin herhangi bir noktasının hızıdır, oysa grup hızı (v_g) titreşen kümenin bir bütün olarak ilerlediği hızıdır.
- Faz hızı: $v_f = \frac{\omega}{k}$; Grup hızı: $v_g = \frac{(\Delta\omega/2)}{(\Delta k/2)} = \frac{\Delta\omega}{\Delta k} \cong \frac{d\omega}{dk}$
- Işık kimi koşullar altında dalga, kimilerinde ise parçacık gibi davranır. Bu ikili davranışa “*dalga-parçacık ikililiği*” denir.
- Fotonun enerjisi $E = hv$, momentumu ise $p = E/c$ ’dir.

- Compton saçılmasına uğrayan bir fotonun dalgaboyundaki değişim:

$$\Delta\lambda = \lambda_s - \lambda_i = \frac{h}{m_e c} (1 - \cos \phi)$$

- Heisenberg belirsizlik ilkesi: $(\Delta x)(\Delta p_x) \geq \frac{\hbar}{2}$ $\Delta E \Delta t \geq \frac{\hbar}{2}$
- Siyahcisim denen oyuktaki dalgaların Planck tarafından önerilen enerji yoğunluğu:

$$e(\nu) d\nu = \frac{8\pi h}{c^3} \frac{\nu^3}{\exp\left(\frac{h\nu}{k_B T}\right) - 1} d\nu$$

- Bohr modeline göre açılal momentumun olası kesikli değerleri:
($L = m_e v r = n(h/2\pi) = n\hbar$)
- Fotoelektrik olayında frekansla enerji arasındaki bağıntı: $E_m = h\nu - eV$

1.15. Sorular

- 1.1) *Rutherford*'un saçılma deneyinde eğer 20° 'lik saçılmaya uğrayan alfa parçacıkları hedefteki çekirdeğe belirli bir b_0 değerindeki bir çarpma parametresi ile geliyorsa
a- 10° 'lik, b- 30° 'lik açı ile sapanların çarpma parametreleri sırasıyla kaç b_0 eder?
- 1.2) $Z_1 = 2 + 5i$ ile $Z_2 = -4 + i$ karmaşık sayıları için a- $Z_1 Z_2$ 'yi, b- $Z_1^* Z_2^*$ 'i ve c- $|Z_1^* Z_2^*|$ büyüklüğünü bulunuz.
- 1.3) a- $\exp\left(\pm i \frac{\pi}{2}\right)$, b- $\exp\left(i \frac{\pi}{6}\right)$, c- $\ln(-1)$ değerlerini hesaplayınız.
- 1.4) Siyah cisim gibi davrandığı varsayılan 200°C 'deki bir kovuğun ucunda bulunan 1 mm yarıçapındaki bir delikten, bir gün süresince ne kadar enerji dışarı salınır?
- 1.5) 100 W şiddetindeki bir ışık kaynağının 5000 angström dalgaboyundaki ışığı her yöne düzgün olarak yaydığını ve sıradan bir gözün herhangi bir ışık kaynağının varlığını anlayabilmesi için bu göze saniyede ortalama 20 foton girmesi gerektiğini varsayarak, yarıçapı 3 mm olan bir göz bebeğinin ışık kaynağından en çok ne kadar uzaklıkta durması halinde orada bu kaynağın olduğunu algılayabileceğini bulunuz.
- 1.6) a- En yüksek hızı 2 mm/s olan bir salyangoz, kare biçimindeki tabanının bir kenarı 2 m olan bir kutunun tam orta yerine (O noktası olsun) bırakılıp, kutunun kapağı kapanmış olsun. Kapak tam 1 dakika sonra açıldığında salyangozun nerede bulunmasını beklersiniz? b- Salyangozun kutunun herhangi bir köşesinde beklenbilmesi için kapağı kapanmasıyla açılması arasında en az ne kadarlık bir sürenin geçmesi gerekir?
- 1.7) Dünyadan r kadar uzakta bulunan ve kendi yarıçapı R olan bir yıldızın yaptığı ışınım yeryüzünde ölçülüyor ve A kadarlık bir yüzeyde P gibi bir değer elde ediyor. a- Bu yıldızın yüzey sıcaklığını bulunuz, b- $r \cong 1.5 \times 10^8$ km olarak ve (10

$\text{cm} \times 10 \text{ cm}$)'lik bir alana 13.5 Watt'lık bir ışınım şiddeti ölçüldüğünü varsayarak, bizim yıldızımız olan Güneş'in yüzey sıcaklığını hesaplayınız.

- 1.8)** Bir elektronun paralel plakalı kapasitördeki gibi $L \times L$ boyutlarında ve aralarındaki açıklık H kadar olan iki paralel, yatay düzlemin arasına, $+x$ yönünde, $\vec{v} = v_0 \vec{i}$ hızıyla yollandığını ve böylece hızının hiç düşey bileşeni olmadığını varsayalım. Bu elektronun, **a-** momentumunu, **b-** enerjisini, **c-** plakalardan ayrılırken düşey doğrultudaki hızının hangi aralıkta değerler alabileceğini verilenler cinsinden bulunuz. **d-** Elektronun yatay hızının $v = 5 \times 10^6$ m/s, düzlemlerin boyunun $L = 1000$ Å, aradaki açıklığın da $H = 50$ Å olması durumunda, kütlesi $m_e = 9.11 \times 10^{-31}$ kg olan elektronun momentumunu, **e-** enerjisini ve **f-** düşey hızındaki belirsizliği hesaplayınız.
- 1.9)** Mavi ve kırmızı birer ışın ile bir x ışını demetini **a-** hız, **b-** dalgaboyu olarak büyükten küçüğe doğru sıralayınız.
- 1.10)** Yarıçapı r olan dairesel bir yörüngede v hızıyla dönmekte olan m kütleli bir cisim için belirsizlik ilkesinin $(\Delta L)(\Delta \theta) \geq \frac{\hbar}{2}$ (ΔL cismin açısal momentumundaki, $\Delta \theta$ ise açısal olarak konumundaki belirsizlikleri gösteriyorlar) olarak yazılabileceğini kanıtlayınız.

2.

Kuantum Mekanikinin Uygulamaları

Günümüzde uygarlığın dayandığı en büyük temellerden biri ve aynı zamanda Katıhal fiziğinin de en somut uygulama alanlarından biri olan elektronikte kullanılan çeşitli aygıtların davranışlarını anlama, sınırlı bir ölçüde de olsa, ancak kuantum mekaniğini kavramakla olasıdır. Örneğin elektronun en önemli oyuncusu olan, ona adını veren elektronun radyo, televizyon, bilgisayar vb bir elektronik aygıtın en önemli parçalarından olan bir transistör ya da bir diyot içerisinde neden yer değiştirdiğini, nasıl davrandığını anlamanın yolu kuantumun temellerini bir ölçüde tanıtmaktan geçer.

2.16. Özet

- Dalga fonksiyonu karmaşık bir büyüklüktür ($\psi = a + bi$ - a ve b gerçektir) ve kendi başına fiziksel bir anlamı ya da birimi yoktur.
- Zamana bağlı *Schrödinger denklemi*: $-\left(\frac{\hbar^2}{2m}\right)\nabla^2\Psi(x,t) + V\Psi(x,t) = i\hbar\frac{\partial\Psi(x,t)}{\partial t}$
- Dalga fonksiyonunun karesinin belirli bir konumdaki değeri, parçacığın orada bulunma olasılığının yoğunluğunu verir. Bir parçacığın üç boyutlu belirli bir bölgede bulunma olasılığı $|\psi|^2$ 'nin hacim elemanı ile çarpılıp, aranan bölgenin sınırları arasında entegre edilmesiyle bulunur.

$$\text{Cismin } x = A \text{ ile } x = B \text{ arasında olma olasılığı} = \int_A^B |\psi|^2 dx \quad (1-B).$$

$$\text{Cismin } r = R_1 \text{ ile } r = R_2 \text{ arasında olma olasılığı} = \int_{R_1}^{R_2} |\psi|^2 dV \quad (3-B).$$

- Sonsuz derin potansiyel kuyusundaki bir parçacığı tanımlayan dalga fonksiyonu

$$\psi = \sqrt{\frac{2}{L}} \sin \frac{n\pi x}{L}, \text{ dir.}$$

- Parçacığın enerji düzeyleri: $E = \frac{p^2}{2m} = n^2 \left(\frac{\hbar^2 \pi^2}{2mL^2} \right) = n^2 \left(\frac{h^2}{8mL^2} \right)$ ($n=1,2,3,\dots$)
- Belirli bir V_0 yüksekliğindeki bir engele doğru yollanan E enerjisini taşıyan ($E < V_0$) parçacıkların, çok küçük bir bölümünün bu engeli geçebilmesi (tünelleme) olasılığı:
 $T \cong \exp(-2ka)$
- Fizikteki birçok olgunun modeli olarak yararlanılan harmonik salıncı için dalga fonksiyonu: $\psi = Ax^n \exp(-bx^2)$
- Herhangi bir değişkenin ya da bir fonksiyonun beklenen değeri, sırasıyla
 $\langle x \rangle = \int_{x_1}^{x_2} \psi^* x \psi dx$; $\langle f(x) \rangle = \int_{x_1}^{x_2} \psi^* [f(x)] \psi dx$
- Atomların durumlarını belirlemede kullanılan bir kuantum durumu, tam olarak, ancak adlarına kuantum sayıları denen 4 sayı ile tanımlanabilir. Bunlardan ilk üçü (n , l ve m_l) o parçacığın momentumunun uzaydaki bileşenlerini, dördüncüsü olan (m_s) ise dönme yönünü gösterir.
Temel kuantum sayısı: $n = 1, 2, 3, \dots$
Yörüngesel açısal momentum kuantum sayısı: $l = 0, 1, 2, \dots, n-1$.
Manyetik kuantum sayısı: $m_l = 0, \pm 1, \pm 2, \dots, \pm l$
- Açısal momentum vektörünün büyüklüğü $L = \sqrt{l(l+1)}\hbar$.

2.17. Sorular

- 2.1) İki boyutlu bir kutudaki m kütleli cismin alabileceği ilk 10 uyarılmış izinli enerji değerini taban enerjisi E_1 cinsinden hesaplayınız.
- 2.2) İki boyutlu bir potansiyel kuyusundaki olası çoklu durumlara çeşitli örnekler verilebilir: ($n_x = 1, n_y = 2$) ile ($n_x = 2, n_y = 1$). Böyle basit bir sayı değişiminden kaynaklanmayan bir yozlaşma (aynı enerji değerine sahip olma) örneği ne olabilir?
- 2.3) Sonsuz derinlikte kuyu örneğinde, birinci uyarılmış durumda ($n=2$) parçacığın **a-** $0 \leq x < L/4$, **b-** $L/2 \leq x < L$ arasında bulunma olasılıklarını hesaplayınız. **c-** Kutunun orta bölümüne rastlayan $0.4L \leq x \leq 0.6L$ aralığında, parçacığın taban ($n = 1$), **d-** birinci ($n = 2$) ve **e-** ikinci ($n = 3$) uyarılmış düzeyler için ortalama bulunma olasılıkları nedir?
- 2.4) Kütlesi m , yay sabiti de k olan bir harmonik salıncının taban enerjisini $\psi = A \exp(-bx^2)$ varsayımıyla bulunuz.
- 2.5) Kütlesi m , yay sabiti de k olan bir harmonik salıncının frekansı $\omega = \sqrt{k/m}$, enerjisi ise $E = (p_x^2/2m) + (kx^2/2)$ dir (burada p_x doğrusal momentumun x yönündeki değerini, x de denge durumundan ne kadar uzaklaştığını gösteriyor). Klasik fizikte salıncının en düşük enerjisi $E_{\min} = 0$ 'dır. Heisenberg'in belirsizlik ilkesini kullanarak, E 'nin yalnızca x cinsinden ifadesini çıkarıp, en küçük değerini bulunuz.

- 2.6) Sonsuz derinlikte ve L genişliğindeki bir potansiyel kuyusundaki m kütleli bir parçacığın taban enerjisi E_1 ise **a-** kutunun genişliği $L/2$ 'ye indiğinde, **b-** $2L$ 'ye çıktığında, **c-** L iken %1 arttığında, yeni enerji değerinin ilk durumdakine oranı ne olur?
- 2.7) Eğer iki kütleli biri ötekenden onun “% n ” si kadar büyükse, indirgenmiş kütle **a-** küçük olanın, **b-** büyük olanın kaç katı olur?
- 2.8) Hidrojen atomu için $R_{31}(r)$ durumunda r 'nin en olası değer(ler)ini bulunuz.
- 2.9) $\psi = A \exp(-r/2a_0)$ gibi bir dalga fonksiyonunu normlayınız.
- 2.10) Eğer ışınım yapan bir element için, herhangi bir t zamanında bozunmamış olarak kalan miktarın ($N(t)$), en baştaki ($t=0$) miktarla (N_0) ilişkisini veren bağıntı $N(t) = N_0 \exp(-t/\tau)$ ise (τ bir zaman sabiti), bu kendiliğinden bozunma sürecinde bir atomun ortalama ömrü nedir?
- 2.11) Hidrojen atomu için **a-** $R_{10}(r)$ durumunda r 'nin en olası değer(ler)ini, **b-** elektronun $r_1 = a_0$ 'da bulunma olasılığının, $r_2 = 2a_0$ 'da bulunma olasılığına oranını bulunuz.
- 2.12) $\psi = A \exp(ikx)$ olarak verilen bir düzlem dalga için (x eksenindeki) momentumun karesinin beklenen değeri olan $\langle p_x^2 \rangle$ nedir?
- 2.13) **a-** $\hat{\Theta}$ işlemcisi uygulandığı vektörü y eksenini çevresinde saat yönünün tersinde (y 'den O 'ya bakarken) $\pi/2$ açısı kadar çevirirken, **b-** $\hat{\Phi}$ işlemcisi uygulandığı vektörü x eksenini çevresinde π kadar döndürüyor. Bu iki işlemcinin “değişim” özelliği taşıyıp taşımadıklarını $(\hat{i} + \hat{j})$ vektörü üzerinden sınavınız.
- 2.14) Spin kavramının tam olarak elektronun kendi eksenini çevresinde dönmek olmadığını, elektronların açısal momentumlarının Güneş sistemindekine benzer şekilde düşünülmemesi gerektiğini gösteriniz.

3.

Kristaller

Birinci bölümde genel bir giriş yapıp, daha çok 20. yüzyılın ilk yarısında tam olarak anlaşılmiş olan modern fiziğin temel kavramlarını inceledikten ve ikinci bölümde de elektronların çeşitli koşullardaki davranışları gibi kuantum mekaniğinin, özellikle bizi daha sonraki bölümlerde ilgilendirecek noktalarını kısaca gördükten sonra, sıra artık kristallerin iç yapısına bakmaya geldi.

3.15. Özet

- Atomlar birbiri ardına, üç boyutlu bir biçimde ve periyodik olarak, aralarında belirli bir uzaklık bırakmak koşuluyla dizilerek kristalleri oluştururlar. Atomlar arasındaki kuvvetlerin bir dengede olduğu genel ağ yapıya örgü, iki atom arasındaki ortalama uzaklığa da örgü sabiti denir (a).
- Örgü içerisinde belirli konumlarda bulunan atomlar bu konumları çevresinde basit harmonik salınım yaparlar. Bir atomun üç boyutlu gerçek bir örgüdeki konumu $\bar{R} = n_1\hat{a} + n_2\hat{b} + n_3\hat{c}$ ile tanımlanır.
- Eğer örgüyü oluşturan atomlar tek türdense buna *Bravais* yapısı adı verilir. Bu yapılar toplam 14 çeşittir. Ama genelde en sık rastlanan yapılar “basit kübik”, “cisim merkezli kübik”, “yüzey merkezli kübik”, “sıkı bağlı altıgen” olanlardır.
- Bir kristalde herhangi bir yön $[n_1n_2n_3]$ sayılarıyla belirlenir. Bir düzlemse *Miller* indisleri denen (hkl) üçlüsü ile gösterilir.
- Kristallerde rastlanan en yaygın bağlanma çeşitleri “iyonik”, “kovalent”, “metalik” ve “*Van der Waals*”dır.
- Atomik doluluk oranı bir kristalin hacimce ne kadarlık bir yüzdesinin gerçekten atomlarca dolu olduğunu bildirir. Yukarıda sözü edilen yapıların genelde birbirinden farklı (en büyüğü % 80’i geçmeyen) doluluk oranları vardır.

3.16. Sorular

- 3.1) Kenar uzunluğu a olan kübik bir yapıda, birbirine koşut (512) düzlemlerinin arasındaki uzaklığı bulunuz.
- 3.2) Basit kübik (BK) yapının doluluk oranını bulunuz.
- 3.3) Eğer basit kübik bir yapının ortasındaki boşluklar olabilen en büyük çaplı atomlarla doldurulsaydı, yeni yapının doluluk oranı ne olurdu?

4.

Kırınım

İlk üç bölümde önce modern fiziğin temellerini gözden geçirip, sonra kuantum evrenine bir giriş yapıp, ardından da kristalleri, örgü yapılarını gördük. Şimdi artık kristal yapılarına daha ayrıntılı biçimde bakıp, önce görülebilecek çeşitli simetri durumlarına göz attıktan sonra bir yapıyı inceleyebilmek için ona bir elektron demeti yollayarak bu demetin o kristalden nasıl yansıdığına bakarak yapı hakkında birtakım sonuçlar çıkarmaya çalışacağız. Bu bölümde ayrıca kristal yapılarını anlamada önem taşıyan yapı çarpanı, atomik biçim çarpanı, ters örgü gibi matematiksel ağırlığı biraz daha büyük olan konular yer alıyor.

4.8. Özet

- Eğer bir kristale bir işlem uygulandığında işlemden önceki durumunda bir değişiklik olmuyorsa, böyle işlemlere *simetri* ya da *bakışım* işlemleri denir ve $(S(x) = x)$ olarak gösterilebilir. Böyle işlemler kristal bir yapıda üç grupta toplanabilirler:

i- Tersyüz etme, **ii-** döndürme, **iii-** yansıma.

- *Bragg yasası*: $YF = n\lambda \Rightarrow 2d \sin \theta = n\lambda$ ($n=1,2,\dots$) (d saçıcı düzlemler arasındaki uzaklık, n de bir tamsayı)
- x yönünde ilerleyen bir dalga $u = A \exp i(\vec{k} \cdot \vec{r} - \omega t)$ ile gösterilir (dalga vektörü \vec{k} 'nin büyüklüğü $|\vec{k}| = k = 2\pi / \lambda$)
- Saçılan dalganın dalga fonksiyonu:

$$\psi_S(r, t) = A e^{i(\vec{k} \cdot \vec{r} - \omega t)} \left[\sum_a e^{-i\vec{\Delta k} \cdot \vec{r}_a} \right] \int e^{-i\vec{\Delta k} \cdot \vec{r}_e} (\rho_{el})_a(r_e) dV$$
- Atomik biçim çarpanı: $f_a = \int e^{-i\vec{\Delta k} \cdot \vec{r}_e} n_a(r_e) dV$
- $|\psi|^2$ 'nin en büyük değeri, $\vec{\Delta k} \cdot \hat{a} = h(2\pi)$; $\vec{\Delta k} \cdot \hat{b} = k(2\pi)$; $\vec{\Delta k} \cdot \hat{c} = l(2\pi)$ olduğunda sağlanır.

- Ters örgü taban vektörleri: $\hat{a}^* = \left(\frac{2\pi}{\hat{a} \cdot (\hat{b} \times \hat{c})} \right) (\hat{b} \times \hat{c})$; $\hat{b}^* = \left(\frac{2\pi}{\hat{a} \cdot (\hat{b} \times \hat{c})} \right) (\hat{c} \times \hat{a})$;
 $\hat{c}^* = \left(\frac{2\pi}{\hat{a} \cdot (\hat{b} \times \hat{c})} \right) (\hat{a} \times \hat{b})$
- Bloch fonksiyonu: $\psi_k(x) = \varphi_k(x) e^{ikx}$
- Dalga vektörünün $k = \pm \frac{\pi}{a}, \pm \frac{2\pi}{a}, \dots$ gibi değerlerinde enerjide (E) atlamalar gözlenir.
- Etkin kütle $m_e^* = \frac{h^2}{\left(\frac{\partial^2 E}{\partial k^2} \right)}$ olarak tanımlanır.

4.9. Sorular

- 4.1) xy düzlemine yerleştirilen **a**- \hat{a} , **b**- \hat{b} , **c**- \hat{c} , **d**- \hat{d} , **e**- \hat{e} simgelerinin ve **f**- tabanı xy düzlemine dayandırılmış bir yarım küre ile **g**- uzun ekseninin ortasından bu ek-sene dik olarak kesilmiş tabanı xy düzlemine dayandırılmış bir Amerikan futbolu topunun, **h**- **g**'deki topun hiç kesilmemiş halinin x , y ve z eksenleri çevresindeki simetri durumlarını belirtiniz.
- 4.2) X -ışınları da elektromanyetik dalgaların bir çeşidi olduklarından, onlar da foton-lardan oluşmuşlardır. Dalgaboyu 1.40 \AA olan bir x ışını demeti, atom katmanları arasındaki uzaklık 0.25 nm olan bir kristale yatayla 40° lik bir açı yapacak şekilde yollanıyor. Kristalden yansıyan demet(ler)in şiddetinin en büyük değerini alabil-mesi için kristalin hangi açı(lar) ile döndürülmesi gerekir?
- 4.3) Bir kristaldeki örgü sabiti $[001]$ yönünde 1 \AA , $[010]$ yönünde 1.5 \AA ve $[001]$ yönünde de 1.8 \AA ise bu kristalde **a**- $[110]$ ve **b**- $[111]$ yönlerindeki örgü sabitleri nelerdir?
- 4.4) Enerjinin $E = Ak^n$ (A ve n birer sabit) biçiminde tanımlandığı bir durum için taşı-yıcının etkin kütlelerini bulunuz.
- 4.5) $\left| \frac{\Delta k}{k} \right|$ oranını $\frac{1}{2}$ yapan açı değerleri nedir?

5.

İstatistiksel Fizik

19. yüzyılda fiziğin, ısı konularıyla uğraşan termodinamik dalı bir bilim haline gelmişti ve çeşitli öncüler tarafından üzerinde çalışılmaktaydı. Daha sonra ışın atomik boyutu da anlaşıldıkça konuya sırasıyla biri çok büyük, öteki çok küçük ölçekte yaklaşmaya çalışan iki farklı disiplin oluştu. Aslında çok daha geniş kapsamlı olmakla birlikte, bu bölümde ana çizgileriyle ve bunu izleyen bölümlerde bizi daha çok ilgilendirecek yanlarını ele almaya çalışacağımız *istatistiksel fizik* dalının amacı da bu büyük ve küçük ölçekli evrenler arasındaki bağlantıyı sağlamak, bir bakıma termodinamikle kuantum mekaniği arasında bir tür köprü kurmaktır. Bizim bu kipteki amaçlarımızdan biri de en önemli parçacıklar olan elektron ve ışık taneciği olan fotonun davranışlarını açıklamaya çalışmak olduğundan ve bunlar da belirli birtakım istatistiksel dağılımlara uyduklarından, bu bölümde en basitten başlayarak bu dağılımlara ulaşmaya çalışacağız.

5.9. Özet

- Bir grup verinin ortalaması: $\langle x \rangle = \frac{1}{N} \sum_{n=1}^N a_n x_n = \frac{1}{N} (a_1 x_1 + a_2 x_2 + \dots + a_N x_N)$
- Verilerin ortalamadan ne kadar dağıldığının bir ölçüsü olan standart sapma:
$$\sigma = \Delta x = \sqrt{\frac{1}{N} \sum_{i=1}^N (x_i - \langle x \rangle)^2} = \sqrt{\langle x^2 \rangle - \langle x \rangle^2}$$
- Gauss eğrisi:
$$n(b) = \frac{1}{\sigma \sqrt{2\pi}} \exp \left[-\frac{(b - \mu)^2}{2\sigma^2} \right]$$
- Rastgele yürüme modelinde atılan $N (= n_{\rightarrow} + n_{\leftarrow})$ adımın n_{\rightarrow} kadarını sağa, n_{\leftarrow} kadarını da sola atmanın toplam yolu:
$$\Omega_N(n_{\rightarrow}) = \frac{N!}{(n_{\rightarrow})!(n_{\leftarrow})!} (p)^{n_{\rightarrow}} (q)^{n_{\leftarrow}}$$
- İki ters yön arasında fark yoksa ve sonunda net olarak m 'ye varılıyorsa:
$$\Omega_N(m) = \frac{N!}{\left(\frac{N+m}{2}\right)! \left(\frac{N-m}{2}\right)!} \left(\frac{1}{2}\right)^N$$

- Bir yöndeki adımların ortalaması: $\langle n_{\rightarrow} \rangle = p \frac{\partial}{\partial p} (p+q)^N = pN(p+q)^{N-1}$
- *Stirling* yaklaşıklığı: $\ln N! \cong N \ln N - N$
- Entropi için *Boltzmann* bağıntısı: $S = k_B \ln \Omega$
- Belirli bir topluluktaki dağılımın toplam parçacık sayısı durum yoğunluğu ile her düzeyin doldurulabilme olasılığının çarpımlarını toplayarak bulunur:

$$n = \int D(E) f(E) dE$$

- *Fermi* enerjisinin üç boyuttaki izinli kuantum sayılarıyla ilişkisi:

$$E_F = \frac{\hbar^2}{2m_e^*} \left(\frac{\pi}{L} \right)^2 n^2 \quad (n^2 = n_x^2 + n_y^2 + n_z^2); \quad E_F = \frac{\hbar^2}{2m_e} \left(\frac{3\pi^2 N}{V} \right)^{2/3} \quad (L^3 = V)$$

- Temel istatistiksel dağılım fonksiyonları: **i-** *Maxwell-Boltzmann* (MB), **ii-** *Fermi-Dirac* (FD), **iii-** *Bose-Einstein* (BE) dağılımı. $n_j = b_j e^{\alpha - \beta E_j}$

- Bölüşüm fonksiyonu: $Z = \sum_{i=1}^n \exp(-\beta E_i) = \sum_{i=1}^n \exp\left(-\frac{E_i}{k_B T}\right)$

- Ortalama enerji ile bölüşüm fonksiyonunun ilişkisi: $\langle E \rangle = -\frac{\partial}{\partial \beta} \ln Z$

- Bir manyetik alana sokulmuş paramanyetik örneğin dipol momenti: $\langle \mu \rangle = \mu \tanh(\mu H / k_B T)$

- *Fermi-Dirac* (FD) Dağılımı: $\frac{n_j}{b_j} = f(E_j) = \frac{1}{e^{[(E_j - E_F)/k_B T]} + 1}$

- *Bose-Einstein* (BE) Dağılımı: $f(E) = \frac{1}{\exp\left(\frac{E - \mu}{k_B T}\right) - 1}$

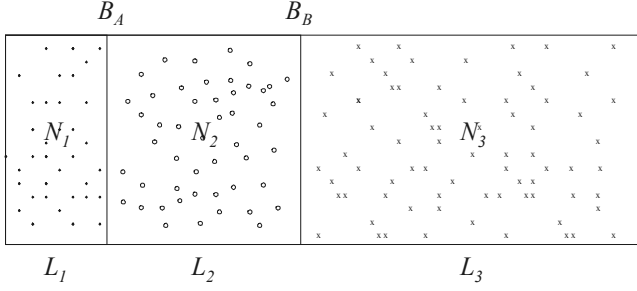
5.10. Sorular

- 5.1) Üstüste **a)** 4 tura, **b)** 3 yazı atma olasılığı nedir?
- 5.2) **a)** Aşağıdaki şekilde görülen ve 5 sütun ile 4 sıradan oluşan matris biçimindeki bölgenin bir yanında duran ve her sırasında 1 mayın bulunan bu alanın içerisinde karşıya geçmek durumunda olan bir yarışmacı için kazanma, yani karşıya sağ ulaşabilme olasılığı nedir? **b)** Bu alanın 4 sütun ve 3 sıradan oluştuğunu, ancak her sırada bu kez 2 mayın bulunduğunu varsayarak, karşıya vurulmadan geçme olasılığını bulunuz. Seçme olanağı bulunsaydı, oyuncunun hangi seçeneği izlemesi daha akıllıca olurdu?

B				
?				
		?		
			?	
	?			
A				

B			
		?	?
?		?	
	?	?	
A			

- 5.3)** Kuşkusuz hiç önerilmeyen ve bilinçli bir insana yakışmayan, ancak eski çağlarda uygulandığı bilinen ve *Rus ruleti* adı verilen olayda bir grup insan sırayla diziliyor ve bunlardan birincisi boş bir tabancaya *tek* bir kurşun koyarak 6 yuvadan oluşan silindirik bölümü rastgele çevirdikten sonra da başına ateş ediyordu. Eğer o ölmezse sıradaki kişi tabancayı alıp, mermi yuvasını *yeniden çevirip* denemesini (!) yapıyor ve bu süreç tabanca patlayana dek sürüyordu. Tabancada 6 mermi yuvası olduğunu varsayarak, böyle bir sözümona oyunda **a)** birinci, **b)** ikinci, **c)** yedinci kişinin *sağ kalma* olasılığını bulunuz. **d)** Kaçınıcı kişiden sonra tabancayı eline alan birinin vurulma ve sağ kalma olasılıkları hemen hemen eşitlenir?
- 5.4)** Rastgele yürüme – 3 yüzü sarı (S) ve 3 yüzü kırmızı (K) renge boyanan bir zarın 10 kez atılması sonucunda en az 6 (S) gelmesi durumu ile bu kez 4 yüzü (S) ve 2 yüzü (K) boyanmış olan bir başka zarın yine 10 kez atılması sonucunda şimdi en az 7 (S) gelmesi durumunun olasılıklarını karşılaştırarak daha kazançlı görüneni bulunuz.
- 5.5)** Düz bir yolda toplam 10 adım atan birinin, bu adımlardan **a)** 5'ini öne, 5'ini arkaya, **b)** 6'sını öne 4'ünü arkaya ve **c)** 7'sini öne 3'ünü arkaya atmasının olasılıklarını tek tek bulup karşılaştırınız.
- 5.6)** **a)** İki boyutlu (düzlemde) gerçekleşecek bir rastgele yürüme olayında başlangıç noktasından belirli bir *b* uzaklığına gitmek için ortalama uzunluğu *L* olan ve herbiri öncekilerden bağımsız olarak her yönde atılabilecek olan adımlardan kaç tane atmak gerekir? **b)** Metre cinsinden (0,0) ile gösterilen başlangıç noktasından, ortalama adımı 1 metre olan bir yetişkinin (3,4) konumuna, **c)** 0.5 metrelik adım atabilen bir çocuğun (-6,2) konumuna ortalama kaç adım sonunda ulaşabileceklerini bulunuz.
- 5.7)** Bir odadaki *N* tane masanın herbirinde, içerisinde *S* tane sarı, *K* tane kırmızı top bulunan birer kapalı kutu ve birer yarışmacı vardır. Çekilişler aynı anda yapılacak ve kutusundan bir kez kırmızı top çeken yarışmacı salondan ayrılacaktır. Sarı top çekerse bunu yeniden kutuya koyacak ve bir sonraki çekilişi bekleyecektir. *T* sayıda çekiliş sonunda odada kimsenin kalmama olasılığı nedir?
- 5.8)** Düzgün kesitli bir kap birbirinden, sızdırmaz ama istendiğinde açılabilir K_A ve K_B kapakçıklarıyla yalıtılmış üç bölümden oluşuyor ve bu bölümlerin herbirinde üç değişik türde ve sırasıyla N_1 , N_2 , N_3 sayıda parçacık bulunuyor. **a)** Önce K_A sonra K_B ve **b)** önce K_B sonra K_A kapakçıklarının kaldırılması halinde toplam entropinin ne kadar değişeceğini (sırasıyla $\Delta S_{K_A K_B}$ ve $\Delta S_{K_B K_A}$) bulunuz.



- 5.9) Bir Einstein katısının 6 harmonik salıncısı ve 4 birimlik enerjisi vardır. **a)** Olası mikrodurumları ve çarpanları yazınız, **b)** mikrodurumları olabildiğince azaltmak istiyorsanız, salıncı sayısını mı, yoksa enerji toplamını mı 1 eksiltirsiniz? **c)** Şimdi bu katı ilkiyle özdeş (aynı sayıda salıncı ve enerji birimi bulunduran) ikinci bir sistemle dengeye getiriliyor. İki Einstein katısından oluşan bu sistemin makrodurumlarını ve çarpanlarını yazıp, en olası durumu gösteriniz.
- 5.10) $E_1 = \varepsilon$, $E_2 = 2\varepsilon$ ve $E_3 = 3\varepsilon$ gibi üç enerji düzeyinden oluşan basit bir sistemin herbir i 'inci enerji düzeyinde $n_i = i^2$ bağıntısına uyan sayıda parçacık bulunmaktadır. Bu sistem için **a)** toplam enerji E_T 'yi, **b)** parçacık başına ortalama enerji $\langle E \rangle$ 'yi, ve **c)** sistemin entropisi S 'yi bulunuz.
- 5.11) Herhangi bir kutuya birden fazla top konamayacağını varsayarak, N tane topun yine N tane kutuya kaç farklı şekilde yerleştirilebileceğini bulunuz.
- 5.12) Bir manyetik dipol momentinin (μ), kendisine bir B manyetik alanı uygulandığında edineceği enerji $U = \pm\mu H$ olur ($\theta = 0$ için $-$, $\theta = \pi$ için $+$ seçilir). **a)** Toplam N tane böyle dipol momentini içeren bir kristaldeki momentlerin $1/3$ 'ünün alanla aynı yönde, $2/3$ 'ünün ters yönde dizileceği sıcaklığı bulunuz. **b)** Bu durumda kristalin toplam enerjisi ne olur?

6.

Katıların Isıl Özellikleri

Deneyle uyum ancak kuantum kavramlarının işe katılmasıyla sağlanabildiğinden, izleyen kesimlerde önce harmonik salıncıya dönüp, sonra aslında birer titreşim olan ses dalgalarının kuantum birimi olan fonondan söz edecek, daha sonra da örgünün ısı iletkenliğine değineceğiz. Kristaldeki sıcaklık farkından kaynaklanan *Seebeck* olayını görüp, ısı sığasının sıcaklıkla değişimini anlamak için *Einstein* ve *Debye* modellerini incelemenin ardından, önce tek türde sonra iki türde atomlardan oluşan kristallerde sapma bağıntılarını çıkaracağız.

6.12. Özet

$$\text{Isı sığası: } C = \frac{\partial E}{\partial T} = 3R$$

$$\text{Eşbölüşüm kuramı: } \left\langle \frac{1}{2}mv_x^2 \right\rangle = \left\langle \frac{1}{2}kx^2 \right\rangle = \frac{k_B T}{2}$$

$$\text{Einstein modelinde enerji: } E_n = \left(n + \frac{1}{2} \right) \hbar \omega \quad (n = 0, 1, 2, \dots)$$

$$\langle E \rangle = \frac{\sum_{n=1}^{\infty} (n\hbar\omega) \exp\left(-\frac{n\hbar\omega}{k_B T}\right)}{\sum_{n=1}^{\infty} \exp\left(-\frac{n\hbar\omega}{k_B T}\right)} \Rightarrow \langle E \rangle = \frac{\hbar\omega}{\exp\left(\frac{\hbar\omega}{k_B T}\right) - 1}$$

$$\text{Kristalde toplam enerji: } E = \int_0^{\omega_D} \langle E(\omega) \rangle D(\omega) d\omega$$

$$\text{Toplam atom sayısı: } N = \int_0^{\omega_D} D(\omega) d\omega = N_A$$

$$\text{Debye frekansı: } \omega_D = v_s (6\pi^2 n)^{1/3}$$

$$\text{Isıl iletkenlik: } j_{\text{ısı}} = -K \frac{dT}{dx}$$

$$\text{Fononun enerjisi ve momentumu: } E = \hbar\omega \quad ; \quad \vec{p} = \hbar\vec{k}_{\text{fon}}$$

Metallerde ve yalıtkanlarda ısıl iletkenlik katsayısı:

$$\kappa = \kappa_{\text{örgü}} + \kappa_{\text{elek}} \text{ (metal) ; } \kappa \cong \kappa_{\text{örgü}} \text{ (yalıtkan)}$$

Seebeck katsayısı: $S = \frac{dV}{dT}$

Birim uzunluk başına olan uzunluk değişimi olan gerginlik: $\varepsilon = \frac{\Delta L_x}{L_x}$

Kristale uygulanan gerilimin dik kesite oranı olan gerilme: $\sigma = \frac{F}{A} = \frac{F}{L_y L_z}$

Gerginlik ile gerilmenin oranı olan *Young* modülü:

$$Y = \frac{\sigma}{\varepsilon} = \left(\frac{F}{L_y L_z} \right) \left(\frac{L_x}{\Delta L_x} \right)$$

Kristaldeki durum yoğunluğunun frekansla ve enerjiyle ilişkisi:

$$D(\omega) = \left(\frac{3V}{2\pi^2 v_s^3} \right) \omega^2 ; D(E) = \left(\frac{3N}{2E_F^{3/2}} \right) E^{1/2}$$

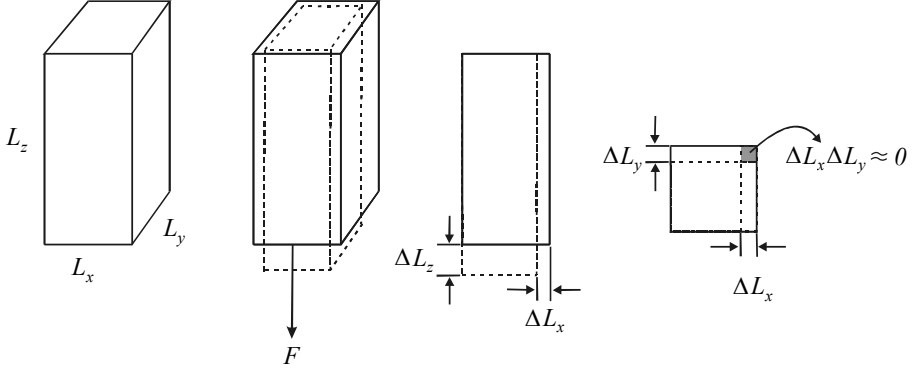
Tek tür atomlardan oluşan kristalde sapma bağıntısı: $\omega = \omega_0 \left| \sin \left(\frac{ka}{2} \right) \right|$

İki tür atomdan oluşan kristalde sapma bağıntısı:

$$\omega_{1,2}^2 = \beta \left(\frac{1}{m_1} + \frac{1}{m_2} \right) \mp \beta \sqrt{\left(\frac{1}{m_1} + \frac{1}{m_2} \right)^2 - \frac{4 \sin^2(ka)}{m_1 m_2}}$$

6.13. Sorular

- 6.1) İki ve üç boyutlu metal örneklerinin sıcaklıklarında ΔT kadarlık bir değişim olmasının sonucunda cisimlerin boyutlarındaki değişiklikleri çıkarınız.
- 6.2) Elimizde boyutları $L_x \times L_y \times L_z$ olan bir tel bulunduğunu ve bu tele bir yönde bir F kuvvetinin uygulandığını varsayalım. Hangi koşulda, telin son hacminin ilk hacminden büyük olacağını bulunuz.



- 6.3)** Tek türde atomlardan oluşan bir örgüde sapma bağıntısından yararlanarak dalganın grup hızının $k = \pi/a$ değerinde sıfır olacağını gösteriniz.
- 6.4)** (6.61) denklemini tek tür atom için yazsaydık, bunun denklem (6.56)'ya dönüşeceğini gösteriniz.
- 6.5)** **a)** İki atomlu 1-B bir örgüden ses dalgalarının geçtiklerini, ama kütlelerden biri $m_1 = m$ iken, ötekinin birinciye göre çok büyük olduğunu ($m_2 = nm$, $n \gg 1$) varsayarak $\omega_{optik} - \omega_{akustik}$ farkını hesaplayınız. $\omega_{optik} = 2\omega_{akustik}$ koşulunu sağlayan k değerini **b)** $n = 10$ ve **c)** $n = 1/2$ durumlarında bulunuz.
- 6.6)** Bir kenarı 1 cm olan küp şeklindeki bir bakır örneği içerisinde bulunan (özgür) elektron gazı için **a)** n_x , n_y , n_z 'den birinin alabileceği, **b)** bunlardan ikisinin eşit olması halinde alabilecekleri en büyük olası değeri bulunuz. **c)** Bu durumlarda hızlar ne kadardır? (Bakırın $T = 0$ K'deki *Fermi* enerjisi 7 eV'dur).
- 6.7)** *Fermi* enerjisi 11.6 eV olan alüminyumun elektron yoğunluğu nedir?
- 6.8)** *Einstein* kristalinin sıcaklığında oluşacak %n kadarlık ($n < 10$) bir artışın ortalama enerjide neden olacağı % değişimini hesaplayınız.

7.

Metallerin Özellikleri

Bu bölümde yalıtkanlar, iletkenler (metaller) ve yarıiletkenlerden oluşan elektronik gereçlerin genel bir tartışmasını sunmaya çalışacağız. Maddelerin iletkenlik dışında hiçbir özellikleri bu kadar geniş bir yelpazeye yayılmamıştır. Bir başka deyişle, doğada iletkenliğin dışında hiçbir fiziksel özelliğin iki aşırı ucu, yani karşılaşılabilecek en büyük ve en küçük değerleri arasında yaklaşık 10^{18} - 10^{20} katlık bir oran yoktur. Ama “iletkenler şurada biter ve artık yalıtkanlar başlar” denebilecek keskin bir sınır da yoktur. Bu bölümde önce gazların dinamiğinden de yararlanıp, metal bir kristaldeki akım taşıyıcılarının davranışlarını kapalı kaptaki gaz atomlarına benzeterek iletkenliği hesaplamaya çalışacağız.

7.10. Özet

Ortalama özgür yol: $\lambda = v_s \tau$

Kristal ortamındaki bir elektronun hızı: $v_s = \frac{eE\tau}{m} (1 - e^{-t/\tau})$

Akım yoğunluğu: $j = ne\langle v_s \rangle = ne \left(\frac{\tau e E_x}{m_e} \right)$

Ohm yasası: $j = \sigma E$

Hareket yeteneği: $v = (\mu)E \quad (\mu = \frac{\tau e}{m_e})$

Matthiessen yasası: $\frac{1}{\mu_s} = \frac{1}{\mu_L} + \frac{1}{\mu_I} \quad ; \quad \rho = \frac{1}{ne\mu_s} = \frac{1}{ne\mu_L} + \frac{1}{ne\mu_I} \quad ; \quad \rho = \rho_T + \rho_I$

Lorentz sabiti: $\frac{\kappa}{\sigma T} = C_{WFL}$

Hall katsayısı (elektronlar için): $R_H = \frac{E_H}{jB} = -\frac{1}{ne}$

Hall katsayısı (özden yarıiletkenler için): $R_H = \frac{p\mu_p^2 - n\mu_n^2}{e(p\mu_p + n\mu_n)^2}$

Fermi küresi kristaldeki elektronları enerji uzayında temsil eder. En enerjik olanlar kürenin yüzeyinde yer alırlar.

$$\text{Durum yoğunluğu: } D(E) = \frac{1}{2\pi^2} \left(\frac{2mE}{\hbar^2} \right) \left(\sqrt{\frac{2m}{\hbar^2 E}} \right) = \frac{1}{2\pi^2} \left(\frac{2m}{\hbar^2} \right)^{3/2} (E)^{1/2}$$

7.11. Sorular

- 7.1) *Yüzey merkezli kübik* (YMK) atom yapısının yüzeyce doluluk oranını **a)** [100], **b)** [110] ve **c)** [111] doğrultularında hesaplayınız.
- 7.2) Boyu L ve yarıçapı r olan bir telin direncinin $R = \frac{m_e L}{ne^2 \pi r^2 \tau}$ olduğunu öğrendik. Bu telin şimdi, daha küçük kesit alanlı bir delikten çekilme nedeniyle, yarıçapı %5 azalrsa, bunun sonucunda yeni direncin eskisine göre %kaçlık artma ya da azalma göstereceğini hesaplayınız.
- 7.3) Akım yoğunluğunun $j = j_0 e^{-r}$ (j_0 bir sabit) ile verildiği a yarıçaplı bir silindirik bir telden geçen toplam akım I_T nedir?
- 7.4) Akım yoğunluğunun $j = j_0 r$ (j_0 bir sabit) ile verildiği a yarıçaplı bir silindirik bir telin ekseninden hangi yarıçapına kadar ki küçük silindirin içerisinden toplam akımın yarısı geçmektedir?
- 7.5) Özden bir yarıiletken için *Hall* katsayısını veren formülden **a)** n -tipi ve **b)** p -tipi yarıiletkenler için kullanılan bağıntılara ulaşınız.
- 7.6) **a)** *Fermi-Dirac* dağılımına uyan bir sistemde E_1 ve E_2 enerjilerine sahip elektronlara rastlama olasılığı sırasıyla 0.4 ve 0.6 ise, $E_1 - E_2$ nedir?. **b)** Eğer herhangi bir E enerjisi ve T sıcaklığında bir elektrona rastlama olasılığı, aynı E ve T değerlerinde bir boşluğa rastlama olasılığının s katı ise, $E = E_F - k_B T \ln s$ olduğunu gösteriniz.
- 7.7) *Fermi* düzeyi E_F 'nin küçük bir ΔE kadar üzerindeki bir enerjiye sahip bir elektronun bulunma olasılığı p ise, E_F 'nin aynı ΔE kadar altında enerjisi olan bir elektrona rastlama olasılığı p' nedir?
- 7.8) Elektronların ortalama özgür yolunun yaklaşık 10 Å olduğunu varsayarak, oda sıcaklığındaki bir metal için, 15 V/cm'lik bir elektrik alanında, **a)** hareket yeteneğini, **b)** sürüklenme hızını bulunuz.

8.

Yarıiletkenler

Maddeleri başka birtakım özelliklerine göre olduğu gibi gerek endüstriyel, gerekse günlük yaşamdaki işlevleri açısından üç sınıfa ayırabiliriz: **i-** İletkenler, **ii-** yalıtkanlar, **iii-** yarıiletkenler. Elbette ilk iki gruptakiler sırasıyla, adlarından da anlaşılacağı gibi elektriksel aygıtlarda akımın kolayca iletilmesi ve biz kullanıcıların bu aygıtlardan yararlanırken akıma kapılmamız için çok önemlidirler. Ama son gruptaki yarıiletkenler de bunlardan aşağı kalmayıp belki daha da önemli işlevler yürütürler. Çünkü özellikle 20. yüzyılın ikinci yarısına doğru elektronikte gelişmeler ortaya çıktıkça yeni yeni aygıtlar önce örnek halinde tanıtıldı, sonra da kısa süre içinde toplumun genel kullanımına sunuldu. Bu bölümde incelemeye çalışacağımız yarıiletkenler genelde düşük sıcaklıklarda ya da karanlıkta yalıtkan davranışı gösterip, sıcaklığın artması, üzerine belirli bir frekansta ışık düşürülmesi, bir elektrik alanına sokulması sonucunda iletkene yakın davranan geçişlerdir. En önemlisi de artık uygarlığın önemli parçalarından biri olan görüntülü/görüntüsüz iletişim araçları, bilgisayarlar vb bunların üzerine dayanmaktadır.

8.10. Özet

Atomlar bir kristali oluşturmak üzere birbirlerine yaklaşıldıkça dalga fonksiyonları, biri bağ yapan (ψ_σ), öteki bağ yapmayan (ψ_{σ^*}) olmak üzere ikiye ayrışmaya başlar. Bunun sonucunda da kristalde kuşaklar (bantlar) oluşur. Enerji açısından daha altta olana değerlik bandı, üsttekine de iletim bandı denir. Bu iki kuşağın arasında ise genelde elektronların sahip olamayacakları enerji değerlerinin olduğu yasa enerji aralığı denen bölge bulunur. İletim kuşağının en alt değeri E_C , değerlik kuşağının en üst değeri E_V ile gösterilir.

Kristaldeki elektron yoğunluğu:

$$n = 2 \left(\frac{m_e^* k_B T}{2\pi\hbar^2} \right)^{3/2} \exp\left(\frac{E_F - E_g}{k_B T} \right) \quad n = N_C \exp\left(\frac{E_F - E_g}{k_B T} \right)$$

Kristaldeki boşluk yoğunluğu:
$$p = 2 \left(\frac{m_h^* k_B T}{2\pi\hbar^2} \right)^{3/2} \exp\left(-\frac{E_F}{k_B T} \right)$$

$$p = N_V \exp\left(-\frac{E_F}{k_B T} \right)$$

İletkenlik: $\sigma = ne\mu_e + pe\mu_h = n_i e(\mu_e + \mu_h)$

$$\text{Fotoiletkenlik: } \Delta p(t) = G\tau_h + \Delta p(0)\exp\left(-\frac{t}{\tau_h}\right)$$

$$\text{Fick yasası: } J = -D\frac{\partial n}{\partial x}$$

$$\text{Yayılmının sonucunda dağılım: } n' = B\exp\left(-\frac{x}{L_y}\right) = n(0)\exp\left(-\frac{x}{L_y}\right)$$

8.11. Sorular

- 8.1)** **a-** Bir kenarı 1 cm olan bir küp şeklindeki özden bir silikon kristalinin direncini hesaplayınız. **b-** Şimdi bu kristalin borla yirmi milyonda bir ($1/(2 \times 10^7)$) oranında katkılandırıldığını varsayarak, yeni direnci ve bunun özden durumdaki dirence oranını bulunuz. Silikonun atomik yoğunluğu $5 \times 10^{22} \text{ cm}^{-3}$, $n_i \cong 1.5 \times 10^{10} \text{ cm}^{-3}$, elektronların ve boşlukların hareket yetenekleri sırasıyla $\mu_e = 1350 \text{ cm}^2/\text{V s}$ ve $\mu_h = 450 \text{ cm}^2/\text{V s}$ 'dir.
- 8.2)** Durum yoğunluğunun enerjisiyle doğrusal olarak değiştiği sanal bir yarıiletken için, enerjinin *Fermi* düzeyinden farkı olan $E - E_F$ 'nin ısı enerjisi olan $k_B T$ 'ye göre çok büyük olduğu ($(E - E_F) \gg k_B T$) durumda taşıyıcı yoğunluğu n' 'yi bulunuz.
- 8.3)** Eğer örgü sabiti $a = 0.57 \text{ nm}$ ve boşluk mobilitesi $\mu_n = 8800 \text{ cm}^2/\text{Vs}$ alınırsa, *GaAs*'in **a-** *Ga* yerine *P* atomlarıyla ($1/10^7$ oranında) ve **b-** *As* yerine *P* atomlarıyla (yine $1/10^7$ oranında) katkılanması durumunda iletkenliği ne olur?
- 8.4)** Yasak enerji aralığı 1.1 eV olan silikon bir yarıiletken hangi sıcaklığa getirilirse direnci 23°C 'deki değerinin **a-** iki katına çıkar? **b-** yarısına iner? ($k_B = 8.6 \times 10^{-5} \text{ eV/K}$).
- 8.5)** Yasak enerji aralığı sırasıyla 1 eV (*A*), 2 eV (*B*), 3 eV (*C*) olan üç yarıiletkenin özgür akım taşıyıcılarının 300 K sıcaklığında birbirine oranı nedir?
- 8.6)** Bir yarıiletkenin iletim kuşağındaki elektronların en olası enerji değeri nedir?
- 8.7)** Işığa duyarlı özden bir yarıiletken için akım taşıyıcılarının yoğunluğunun $\frac{dn}{dt} = L - (Ap)n - Bn$ (L örneğe düşürülen ışık şiddetini gösteriyor, A ve B sabitler) ile değiştiğini ve L 'nin değerinin görece **a-** küçük, **b-** büyük olduğunu varsayarak n' 'nin değerini hesaplayınız.

9.

Yarıiletken Aygıtlar

Katıhal fiziğinin en önemli uygulama alanlarından biri yarıiletken gereçlerin kullanıldığı elektronik devrelerini içeren aygıtlardır. Bundan önceki bölümlerde çalışma ilkelerini incelemeye çalıştığımız öğelerin endüstride çok yoğun olarak kullanılan aygıtlara dönüşümünü, bu bölümde en azından bu aygıtların en temelleri üzerinden görmeye çalışacağız. İçinde bulunduğumuz 21. yüzyıldaki bütün bu elektronik gelişmelerin temelinde yatan iki çok önemli parça olan “*diyot*” ve “*transistör*” ile fiziksel ilkeleri geçtiğimiz yüzyılın başlarında anlaşılacakla birlikte somut bir ürün olarak ortaya çıkması 1960 yılını bulan “*lazer*” burada üzerinde duracağımız temel parçalar olacak. Ama işe öncelikle bu parçaların ilk ikisi için çok önemli olan “*p-n*” eklemiyle başlayalım.

9.8. Özet

p-n eklemindeki yük yoğunlukları için *Poisson* denklemi: $\frac{d^2V}{dx^2} = -\frac{\rho}{\epsilon}$

Sınır koşulları: $\frac{dV}{dx} = -\frac{\rho_p}{\epsilon}(x + L_p)$; $\frac{dV}{dx} = \frac{\rho_n}{\epsilon}(L_n - x)$

Eklemin her iki yanındaki yükler eşittir: $N_a L_p = N_d L_n$

Azınlık taşıyıcılarının yoğunluğunun çoğunlukta olanlarına oranı:

$$\frac{n_p}{n_n} = \exp\left(-\frac{e(V_0 \pm V)}{k_B T}\right)$$

(ekleme dışarıdan besleme uygulanmazsa $V = 0$, ileri beslemede (-), ters beslemede (+)).

Yasak enerji aralığı E_g kadar olan bir yarıiletken enerji en az bu kadarlık bir foton ($h\nu = E_g$) yollanması durumunda gelen bu foton kendi yok olurken, değerlik kuşağından bir elektronun iletim kuşağına geçmesini, aynı zamanda yerinde de bir boşluk bırakarak iletkenliğe katkıda bulunmasını sağlar.

Tersine, eğer iletim kuşağında bulunan bir elektron değerlik kuşağındaki bir boşlukla birleşirse, o zaman da enerjisi yasak enerji aralığı kadar olan bir foton ortama salınır.

Diyotlarda gerilim-akım bağıntısı: $I = I_0 \left(e^{eV/k_B T} - 1 \right)$

Transistördeki yayıcı (E), taban (B) ve toplayıcı (C) akımları arasında $I_E = I_B + I_C$ bağıntısı geçerlidir.

Transistörde toplayıcı akımının taban akımına oranı: $h_{FE} = \beta = \frac{I_C}{I_B}$

Lazerde enerji yoğunluğu: $e_\nu = \frac{(A_{21} / B_{21})}{(N_1 B_{12} / N_2 B_{21}) - 1}$

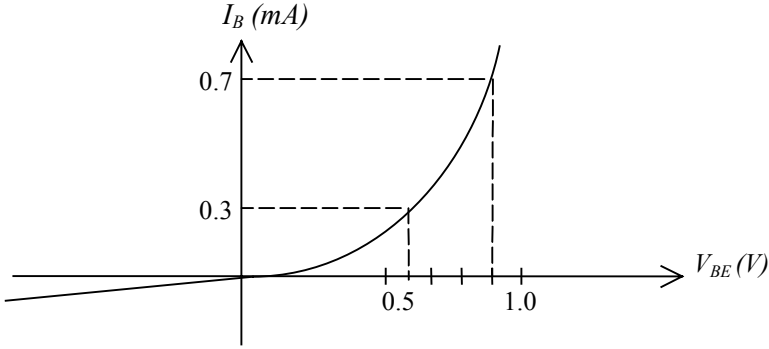
Kendiliğinde salınma ile uyarılmış salınma arasındaki bağıntı:

$$R = \frac{N_2 A_{21}}{N_2 B_{21} e_\nu} = \frac{8\pi h\nu^3}{e_\nu c^3} = \exp\left(\frac{h\nu}{k_B T}\right) - 1.$$

Soğurucu bir ortama yollanan bir demetin şiddeti: $I(x) = I(0)e^{-\alpha x}$.

9.9. Sorular

- 9.1) Bir diyodun -2 V'luk gerilim altında ve oda sıcaklığında geçireceği akım 0.2 mA'dir. Bu diyodun +0.4 V gerilim uygulandığında **a-** oda sıcaklığında, **b-** bir Ay gecesinde -100 °C'lik soğukta geçireceği akımları bulunuz.
- 9.2) 10 K'lık bir direnç tümleşik bir devrede (IC) kullanılmak üzere ($5 \times 20 \times 800$) μ m boyutlarında ve *n*-tipi silikondan üretiliyor. Yapılması gereken katkılamanın oranını bulunuz.
- 9.3) Transistörde akım aktarım oranı $\beta = \alpha / (1 - \alpha)$ 'dır. α 'nın değerinde oluşacak %1'lik bir artışın β 'nin değerinde % kaçlık bir değişime neden olacağını bulunuz.
- 9.4) Örnek-9.3'deki devrede kullanılan transistör için $\beta = 60$ ve $I_{CE0} = 1$ nA, gerilim kaynağını 30 V, direnci de 500 ohm alarak, giriş geriliminin **a-** 0.2 V, **b-** 0.6 V olması durumlarında çıkış gerilimini bulunuz.



- 9.5) **a-** Dalgaboyu 660 nm olan bir ışınım için, hangi sıcaklıkta ‘uyarılmış salınma’ ‘kendiliğinden salınma’ nın on katı olur? **b-** Aynı sistemin oda sıcaklığında olması durumunda, hangi dalgaboyunda ‘uyarılmış salınma’ ‘kendiliğinden salınma’ nın üçte biri olur?
- 9.6) Soğurucu bir ortama yollanan ışınımın şiddeti her santimetrede %3 oranında azalıyor. Girişten hangi uzaklıkta ışınımın şiddeti en büyük değerinin **a-** %90’ına, **b-** %37’sine iner?
- 9.7) Oda sıcaklığında, 0.2 V’luk ters besleme uygulanan bir *p-n* eklem diyodundan $9 \mu A$ ’lik bir akım geçerse, **a-** 0.4 V’luk ters, **b-** 0.2 V’luk doğru ve **c-** 0.4 V’luk doğru besleme durumlarında ne akım geçer?

10.

Kutuplanma

Gereçleri elektriksel iletkenlik açısından iyiden kötüye doğru sıraladığımızda, önce metallerin, sonra yarıiletkenlerin, en sonra da yalıtkanların geldiğini biliyoruz. Hem elektriksel, hem de ısı bakımından iyi iletkenler olan metaller bu özelliklerini büyük ölçüde, içlerinde hemen her sıcaklık derecesinde özgür şekilde dolaşabilen elektronlara ve örgü titreşimlerine (fononlara) borçludurlar. Metallerin elektrik ve ısı iletimindeki, yarıiletkenlerin de elektronik aygıtlardaki görevlerini değerlendirirken, yalıtkanları da küçümsemeyelim. Çünkü onlar doğada bulunmasaydı ne çarpılmadan elektrikli bir gereci kullanabilecek ne de sıcak nesnelere yanmadan (kimi zaman da çok soğuk cisimleri donmadan) tutabilecektik. İletimin çok düşük, hatta sıfıra yakın olduğu yalıtkanlarda elektronların neredeyse tamamı kendi atomlarına oldukça sıkı biçimde bağlı olduklarından, madde içerisinde özgürleşip bir uçtan ötekine elektrik akımını ya da ısı enerjisini taşıyamazlar. Ama iletken deşiller diye de bunlara bir elektrik alanı uygulandığında hiçbir şey olmayacağı sanılmasın. Bu bölümde yalıtkanların içlerinde ne gibi değişiklikler olacağını göreceğiz. Aslında kutuplanma ve manyetik özellikler yer yer birbirlerini andırdığından 10. ve 11. Bölümler arasında benzerlikler bulunmaktadır. Bu bölümde ayrıca kristallerdeki kusurları ve düzenli bir kristal yapı göstermeyen amorf gereçleri inceleyeceğiz.

10.11. Özet

Bir iki kutuplunun dipol momenti: $\vec{p} = q\vec{a}$

Tork: $\vec{\tau} = \vec{p} \times \vec{E}$

Potansiyel enerji: $U = -\vec{p} \cdot \vec{E} = -pE \cos \theta$

Kapasitördeki yalıtkan levhanın yalıtkanlık sabiti: $\epsilon_g = \frac{q}{q_0} = \frac{C}{C_0} > 1$

Kapasitördeki toplam kutuplanma: $P = \frac{\sum_{n=1}^N p_n}{V} = N \langle p \rangle$ (V hacim, N dipol momenti sayısı)

Bir atom için kutuplanma: $p = \alpha E$

Birim hacimdeki toplam kutuplanma: $\vec{P} = n\vec{p} = n(\alpha\vec{E})$

Bir ortamın yalıtkanlık ve optik özellikleri “*yer değiştirme*” (ya da akı yoğunluğu) vektörü \vec{D} : $\vec{D} = \epsilon_0 \vec{E}_{yerel} + \vec{P} = \epsilon_0 \vec{E}_{yerel} + n\alpha \vec{E}_{yerel}$

$$\vec{D} = \epsilon_0 \left(1 + \frac{n\alpha}{\epsilon_0} \right) \vec{E}_{yerel}$$

Kutuplanma türleri: **a-** *Elektronik*, **b-** *iyonik* ve **c-** *yönlü* kutuplanma.

Langevin bağıntısı: $L(x) = (\coth x - (1/x))$

Kristallerdeki kusurlar, bozukluklar, düzensizlikler *safsızlık*, *boşluk* ya da *arayer* atomlarıdır.

Kristaldeki boşluk yoğunluğu: $N_b \cong Ne^{-E_b/k_B T}$

Amorf bir yapıda bir elektronun bir atomdan, ondan $\langle R \rangle$ kadar uzakta ve enerji açısından

dan ΔE kadar yüksekte olan bir başkasına atlama olasılığı: $P \propto \left(e^{-\frac{a(R)}{k_B T}} \right) \left(e^{-\frac{\Delta E}{k_B T}} \right)$

Amorf yarıiletkenlerin değişken akım (ac) iletkenliği: $\sigma(\omega) \propto \omega^s$ ($s \cong 0.8$)

10.12. Sorular

10.1) Plakalarının alanı 1 cm^2 , aralarındaki boşluk 0.1 mm olan bir paralel plakalı kapasitörün sığasının yükselmesi için araya bir yalıtkan konuyor. Aradaki gerilim 15 V , ölçülen sığa da 2 nF ise **a-** içerideki elektrik alanını, **b-** kullanılan maddenin yalıtkanlık sabitini bulunuz.

10.2) *A* ve *B* elementlerinin atomlarının aralarındaki uzaklık 2.4 angström olacak şekilde bir araya geldikleri ve *AB* olarak gösterilebilecek bir bileşikte bir elektron *A* atomundan *B* atomuna tümüyle geçiyor. **a-** Bu *AB* molekülünün dipol momentini nedir? **b-** Eğer bu molekülün deneysel olarak ölçülen dipol momentini $5.4 \times 10^{-30} \text{ Cm}$ ise elektronun tamamının *A*'dan *B*'ye aktarıldığı söylenebilir mi?

10.3) Silikonda bir boşluk yaratmak için gereken enerji atom başına 2.4 eV 'dur. **a-** Oda sıcaklığında, **b-** $T = 1000 \text{ K}$ 'de silikon örneğindeki boşluk yoğunluğunu bulunuz. (Üretim sırasında, silikonun katkılanması genellikle böyle olur). Silikonun atomik kütlesi $M_{at} = 28.09 \text{ g/mol}$, yoğunluğu ise $\rho = 2.33 \text{ g/cm}^3$ dür.

10.4) Eğer bir kristaldeki kusurların, 100 kelvin sıcaklığındaki oranı $\% 0.1$ ise bu oran 300 kelvin sıcaklığında ne kadar olur?

10.5) Eğer akım taşıyan iletkenlerin yalıtımında kullanılan yalıtkan bir maddenin kritik elektrik alan değeri $1 \times 10^8 \text{ V/m}$ ise elektriğin kentten kente taşınmasında genelde seçilen 154 kV 'luk gerilimde, kullanıcıların çarpılmaması için tellerin bu yalıtkanla en az ne kalınlıkta kaplanması gerekir?

10.6) Örnek-10.7 ye göre **a-** $\frac{P_{AB}}{P_{BA}}$, **b-** $\frac{P_{AB}}{P_{AC}}$, **c-** $\frac{P_{CF}}{P_{FD}}$ oranlarını, **d-** önce *A*'dan *C*'ye sonra *C*'den *F*'ye geçmekle, *A*'dan *F*'ye doğrudan geçme olasılıklarının oranını hesaplayınız.

10.7) Yalıtkanlık sabitini (ϵ) alınganlık (χ) cinsinden yazınız.

11.

Manyetik Özellikler

Üstüniletkenlik

Bu bölümde, günlük yaşamın birçok bölümünde karşımıza çeşitli biçimlerde çıkan mıknatıslara ve böyle gereçlerin bu özelliklerinin nedenlerine göz atacağız. Kapı ziline çalmasından, dev transformatörlerin gelen yüksek gerilimi düşürerek (kimi zaman da düşük gerilimi yükselterek) evlere ulaştırmasına, makasların uçlarındaki mıknatıslık yeteneği yardımıyla yerdeki toplu iğneleri çekebilmesinden, elektronik aygıtlardaki kimi belleklerin bilgileri “0”lar ve “1”ler şeklinde saklamasına, buzdolabının kapağına yapıştırılan minik bir mıknatısla oraya bir fotoğraf ya da kâğıt parçasının tutturulmasından, hurda yığınları üzerinde gezdirilen dev mıknatısların bu yığınlardaki işe yarayabilecek demir parçalarını toplayıp yeniden kullanıma sokmasına, saç kurutma makinesinden, müzik dinlediğimiz hoparlörlere değin, pekçok alanda işimize yarayan, güçlü ya da zayıf, ama yetenekli olan bu maddeleri yeterince tanyor muyuz? İşe **manyetik alanı** inceleyerek başlayabiliriz.

11.11. Özet

Manyetik dipol momenti ile açısal momentum arasındaki bağıntı: $\vec{\mu} = \left(-\frac{e}{2m_e} \right) \vec{L}$

Spin manyetik momenti (μ_s) ile spin açısal momentumu arasındaki bağıntı:

$$\vec{\mu}_s = \left(-\frac{e}{m_e} \right) \vec{S}$$

Spin açısal momentumunun manyetik alan B 'nin uygulandığını düşündüğümüz z eksenini

$$\text{üzerindeki bileşeni: } S_z = \pm \frac{1}{2} \hbar$$

$$\text{Bohr manyetonu: } \mu_B = \frac{e\hbar}{2m_e}$$

$$\text{Birim hacimdeki dipol momenti olan mıknatıslanma: } \vec{M} = \frac{1}{\mu_0} \chi_m \vec{B}_1$$

$$\text{Toplam açısal momentum: } \vec{J} = \vec{L} + \vec{S}$$

$$\text{Toplam spin açısal momentumu: } S = \sum m_s$$

Toplam yörünge açısal momentumu: $L = \sum m_l$

Manyetizma türleri: *diyamanyetizma*, *paramanyetizma*, *ferromanyetizma*, *antiferromanyetizma*, *ferrimanyetizma*.

Üstüniletkenlerde Meissner etkisi manyetik alanın böyle bir maddenin içerisinde dışarı püskürtülmesidir.

Üstüniletkenlik bozulmadan dayanılacak en yüksek manyetik alan: $B_T = B_K \left[1 - \left(\frac{T}{T_K} \right)^2 \right]$

11.12. Sorular

11.1) Toplam boyu L , kesit alanı s kadar olan bir telin iki ucu bir gerilim kaynağına bağlanarak uçlar arasında bir V gerilimi oluşturulurken, tel de kapalı denebilecek bir döngü haline getiriliyor. **a-** Bu döngünün ($a \times b$) boyutlarında tek sarımlı bir dikdörtgen biçiminde yapılması durumunda manyetik dipol momentinin olası en büyük değerini alması için dikdörtgenin boyutlarını bulunuz. **b-** Döngünün çember biçiminde olması durumunu **a**'daki biçimle karşılaştırınız.

11.2) Dünyanın Güneş çevresinde (yıl boyunca) ve kendi ekseninde (gün boyunca) dönmesinden yola çıkarak sırasıyla **a-** Güneş çevresindeki yörünge açısal momentumu L 'yi, **b-** kendi ekseninde spin açısal momentumu S 'yi ve **c-** toplam açısal momentumu J 'yi bulunuz.

1-a a- Demir ve **b-** bakır için S , L ve J 'nin değerlerini bulunuz.

1-dipole. İçerisinden i akımı geçen, R yarıçapındaki bir halkanın ekseninde ve halka merkezinden z uzaklıktaki bir noktadaki B manyetik alanını bulunuz. $z \gg R$ durumunda manyetik alanın z uzaklığının küpüyle ters orantılı olduğunu gösteriniz.

11.3) Yarıçapı R olan bir yarım küre için r^2 nin ortalama değerini bulunuz.

11.4) Dünyamızın daha yeni oluştuğu yıllarda bir üstüniletken madde olsaydı ve o sırada bunun yüzeyinde oluşan akım zamanla zayıflayarak günümüzde ilk değerinin milyonda birine inmiş olsaydı, bu örneğin zaman sabiti τ için ne diyebilirdik?

11.5) Hangi sıcaklıkta, bir B manyetik alanına konulan toplam N tane dipolün $2/3$ 'ü alana antiparalel, $1/3$ 'ü paralel olur?

11.6) Bir üstüniletken maddenin kritik manyetik alanının, mutlak sıfır sıcaklığındaki değerinin $1/3$ 'üne indiği sıcaklık nedir?

Kaynakça

- Amit D. J., Verbin Y., “**Statistical Physics**”, World Scientific, 1995
- Beiser A., “**Concepts of Modern Physics**”, McGraw-Hill,
- Bernstein J., Fishbane P., Gasiorowicz S., “**Modern Physics**”, Prentice Hall, 2000
- Brehm J., Mullin W., “**Introduction to the Structure of Matter**”, Wiley, 1989
- Chandrasekhar B.S., “**Perché Il Vetro é Trasparente**”, Il Saggiatore, 2001
- Christman J. R., “**Solid State Physics**”, Wiley, 1988
- Eisberg R., “**Quantum Physics**”, Wiley, 1985
- Flowers B. H., Mendosa E., “**Properties of Matter**”, Wiley, 1970
- Gamow G., “**Biografia Della Fisica**”, Mondadori, 1963
- Kasap S. O., “**Electronic Materials and Devices**”, McGraw-Hill, 2002
- Kittel C., “**Introduction to Solid State Physics**”, Wiley, 1996
- Krane K., “**Modern Physics**”, Wiley, 1983
- Neamen D., “**Semiconductor Physics and Devices**”, McGraw-Hill, 2003
- O’Reilly E., “**Quantum Theory of Solids**”, Taylor & Francis, 2002
- Omar M. A., “**Elementary Solid State Physics**”, Addison-Wesley, 1975
- Reif F., “**Statistical and Thermal Physics**”, McGraw-Hill, 1985
- Sandin T.R., “**Essentials of Modern Physics**”, Addison Wesley, 1989
- Smith R. J., “**Circuits, Devices and Systems**”, Wiley, 1976
- Solymar L., Walsh D., “**Electrical Properties of Materials**”, Oxford, 2003
- Streetman B. G., Banerjee S., “**Solid State Electronic Devices**”, Prentice Hall, 2000
- Tanner B. K., “**Introduction to the Physics of Electrons in Solids**”, Cambridge, 1995
- Turton R., “**The Physics of Solids**”, Oxford, 2000
- Wilson J., Hawkes J. F. B., “**Lasers Principles and Applications**”, Prentice Hall, 1987

Dizin

- akkor 45
alan etkili transistör 403, 410
altıgen 138, 141
amorf 126, 359, 427, 454, 458
atma 19, 31
atomik doluluk oranı 159
- bağlı 54, 141, 152
basit harmonik salınım 129, 149, 232, 267
boyuna dalgalar 20
- cisim merkezli kübik 137, 139
- çekici 54, 147, 293, 428
- dalga fonksiyonu 66, 151, 250, 347
dalga kılavuzu 66
dalga-parçacık ikililiği 35, 57
değerlik 17, 349
- duran dalgalar 26, 47, 196, 420
- elektron afinitesi 150
en yakın komşu sayısı 139
eşyönlü
evrenbilim ilkesi
- fotoelektrik olayı
foton
- geri çağırıcı kuvvet
girişim
- havası alınmış tüp
hızlandırıcı
- ilkel birim hücresi
indirgenmiş kütle
iş fonksiyonu
işlemci
iyonik göbek
- iyonlaşma enerjisi
- ışınım gücü
- karmaşık
kesikli
kip
kırınım
kızılaltı
kuantum durumu
kuark
kusur
kübik
- monoklinik
morötesi çöküşü
- normlanabilir
nötron
- olasılık yoğunluğu
ortorombik
- örgü
örgü sabiti
özgürlük derecesi
- Pauli'nin dışlama ilkesi
- safsızlık
sanal
sıkı bağlı altıgen
siyahcisim
sonlu
sürekli
- taban - basis
- tarayıcı tünelleme mikroskopu
tayf
tedirgeme
tetragonal

trigonal
triklinik
tünelleme

vuru

yansıma
yerdeđiştirme
yoğun madde
yörüngemsi
yüzey merkezli kübik