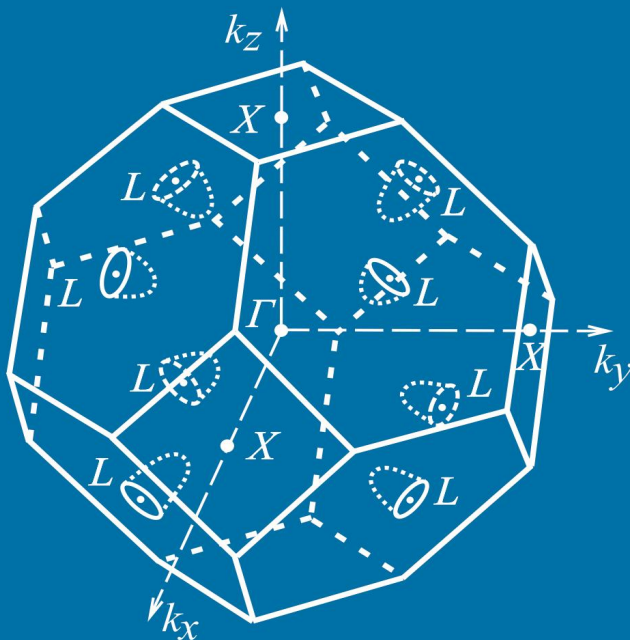


B.M.ƏSGƏROV

BƏRK CİSİMLƏRİN NƏZƏRİYYƏSİ



BAKI - 2013

B.M.ƏSGƏROV

BƏRK CİSİMLƏRİN NƏZƏRİYYƏSİ

Universitetlər üçün dərs vəsaiti

Yenidən işlənilmiş ikinci nəşr

*Azərbaycan Respublikası Təhsil
İçişlər Nazirliyi 25 yanvar 2013-cü il tarixli
127 sayılı əmri ilə təsdiqlənmişdir*

"Bakı Universiteti" nəşriyyatı

ÁÀÊÛ– 2013

Kitaba rəy verən
akademik F.M.Həşimzadə
professor A.H.Kazımzadə

Elmi redaktor
professor S.R.Fiqarova

B.M.Əsgərov. Bərk cisimlərin nəzəriyyəsi.

Universitetlər üçün dərs vəsaiti.

Bakı: “Bakı Universiteti” nəşriyyatı, 2013, 396 s., şəkilli.

Təqdim olunan bu kitab müəllifin 2001-ci ildə nəşr olunmuş eyni adlı kitabının yenidən işlənmiş və genişləndirilmiş ikinci nəşridir. Bu nəşrdə elektron və elektron-fonon qarşılıqlı təsirini əhatə edən yeni bölmələr əlavə olunmuş və zona nəzəriyyəsinin əsasları şərh edilmişdir. Elektron-fonon qarşılıqlı təsiri hissəsində keçirici elektronların fononlardan və kristalın başqa defektlərindən səpilməsinə baxılmış, uyğun səpilmə mexanizmləri üçün relaksasiya müddətlərinin açıq şəkli tapılmışdır. Sonda alınmış nəticələr əsasında elektron köçürmə hadisələrinin (kinetik effektlərin) nəzəriyyəsi şərh edilmişdir.

Dərs vəsaiti müəllifin uzun illər Bakı Dövlət Universitetinin fizika fakültəsində və Türkiyənin Hacəttəpə Universitetinin fizika bölümündə oxuduğu mühazirələr əsasında yazılmışdır.

Kitab magistrantlar, doktorantlar və bərk cismin termodinamik və kinetik xassələrini tədqiq edən elmi işçilər üçün nəzərdə tutulmuşdur.

Ə $\frac{2302030300}{M - 658(07)}$ – 2013

Ó Əsgərov Bəhram Mehrəli oğlu, 2013
Ó “Bakı Universiteti” nəşriyyatı, 2013

ÖN SÖZ

Bərk cisimlərin nəzəriyyəsi ümumi nəzəri fizikanın mühüm bir tərkib hissəsini təşkil edir. İstənilən makroskopik sistem, o cümlədən bərk cisimlər yalnız iki növ stabil zərrəcikdən-nüvələrdən və elektronlardan ibarətdir. Kristallik bərk cisimlər makroskopik sistemlərin xüsusi halıdır. Belə ki, bu halda ağır zərrəciklər olan nüvələr elektronların əhatəsində müəyyən bir qayda ilə fəzada düzülərək kristal qəfəs əmələ gətirirlər. Müsbət yüklü nüvələr və mənfi yüklü elektronlar, bir-biri ilə kulon qarşılıqlı təsirdə olaraq, birlikdə dayanıqlı neytral sistemi-kristallik bərk cisimləri yaradırlar. Müxtəlif növ kristallik bərk cisimlər, onları təşkil edən nüvələrin müxtəlifliyi və onların əmələ gətirdiyi kristallik qəfəsin müxtəlif simmetriyaya malik olması ilə təyin olunur.

Kristallik bərk cisimlərin bütün fiziki xassələri (termodinamik, kinetik, elektrik, optik, maqnit və s.) qəfəsin düyünlərindəki nüvələrin və qəfəs daxilində paylanmış elektronların hərəkətlərinin təbiəti ilə də müəyyən olunur. Hərəkətin təbiəti dedikdə onların hansı hərəkət növündə (rəqsi və ya irəliləmə) iştirak etməsi, eyni zamanda bunların klassik və ya kvant hərəkəti olması nəzərdə tutulur.

Nəzəriyyənin əsas məqsədi bərk cisimlərin təcrübədə müşahidə olunan və ölçülən makroskopik fiziki xassələrini izah etmək və ya məlum olmayan yeni xassələrini əvvəlcədən söyləməkdən ibarətdir. Bunun üçün bərk cismin hər bir makroskopik xassəsinin mikroskopik nəzəriyyəsinə qurmaq tələb olunur. Mikroskopik nəzəriyyə qurmaq makroskopik xassələri kristal qəfəs daxilində baş verən mikroskopik hərəkətlərlə əlaqələndirmək deməkdir. Bu məqsədlə bərk cismin daxili quruluşu haqqında konkret model qəbul etmək və onun əsasında

mikroskopik nəzəriyyə qurmaq lazımdır. Hər şeydən əvvəl bərk cisim əmələ gətirən zərrəciklərin (nüvələrin və elektronların) hərəkətlərinin hansı tənliklərlə təsvir olunduğunu müəyyənləşdirmək lazımdır. Yalnız bundan sonra nəzəriyyənin klassik və ya kvant nəzəriyyəsi olması barəsində danışmaq olar.

Bu məsələ araşdırılmış və kitabın əvvəlində (§1)-də şərh olunmuşdur. Göstərilmişdir ki, kristal təşkil edən elektronların hərəkəti həmişə kvant təbiətlidir. Nüvələrin hərəkətinə isə yalnız yüksək temperaturlarda klassik hərəkət kimi baxıla bilər. Odur ki, kristallik bərk cisimlərin nəzəriyyəsi ümumi halda kvant nəzəriyyəsidir. Beləliklə, bərk cisimlərin nəzəriyyəsinin yeri ümumi nəzəri fizikada yeri qeyri-relyativistik kvant mexanikası oblastındadır, yəni əsas hərəkət tənliyi kimi Şredinger tənliyi götürülməlidir.

Yuxarıda qeyd etdiyimiz kimi, istənilən kristallik bərk cisim iki altsistemdən: nüvələrdən və elektronlardan ibarətdir. Bu altsistemlərin hər birində zərrəciklərin sayı həddindən artıq çox olduğundan Şredinger tənliyinin analitik həllini tapmaq praktiki olaraq mümkün deyil. Ona görə də altsistemlərin daxili hərəkətinə növbə ilə baxılır. Əvvəlcə fərz edilir ki, elektron altsistemi hərəkətsizdir və onlar nüvə altsistemində paylanaraq onun dayanıqlığını təmin edir. Onda belə çıxır ki, nüvələr bir-biri ilə kvazielastiki qüvvələrlə əlaqədar olub, öz tarazlıq vəziyyətləri ətrafında rəqsi hərəkət edirlər, rəqslər isə qəfəs boyu yayılaraq elastiki dalğa əmələ gətirir. Bu dalğaların nəzəri tədqiqi *fonon qazı anlayışını* yaradır.

Daha sonra fərz edilir ki, nüvələr tərpənməzdir və kristalın istənilən nöqtəsində onlar periodik elektrostatik potensial sahəsi yaradır. Elektronlar da tərpənməz nüvələr ətrafında simmetrik paylandığından onlar da periodik effektiv sahə yaradırlar. Beləliklə hər bir elektron nüvələrin və elektronların (baxılan elektronlardan başqa) yaratdığı periodik qəfəs potensialında hərəkət edir. Elektronların bu hərəkətinin öyrənilməsi zona nəzəriyyəsinin meydana çıxmasına gətirir. Nəticədə keçirici elektron və dəşik kimi kvazizərrəciklərin yükdaşıyıcıları olduğu məlum olur. Bundan sonra keçirici elektronlarla fononlar arasında qarşılıqlı təsir öyrənilir.

Bərk cisimlərin nəzəriyyəsi çox geniş məsələləri əhatə edir və onun hamısını bir kitabda şərh etmək mümkün deyil. Onun hər bir xassəsinə ayrıca kitab həsr etmək lazımdır. Məsələn, bərk cisimlərin optik, maqnit və s. xassələrinin nəzəriyyəsi. Burada bərk cisimlərin yalnız termodinamik və kinetik xassələrin nəzəriyyəsi haqqında danışılacaq.

Kitab əsasən fononlar, keçirici elektronlar və elektron-fonon qarşılıqlı təsiri adlı üç hissədən ibarətdir.

Fononlar hissəsi (I və II Fəsilələr) kristal qəfəsin düyünlərində yerləşən nüvələrin rəqsi hərəkətinə həsr olunmuşdur. Bu zaman elektron alt sisteminin mövcudluğu fərz olunur, lakin hesab edilir ki, onlar hərəkətsizdir və nüvələr altsisteminin dayanıqlığını təmin edir. Əvvəlcə nüvələr sisteminin rəqsi hərəkətinə klassik mexikanın tənlikləri əsasında baxılır (yüksək temperatur oblastında) və göstərilir ki, nüvələr alt sisteminin (kristal qəfəsin) tam enerjisi sərbəstlik dərəcələrinin sayı qədər qarşılıqlı təsirdə olmayan harmonik ossilyatorların enerjilərinə bərabərdir. Bütün ossilyatorların kvant ədədləri sıfır olarsa, kristal həyəcanlaşmamış əsas halda olur. Ossilyatorların həyəcanlaşmış halında fonon qazı meydana çıxır, yəni həyəcanlaşmış halda kristala onun enerjisi fonon qazının enerjisinə bərabər olur. Bu yolla kristal qəfəsin rəqsi hərəkət enerjisi ideal fonon qazının enerjisi ilə təyin olunur. Fonon qazı konsepsiyası əsasında keçirici olmayan kristalın termodinamik, əsasən istilik xassələri tədqiq olunmuşdur.

Keçirici elektronlar hissəsində (III-VI Fəsilələr) hərəkətsiz nüvələr ətrafında paylanmış elektronların hərəkətinə Şredinger tənliyini tətbiq edərək cox elektronlu məsələni bir elektronun qəfəsin periodik potensial sahəsində hərəkəti məsələsinə gətirilir. Bu tənlik əsasında elektronun ideal qəfəs daxilində hərəkətinin ümumi xassələri aydınlaşdırılır. Burada alınan nəticələr (§12) kristalların elektrik keçiriciliyinə görə təsnifatını izah edə bilmədiyinə görə müxtəlif (zəif və güclü əlaqəli elektron) yaxınlaşmalardan istifadə edərək kristal daxilində elektronun spektri üçün enerji zonaları alınır, bununda zona nəzəriyyəsinin əsası qoyulur. Bu nəzəriyyə əsasında bərk cisimlərin metallara və izolyatorlara (yarımkeçiricilərə) bölünməsi

izah edilir və mütəhərrik dəşiklərin yükdaşıyıcı olması müəyyən-
ləşdirir. Eyni zamanda keçirici elektron qazı və deşik qazının statis-
tikası qurulur.

Elektron-fonon qarşılıqlı təsiri hissəsində (VII Fəsil) keçirici elektronların fononlardan və kristalın başqa defektlərindən səpilməsinə baxılır və hər bir səpilmə mexanizmləri üçün relaksasiya müddətlərinin açıq şəkli tapılır.

Sonda (VIII Fəsil) alınmış nəticələr əsasında elektron köçürmə hadisələrinin (kinetik effektlərin) nəzəriyyəsi şərh edilir.

Kitabın quruluşu çox sadədir: paraqraflar ardıcıl sıralanmış, şəkillər, cədvəllər və düsturlar isə hər paraqraf daxilində nömrələnmişdir.

Oxucular tərəfindən ediləcək arzu və təklifləri böyük məmnuniyyət və minnətdarlıq hissi ilə qəbul etməyə hazırım.

Kitabın əlyazması üzərində işləyərkən, köməyini hiss etdiyim hər kəsə müəllif kimi öz dərin təşəkkürümü bildirirəm.

Kitab magistrantlar, doktorantlar və bərk cismin termodinamik və kinetik xassələrini tədqiq edən elmi işçilər üçün nəzərdə tutulmuşdur.

B.M.Əsgərov

Bakı, dekabr 2012

MÜNDƏRİCAT

Ön söz.....	3
I fəsil. Kristal qəfəsin rəqsləri. Fonon qazı	7
§1. Áyðe úeñeí eýð íyçýðeéyñeí eí òì òì è íyçýðe òe- çeèàya aid diaqramda (elmlərin xəritəsində) éáðe	8
§2. Áyðe úeñeí eýð íyçýðeéyñeí äý məsələni í òì òì è qo- yuluşu	11
§3. Êââçççýðýúeéyð.....	13
§4. Äöç äý öyðñ äyöyñeýð	17
Äöç äyöyñ. Brave qəfəsləri (17). Öyðñ äyöyñ (24). Í iéèð ii ääeñeýðe (28). Ðái öyái øäèèðñın äèðäeñeèañú ò-òí Êäöá äý Áðááá-Vulf öyðe (31)	
§5. Êðeñäe äyöyñeýðäy öyäneýð äý ääèüèèð	34
Kristallik bərk cisimlərdə rabitə növləri (34). Áèðpè-öèö ñääý äyöyñdə rəqslər və dalgalar (39). Áèðpè-öèö í öðyè- éyá äyöyñdə rəqslər və dalgalar (45). Ö-þè-öèö äyöyñ- éyðdə rəqslər və dalgalar (54)	
§6. Í î ðì àè èí î ðäèí äèèð. Êðeñäe äyöyñeí Ùàì èèò í òóí èñeèañú.....	61
§7. Äyöyñeí öyäneýðeí eí éâàí èèàí ì àñú Ôíííí äàçú	66
Fonon qazımın orta enerjisi (69). Akustik fononların orta sayı (71). Debay temperaturu və Debay funksiyası (72)	

II fəsil. Keçirici olmayan bərk cisimlərin istilik xassələri və hal tənliyi 77

§8. *Áýðe ünəi eyðei enəəe oóoi ó íýçýðeéýñe Áeíəəeí äý Áäääe í îääeyðe* 78

İstilik tutumunun kənnəe íýçýðeéýsi (78). Êääið íýçý-ðeéýñe (80). Áeíəəeí í îääe (1907-ci il) (81). Áeíəəeí-Áäääe í îääe (1912-ci il) (85)

§ 9. *Ôîíîí äaçúäý äýðe ünəi eyðei uəe öyi eəe. Áðoiəeçái nääəe* 95

§10. *Áýðe ünəi eyðei enəäyi yai eeyii yñe äý eçíääəe enəəe oóoi ó* 103

§11. *Ôîíîí enəəe ea-əəeəe* 114

III fəsil. Enerji zonaları nəzəriyyəsinin əsasları. Keçirici elektronlar və dəşiklər..... 123

§12. Elektronun ideal kristal qəfəsdə hərəkəti 124

İdeal kristalda hərəkət edən elektronun dalğa funksiyası. Blox funksiyası (127). Elektronun dalğa vektoru (129). Elektronun enerjisi (131). Elektronun kvaziimpulsu (133). Elektronun effektiv kütləsi (134)

§13. Zəif əlaqəli elektronlar yaxınlaşması. Qadağan olunmuş enerji zonaları 138

§14. Enerji zonaları və birinci Brillüen zonası 146

§15. Güclü əlaqəli elektronlar yaxınlaşması. Diskret enerji səviyyələrinin enerji zonalarına çevrilməsi 154

§16. Keçirici elektronlar və müsbət yüklü dəşiklər..... 161

§17. Zona nəzəriyyəsi və bərk cisimlərin elektrik keçiriciliyinə görə təsnifatı: keçiricilər və izolyatorlar.... 166

§18. Enerji zonalarının əsas modelləri 173

Metalların keçirici zonası üçün parabolik model (174).

Məxsusi yarımkeçiricilər üçün parabolik zona modeli (175). Dördüncü, A^{IV} qrup elementi olan yarımkeçiricilərin zona quruluşu; çoxminimumlu parabolik model (176). $A^{III}B^V$ -tipli yarımkeçiricilərin zona quruluşu; qeyri-parabolik Keyn modeli (180).....

IV fəsil. Metallarda və yarımkeçiricilərdə yükdaşıyıcıların statistikasını	
§19. Metallarda keçirici elektron qazının statistikasını	190
Paylanma funksiyası (191). Elektron qazı mütləq sıfır ($T=0$) temperaturunda-tam cırılmış hal (193). Elektron qazı aşağı ($k_0T \ll Z_F$) temperaturda – güclü cırılmış hal (198)	
§20. Yarımkeçiricilərdə keçirici elektronların konsentrasiyasını	202
Parabolik və qeyri-parabolik keçirici zonlar (202). Keçirici elektronların effektiv kütləsinin konsentrasiyadan asılılığı (209). Çoxminimumlu ellipsoid parabolik keçirici zonada elektronların konsentrasiyasını (211)	
§21. Məxsusi yarımkeçiricilərin və yarımmetalların statistikasını	214
Deşiklərin konsentrasiyasını (214). Qadağan olunmuş zonası sıfırdan fərqli ($e_g \neq 0$) olan məxsusi yarımkeçiricilər (216). Qadağan olunmuş zonası sıfır ($e_g = 0$) olan məxsusi yarımkeçiricilər (218). Yarımmetallar (220)	
§22. Aşqarlı yarımkeçiricilərin statistikasını	222
V fəsil. Metalların istilik tutumu.....	233
§23. Metalların istilik tutumunun klassik nəzəriyyəsi	234
Qəfəs istilik tutumu (235). Elektron qazının enerjisi	

	(236). Elektron qazının istilik tutumunun klassik nəzəriyyəsi (237)	
§24.	Metalların istilik tutumu. Kvant nəzəriyyəsi.....	240
	Mütləq sıfır ($T=0$) temperaturu (240). Aşağı temperaturalarda elektron qazının istilik tutumu (243). Güclü qeyri-parabolik zonalı—"ultrarelyativistik" elektron qazının istilik tutumu (251)	
VI fəsil.	Sərbəst elektron və elektron qazı xarici maqnit sahəsində	254
§25.	Elektron qazının Pauli paramaqnetizmi.....	255
	Cırılşmamış-klassik elektron qazı (259). Cırılşmış-kvant elektron qazı (260)	
§26.	Elektronun xarici sabit maqnit sahəsində hərəkəti. Diskret Landau spektri	263
	Maqnit sahəsində elektronun klassik hərəkəti (263). Elektronun xarici maqnit sahəsində kvant hərəkəti (265). Güclü maqnit sahəsində kvant hallarının sıxlığı (269). Kvantlayıcı maqnit sahəsində elektron qazının kimyəvi potensialı (272).....	
§27.	Elektron qazının Landau diamaqnetizmi	279
	Elektron qazının diamaqnetizminə klassik baxış (279). Elektron qazının diamaqnetizminin Landau nəzəriyyəsi (281)	
§28.	Tsiklotron rezonansı. Effektiv kütlənin təyini.....	287
	Tsiklotron rezonansının mahiyyəti (287). Tsiklotron rezonansının elementar klassik nəzəriyyəsi (289). Ellipsoidal izoenergetik səthlər üçün tsiklotron tezlikləri (292). Germanium və silisium yarımkəçiriciləri üçün tsiklotron tezlikləri (295)	
VII fəsil.	Kinetik tənlik və onun həlli. Səpilmə mexanizmləri	297
§29.	Kinetik tənlik və onun tətbiq olunma şərtləri	298

	Qeyri-taraz paylanma funksiyası (298). Kinetik tənlik (299). Kinetik tənliyin tətbiq olunma şərtləri (302)	
§30.	İxtiyarı sferik-simmetrik zona üçün relaksasiya müddəti yaxınlaşmasında kinetik tənliyin həlli..... Relaksasiya müddəti (306). Maqnit sahəsi olmadıqda t yaxınlaşmasında kinetik tənliyin həlli (307). Kvantlayıcı olmayan ixtiyarı maqnit sahəsində kinetik tənliyin həlli (309)	305
§31.	İxtiyarı izotop zonalı yarımkeçiricilərdə yükdaşıyıcıların ionlaşmış aşqar atomlarından səpilmə Keçid ehtimalının ümumi ifadəsi (313). Yükdaşıyıcıların ionlaşmış aşqar atomlarından səpilməsi (317). Nöqtəvi defektlərdən, yəni yaxına təsir potensialından səpilmə (322)	312
§32.	Keçirici elektronların ixtiyarı izotop zonalı yarımkeçiricilərdə müxtəlif fononlardan səpilməsi Keçirici elektron və fonon qazı (323). Keçirici elektronların akustik fononlardan səpilmə. Deformasiya potensialı metodu (329). Qeyri-polyar fononlardan səpilmə; deformasiya potensialı metodu (334). Polyar optik fononlardan səpilmə (338). Pyezoakustik fononlardan səpilmə (342)	323
§33.	Relaksasiya müddətinin ümumiləşmiş ifadələri..... Parabolik zonalı (344). İxtiyarı izotrop (qeyri-parabolik) zonalı keçiricilərdə (347)	344
VIII fəsil.	Elektron köçürmə hadisələri – kinetik effektlər	350
§34.	Cərəyan və enerji selinin sıxlığı. Keçiricilik tenzorlarının ümumi şəkli	351
§35.	Xarici maqnit sahəsi olmadıqda ($H = 0$) elektron köçürmə hadisələri	355

Elektrikkeçiriciliyi,elektronların dreyf yütklüyü (356). Termoelektrik hərəkət qüvvəsi - Zeebek effekti (359). Elektron istilikkeçiriciliyi, Videman-Frans qanunu. Lorens ədədi (362). Nernst effekti (365)	
§36. Kinetik effektlərin tərfi və kinetik əmsalların təyini.....	366
Qalvanomaqnit effektlər (366). Termomaqnit effektlər (369)	
§37. Elektron köçürmə hadisələri (kinetik effektlər) xarici maqnit sahəsində	372
Holl effekti (372). Maqnit-müqaviməti (376). Eninə Nernst-Ettingshauzen effekti (380). Uzununa Nernst- Ettingshauzen effekti (384)	
Ədəbiyyat	388



Əsgərov Bəhram Mehrəli oğlu – Azərbaycan Milli Elmlər Akademiyasının akademiki, Dövlət mükafatı laureatı, Əməkdar elm xadimi, "Şöhrət" ordenli, fizika-riyaziyyat elmləri doktoru, professor, Bakı Dövlət Universitetinin "Bərk cisimlər fizikası" kafedrasının müdiri.

Akademik B.M.Əsgərov bərk cisimlərin nəzəriyyəsi sahəsində 150-dən artıq elmi məqalənin, 5 monoqrafiyanın "*Теория явлений переноса в полупроводниках*" (Bakı, Elm, 1963), "*Кинетические эффекты в полупроводниках*" (Leningrad, Nauka, 1970), "*Электронные явления переноса в полупроводниках*" (Moskva, Nauka, 1985), "*Electron Transport Phenomena in Semiconductors*" (Singapore, New Jersey, London, World Scientific, 1994), "*Thermodynamics, Gibbs Method and Statistical Physics of Electron Gases*" (Berlin, Springer-Verlag, 2010) və iki dərsliyin "*Bərk cisimlər nəzəriyyəsi*" (Bakı, 2001), "*Termodinamika və statistik fizika*" (Bakı, 2005) müəllifidir. O, 12 elmlər namizədinin elmi rəhbəri və 4 elmlər doktorunun elmi məsləhətçisi olmuşdur.

B.M.Əsgərov 5 oktyabr 1933-cü ildə Tovuz rayonunun Əhmədabad kəndində anadan olmuşdur. O, 1957-ci ildə Azərbaycan Dövlət Universitetinin fizika-riyaziyyat fakültəsinin fizika şöbəsini fərqlənmə diplomu ilə bitirmiş və həmin ildə Azərbaycan Elmlər Akademiyasının Fizika İnstitutunun "Yarımkeçiricilər" fizikası ixtisası üzrə əyani aspiranturasına qəbul olunmuşdur. Aspirantura təhsilini SSRİ Elmlər Akademiyasının Leningrad şəhərində yerləşən "Yarımkeçiricilər" İnstitutunda almış və orada 1962-ci ildə namizədlik dissertasiya işini müdafiə etmişdir. 1971-ci ildə doktorluq dissertasiyasını müdafiə etmiş və 1972-ci ildə professor elmi adını almışdır.

1971-ci ildə Azərbaycan Elmlər Akademiyasının tövsiyyəsi əsasında B.M.Əsgərov Universitetdə "Bərk cisimlər fizikası" kafedrasını təşkil etmiş və indiyə kimi həmin kafedraya rəhbərlik edir.

2001-ci ildə Azərbaycan Milli Elmlər Akademiyasının "Fizika" ixtisası üzrə müxbir üzvü, 2007-ci ildə isə həqiqi üzvü seçilmişdir.

Akademik B.M.Əsgərov 1994-2004-cü illərdə Bakı Dövlət Universitetinin elmi işlər üzrə prorektoru vəzifəsində çalışmışdır.