

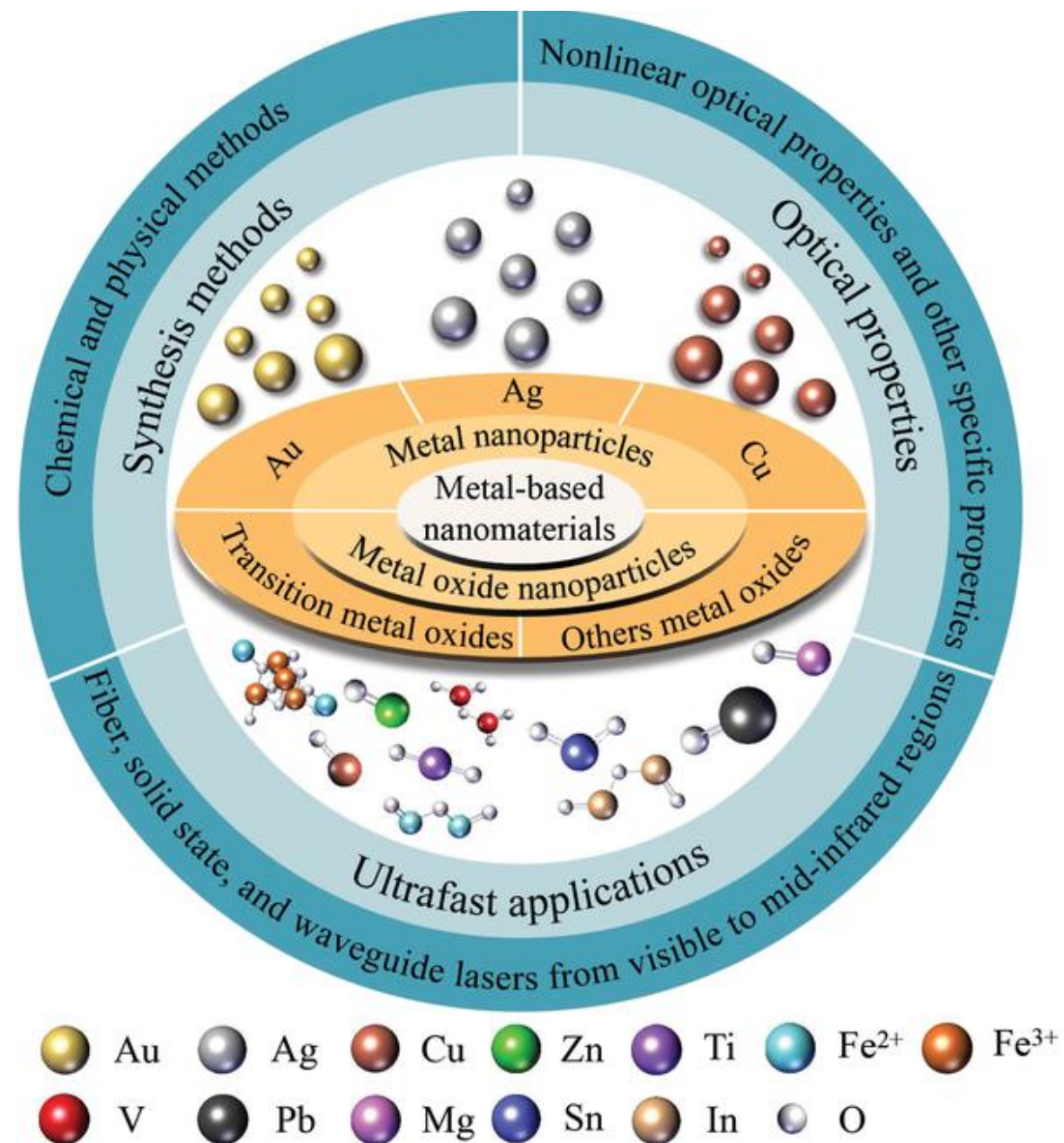
14-Дәріс

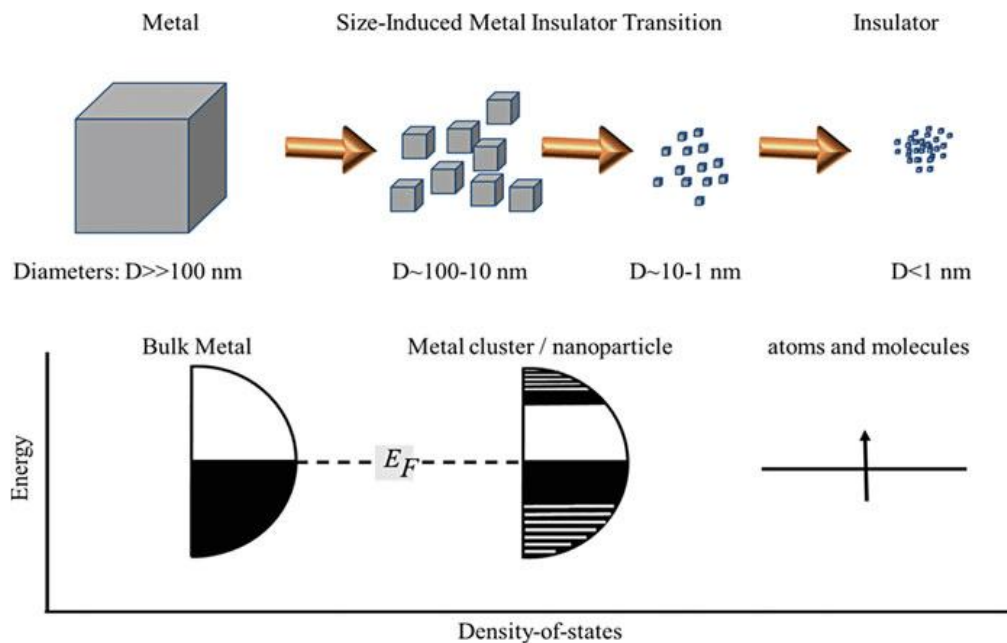
НАНОМАТЕРИАЛДАРДЫҢ ОПТИКАЛЫҚ ЖӘНЕ МЕХАНИКАЛЫҚ ҚАСИЕТТЕРІ

7M07103 - Материалтану және жаңа
материалдар технологиясы

Семестр: 1, күз, 2025- 2026 оқу жылы

Дәріскер – Керимкулова Алмагуль
Рыскуловна



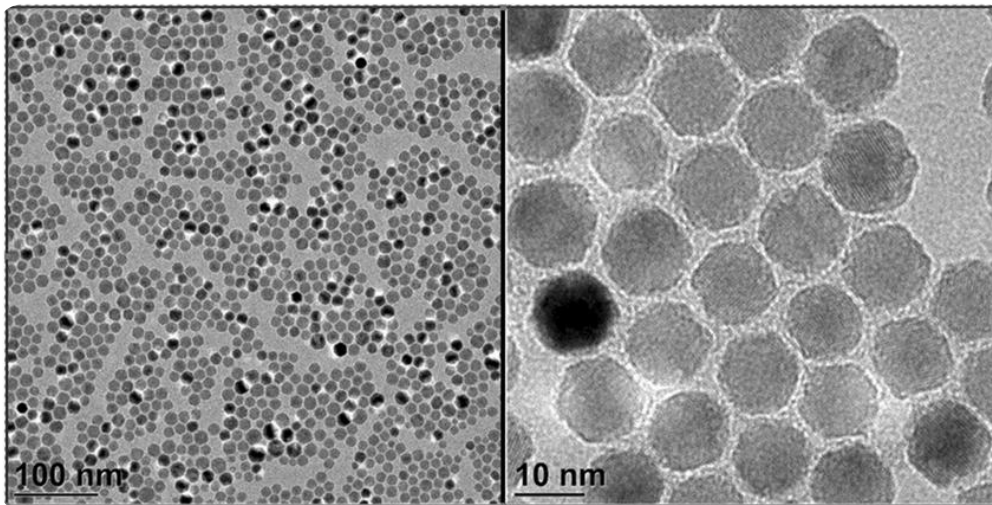


Наноматериалдар – өлшемі шамамен **1–100 нанометр** аралығында болатын құрылымдық элементтерден тұратын қатты денелердің ерекше класы. Осындай шағын өлшем диапазонында материалдардың қасиеттері макродеңгейдегі ұқсас заттарға қарағанда түбегейлі өзгереді. Бұл құбылыс негізінен **кванттық өлшем эффектісі, беттік атомдардың үлесінің артуы, және атомаралық өзара әрекеттесудің өзгеруімен** түсіндіріледі.

Наноматериалдардың **оптикалық** және **механикалық қасиеттері** олардың құрылымдық өлшеміне, морфологиясына және кристалдық ақаулардың таралуына тікелей тәуелді. Наноөлшемге өткен кезде электрондардың қозғалысы шектеледі, соның нәтижесінде материалдардың **жарық жұтылу, шағылу, және шашырау** қасиеттері өзгереді. Бұл құбылыстар **кванттық шектеу әсерімен** және **беттік энергияның артуымен** байланысты.

Наноөлшемдегі жүйелерде атомдардың үлкен бөлігі беттік қабатта орналасады, сондықтан олардың байланыс энергиясы азаяды, ал **беттік энергия** және **реакциялық қабілет** артады. Мұндай құрылымдар жарық пен энергияны тиімді жұтып, түрлендіре алады, сонымен қатар жоғары серпімділік пен механикалық беріктік көрсетеді.

Механикалық тұрғыдан алғанда, наноматериалдарда дислокациялардың қозғалысы шектеліп, түйір шекаралары тығыз орналасады. Нәтижесінде материалдың **беріктік шегі** мен **қаттылығы** артады, ал кей жағдайда **созылғыштық** төмендеуі мүмкін. Бұл құбылыстар материалдың түйір өлшеміне, яғни құрылымдық ұйымдасу дәрежесіне тәуелді.



Органикалық фазада синтезделген нанобөлшектердің ТЭМ кескіндері.
Екі түрлі үлкейту дәрежесі көрсетілген: 105 000× және 810 000×.

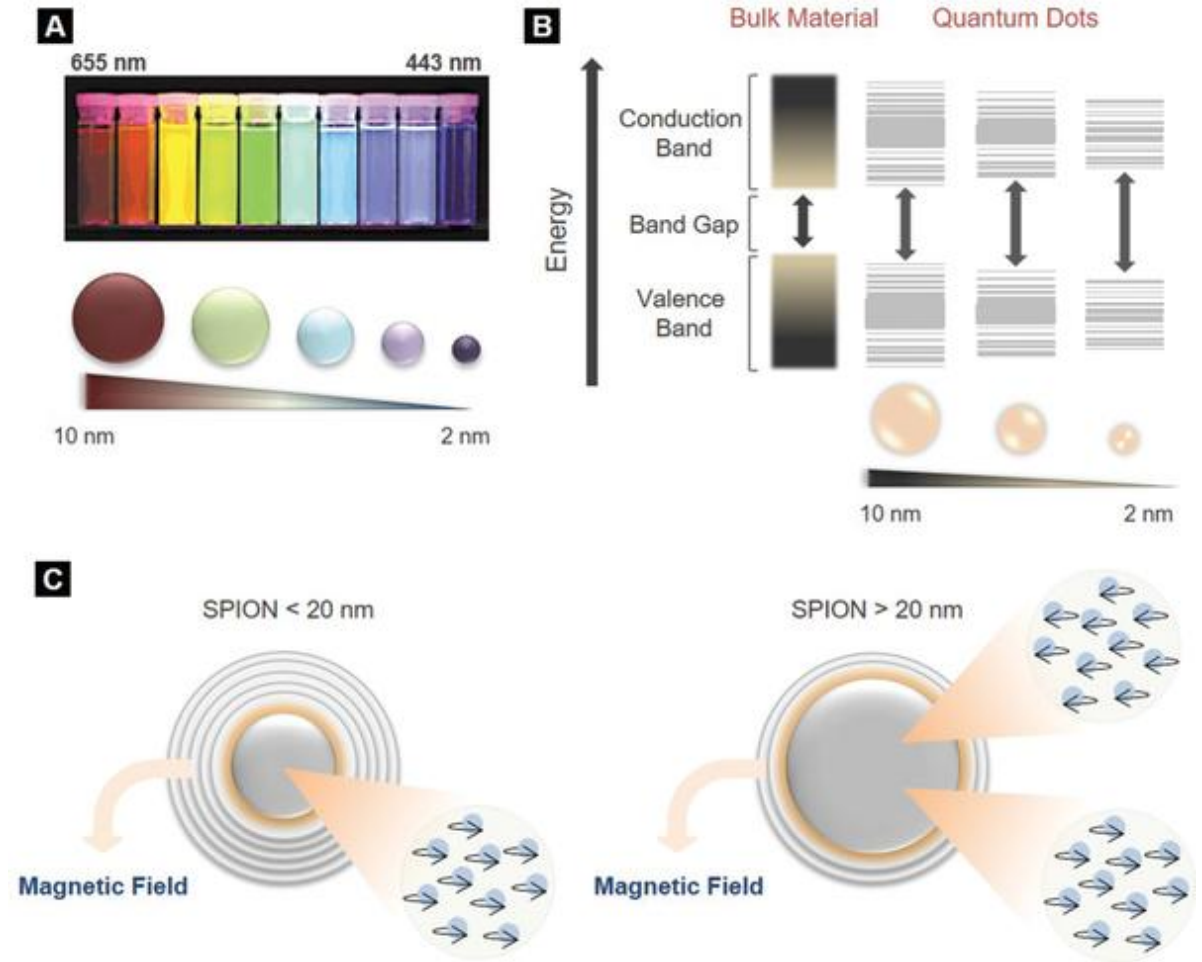
- Наноматериалдардың оптикалық қасиеттері олардың құрылымдық өлшемі мен электрондық күйіне тікелей байланысты. Наноөлшемге өткен кезде электрондардың қозғалысы шектеліп, **кванттық шектеу эффектісі** байқалады. Бұл құбылыс материалдың жарықты жұту, шағылу және шашырау қасиеттерін түбегейлі өзгертеді.
- Наноматериалдардағы жарық пен заттың өзара әсерлесу процесі макродеңгейден өзгеше өтеді. Электрондардың энергия деңгейлері үздіксіз емес, **дискретті күйге** өтеді, нәтижесінде жұтылу және люминесценция спектрлері өлшемге тәуелді болады. Мұндай құбылыс **жартылай өткізгіш кванттық нүктелерде (CdSe, ZnS, PbS және т.б.)** айқын байқалады.
- Оптикалық қасиеттердің негізгі параметрлері — **жарық сыну көрсеткіші (n)**, **жұтылу коэффициенті (α)** және **оптикалық тыйым салынған зона энергиясы (E_g)**. Бұл шамалардың өзара байланысы төмендегі өрнекпен сипатталады:

$$\alpha(h\nu) = A(h\nu - E_g)^n$$

- мұндағы
 α — жұтылу коэффициенті,
 $h\nu$ — фотон энергиясы,
 E_g — тыйым салынған зона ені,
 A — пропорционалдық тұрақтысы,
 n — өтудің типіне байланысты көрсеткіш (тікелей немесе жанама).
- Наноматериалдарда өлшем азайған сайын E_g мәні артып, жұтылу спектрі **көк аймаққа ығысады (blue shift)**. Бұл құбылыс кванттық өлшем әсерінің негізгі дәлелі болып саналады.
- Мысалы, CdSe кванттық нүктелерінің диаметрі азайған сайын олардың люминесценциялық түсі қызылдан көкке қарай өзгереді. Осындай қасиеттер наноматериалдарды **жарықдиодтарда, күн батареяларында, сенсорлық жүйелерде** және **биомедициналық бейнелеу технологияларында** кеңінен қолдануға мүмкіндік береді.

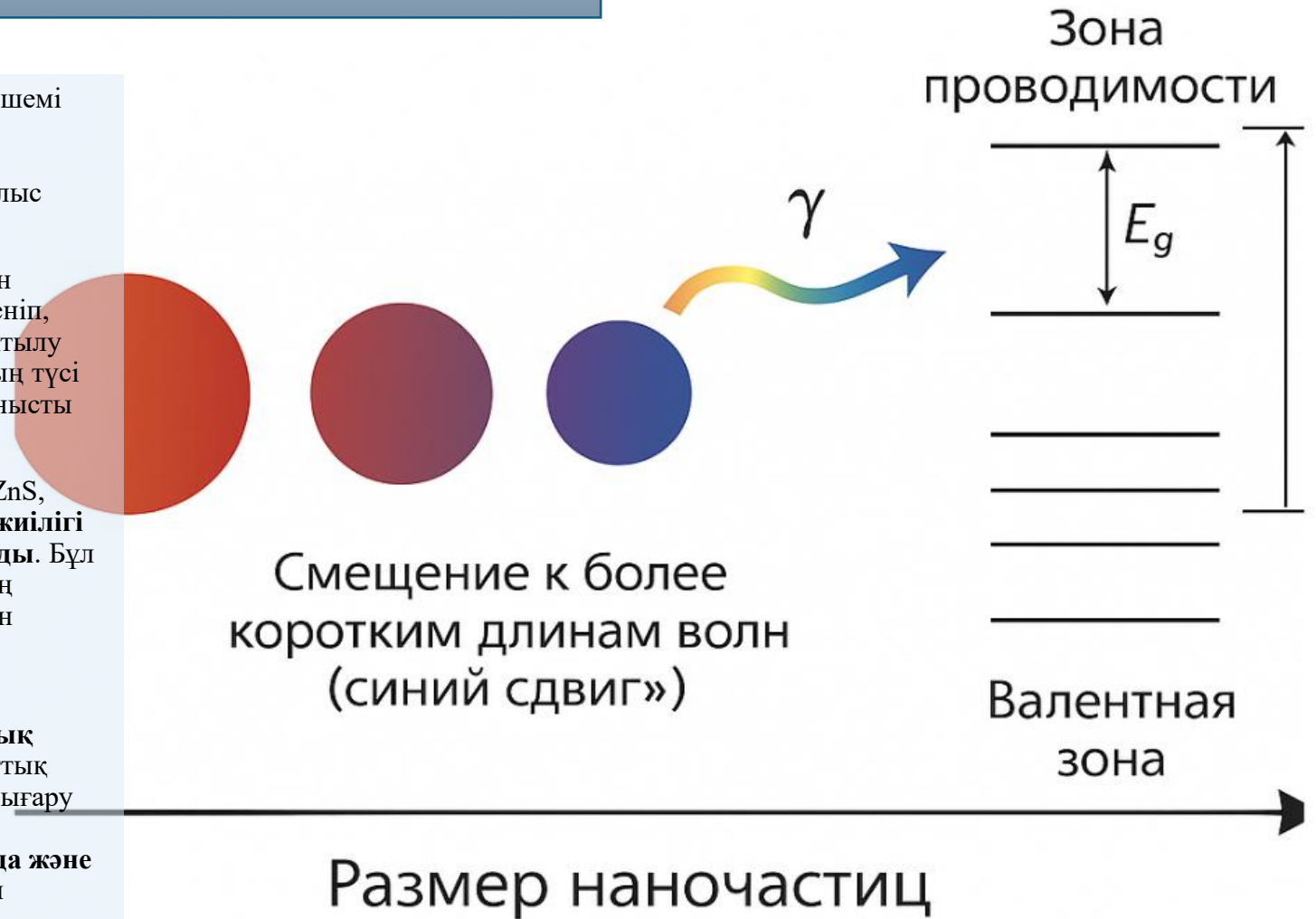
Кванттық нүктелердің және суперпарамагниттік темір оксиді нанобөлшектерінің өлшемге тәуелді қасиеттері.

- **А)** Кванттық нүктелердің оптикалық қасиеттері олардың өлшеміне тікелей тәуелді. Кванттық нүктелердің орташа диаметрі 10 нм-ден 2 нм-ге дейін азайған сайын, сәуле шығару максимумдары қысқа толқын ұзындықтарына (655 нм-ден 443 нм-ге дейін) ығысады. Соның нәтижесінде сәулеленудің түсі қызылдан көкке ауысады.
- **Б)** Кванттық нүктелердегі энергия деңгейлерінің бөлінуі кванттық шектеу эффектісімен түсіндіріледі. Нанокристалл өлшемі азайған сайын тыйым салынған аймақтың ені артады. Өлшемге байланысты тыйым салынған аймақ — жоғарғы валенттік зона мен төменгі өткізгіштік зона арасындағы айырма — өзгеріп отырады, бұл өз кезегінде сәулелену түсінің көктен қызылға ауысуына әкеледі. Кіші кванттық нүктелер көк түсті, ал ірілері қызыл түсті жарық шығарады.
- **В)** Суперпарамагниттік темір оксиді нанобөлшектерінің нанобөлшектерінің магниттік қасиеттері де өлшемге тәуелді. Орташа диаметрі 20 нм-ден аз бөлшектерде электрондардың спиндері бір бағытта бағытталады, нәтижесінде суперпарамагниттік қасиет байқалады. Ал диаметрі үлкен бөлшектерде бірнеше магниттік домендер түзіліп, олардың электрондық спиндері қарама-қарсы бағытталады.



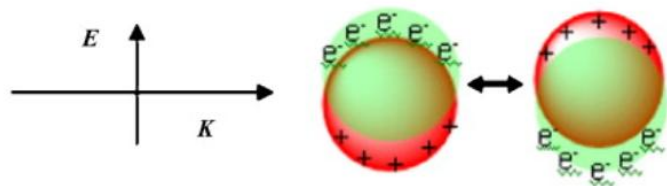
Кванттық өлшем әсері және жарық жұтылу

- Наноматериалдардың оптикалық қасиеттері олардың өлшемі мен құрылымдық ұйымдасуына тікелей тәуелді. Өлшем наномасштабқа дейін азайған кезде электрондар мен кемтіктердің қозғалысы кеңістікте шектеледі. Бұл құбылыс **кванттық өлшем эффектісі** деп аталады.
- Кванттық шектеу кезінде электрондар бұрынғыдай еркін қозғала алмайды, олардың энергия деңгейлері бөлшектеніп, дискретті күйге өтеді. Соның салдарынан жарықтың жұтылу және шығарылу жиіліктері өзгереді — яғни, материалдың түсі мен спектрлік сипаттамасы наноөлшемге тікелей байланысты болады.
- Мысалы, жартылай өткізгіш нанобөлшектердің (CdSe, ZnS, PbS) диаметрі азайған сайын олардың **жарық жұтылу жиілігі жоғарылап, жарық шығару түсі көк аймаққа ығысады**. Бұл құбылыс “blue shift” деп аталады және наноматериалдың энергия зоналары арасындағы қашықтықтың ұлғаюымен түсіндіріледі.
- Кванттық өлшем әсері наноматериалдардың **люминесценциялық, фотондық және оптоэлектрондық** қасиеттерін басқаруға мүмкіндік береді. Мысалы, кванттық нүктелердің өлшемін өзгерту арқылы олардың жарық шығару түсін дәл реттеуге болады. Бұл қасиет оларды **дисплей экрандарында, жарықдиодтарда, күн батареяларында және биомедициналық бейнелеу құрылғыларында** кеңінен қолдануға мүмкіндік береді.



- Наноматериалдардың оптикалық қасиеттерінің ерекше түрлерінің бірі — **жергілікті беткі плазмондық резонанс (Surface Plasmon Resonance, SPR)** құбылысы. Бұл құбылыс негізінен металл нанобөлшектерінде (алтын, күміс, мыс) байқалады және олардың жарықпен әсерлесу қабілетіне тікелей байланысты.
- Плазмондық резонанс кезінде жарық толқындарының жиілігі металл бетіндегі еркін электрондардың тербеліс жиілігімен сәйкес келеді. Нәтижесінде жарықтың белгілі бір жиілігі қарқынды жұтылып немесе шашырайды. Бұл құбылыс нанобөлшектерге ерекше **түстік және оптикалық белсенділік** береді.
- Мысалы, алтын нанобөлшектерінің ерітіндісі көлемдік алтыннан мүлде өзгеше — ол сарғылт емес, қызыл түске боялады. Ал күміс нанобөлшектері көгілдір немесе күлгін реңкті көрсетеді. Мұндай түстердің айырмашылығы бөлшек өлшеміне, пішініне және қоршаған ортаның сыну көрсеткішіне тәуелді.
- Плазмондық резонанс наноматериалдардың **жарықты жұту және шашырату қабілетін арттырады**, сондықтан оларды **сенсорика, оптикалық фильтрлер, фототермиялық терапия**, және **биомолекулаларды анықтау жүйелерінде** кеңінен қолдануға болады.

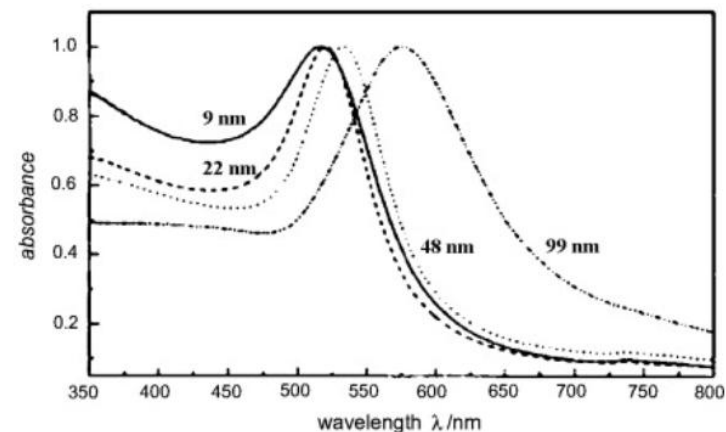
A



A – жарықтың әсерінен металл нанобөлшегіндегі еркін электрондардың ұжымдық тербелісі басталатын сәт.

Плазмондық резонанс құбылысы

B



B – плазмондық резонанс нәтижесінде бөлшек айналасында жергілікті электр өрісінің күшеюін көрсетеді.

- Сонымен қатар, плазмондық әсер наноматериалдардың **фотокаталитикалық белсенділігін** күшейтіп, **жарық энергиясын химиялық реакцияларға түрлендіру тиімділігін** арттырады. Бұл қасиет күн энергиясын пайдалану технологияларында (мысалы, күн батареялары мен су тазарту жүйелерінде) ерекше маңызға ие.
- Осылайша, плазмондық резонанс наноматериалдардың оптикалық қасиеттерін реттеудің тиімді тетігі болып табылады. Ол жарық пен электрондардың өзара әсерін басқаруға мүмкіндік беріп, заманауи **нанооптика мен нанофотониканың** негізгі теориялық негізін құрайды.

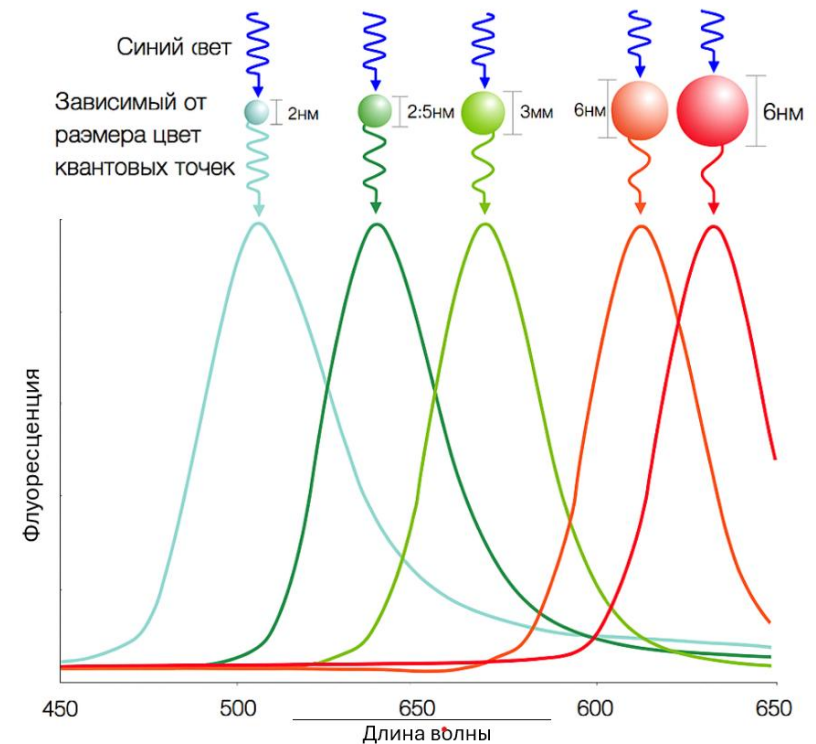
Оптикалық қасиеттердің қолданылуы

- Наноматериалдардың ерекше оптикалық қасиеттері — олардың **жарықты жұту, шағылу, шашырату және қайта сәулелендіру қабілеттерін** дәл басқаруға мүмкіндік береді. Осы қасиеттердің арқасында нанокұрылымдар заманауи **оптоэлектроника, фотоника, және биомедицина** салаларында кеңінен қолданылады.

➤ Біріншіден, **жартылай өткізгіш кванттық нүктелер** (CdSe, ZnS, PbS) өздерінің жарық шығару спектрін өлшемге байланысты өзгерте алады. Бұл қасиет оларды **жарықдиодтарда (LED), дисплей панельдерінде (QD-LED) және кванттық лазерлерде** қолдануға мүмкіндік береді. Кванттық нүктелер жоғары жарық тиімділігі мен ұзақ қызмет ету мерзіміне ие болғандықтан, энергия үнемдеуші құрылғыларда кеңінен қолданылады.

➤ Екіншіден, **металл нанобөлшектері** (алтын, күміс) **жергілікті беткі плазмондық резонанс** құбылысының арқасында жарықтың белгілі бір жиілігін күшейтіп немесе жұта алады. Бұл қасиет **биосенсорлар, оптикалық фильтрлер, және молекулалық диагностика құрылғыларының** сезімталдығын арттыруға мүмкіндік береді. Әсіресе алтын нанобөлшектері негізінде жасалған плазмондық сенсорлар биомолекулаларды наномолекулалық дәлдікпен анықтай алады.

➤ Үшіншіден, **оксидтік наноматериалдар** (ZnO, TiO₂, Fe₂O₃) күн сәулесін тиімді жұтып, энергияны түрлендіру қабілетіне ие. Олар **күн батареяларының фотокатализаторлары және ультракүлгін фильтрлер** ретінде пайдаланылады. Мысалы, TiO₂ наноқабықшалары күн сәулесінің ультракүлгін бөлігін жұтып, органикалық ластаушыларды ыдыратуға қабілетті.



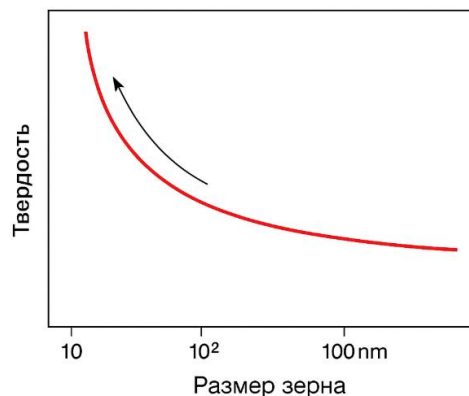
Кванттық нүктелердің люминесценциясы

I. Механикалық қасиеттер туралы жалпы түсінік

Наноматериалдардың механикалық қасиеттері олардың құрылымдық өлшеміне, түйіршік шекараларына және ақаулардың таралу сипатына тікелей тәуелді. Макроскопиялық материалдарда беріктік пен қаттылық көбіне түйір өлшемі мен дислокация қозғалысына байланысты болса, наноөлшемді құрылымдарда бұл заңдылық өзгереді.

Наноөлшемге өткен кезде материалдың түйіршік шекаралары айтарлықтай ұлғаяды, ал дислокациялардың қозғалысы шектеледі. Бұл құбылыс **беріктік пен қаттылықтың артуына**, яғни материалдың механикалық тұрақтылығының жоғарылауына әкеледі. Мұндай құрылымдар «беріктік – өлшемге кері пропорционал» деген қағидаға бағынады.

Сонымен қатар, наноқұрылымдық материалдарда **Холл–Петч заңы** орын алады: түйір өлшемі кішірейген сайын материалдың ағу шегі артады. Бірақ өте ұсақ (5–10 нм) түйірлерде керісінше, пластикалық қасиеттер төмендеуі мүмкін, бұл құбылыс **инверсияланған Холл–Петч әсері** деп аталады.



Наноматериалдың механикалық қасиеттерін анықтау үшін жүргізілетін наноиндентациялық сынақтың құрылымдық сызбасы.

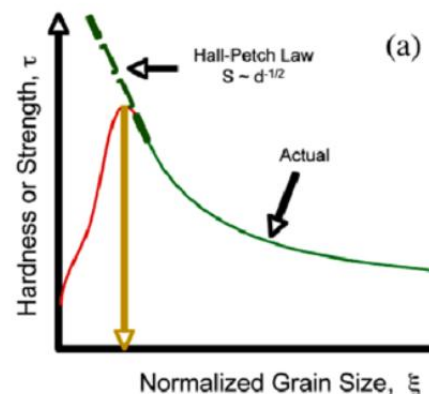
II. Наноқұрылым және беріктік заңы (Холл–Петч заңы)

Наноматериалдардың механикалық беріктігі олардың құрылымдық түйір өлшеміне тікелей тәуелді. Қатты дене физикасында бұл тәуелділік **Холл–Петч заңы** арқылы сипатталады. Заң бойынша материалдың ағу шегі немесе беріктік шегі түйіршік өлшемі азайған сайын артады, себебі түйір шекаралары дислокациялардың қозғалысына кедергі келтіреді.

Наноөлшемге өткен кезде түйіршік шекараларының үлесі артып, материал ішінде дислокациялардың еркін қозғалысы күрт шектеледі. Бұл ішкі кедергілердің көбеюіне және материалдың **жоғары беріктік пен қаттылыққа** ие болуына әкеледі. Сондықтан наноқұрылымды металдар мен керамикалар дәстүрлі материалдарға қарағанда әлдеқайда мықты және тозуға төзімді болады.

Холл–Петч заңының физикалық мәні келесідей түсіндіріледі: түйір өлшемі неғұрлым кішкентай болса, әрбір түйір шекарасы дислокацияның қозғалысын тежеуші бөгет ретінде әрекет етеді. Бұл материалдың пластикалық деформацияға қарсыласу қабілетін арттырады. Сондықтан нанотүйірлі металдар мен қорытпаларда ағу кернеуі мен қаттылық айтарлықтай өседі.

Алайда, түйір өлшемі шамамен 10 нм-ден төмен болғанда **инверсияланған Холл–Петч эффектісі** байқалуы мүмкін. Бұл жағдайда материалдың беріктігі керісінше төмендейді, себебі түйір шекараларында атомдардың байланысы әлсірейді және сырғу немесе диффузиялық қозғалыс жеңілдейді.



Бұл график түйір өлшемі кішірейген сайын материалдың беріктігі алдымен артатынын, бірақ белгілі бір шектен кейін қайта төмендейтінін көрсетеді. Яғни, Холл–Петч заңы өте ұсақ түйірлерде әрдайым сақталмайды, себебі материал үшін ағу шегін анықтайтын ең тиімді (оптимальный) түйір өлшемі бар.

Наноккомпозиттердің механикалық артықшылықтары

- Наноккомпозиттер — екі немесе одан да көп фазалы материалдар жүйесі, олардың бір фазасы наномасштаптағы дисперстік бөлшектер түрінде енгізіледі. Бұл нанобөлшектер негізгі матрицаның құрылымдық және механикалық қасиеттерін айтарлықтай жақсартады. Матрицалық орта металл, керамика немесе полимер болуы мүмкін.
- Наноккомпозиттердің басты ерекшелігі — **жоғары беріктік, қаттылық және тозуға төзімділік**. Бұл қасиеттер нанобөлшектердің матрицада біркелкі таралуының және олардың түйіршік шекараларымен өзара әрекеттесуінің нәтижесінде пайда болады. Наноқұрылымдық фазалар дислокация қозғалысына бөгет жасап, пластикалық деформацияны тежейді.
- Мысалы, көміртекті нанотүтікшелер (CNT) немесе графен негізіндегі наноқоспалар полимерлік матрицалардың беріктігін бірнеше есе арттырады. CNT талшықтарының жоғары модулі мен икемділігі полимер тізбектерімен берік байланыс түзіп, материалдың серпімділік қасиетін жақсартады. Мұндай наноккомпозиттер жоғары беріктік қажет ететін салаларда — авиация, көлік, спорт индустриясы және құрылыс материалдарында — кеңінен қолданылады.
- Сонымен қатар, нанобөлшектердің үлкен меншікті беткі ауданы мен адгезиялық қабілеті матрица мен толтырғыш арасындағы интерфейстік өзара әрекеттесуді күшейтеді. Бұл композиттің микрожарықтарға және шаршау бұзылыстарына төзімділігін арттырады.
- Наноккомпозиттердің тағы бір маңызды артықшылығы — олардың **жеңілдігі мен икемділігі**. Мұндай материалдар механикалық беріктігі жоғары бола тұра салмағы жағынан әлдеқайда жеңіл, сондықтан олар **жаңа буын құрылымдық және функционалды материалдар** қатарында ерекше орын алады.

Оптикалық және механикалық қасиеттердің байланысы

Наноматериалдардың оптикалық және механикалық қасиеттері өзара тығыз байланысты, себебі екеуі де материалдың **атомаралық байланыс энергиясына, кристалдық құрылымына**, және **түйір өлшеміне** тәуелді. Наноөлшемге өткен кезде бұл қасиеттер бір-біріне ықпал етіп, материалдың жалпы физикалық мінез-құлқын өзгертеді.

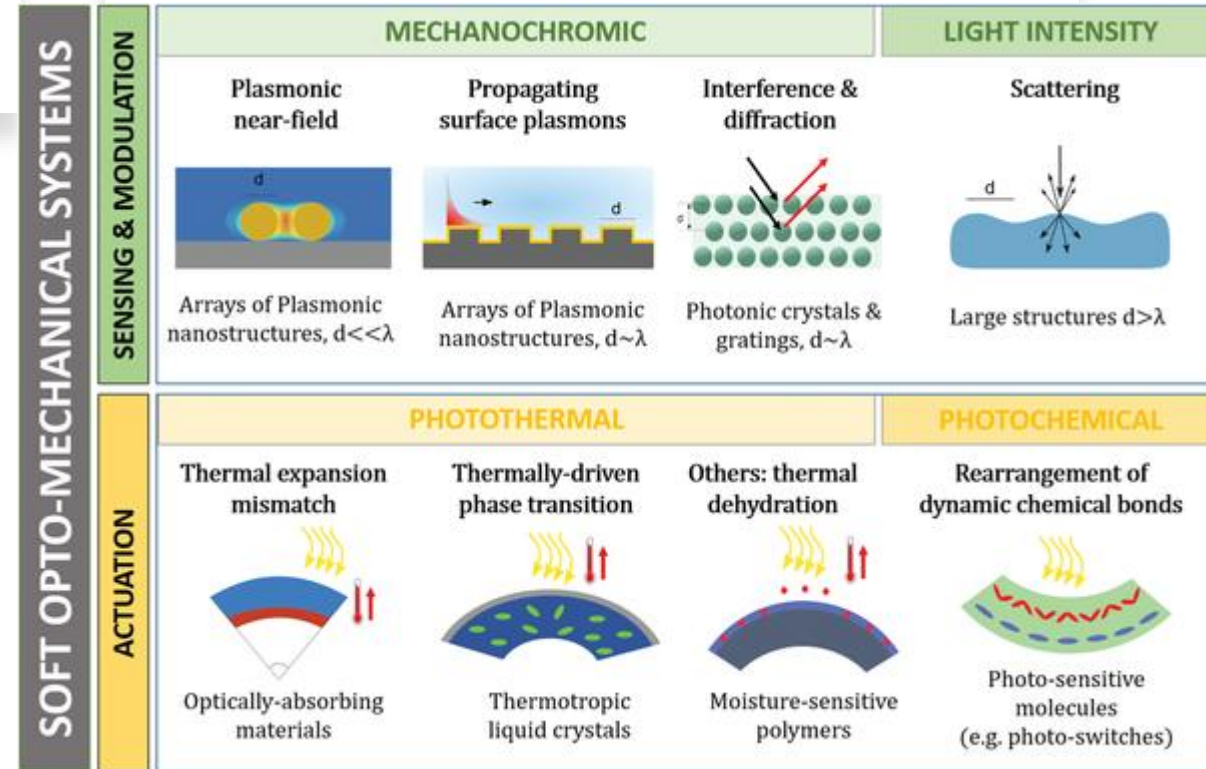
Механикалық тұрғыдан алғанда, атомаралық байланыстар неғұрлым берік болса, материал соғұрлым қатты және серпімді болады. Ал дәл сол байланыстар электрондардың энергетикалық деңгейлерін анықтайды, бұл өз кезегінде жарықтың жұтылу және сыну қасиеттеріне әсер етеді. Осылайша, **берік материалдардың оптикалық сыну көрсеткіші әдетте жоғары** болады.

Мысалы, алмаз құрылымындағы көміртек атомдарының байланысы өте берік болғандықтан, ол ең қатты әрі ең жоғары сыну көрсеткішіне ($n \approx 2.42$) ие заттардың бірі. Сол сияқты, TiO_2 және ZnO сияқты нанокұрылымды материалдарда жоғары беріктік пен үлкен оптикалық белсенділік қатар байқалады.

Наноматериалдардың механикалық деформациясы кезінде олардың оптикалық қасиеттері де өзгереді. Кристалдық тордағы кернеу немесе созылу кезінде **жарық жұтылу шегі мен люминесценция жиілігі ығысады**, бұл құбылыс **оптомеханикалық әсер** деп аталады. Мұндай әсер нанодатчиктер мен деформацияны бақылайтын оптикалық жүйелерде қолданылады.

Сонымен қатар, оптикалық энергия әсерінен (мысалы, лазерлік сәуле түскенде) материалдың ішкі кернеуі артып, **жергілікті термиялық деформация** туындауы мүмкін. Бұл өзара әсер екі бағытта жүреді:

- *механикалық кернеу → оптикалық қасиеттің өзгеруі;*
- *жарық әсері → механикалық деформацияның пайда болуы.*



Бұл суретте жұмсақ оптомеханикалық жүйелердің жұмыс істеу тәсілдері көрсетілген. Онда мұндай жүйелердің механикалық зерттеу (зондтау), жарықты басқару (оптикалық модуляция) және механикалық қозғалысты іске асыру (жетектеу) сияқты түрлі мақсаттарда қалай қолданылатыны түсіндіріледі.

Наноматериалдардың қолдану салалары

Қолдану саласы	Наноматериал түрі	Негізгі қасиеті	Қолданылу мысалы
Оптоэлектроника	CdSe, ZnO, TiO ₂ , Graphene	Кванттық люминесценция, жарық жұтылу тиімділігі	Кванттық нүктелер негізіндегі жарықдиодтар (QD-LED), күн элементтері
Биомедицина	Au, Ag нанобөлшектері, Fe ₃ O ₄	Плазмондық резонанс, биосәйкестілік	Оптикалық биосенсорлар, фототермиялық терапия, МРТ контраст агенттері
Энергетика	TiO ₂ , ZnO, Fe ₂ O ₃	Жарықты түрлендіру және энергия сақтау қабілеті	Күн батареялары, фотокатализаторлар
Механикалық инженерия	CNT-композиттер, нанокерамикалар	Жоғары беріктік, тозуға төзімділік	Авиациялық бөлшектер, жеңіл құрылымдық элементтер
Құрылыс материалдары	SiO ₂ , Al ₂ O ₃ , TiN наноқосымшалары	Қаттылық пен адгезияның артуы	Беріктігі жоғары жабындар, нанобетондар
Интеллектуалды жүйелер	Графен, пьезо-наноматериалдар	Оптомеханикалық әсер, сенсорлық сезімталдық	Деформацияға жауап беретін ақылды сенсорлар

Қорытынды

- ✓ Наноматериалдар — заманауи материалтанудың стратегиялық маңызды бағыты болып табылады. Олардың оптикалық және механикалық қасиеттері классикалық материалдарға қарағанда түбегейлі ерекшеленеді және бұл айырмашылық **кванттық өлшем эффектiсi** мен **беттік энергияның артуы** арқылы түсіндіріледі.
- ✓ Наноөлшемге өткен кезде материалдардың жарықпен әсерлесу қабілеті күрт өзгереді: жұтылу, шағылу және люминесценция процестері өлшемге тәуелді сипат алады. Сонымен қатар, түйір өлшемінің кішіреюі дислокация қозғалысын шектеп, беріктік пен қаттылықтың артуына әкеледі. Осылайша, наноматериалдардың оптикалық және механикалық қасиеттері өзара байланыста дамиды және олардың құрылымдық ұйымдасуымен тікелей анықталады.
- ✓ Наноматериалдар негізінде **жоғары тиімді жарықдиодтар, күн батареялары, фотокатализаторлар, биосенсорлар, жоғары берікті композиттер мен интеллектуалды құрылымдар** жасалуда. Мұндай технологиялар энергетика, медицина, электроника және құрылыс индустриясында кеңінен қолданыс табуда.
- ✓ Қорытындылай келе, наноматериалдардың ерекше оптикалық және механикалық қасиеттерін зерттеу — жаңа буын функционалды материалдарды жобалаудың және **наноинженерлік технологиялардың дамуының** негізгі ғылыми бағыты болып табылады.

ҚОЛДАНЫЛҒАН ӘДЕБИЕТТЕР

- Глинка, Н. Л. *Жалпы химия курсы*. — Алматы: Білім, 2018. — 640 б.
- Кузнецов, В. Н., Смирнов, Ю. И. *Наноматериалы и нанотехнологии: Учебное пособие*. — Москва: МИСиС, 2020. — 328 с.
- Жуматаев, А. Б., Қасымов, Р. Н. *Материалтану және жаңа материалдар технологиясы*. — Алматы: Қазақ университеті, 2021. — 312 б.
- Suryanarayana, C., & Norton, M. G. *Nanomaterials: Synthesis, Properties and Applications*. — Cambridge University Press, 2017. — 500 p.
- Cao, G. *Nanostructures and Nanomaterials: Synthesis, Properties and Applications*. — Imperial College Press, London, 2016. — 567 p.
- Bhushan, B. *Springer Handbook of Nanotechnology*. — Springer-Verlag, Berlin Heidelberg, 2021. — 1398 p.
- Ashby, M. F., & Jones, D. R. H. *Engineering Materials 2: An Introduction to Microstructures, Processing and Design*. — Elsevier, 2019. — 450 p.
- Kulikova, L. V., & Chernykh, I. A. *Mechanical Behavior of Nanostructured Materials*. — Materials Science Reports, Vol. 12, No. 3, 2020, pp. 145–162.
- Khan, S., et al. *Optical and Mechanical Characterization of ZnO and TiO₂ Nanomaterials for Energy Devices*. — *Journal of Nanoscience and Nanotechnology*, 2021, Vol. 21(8), pp. 3901–3910.
- Nanomaterials in Modern Science and Engineering: Review Report*. — *Materials Today Advances*, Elsevier, 2022.