

Лекция - 1. Оптика пәні. Физикадағы орны және басқа пәндермен байланысы. Фотометриялық ұғымдар мен шамалар.

Лекцияның мақсаты; Оптика пәнінің мазмұнын, жарықтың электромагниттік табиғатын және фотометриялық ұғымдарды түсіндіру. Оптикалық шамаларды (жарық күші, жарық ағыны, жарықтылық, жарықталу және т.б.) анықтауды үйрету.

Негізгі сұрақтар:

1. Оптика пәнінің анықтамасы және оның басқа ғылымдармен байланысы.
2. Жарықтың электромагниттік табиғаты.
3. Жарық туралы ілімнің тарихи дамуы.
4. Энергетикалық және фотометриялық шамалар.
5. Фотометриялық шамалар арасындағы байланыс.

Оптика - физика ғылымының дербес салаларының бірі, ол өте көне ілім. «**Оптика**» - гректің **optos** - көрінетін сөзінен шыққан, **optike** - көру (көзбен қабылдау) жөніндегі ғылым деген мағына береді.

Жарық деген не? Оның физикалық табиғаты қандай? Осы сұрақтар адамзат баласын өте ерте заманнан бастап толғандырған.

1865 ж. ағылшын физигі Дж.Максвелл электромагниттік құбылыстар теориясын дамыта келіп жарықтың электромагниттік табиғаты жөнінде электромагниттік толқын мен жарықтың табиғаты бір. Осы жорамал 1888 ж. неміс физигі Г.Герцтің тәжірибесінде расталды: электромагниттік толқындар мен жарықтың негізгі қасиеттерінің ұқсас екендігі анықталды.

Планктың энергия кванттары жайындағы идеясын (1900) Эйнштейн дамыта келе (1905) жарық кванттарының (фотондардың) энергиясымен қатар импульсы және массасы да болады деген ұйғарым жасады. Сөйтіп оптикаға корпускулалық түсініктердің көптеген белгілері қайтып оралды. Сонымен, жарықтың әрі толқындық, әрі корпускулалық қасиеттері бар; жарықтың табиғаты екі жақтылы болып шықты.

Электромагниттік толқындармен жүргізілген тәжірибелер көрінетін жарық-бұл **жиіліктері** $4 \cdot 10^{14}$ Гц-тен $8 \cdot 10^{14}$ Гц-ке дейінгі аралықта, бұларға сәйкес **толқын ұзындықтары 380 нм-ден 780 нм-ге** дейінгі аралықта жататын электромагниттік сәуле екендігін көрсетті.

Электромагниттік толқындар радиотолқындарға, инфрақызыл, көрінетін, ультракүлгін, рентгендік және γ -сәулелерге бөлінеді.

Радиотолқындар деп толқын ұзындықтары $\sim 0,1$ мм-ден артық электромагниттік толқындарды айтады.

Оптикалық электромагниттік сәуле спектрі инфрақызыл сәуленің шартты шекарасынан ($\lambda = 2 \text{ мм}, \nu = 1,5 \cdot 10^{11} \text{ Гц}$) бастап ультракүлгін сәуленің шарты шекарасына ($\lambda = 10^{-6} \text{ см}, \nu = 3 \cdot 10^{16} \text{ Гц}$) дейінгі аумақты алып жатады.

Қалыптасқан дәстүр бойынша оптика пән ретінде шартты түрде **физикалық, геометриялық және физиологиялық** болып бөлінеді.

Физикалық оптика жарықтың табиғаты және жарық құбылыстарымен байланысты мәселелерді қарастырады. Физикалық оптикада қарастырылатын мәселелерге жарық табиғатын жан-жақты зерттеу, оның толқындық және кванттық қасиеттері, изотропты және анизотропты орталарда таралу заңдары, электромагниттік сәуленің шығарылу, жұтылу, шашырау процестерінде білінетін жарықтың затпен әсерлесулері жатады.

Геометриялық оптикада кескіндердің жарық сәулелері көмегімен қалыптасуын қарастырады. Геометриялық оптика негізінде жарықтың изотропты орталарда түзу сызықты таралу заңы және жарық сәулелерінің тәуелсіз таралу заңы; оптикалық қасиеттері әртүрлі орталар шекараларындағы сыну және шағылу заңдары алынады. Жарық сәулелерінің табиғаты геометриялық оптикада қарастырылмайды.

Практикалық мәселелердің көпшілігін геометриялық оптика заңдары көмегімен шешуге болады. Оптикалық аспап теориясы соның ішінде абберрациялар теориясы және оптикалық жүйелерді есептеу әдістері негізінен геометриялық оптика заңдарына сүйенеді.

Физиологиялық оптика-көру арқылы көздің қабылдауы жайындағы ғылым-көру механизмін, көздің жарықты қабылдауын зерттейді.

Оптиканың практикалық мәні және оның білімнің басқа салаларына ықпалы ерекше зор. Телескоп пен спектроскоптың ойлап шығарылуы адамға шексіз Әлем кеңістігінде өтетін құбылыстардың таңғажайып әрі бай дүниесінің есігін ашып бергені белгілі. Микроскоптың ойлап шығарылуы кезінде биологияда төңкеріс жасады. Фотография ғылымның барлық саласында қолданылады.

Жарық туралы ілімнің дамуына тарихи шолу

Ерте заман және орта ғасырлардағы оптика. Көне грек философтары мен математиктері-Пифагор (б.д.д. 582-500 ж.ж.), Эмпедокл (б.д.д. 492-432 ж.ж.), Демокрит (б.д.д. 400-370 ж.ж.), Евклид (б.д.д. 300 ж.ж.), Платон (б.д.д. 427-347 ж.ж.), және басқалары жарық құбылыстары табиғатын көру түйсігі сезімін негізге алып түсіндіруге тырысқан.

Евклидтің пікірінше, көзден “көру сәулелері” шығарылады, бұлардың ұштары нәрсені (затты) сипалайды, бұл көру сезімін туғызады. **Евклид** жарықты зерттеуге математиканы қолданып жарықтың айналардан шағылу заңдарын тағайындады. Ол жарықтың түзу сызықты таралуы жайындағы ілімнің негізін қалаушы болып табылады.

Эмпедоклдың пікірінше, жарық шығаратын денелерден көзге ағыс бағытталады, ал көзден де денелерге қарай ағыс шығарылады. Осы ағыстар түйіскен жағдайда көру сезімі пайда болады.

Демокрит көру сәулелері жайындағы түсінікті толығымен жоққа шығарады. Оның көзқарасына сәйкес денелерден шығарылатын атомдар көз бетіне түскенде көру сезімі пайда болады.

Біздің дәуірімізге дейінгі III ғ. өзінде геометриялық оптика негізі қаланған. Бұған дәлел **Евклидтің** өзіне дейінгі белгілі тәжірибе деректерін қорыту нәтижесінде жазылған «Оптика», «Катоптика» деген еңбектерінде геометриялық оптиканың негіздері баяндалады.

Орта ғасыр дәуіріндегі оптика. Орта ғасыр дәуірінде (X-XVI ғ.ғ.) ғылымның барлық саласында, соның ішінде оптикада да құлдырау байқалады. Осы кезеңде оптика ғылымы сәулелердің шағылу, сыну заңдарын, бұлардың линза арқылы өтуін зерттеу бағытында дамыды. Жарық табиғатына зерттеу жүргізілмеді.

XVII-XVIII ғ.ғ. оптиканың дамуы. Жарықтың корпускулалық және толқындық теориялары. Жарық құбылыстарын зерттеу нәтижелері жинақталған сайын жарық табиғатына деген көзқарас та өзгеріп отырды.

XIX ғасырдағы оптика. Жарықтың толқындық теориясының нығаюы. 19 ғ. оптика тарихындағы ең басты уақиға толқындық теорияның жеңісі болды. Ағылшын физигі Томас Юнг (1773-1829) интерференциялық теорияның басты теориялық баптарын тұжырымдады және Ньютонның түрлі-түсті сақиналарының қалай пайда болатындығын түсіндіріп берді. Ол жарықтың толқын ұзындығының жуық мәнін тұңғыш анықтады. 1817 ж. Юнг жарықтың көлденең толқындарға жататындығы жөнінде пікір айтты. Бірақта сол кезде үстем болып тұрған дүниелік эфир жайындағы түсініктер тұрғысынан жарық толқындарының көлденең екендігін дәлелдеу мүмкін болмады.

XX ғ. оптика. Жарықтың кванттық және фотондық теориялары. 19 ғ. соңы 20ғ. басында жаратылыстануда төңкеріске әкеліп соққан бір топ физикалық құбылыстар ашылды. Кеңістік, уақыт, зат құрылысы жайында жаңа түсініктер пайда болды. 1895 ж. неміс физигі Рентген (1845-1923) көрінбейтін, бірақ күшті өткіш сәулелерді ашты. Неміс ғалымы Лауэ рентген сәулелерінің кристалдардағы дифракциясын бақылап, рентген сәулелері де электромагниттік толқындар екендігін, тек спектрдің көрінетін аймағындағы толқындарға қарағанда өте қысқа электромагниттік толқындар екендігін өзінің эксперименттерінде дәлелдеп берді.

Эйнштейн (1879-1955) Планк идеясын дамытты әрі тереңдете түсті. 1905 ж. ол жарықтың шығарылуы және жұтылуы ғана емес, жарықтың таралуы да жарық бөлшектері-жарық кванттарының ағыны түрінде өтеді деп ұйғарды.

Жарықтың кванттық теориясына сәйкес жарықтың таралуы үздіксіз толқындық процесс ретінде емес, ерекше бөлшектер-фотондардың қозғалысы ретінде (вакуумда жарық жылдамдығымен) қарастырылады.

Кванттық теория жарықтың Ньютон ұсынған корпускулалық теориясына қайта оралу емес, өйткені Ньютонға сәйкес жарық бөлшектері-корпускулалар-бұл кәдімгі механикалық бөлшектер.

Жарық кванттарының теориясы жарықтың толқындық теориясы көмегімен түсіндіруге келмеген көптеген оптикалық құбылыстарды түсінуге мүмкіндік берді: жарықтың шығарылуы және жұтылуы, фотоэффект, флюоресценция және басқалары.

Бақылау сұрақтары:

1. Оптика ғылымының зерттеу нысаны қандай?
2. Жарықтың электромагниттік табиғатын кім дәлелдеді?
3. Геометриялық, физикалық және кванттық оптика қандай құбылыстарды зерттейді?
4. Энергетикалық және фотометриялық шамалар қалай анықталады?
5. Кандела және люмен шамалары нені сипаттайды?

Ұсынылатын әдебиеттер:

Сивухин Д.В. 3-е изд., стереот. М.: ФИЗМАТЛИТ; Изд-во МФТИ, 2021, 792 с.

Савельев, И.В. Курс общей физики. В 3-х т.: Учебное пособие для студ. вузов/ И.В.Савельев.- 10-е изд., стер.- СПб: Лань. - (Учебники для вузов. Специальная литература) Т.2: Электричество и магнетизм. Волны. Оптика, 2020, 496с.

Иродов И.Е. Волновые процессы. Основные законы. Издательство "Лаборатория знаний", 8-ое издание, 2020, 266 стр.

Иродов И.Е. Задачи по общей физике, 13-е изд. — М.: Лаборатория знаний, 2020, 431 стр.

Жұманов К.Б. Оптика негіздері, Алматы: Қазақ университеті, 2020, 321 бет.

Аль-Фараби атындағы Қазақ Ұлттық университеті
Физикалық техникалық факультеті

**Оптика пәні. Физикадағы орны
және басқа пәндермен
байланысы. Фотометриялық
ұғымдар мен шамалар.**

Мархабаева А.А.

«Оптика»

Оптика - физика ғылымының дербес салаларының бірі, ол өте көне ілім. «Оптика» - гректің **optos** - көрінетін сөзінен шыққан, **optike** - көру (көзбен қабылдау) жөніндегі ғылым деген мағына береді.

Оптика жарықтың физикалық табиғатын және оның қасиеттерін, затпен әсерлесуін зерттейтін физиканың бөлігі.

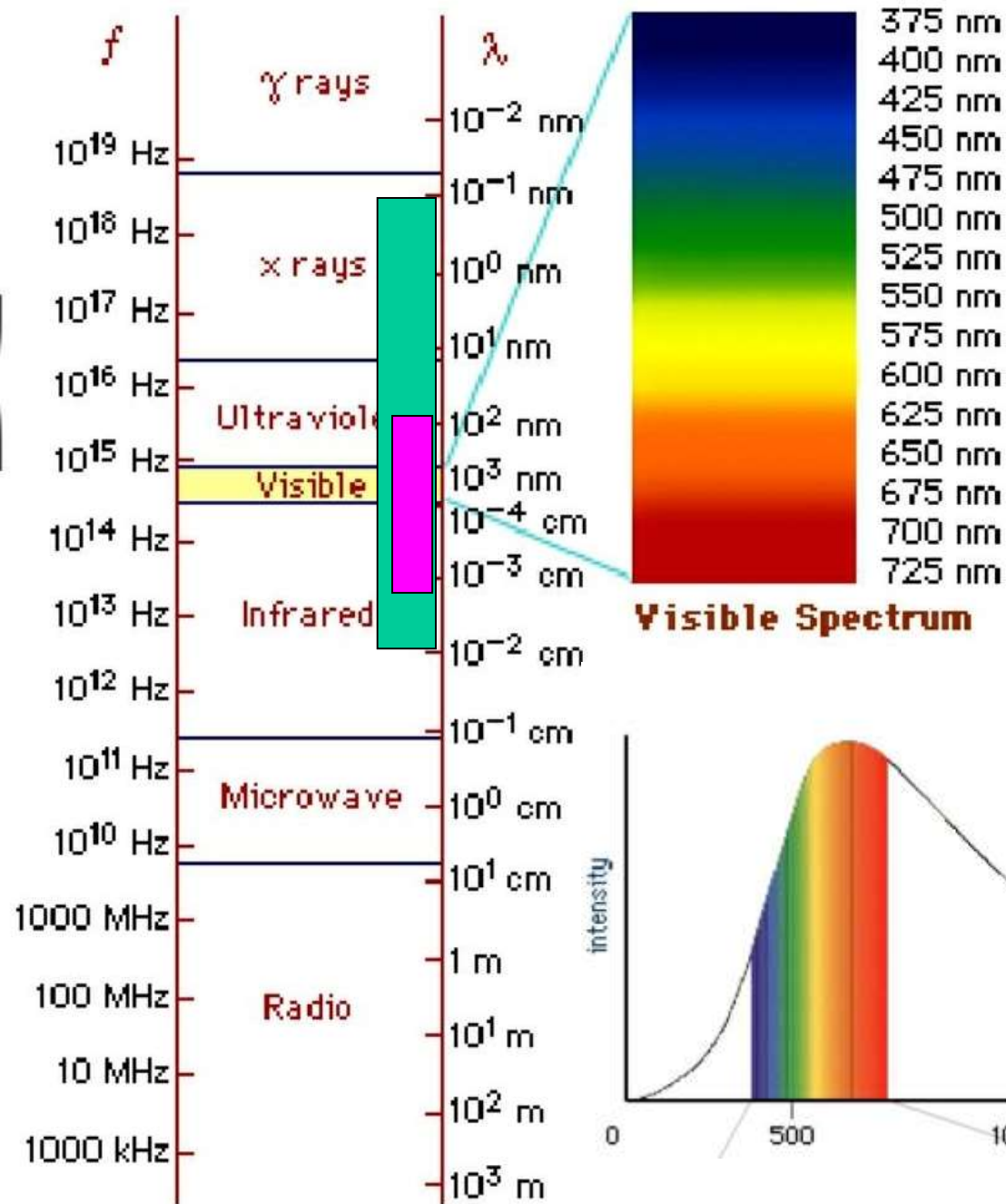
Оптикалық сәуле немесе жарық дегеніміз толқын ұзындығы $10^{-3} - 10^3$ мкм аралықты жататын электромагниттік сәулені айтамыз. Соның ішіне ультракүлгін $10^{-3} - 0,38$ мкм, көрінетін жарық $0,38 - 0,78$ мкм және толқын ұзындығы $0,78 - 10^3$ мкм инфрақызыл сәулелері жатады.

Физикалық оптика жарықтың табиғаты және жарық құбылыстарымен байланысты мәселелерді қарастырады.

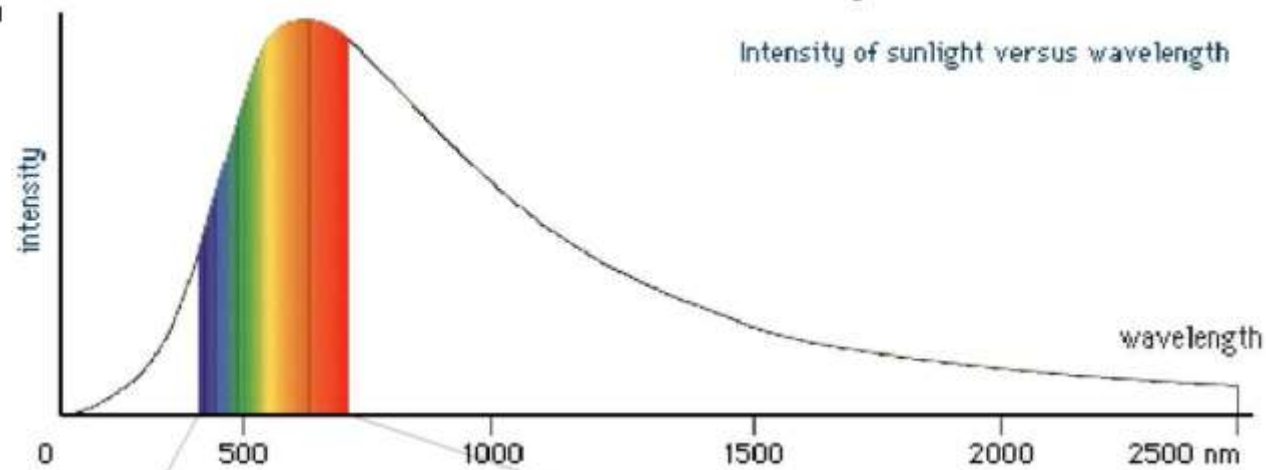
Геометриялық оптикада кескіндердің жарық сәулелері көмегімен қалыптасуын қарастырады. Геометриялық оптика негізінде жарықтың изотропты орталарда түзу сызықты таралу заңы және жарық сәулелерінің тәуелсіз таралу заңы; оптикалық қасиеттері әртүрлі орталар шекараларындағы сыну және шағылу заңдары алынады. Жарық сәулелерінің табиғаты геометриялық оптикада қарастырылмайды. Практикалық мәселелердің көпшілігін геометриялық оптика заңдары көмегімен шешуге болады. Оптикалық аспап теориясы соның ішінде абберрациялар теориясы және оптикалық жүйелерді есептеу әдістері негізінен геометриялық оптика заңдарына сүйенеді.

Физиологиялық оптика- көру арқылы көздің қабылдауы жайындағы ғылым-көру механизмін, көздің жарықты қабылдауын зерттейді.

Шкала Э-М ВОЛН



The Solar Spectrum



Жарық туралы ілімнің дамуына тарихи шолу
Ерте заман және орта ғасырлардағы оптика.
Көне грек философтары мен математиктері-Пифагор (б.д.д. 582-500 ж.ж.), Эмпедокл (б.д.д. 492-432 ж.ж.), Демокрит (б.д.д. 400-370 ж.ж.), Евклид (б.д.д. 300 ж.ж.), Платон (б.д.д. 427-347 ж.ж.), және басқалары **жарық құбылыстары табиғатын көру сезімін** негізге алып түсіндіруге тырысқан. Евклидтің пікірінше, көзден “көру сәулелері” шығарылады, бұлардың ұштары нәрсені (затты) сипалайды, бұл көру сезімін туғызады. Евклид жарықты зерттеуге математиканы қолдынып жарықтың айналардан шағылу заңдарын тағайындады. Ол жарықтың түзу сызықты таралуы жайындағы ілімнің негізін қалаушы болып табылады. Эмпедоклдың пікірінше, жарық шығаратын денелерден көзге ағыс бағытталады, ал көзден де денелерге қарай ағыс шығарылады. Осы ағыстар түйіскен жағдайда көру сезімі пайда болады. Демокрит көру сәулелері жайындағы түсінікті толығымен жоққа шығарады. Оның көзқарасына сәйкес денелерден шығарылатын атомдар көз бетіне түскенде көру сезімі пайда болады. Біздің дәуірімізге дейінгі III ғ. өзінде геометриялық оптика негізі қаланған. Бұған дәлел **Евклидтің** өзіне дейінгі белгілі тәжірибе деректерін қорыту нәтижесінде жазылған «Оптика», «Катоптика» деген еңбектерінде геометриялық оптиканың негіздері баяндалады.



Пифагор

Біздің эрамызға дейінгі 570 ж объектілер өздігінен шығаратын бөлшектердің арқасында көрінеді деп ойлаған.



Аристотель (384-322 гг. до н.э.)

Оптикалық құбылыстардың заңын байланыстырған, жарықтың түзу сызық бойымен таралуын, жарықтың айна беттерден шашырауын, сәуленің екі орта шекарасында сынуын зерттеп алғашқы физика кітабын жазған.

Эвклид (III в. до н. э.)

“Оптика” және
“Катоптрика” еңбегінде
жарықтың таралуы мен
шашырауы туралы жазған.
Оптиканың негізін
қалаушы болып
есептелінеді.

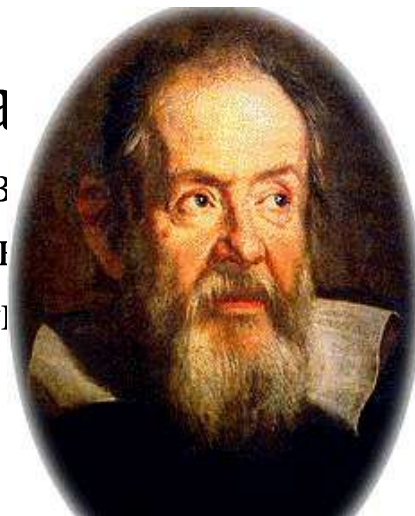


Ойыс айналардың
фокуска
сәулелерді
жинайтындығын
байқаған.

Архимед (287-212 гг. до н.э.)



Иога
негізгі з
арақаш
трактат



(1571 -1630
ленің жарық
ына тәуелділ
алық ось, жү



Фотометрия

- Жарық энергия тасымалдайды
- Энергия негізгі екі жолмен — **бөлшектер** немесе **толқындар** көмегімен тасымалдануы мүмкін. Бірінші жағдайда энергия тасымалдаушы материалдық бөлшектер болады, ал екінші жағдайда толқындар энергияны үлкен қашықтықтарға тасымалдай алады, бірақ осы жағдайда массаның орын ауыстырылуы болмайды.
- Фотометрия жарық ағындарының қасиеттерін көру сезімталдығымен байланыстыратын оптиканың бір бөлігі.
- Оптикалық аумаққа жататын электромагниттік толқындардың тасымалдайтын энергиясын өлшеулермен шұғылданатын оптика бөлімі *фотометрия* деп аталады.

Фотометрия

- Көрінетін жарық 380 нм-760 нм аралығында жататын толқындар.
- Адам көзі сезімталдығы 550 нм толқын ұзындығында жоғары және осы толқын ұзындығын жақсы қабылдайды.
- Толқын ұзындықтары әртүрлі жарық бірдей жарық ағыны жағдайында әртүрлі көру сезімін туғызатындықтан, көздің салыстырмалы сезгіштіктері деп аталатын шамалар бірдей көру сезімін беретін монохроматтық қуаттарға кері пропорционал болады, яғни

$$V_{\lambda} = \frac{b}{\Phi(\lambda)}$$

Фотометрия

Толқын ұзындықтары әртүрлі жарық бірдей жарық ағыны жағдайында әртүрлі көру сезімін туғызатындықтан, көздің салыстырмалы сезгіштіктері деп аталатын шамалар бірдей көру сезімін беретін монохроматтық қуаттарға кері пропорционал болады, яғни

$$V_{\lambda} = \frac{b}{\Phi(\lambda)},$$

мұндағы V_{λ} -көздің салыстырмалы сезгіштігі (көру функциясы), $\Phi(\lambda)$ -монохроматты жарық ағыны шамасы, b -пропорциялық коэффициент, мұны көздің салыстырмалы сезгіштігінің максимум мәніне (шартты түрде 1-ге тең) сүйеніп анықтауға болады. Егер $V_{\lambda} = 1$ болатын толқын ұзындығын λ_0 арқылы белгілесек, онда $b/\Phi(\lambda_0) = 1$, осыдан $b = \Phi(\lambda_0)$ болады.

Демек, $V_{\lambda} = \frac{\Phi(\lambda_0)}{\Phi(\lambda)}$. λ_0 -көздің максимум сезгіштігіне сәйкес толқын ұзындық болғандықтан, жарық ағынының $\Phi(\lambda_0)$ шамасы бірдей көру сезімін беретін монохроматты қуаттарының ішінен ең кішісі (минимум) болады, яғни $\lambda_0 = 555$ нм-ден өзгеше барлық толқын ұзындықтар жағдайында $\Phi(\lambda_0) < \Phi(\lambda)$:

$$V_{\lambda} = \begin{cases} 0 & 400\text{нм} > \lambda > 760\text{нм} \\ < 1 & \lambda \neq \lambda_0 \\ 1 & \lambda = \lambda_0 = 555\text{нм} \end{cases} \quad (\text{көрінетін аймақ})$$

Фотометрия

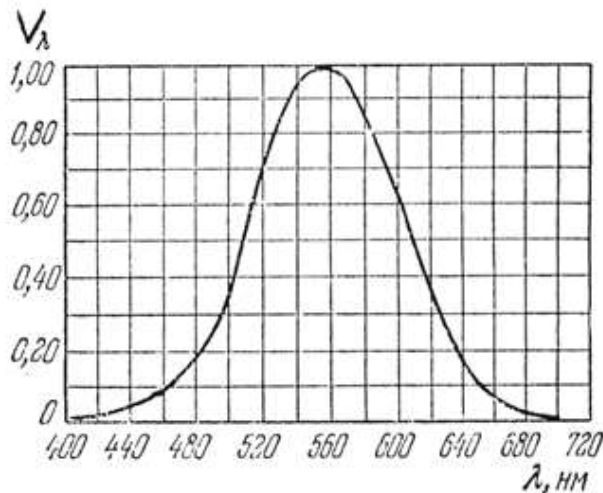
Көздің сезгіштігінің жарықтың толқын ұзындығына тәуелділігі (көру функциясы) 5-суретте келтірілген. Көру функциясының максимум мәні $\lambda_0 = 555$ нм толқын ұзындығына сәйкес келеді. Сондықтан жарық ағыны (лм) мен жарық қуаты (Вт) арасындағы байланысты толқын ұзындығы үшін табу ыңғайлы. $\lambda_0 = 555$ нм толқын ұзындығы жағдайында 1 лм жарық ағынына 0,0016 Вт қуат сәйкес келеді, яғни

$$1 \text{ лм}(\lambda = 555 \text{ нм}) = 0,0016 \text{ Вт},$$

немесе $1 \text{ Вт}(\lambda = 555 \text{ нм}) = 650 \text{ лм}.$

Көрінетін аймақтағы кез-келген λ толқын ұзындығы үшін осы сияқты байланысты көру функциясын пайдаланып тағайындауға болады:

$$1 \text{ Вт}(\lambda) = 650 V_{\lambda} \cdot \text{лм}.$$



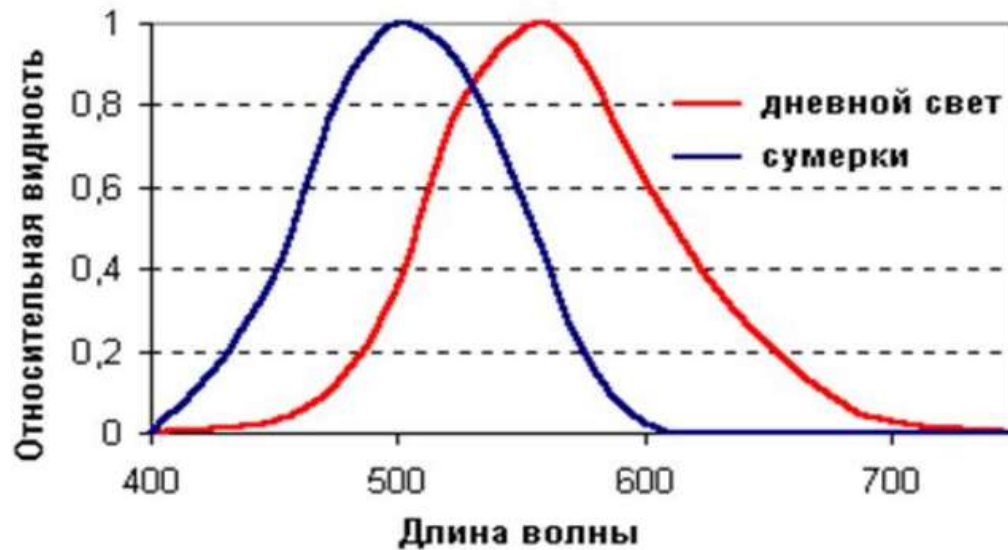
5-сурет

$M = 0,0016 \text{ Вт/лм}$ шамасы жарықтың ең кіші механикалық эквиваленті деп аталады, өйткені $\lambda_0 = 555$ нм-ден өзгеше барлық толқын ұзындықтары жағдайында шамасы 1 лм жарық ағынына сәйкес келетін қуат 0,0016 Вт-тан үлкен болады.

Фотометрия

Кривая видности -

относительная спектральная чувствительность глаза к излучениям различных длин волн

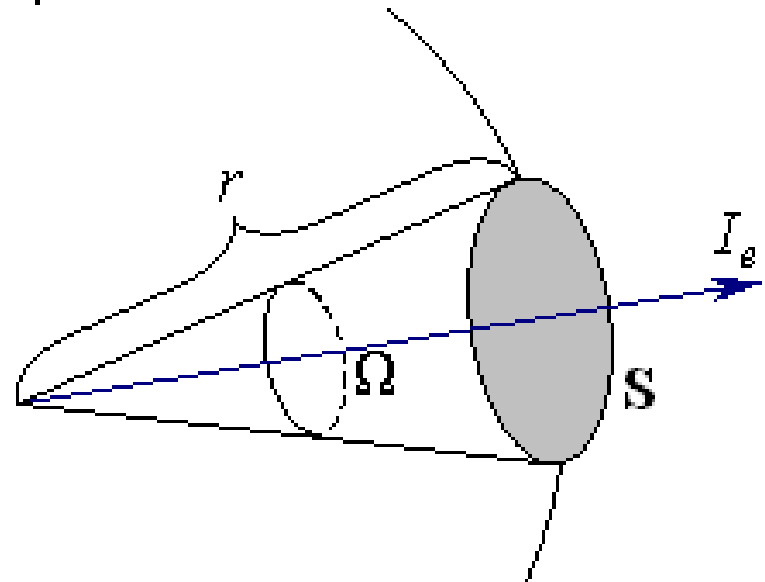
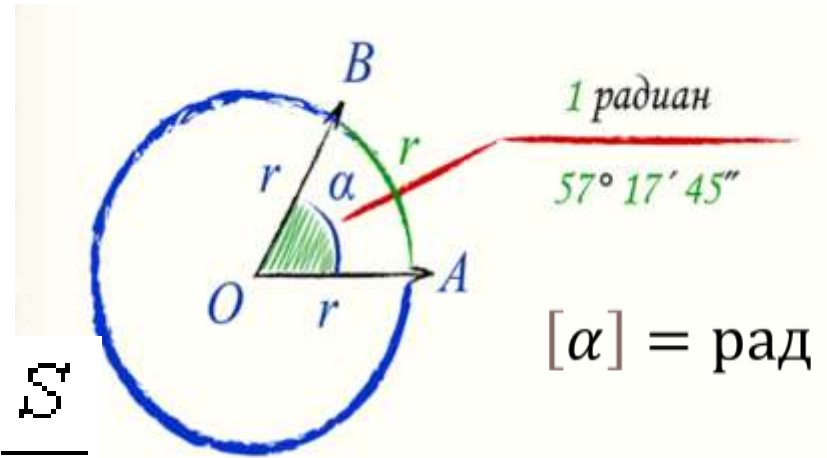


- максимальная чувствительность глаза при дневном свете — на длине волны **555 нм**,
- при сумеречном свете - на длине волны **510 нм**.

Негізгі ұғымдар

- Жазық бұрыш радианмен анықталады.
- 1 радиан — доға ұзындығы шеңбер радиусына тең, орталық бұрыш.
- Денелік бұрыш — кеңістіктің кез келген бір конустық бетпен шектелген бөлігі;
- **Конустың денелік бұрышы S ауданның конустан кесіліп алынған сфераның радиусының квадратының қатынасына тең** Денелік бұрыш стерadianмен өлшенеді (сферада 4π ср).
- 1 ср. дегеніміз сферадан ауданы сфера радиусының квадратына тең бет қиятын, төбесі сфера центрінде жатқан денелік бұрышқа тең.

$$\Omega = \frac{S}{r^2}$$

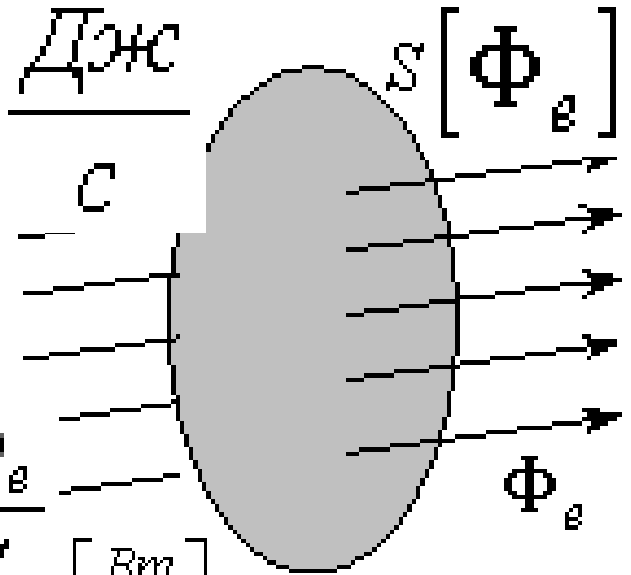


[ср]

Оптикадағы өлшем бірліктер

Энергетикалық жарық ағыны Φ_e —белгілі аудан арқылы бірлік уақыттағы энергия шамасы

$$1 \text{ Вт} = 1 \frac{\text{Дж}}{\text{с}}$$



$$S [\Phi_e] = \text{Вт}$$

Жарық ағыны Φ (световой поток)— көру сезімталдығымен бағаланатын жарық сәулелерінің ағыны

$$E_e = \frac{\partial \Phi_e}{\partial S} \left[\frac{\text{Вт}}{\text{м}^2} \right]$$

Өлшем бірлігі люмен [лм]

Мысалы жарықтың толқын ұзындығы 550 нм де $\Phi_e = 1 \text{ Вт}$ болса, жарық ағыны $\Phi = 683 \text{ лм}$.

$$\Phi = 683 \frac{\text{лм}}{\text{Вт}} \cdot V \cdot \Phi_e$$



Жарықтық шамалар

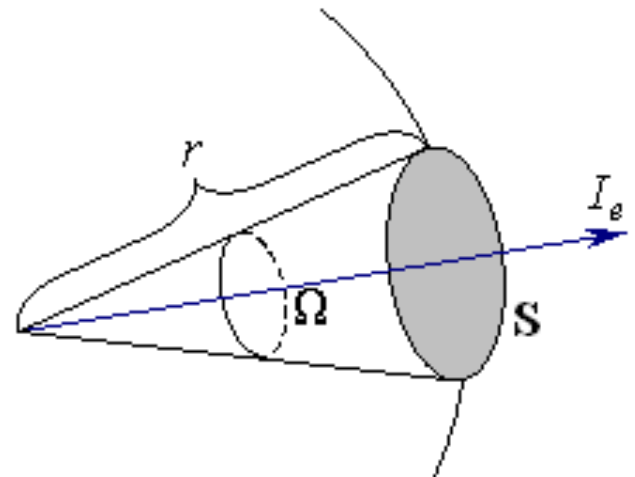
**Жарық күші нүктелік
жарық көзінің
сипатамасы**

$$I = \frac{\partial \Phi}{\partial \Omega} \quad [\text{кд}] \quad (2.1)$$

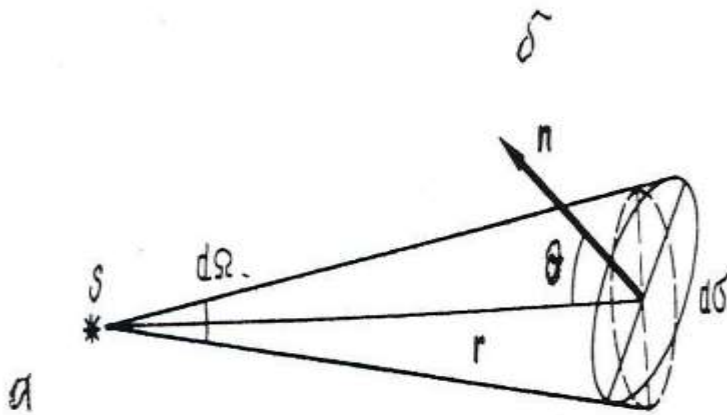
кд – (кандела) жарық күшінің өлшем бірлігі

1 кандела – ауданы $1/60\text{см}^2$ қату температурасы ($\sim 2042^\circ\text{K}$) болатын платинаның сәулелену күші

$$I_e = \frac{\Phi_e}{\Omega} \quad \left[\frac{\text{Вт}}{\text{ср}} \right]$$



- Барлық бағыт бойынша біркелкі таралаған жарық көзін **изотропты жарық** көзі деп атайды.



$$dI = I_0 = \text{const}$$

$$\Phi = 4\pi I$$

Жарықталу

(освещенность):

$$E = \frac{\partial \Phi}{\partial S} \quad [лк] \quad (2.3)$$

1 люкс—1 лм ағын түсетін беттің жарықталынуы

Жарқырау
(светимость)

$$[M] = \frac{\text{лм}}{\text{м}^2} \quad R = \frac{\partial \Phi}{\partial S}$$

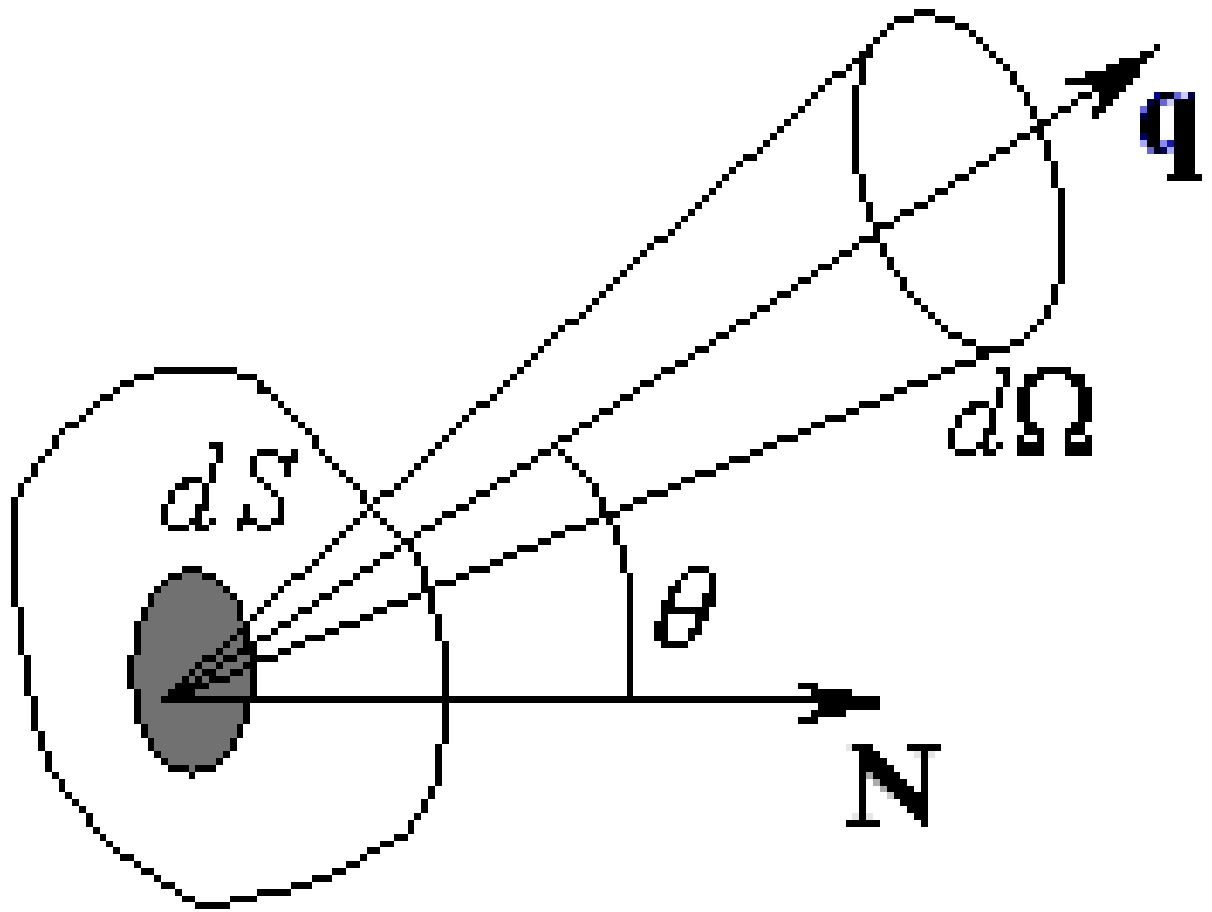
Жарқыраудың өлшем бірлігі ретінде бірлік ауданда жарық ағыны *1 лм* болатын беттің жарқырауын алады.

Жарық интенсивтілігі:

Жарық интенсивтілігінің өлшем бірліі *1 м²* ауданға нормаль болатын *1 лм* жарық ағынының интенсивтілігін алады.

$$[J] = \frac{\text{лм}}{\text{м}^2} \quad I = \frac{\partial \Phi}{\partial S}$$

**Энергетикалық
жарықтылық
(яркость).–** бірлік
аудан және бірлік
денелік бұрышта
таралатын жарық
ағыны



$$L_e = \frac{\partial^2 \Phi_e}{\partial \Omega \cdot \partial S \cdot \cos \theta} = \frac{dI_e}{dS \cos \theta} \left[\frac{Bm}{cp \cdot m^2} \right] \quad (1.11)$$



Энергетикалық өткізу

коэффициенті τ_e – дене арқылы
өткен жарық ағынының түскен жарық
ағынына қатынасын көрсететін шама

$$\tau_e = \frac{\Phi'_e}{\Phi_e}$$
$$(0 < \tau_e < 1)$$

Ортаның оптикалық

тығыздығы – өткізу
коэффициентінің логарифміне
кері шама

$$D = \lg \frac{1}{\tau} = -\lg \tau$$