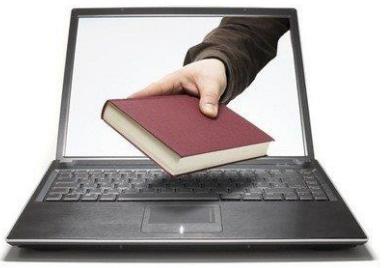




FIZIKA KAFEDRASI



Fizika II

2019

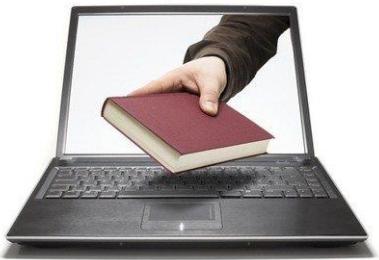
# OPTIKA. KVANT MEXANIKASINING ASOSLARI

8 – ma’ruza

K.P.Abduraxmanov,  
V.S.Xamidov, M.F.Raxmatullaeva



TÁBIYIY HÁM  
ANÍQ PÁNLER  
KAFEDRASÍ



Fizika II

2023

# OPTIKA. KVANT MEXANIKASÍNÍN TIYKARLARÍ

8 – lekciya. Jaqtılıq dispersiyası hám  
polyarlanıwi.

Qaraqalpaq tiline awdarmalaǵan  
S.G. Kaypnazarov



# Lekciya rejesi

Normal hám anomal dispersiya.

Dispersiyanıń klassikalıq elektron teoriyası.

Jaqtılıqtıń jutılıwı hám shashırawı.

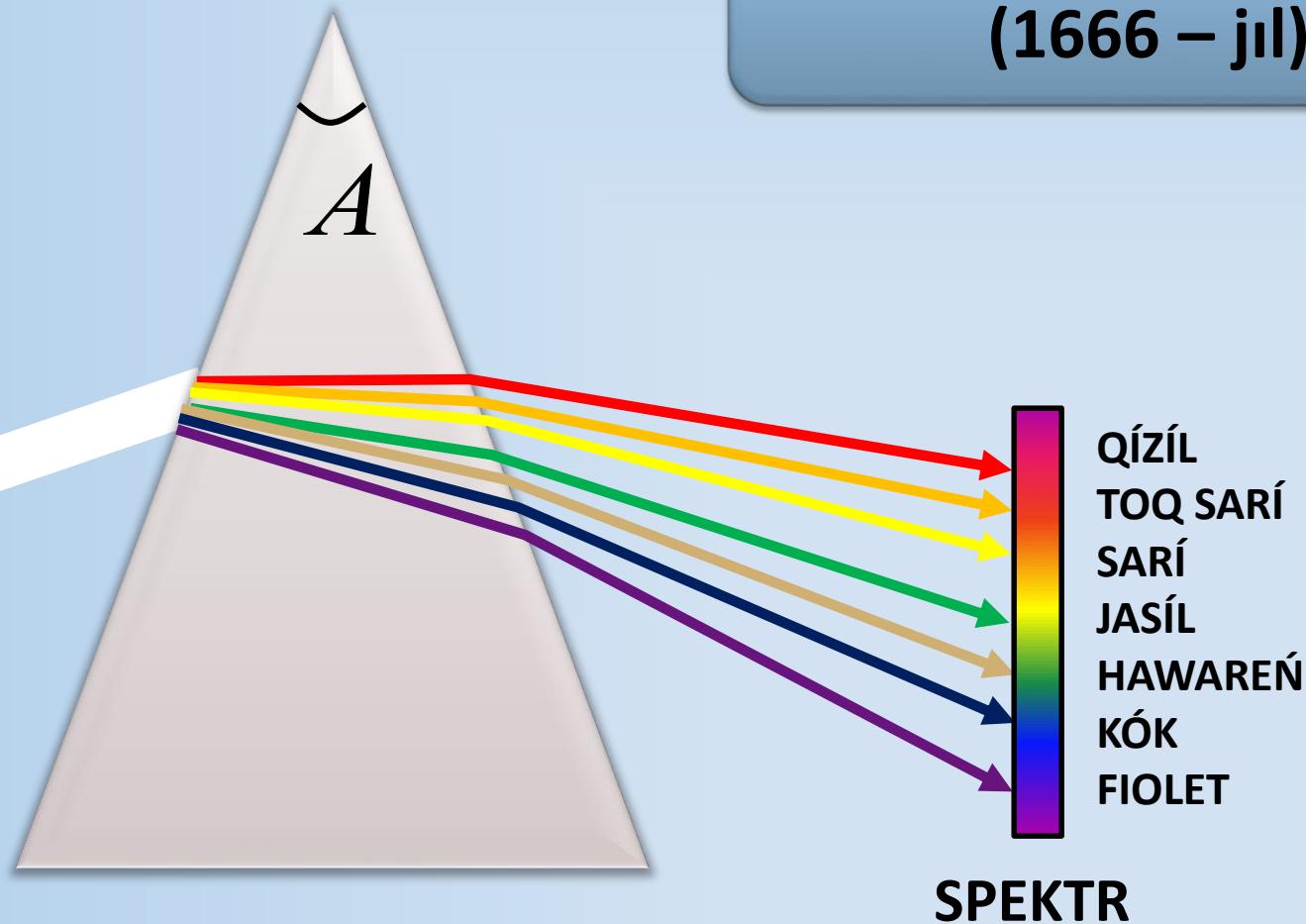
Jaqtılıq nurlarınıń shaǵılısıwı hám sınıwındaǵı polyarlanıw.

Qos nur sınıwi.

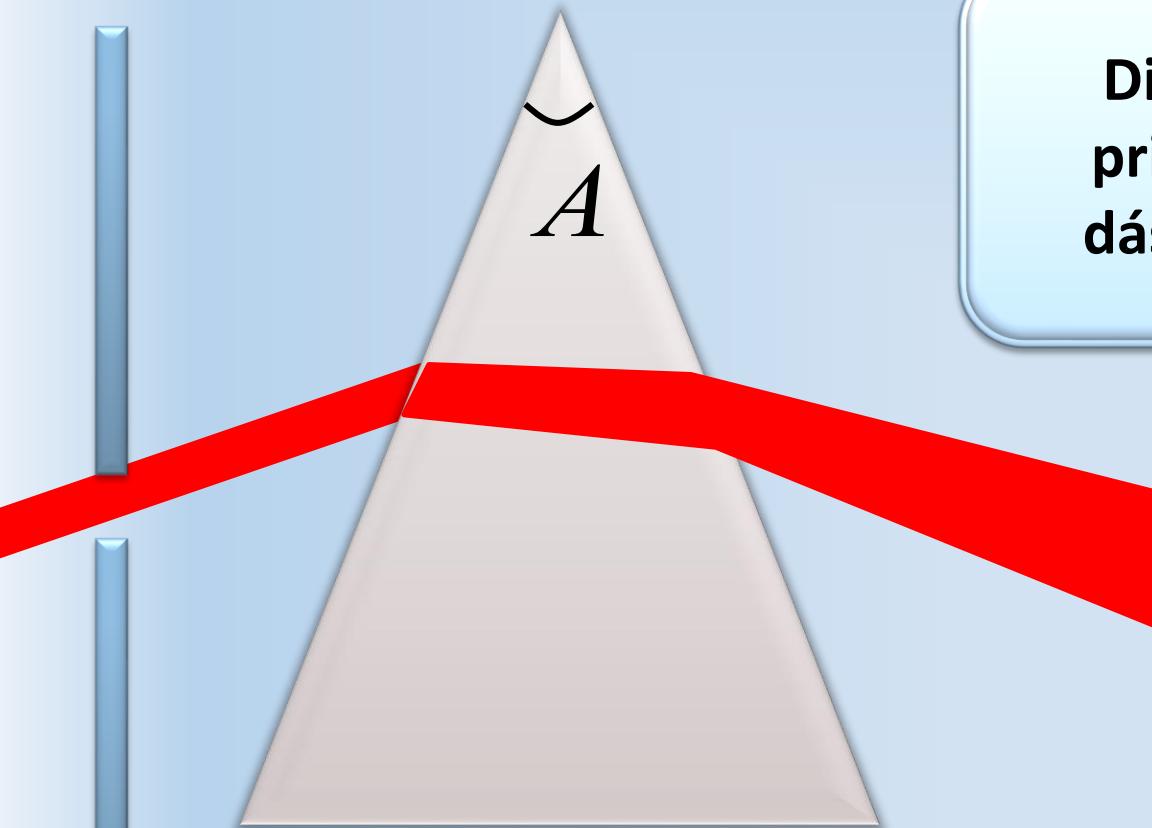
Polyarlanıw tegisliginiń aylanıwı.

# Jaqtılıq dispersiyası

Njuton tájiriybesi  
(1666 – jıl)



*n* sindiriw kórsetkishiniń v jaqtılıq ( $\lambda$  tolqın uzınlıqtaǵı) jiyiligine baylanıslılığı jaqtılıqtıń dispersiyası dep ataladı.



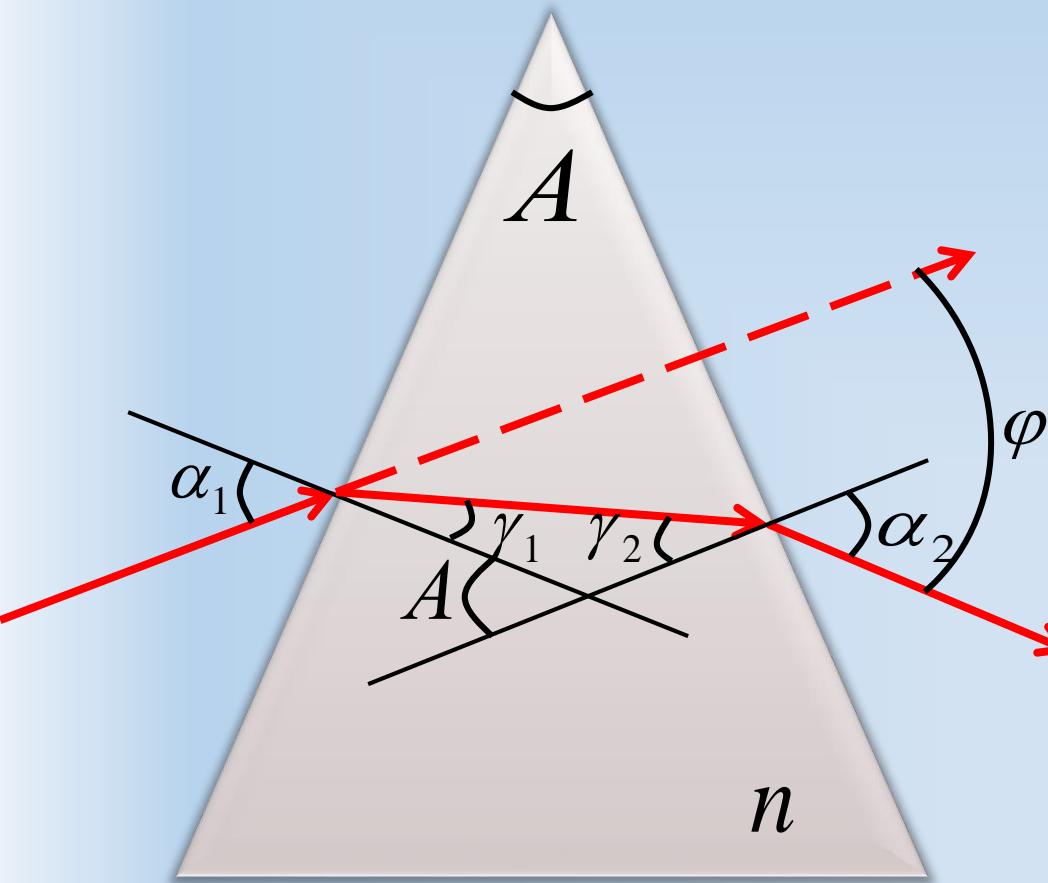
Dispersiya nátiyjesinde prizmadan ótken aq nur dástesi spektrge jayıladı.

Dispersiya tek monoxromatikalıq bolmaǵan tolqınlarda baqlanadı.

Qızıl nur tolqın uzınlığı 800-600 nm diapazonda jatadı.



# Prizmada jaqtılıq dispersiyası



Jaqtılıq nurınıń eki ese  
singanınan soń awısıw mýyeshi

$$\begin{aligned}\varphi &= (\alpha_1 - \gamma_1) + (\alpha_2 - \gamma_2) = \\ &= \alpha_1 + \alpha_2 - A\end{aligned}$$

Egerde  $A$  hám  $\alpha_1$  mýyeshler  
kishi bolsa

$$\frac{\alpha_1}{\gamma_1} = \frac{n}{1} \quad u \quad \frac{\gamma_2}{\alpha_2} = \frac{1}{n}$$

$$\gamma_1 + \gamma_2 = A$$

$$\alpha_2 = \gamma_2 n = n(A - \gamma_1) = n\left(A - \frac{\alpha_1}{n}\right) = nA - \alpha_1$$

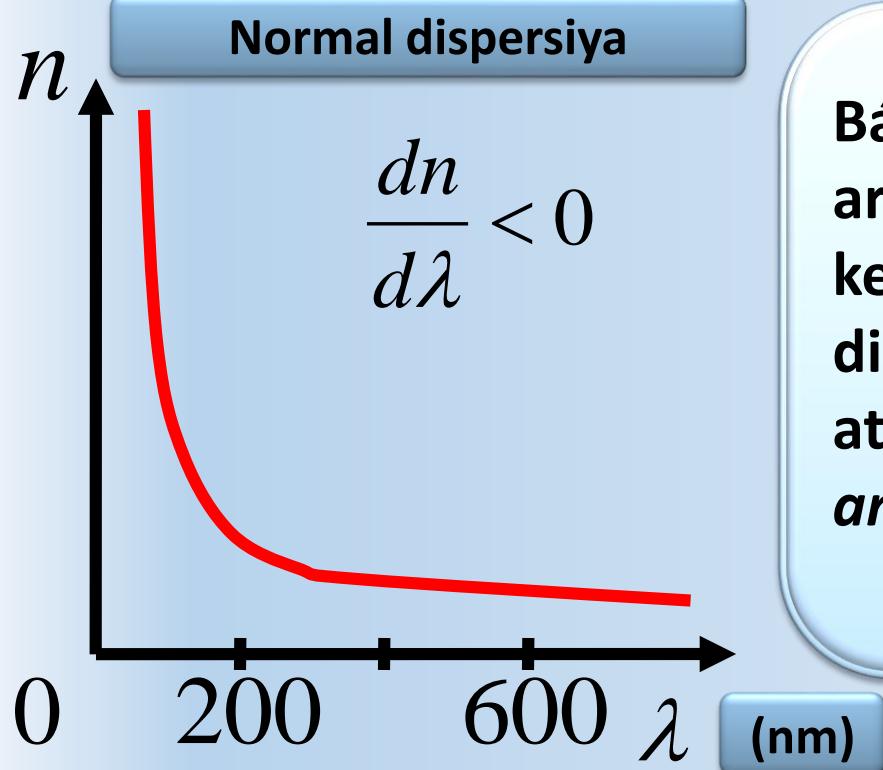


$$\alpha_1 + \alpha_2 = nA$$

Prizmaniń sindırıw kórsetkishi úlken bolsa,  
prizmadan nurlardıń awısıwı da úlken boladı.

$$\varphi = A(n - 1)$$

$D = \frac{dn}{d\lambda}$  shama — zattıń dispersiyası dep ataladı.



Bárshe tınıq zatlarda tolqın uzınlığı artıwı menen sindırıw kórsetkishi kemeyip baradı ( $\frac{dn}{d\lambda} < 0$ ): bunday dispersiya *normal dispersiya* dep ataladı.  $\frac{dn}{d\lambda} > 0$  bolǵan halda *anomal dispersiya baqlanadı*.

# Hár túrli zatlarda sindiriw kórsetkishiniń tolqın uzınlığına baylanıslılığı

| λ tolqın uzınlığı (reńi) | Sındırıw kórsetkishi       |                             |                    |        |
|--------------------------|----------------------------|-----------------------------|--------------------|--------|
|                          | Shiyshe,<br>awır,<br>flint | Shiyshe<br>jeńil<br>Mineral | Uglerod<br>sulfidi | Suw    |
| 656,3 (qızıl)            | 1,6444                     | 1,5145                      | 1,6219             | 1,3311 |
| 589,3 (sarı)             | 1,6499                     | 1,5170                      | 1,6308             | 1,3330 |
| 486,1 (hawareń)          | 1,6657                     | 1,5230                      | 1,6799             | 1,3371 |
| 404,7 (fiolet)           | 1,6852                     | 1,5318                      | 1,6990             | 1,3428 |

## Dispersiyanıń elektron teoriyası

Lorenctiń dispersiya elektron teoriyası *jaqtılıq dispersiyasınıń elektromagnit tolqınlardıń zat quramına kiriwshi*, tolqınlardıń ózgermeli elektromagnit maydanında májbúriy terbelmeli háreket etiwshi zaryadlanǵan bóleksheler menen ózara tásırı nátiyjesi dep qaraydı.

Lorenc teoriyasına tiykarlanıp, jaqtılıq dispersiyası — $\varepsilon$  niń jaqtılıq tolqınlarınıń  $v$  (tolqın uzınlığı  $\lambda$ ) jiyiligine górezlilik nátiyjesi.

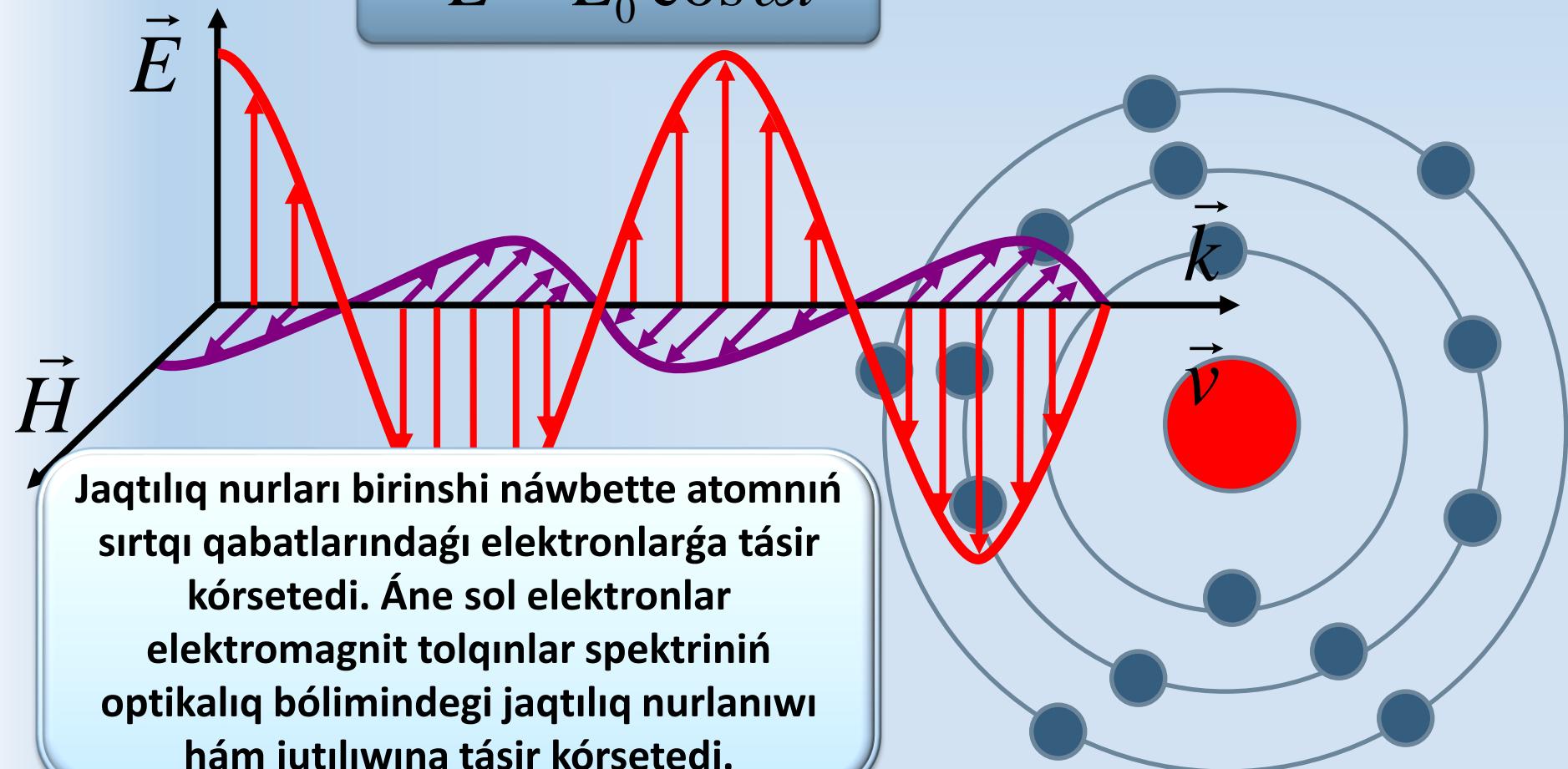
$\varepsilon$  - ortalıqtıń dielektrik sińiriwshılıgi



$$\varepsilon = 1 + \chi = 1 + \frac{P}{\varepsilon_0 E}$$

Jaqtılıq dispersiyası elektromagnit tolqinniń ózgermeli (jaqtılıq) maydanı tásırı astında zaryadlanǵan bólekshelerdiń (elektronlar hám ionlar) májbúriy terbelisleri nátiyjesinde júz beredi.

$$E = E_0 \cos \omega t$$



Ortalıqtıń absolyut sindırıw kórsetkishi

$$n = \sqrt{\epsilon\mu}$$

Spektrdiń optikalıq tarawında bárshe zatlar ushın ,  $\mu \approx 1$   
sol sebepli  $n = \sqrt{\epsilon}$

Atom hám molekulalar ózleriniń menshikli terbelis jiyiliklerine iye boladı. Elektronlardıń májbúriy terbelisleri amplituda hám fazaları sırtqı maydannıń terbelis jiyiligine baylanıslı boladı – sol sebepli tómendegi baylanıslar orınlı boladı:  $\epsilon(\omega)$  hám  $n(\omega)$ .

$\omega_0$ —elektron terbelisiniń menshikli jiyiliği,  
 $m$ —elektron massası,  
 $e$ —elektron zaryadı,  
 $x$ —jaqtılıq tolqınıñınıń elektr maydanı tásirinde elektronniń jılıjıwi,  
 $n_0$ —dielektriktegi atomlar koncentraciyası.

$\epsilon$ —ortalıqtıń dielektrik sińiriwshılıgi,  
 $\mu$ —magnit sińiriwshılık  
 $\chi$ —ortalıqtıń dielektrik tásirsheńligi  
 $\epsilon_0$ —elektr turaqlısı  
 $P$  hám  $E$ —sırtqı elekr maydanı polyarlanganlığı hám kernewliliginiń zamatlıq mánisleri.

**Elektron májbúriy terbelisleriniń teńlemesi (túsip atırǵan tolqın energiyası jutılıwına qarsılıq kórsetiwshi kúshler esapqa alınbagan halda)**

$$\ddot{x} + \omega_0^2 x = \frac{1}{m} F_0 \cos \omega t = \frac{e}{m} E_0 \cos \omega t$$

$$F_0 = eE_0$$

**Elektronǵa tásir etiwshi elektromagnit tolqın maydan kúshiniń amplituda mánisi**

**Differencial teńlemeniń sheshimi**

$$x = x_m \cos \omega t$$

$$x_m = \frac{eE_0}{m(\omega_0^2 - \omega^2)}$$

**Elektromagnit tolqın tásirinde, atom elektr maydanda dipol momentine iye boladı.**

$$p = ex$$

**$P = n_0 p = n_0 ex$  - polyarlańgan atomniń dipol momentiniń zamatlıq mánisi.**

$$n = \sqrt{\varepsilon}$$

$$\varepsilon = 1 + \chi = 1 + \frac{P}{\varepsilon_0 E}$$

$$P = n_0 p = \\ = n_0 e x$$

$$n^2 = 1 + \frac{n_0 e x}{\varepsilon_0 E}$$

$$p = e x$$

$$x_m = \frac{e E_0}{m(\omega_0^2 - \omega^2)}$$

$$n^2 = 1 + \frac{n_0 e^2}{\varepsilon_0 m} \frac{1}{(\omega_0^2 - \omega^2)}$$

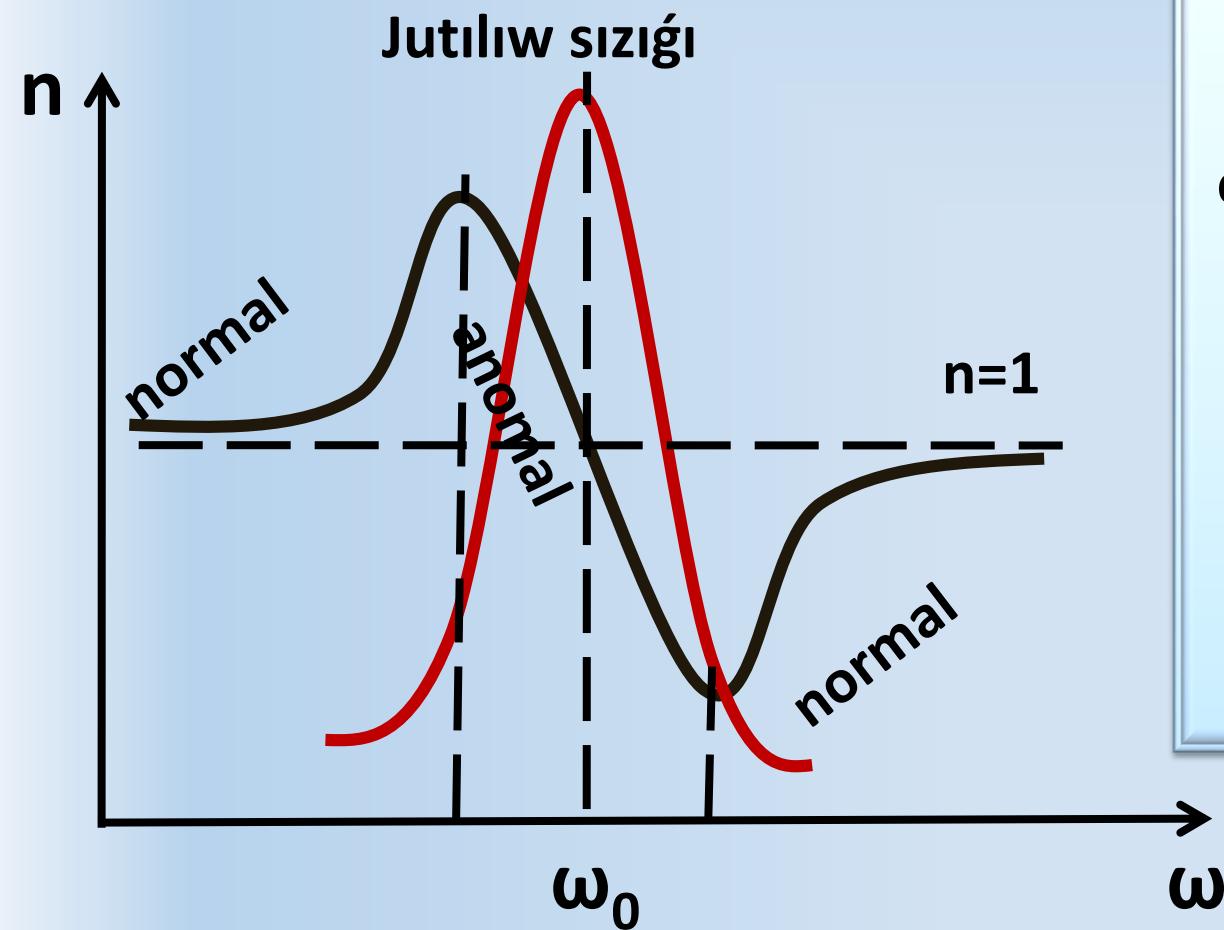
Dispersiya aňlatpasınıń  
sheshimi

$$n^2 = 1 + \frac{n_0}{\varepsilon_0} \sum_i \frac{e_i}{m_i} \frac{1}{(\omega_{0i}^2 - \omega^2)}$$

## Dispersiya aňlatpası

$$n = n(\omega)$$

$$n^2 = 1 + \frac{n_0 e^2}{\varepsilon_0 m} \frac{1}{(\omega_0^2 - \omega^2)}$$



$\omega_0$  zonada – jaqtılıq jutılıowi baqlanadı.

$\omega$  artıwi menen  $n$  niń ósiwi normal dispersiya zonası esaplanadı.

$\omega$  artıwi menen  $n$  niń kemeyiwi anomal dispersiya zonası esaplanadı.

*Jaqtılıqtıń jutılıwı dep, zatta jaqtılıq tolqını tarqalıp atırǵanda onıń energiyasınıń kemeyiwi hádiysesine aytıladı. Energiya kemeyiwi tolqın energiyasınıń basqa türdegi energiyalarǵa (zattıń ishki energiyasına, ekilemshi nurlanıw energiyasına h.b.) ótiwi esabına júz beredi.*

Buger nızamı

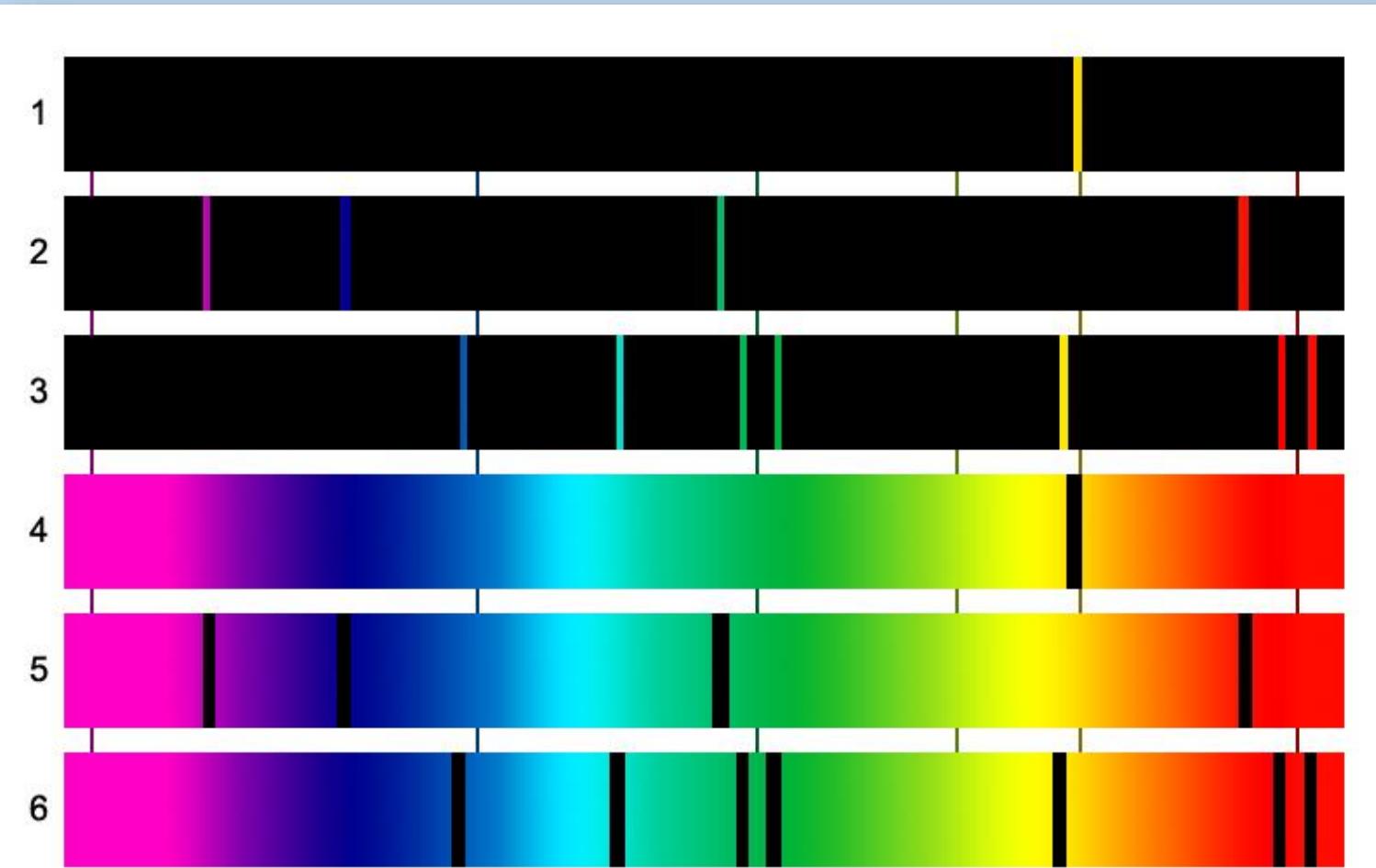
$$I = I_0 \exp(-\alpha x) \quad I = I_0 e^{-\alpha x}$$

$I_0$ ,  $I$  — zattıń jutılıw zonasına kiriw hám shıǵarıwdagı tegis monoxromatikalıq tolqinnıń jedelligi

$\alpha$ —jaqtılıq jedelligine baylanıslı bolmaǵan, jaqtılıqtıń tolqın uzınlığı, zattıń ximiyalıq tábiyatı hám halatına baylanıslı bolǵan jutılıw koefficienti.

Jutılıw koefficientiniń muǵdarlıq mánisi x qalınlıqtaǵı jutıwshı qatlamnan jaqtılıq ótkende tegis tolqın jedelligi  $e = 2,72$  márte kemeyiwin kórsetedi.

# Nurlanıw hám jutılıw spektrleri



Nurlanıw spektrleri: 1-natriy; 2-vodorod; 3-geliy.  
Jutılıw spektrleri: 4-natriy; 5-vodorod; 6-geliy.

## Jaqtılıqtıń shashırawı

Jaqtılıq tolqınlarınıń, ortalıq atomları elektronları menen ózara tásirlesiwinde, elektronlar terbelmeli háreketke kelip jaqtılıq shıgaradı. Tábiyyiy nurlarda terbelislerdiń bárshe bağıtları teń itimallı bolǵanlıǵı ushın, atomlar shıgarıp atırǵan jaqtılıq bárshe bağıtlarda shashırawı múmkin. Egerde ortalıq atomları bir tegis bólistirilgen bolsa, shashıraǵan nurlar kogerent boladı hám interferenciya sebepli bir-birin joqqa shıgaradı. Bul halda ortalıq optikalıq jaqtan bir tekli bolıp, nurlardı shashpaydı.

$$I_\theta = a \frac{N_0 V^2}{R^2 \lambda^4} I_0 (1 + \cos^2 \theta)$$

$$I \sim \omega^4 \sim \frac{1}{\lambda^4}$$

Reley nızamı

V- bir bóleksheniń kólemi,

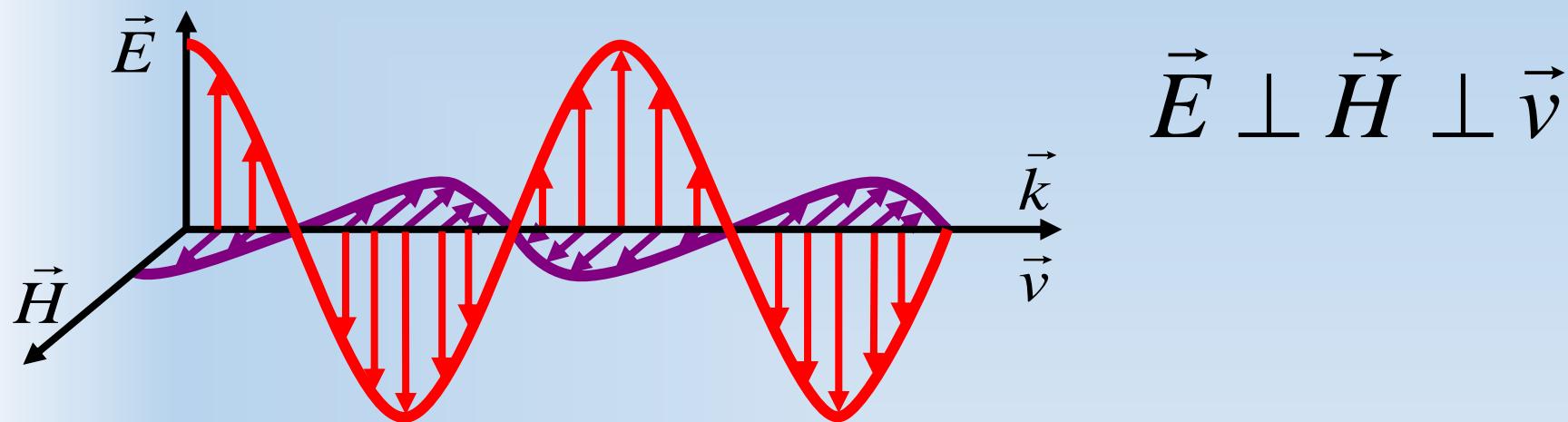
$N_0$ - ortalıqtaǵı bóleksheler koncentraciyası,

R- shashıraw júz berip atırǵan kólemnen baqlaw noqatına shekemgi bolǵan aralıq,

a- ortalıq teń ólshewsizligi dárejesine baylanıslı bolǵan koefficient,

θ- jaqtılıqtıń túsiw baǵıtı mýyeshi.

# Jaqtılıq nurınıń polyarlanıwı

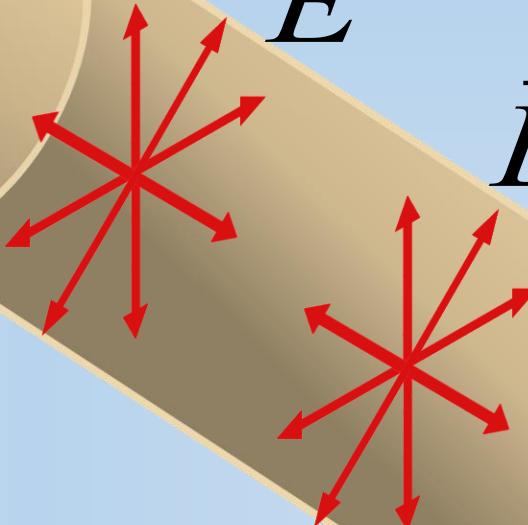


Polyarlanıw nızamlılıqların ańlatıw ushın tek – elektr maydan kernewliliği vektorı  $\vec{E}$  kórip shıǵıladı.

*Jaqtılıqtıń polyarlanıwı* – jaqtılıq tolqınlarınıń kóndeleinlik qásiyeti kórinetuǵın, tolqın optikası hádiyseleri kompleksi.

Tábiyyiy jaqtılıq

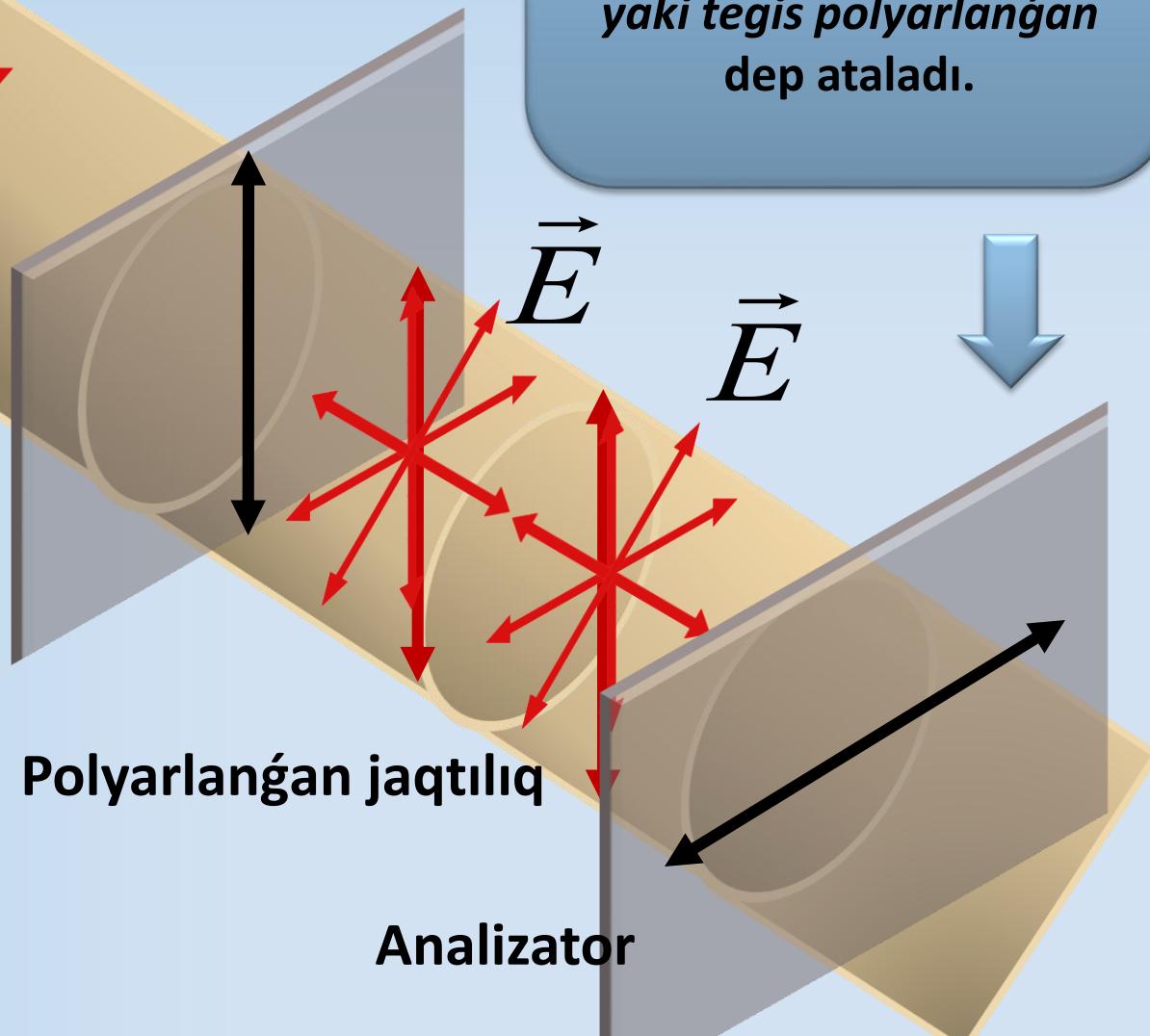
$$\vec{E}$$



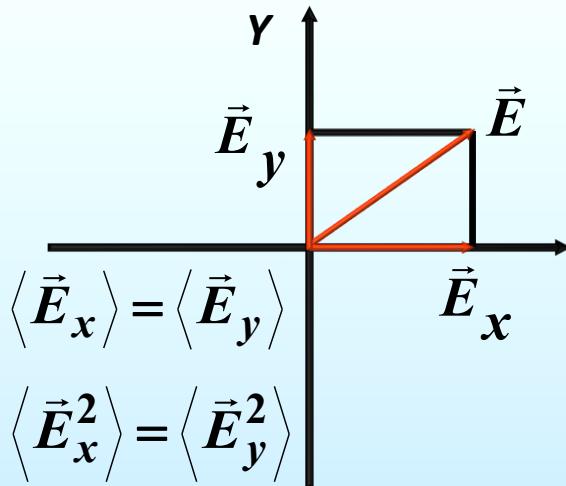
Polyarlaǵışh

Jaqtılıq nuri ótetugın tegisliktiń tek birewinde terbeletugın jaqtılıq vektorı *sızıqlı polyarlanǵan*  $\vec{E}$  yaki *tegis polyarlanǵan* dep ataladı.

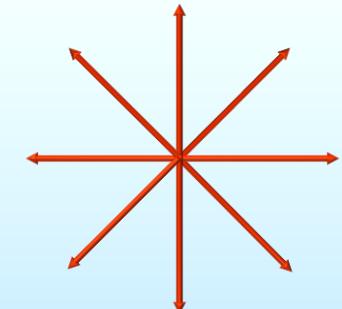
Tábiyyiy jaqtılıqta  $\vec{E}$  vektor terbelisi bárshı baǵıtlarda teń huqıqlı bolıp, tártipsiz óz orientaciyasın ózgertedi.



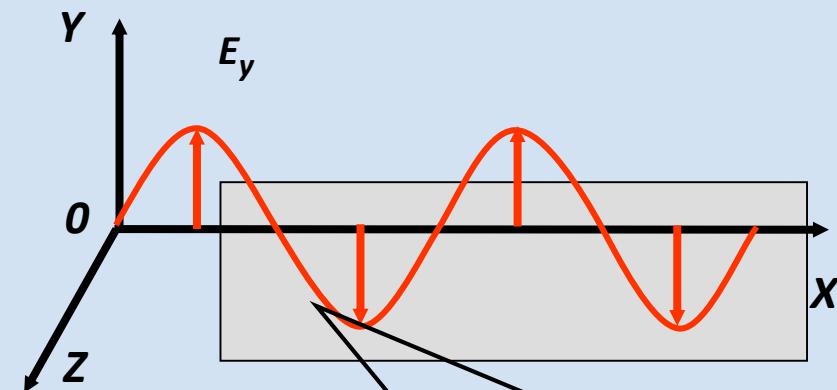
# Tábiyyiy jaqtılıq



$$E_x = E_m \cos(\omega t)$$
$$E_y = E_m \cos(\omega t + \delta)$$
$$\delta = f(t) \text{ -- kogerent emes}$$



Tegis polyarlanǵan tolqınnıń, tolqın tarqalıwındaǵı jaqtılıq vektorı terbelisi baǵıtınan ótetugıń tegislik – *polyarlanıw tegisligi* dep ataladı.



Polyarlanıw tegisligi

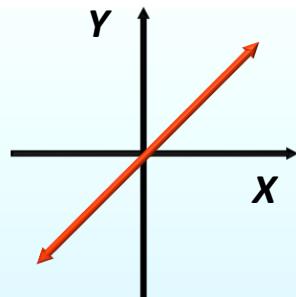
# Polyarlanǵan jaqtılıq

$$E_x = E_m \cos(\omega t)$$

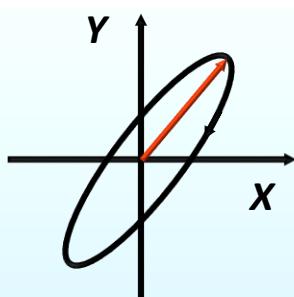
$$E_y = E_m \cos(\omega t + \delta)$$

$\delta \neq f(t)$  – kogerent

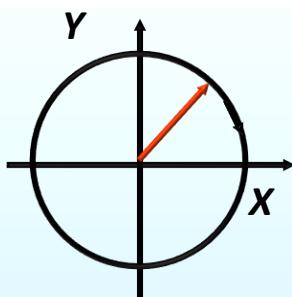
Tábiyyiy nurdı, kristallografik kósherine parallel kesilgen turmalin kristall plastinkasınan ótkiziwde, *sızıqlı polyarlanǵan jaqtılıqtı* ańsat alıw mümkin. Turmalin kristalı kúshli anizotrop bolǵanı sebepli, optikalıq kósherge perpendikulyar bolǵan elektr vektorlarının ibarat bolǵan jaqtılıq nurların kúshli jutadı.



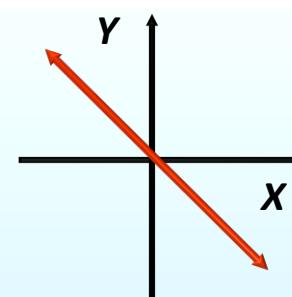
$$\delta = 0$$



$$\delta = \frac{\pi}{6}$$



$$\delta = \frac{\pi}{2}$$



$$\delta = \pi$$

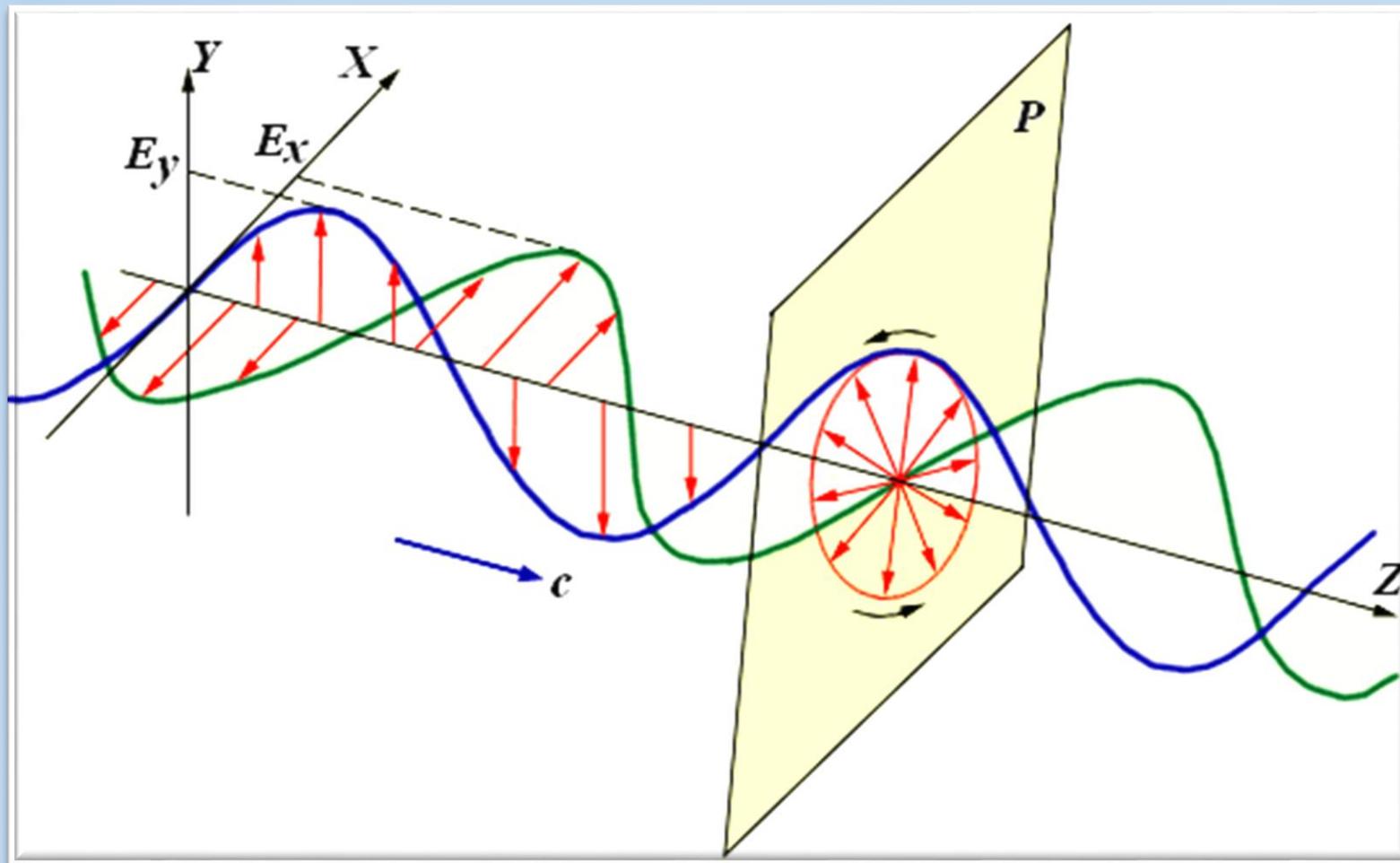
Sızıqlı

Elliptik

Sheńberli

Sızıqlı

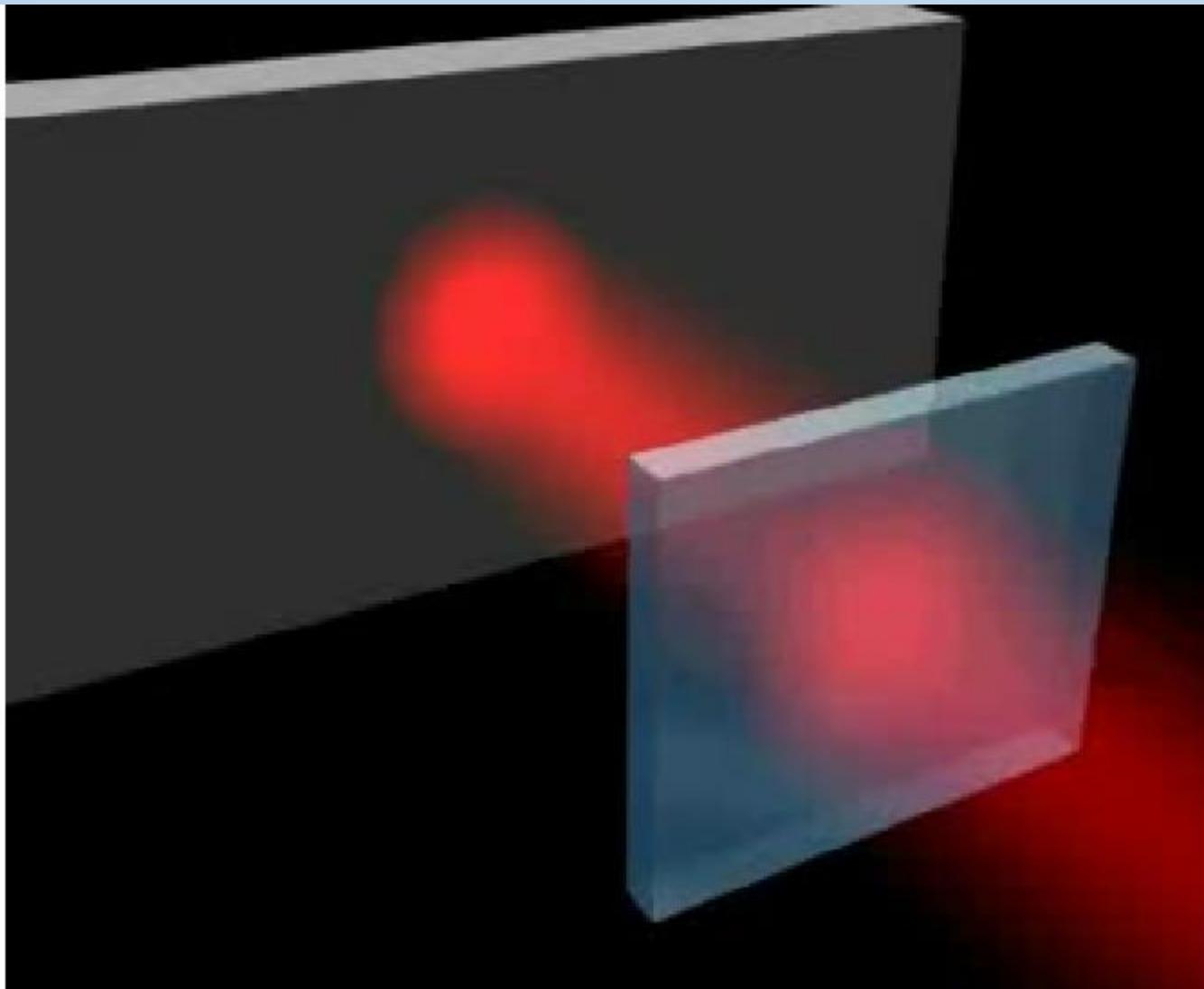
Eki ózara perpendikulyar tegisliklerde polyarlangan eki monoxromatikalıq tolqınlar birden bir baǵıt boyınsha tarqalıw waqtında kóshiwleri nátiyjesinde elleptikalıq polyarlangan tolqın payda boladı.



# Polyarlanıw



# Lazer deregi shıǵarıp atırǵan sızıqlı – polyarlangan jaqtılıq



# Polyarlanıw dárejesi

$$P = \frac{I_{\max} - I_{\min}}{I_{\max} + I_{\min}}$$

$I_{\max}$ ,  $I_{\min}$  - bir bólimi polyarlangan jaqtılıq jedelliginiń maksimal hám minimal mánisleri.

Tábiyyiy jaqtılıq ushın

$$I_{\max} = I_{\min}, P = 0$$

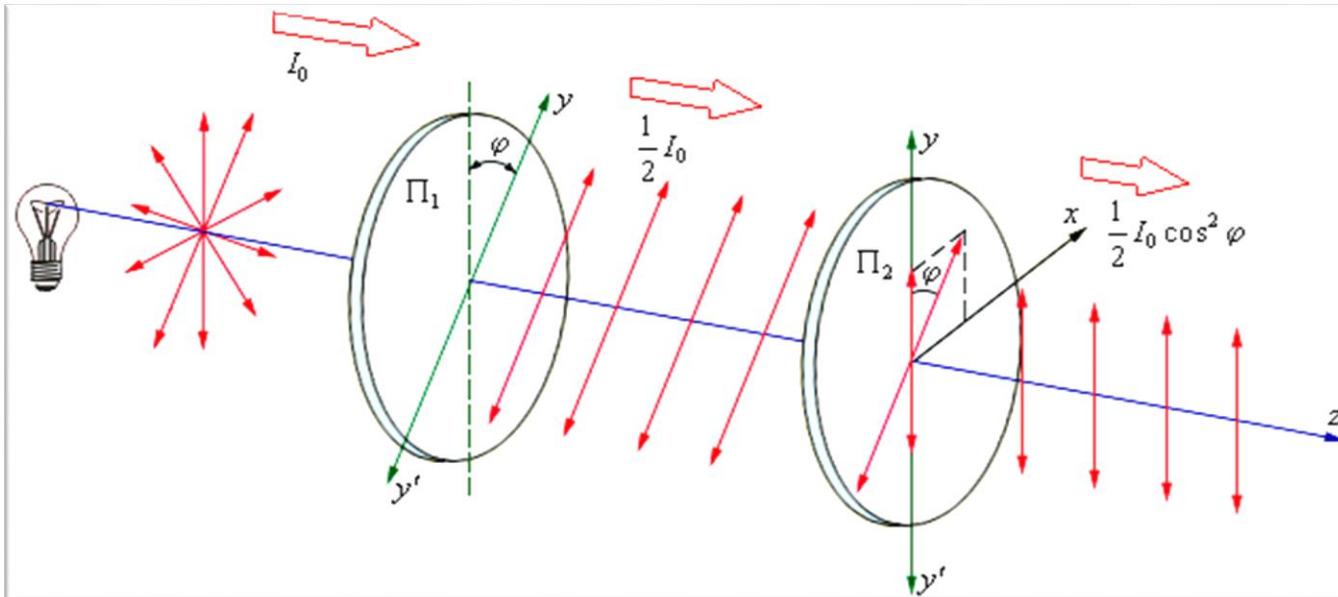
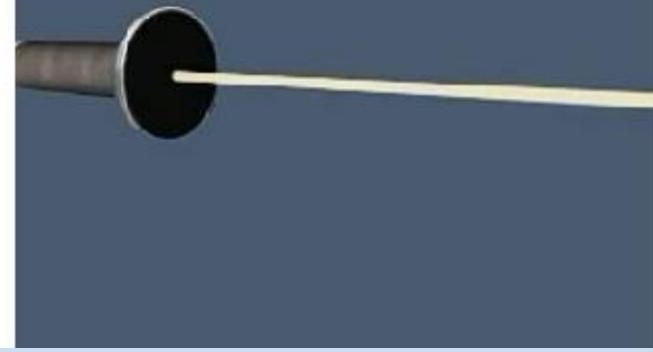
Tegis polyarlangan jaqtılıq ushın

$$I_{\min} = 0, P = 1$$

# Malyus nızamı

Analizator arqalı ótken  
jaqtılıq jedelligi  
 $\varphi$  mýyeshke  
baylanışlı ózgeredi

$$I = I_0 \cos^2 \varphi$$



Birinshi polyaroid  
polyarlaǵış  
wazypasın óteydi.  
Ol tábiyyiy jaqtılıqtı  
sızıqlı polyarlangan  
jaqtılıqqa  
aylandıradi.  
Ekinshi polyaroid-  
analizator, oğan  
túsip atırǵan  
jaqtılıqtı úyreniw  
ushın xızmet etedi.

Terbelis amplitudası  $E$  ni ekige ajratiw mûmkin

$$E_{II} = E \cos \varphi \quad \text{hám} \quad E_{\perp} = E \sin \varphi$$

Ótken tolqinniń jedelligi tómendegige proporcional

$$E_{II}^2 = E^2 \cos^2 \varphi$$

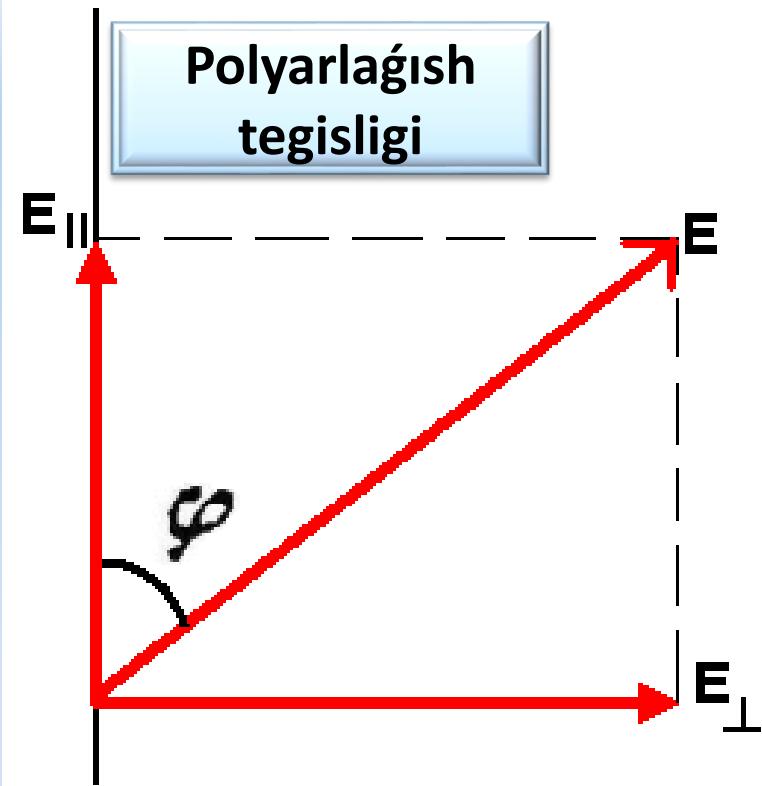
Birinshi polyarlaǵış arqalı ótken tegis-polyarlangan jaqtılıq jedelligi

$$I_0 = \frac{I_{ma\delta}}{2}$$

Analizator arqalı ótken jaqtılıq jedelligi, Malyus nızamına tiykarlanıp, müyeshke baylanıslı ózgeredi

$$I = I_0 \cos^2 \varphi$$

Polyarlaǵış tegisligi



Eki polyarlaǵış arqalı ótken jaqtılıq jedelligi

$$I = \frac{1}{2} I_{ma\delta} \cos^2 \varphi$$



# Shaǵılısqan hám sıńǵan nurlar polyarlanıwi

Eki dielektriğiń bóliniw shegarasına tábiyyiy jaqtılıq túskende, shaǵılısqan hám sıńǵan nurlar bir bólimi polyarlanadı.

Shaǵılısqan nurda túsiw tegisligine perpendikulyar bolǵan nurlar kóbirek boladı, sıńǵan nurda bolsa túsiw tegisliginde jatqan terbelisler kóbirek boladı.

Túsiw mýyeshi Bryuster mýyeshine teńleskende shaǵılısqan nur tegis polyarlangan nurga aylanadı.

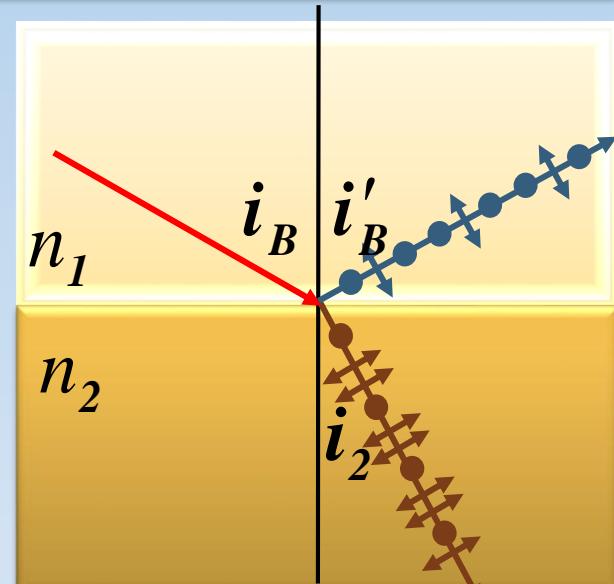
$$\operatorname{tg} i_B = n_{21}$$

$$\operatorname{tg} i_B = \frac{\sin i_B}{\cos i_B} = n_{21}, \quad \frac{\sin i_B}{\cos i_B} = n_{21} \Rightarrow \cos i_B = \sin i_2$$

$$i_B + i_2 = \frac{\pi}{2}, \quad \text{ho} \quad i'_B = i_B,$$

sonıń  
ushın

$$i'_B + i_2 = \frac{\pi}{2} -$$



$n_{21}$  –birinshi ortalıqqa salıstırǵanda ekinshisiniń sindırıw kórsetkishi

yaki

Bryuster  
ańlatpası

# Qos nur SINIWI

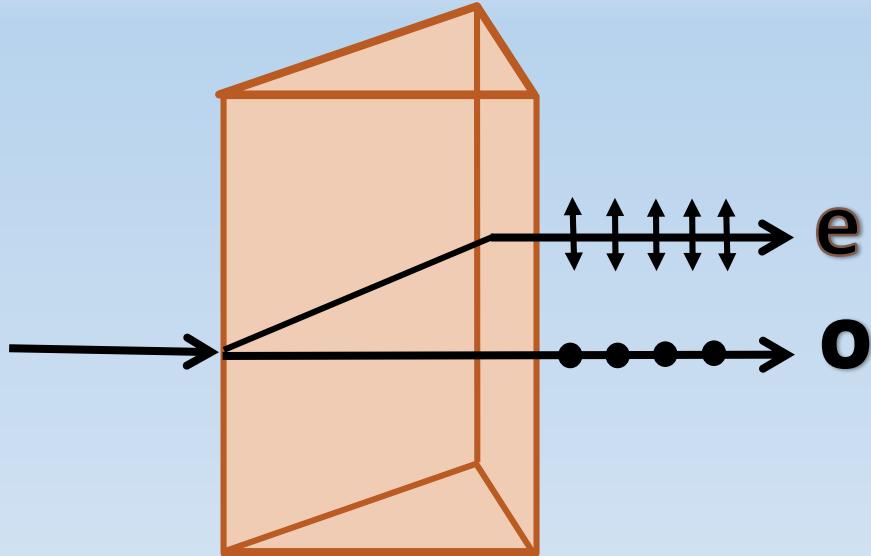
Jaqtılıq tınıq kristallardan ótkende  
eki nurǵa ajraladı.

Bir nur ádettegi sıniw nızamın  
qanaatlandıradı, túsip atırǵan nur  
normal tegisliginde jatadı.

Bul nur ádettegi nur dep ataladı.

$e$  – baǵıttaǵı ekinshi nur sıniw  
nızamının shetlesedi hám ádetten  
tısqarı nur dep esaplanadı.

Anizotrop kristallarda dielektrik  
sińiriwshilik elektr maydanı  
kernewliliǵı vektorınıń terbelis baǵıtına  
baylanıslı boladı.



$v_o > v_e$  ( $n_o < n_e$ ) bolǵan halda  
kristall oń esaplanadı.

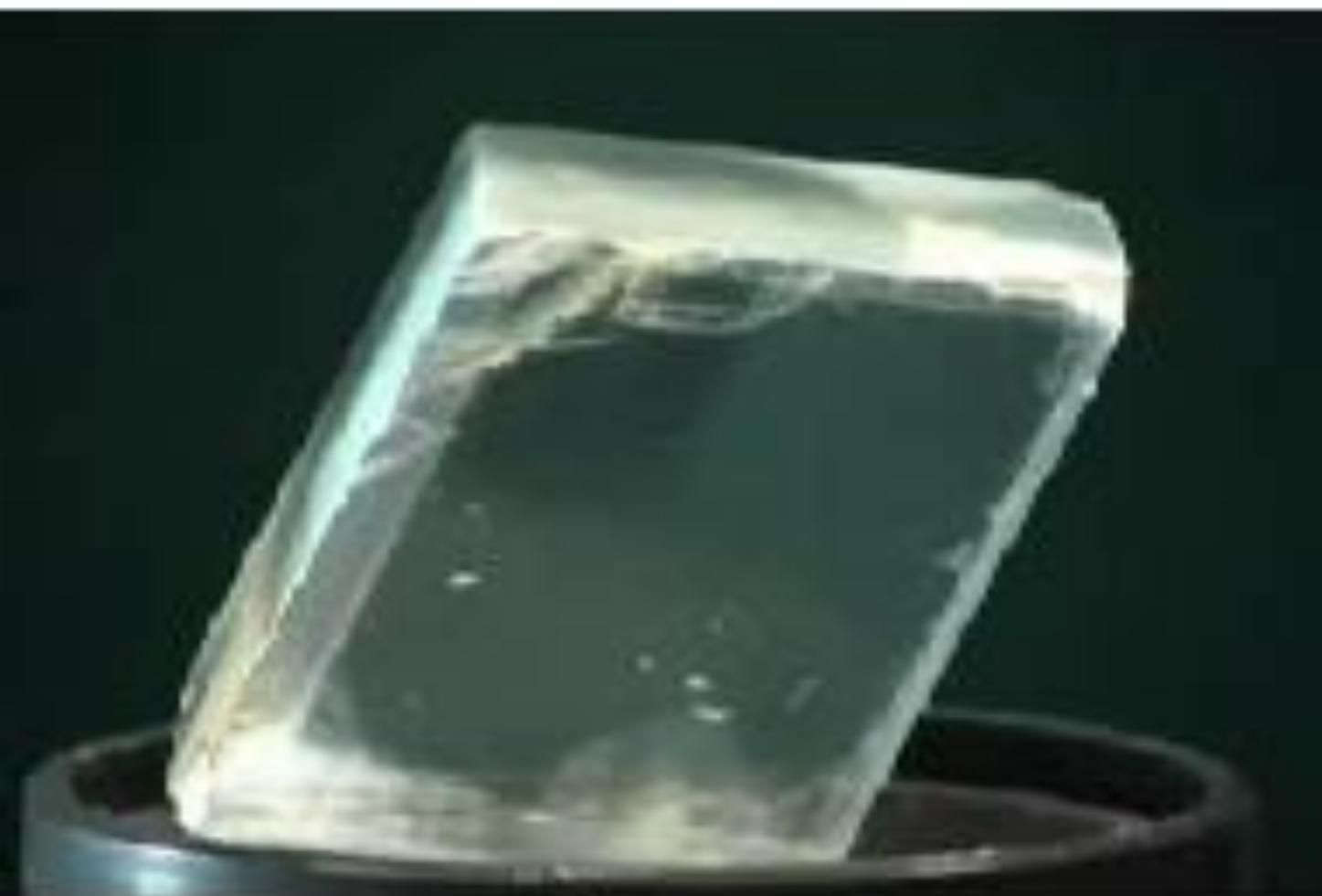
$v_o < v_e$  ( $n_o > n_e$ ) bolǵan halda  
kristallar teris esaplanadı.

$$\varepsilon_x x^2 + \varepsilon_y y^2 + \varepsilon_z z^2 = \text{const}$$
$$(n_x x)^2 + (n_y y)^2 + (n_z z)^2 = \text{const}$$

# Ádettegi hám ádetten tısqarı nurlardıń qásiyetleri

| Ádettegi nur  | Ádetten tısqarı nur   |
|---|---|
| Ádettegi nur $E$ kernewlilik vektorı kristaldıń bas tegisligine perpendikulyar baǵıtta terbeledi.     | Ádetten tısqarı nurda $E$ kernewlilik vektorı kristaldıń bas tegisliginde terbeledi.                            |
| Ádettegi nur kristaldıń bárshe baǵıtlarında birdey tezlik penen tarqaladı.<br>$\nu_0 = \frac{c}{n_0}$ | Ádetten tısqarı nur kristaldıń bárshe baǵıtlarında hár túrli tezlik penen tarqaladı.<br>$\nu_e = \frac{c}{n_e}$ |
| Bul nur ushın $n_0$ - sindırıw kórsetkishi turaqlı shama.   | Ádetten tısqarı nurda $n_e$ nur baǵıtqa baylanıslı ózgermeli shama.   |

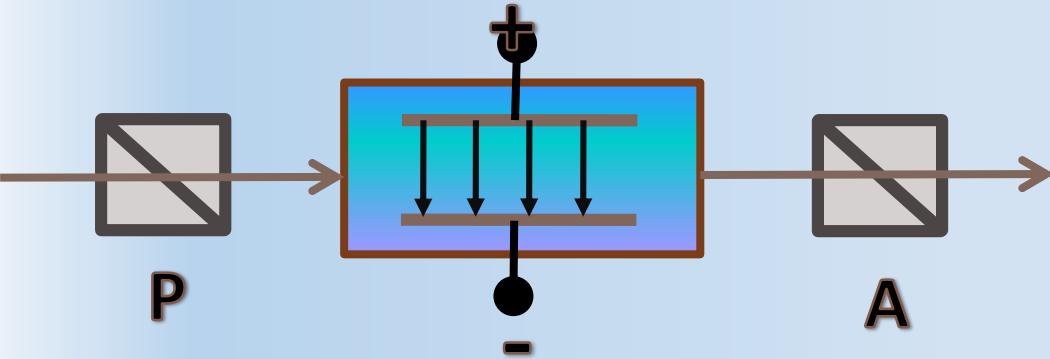
**Qos nur SINIWI.**



# Jasalma optikalıq anizotropiya

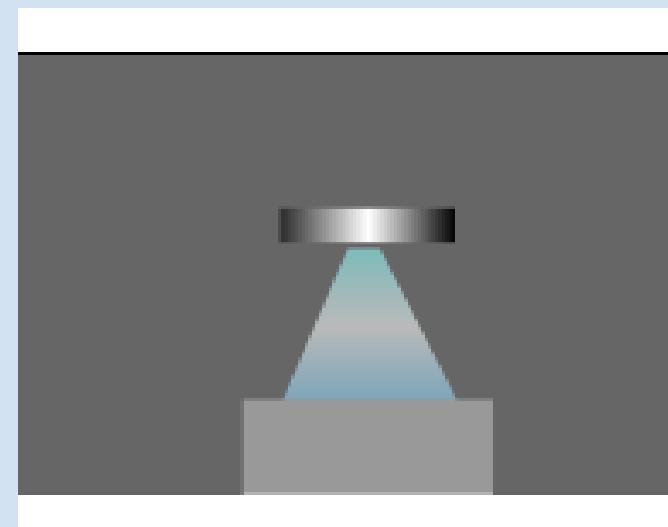
Jasalma anizotrop zat mexanikalıq deformaciya yaki elektr maydanı (Kerr effekti) tásirinde payda bolıwı mümkin. Kyuvetadaǵı suyıqlıqqa potenciallar ayırması túsirilgende – suyıqlıq qos nur sindırıw qásiyetine iye boladı. Ádettegi hám ádetten tısqarı nurlar sindırıw kórsetkishleri ayırması tómendegige teń boladı:

$$n_e - n_0 = B\lambda_0 E^2$$



$\lambda_0$  – vakuumdagı jaqtılıq tolqınıñızıñ uzınlığı,  
 $E$  – elektr maydanıñ kernewliliği,  
 $B$  – temperatura, jaqtılıq tolqın uzınlığı hám zattıñ tábiyatına baylanıslı Kerr turaqlısı.

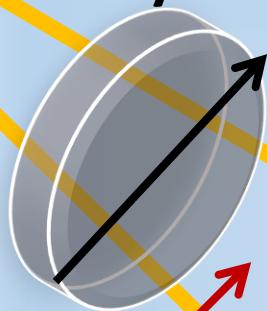
2) Kristaldı bir tamanlama qısıw hám soziw



# Polyarlanıw tegisliginiń aylanıwı

Polyarlaǵış

$$\vec{E}$$



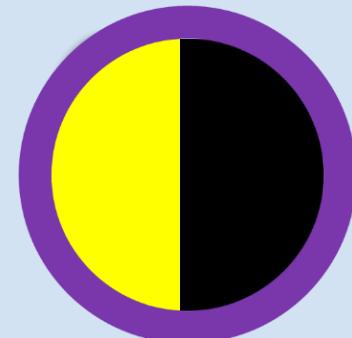
Shekerli  
kyuveta

Analizatordaǵı  $\varphi$  burılıw mýyeshine qarap aralaspadaǵı sheker koncentraciyası aniqlanadı.

Ayırım zatlar: kvarc, sheker hám skipidar polyarlanıw tegisligin aylandırıw qásiyetine iye bolǵanı ushın, optikalıq aktiv zatlar esaplanadı.

$$\varphi = \alpha \cdot c \cdot d$$

Analizatorlar



# PAYDALANÍLĞAN ÁDEBIYATLAR

1. Q.P.Abduraxmanov, V.S.Xamidov, N.A.Axmedova. FIZIKA. Darslik. Toshkent. “Aloqachi nashriyoti”. 2018 y. O’zR OO’MTV 2017.24.08 dagi “603”-sonli buyrug‘i.
2. B.A.Ibragimov, G.Q.Atajanova. “FIZIKA”. Oqıwlıq. Tashkent. 2018 j.
3. Q.P.Abduraxmanov, O’.Egamov. “FIZIKA”. Darslik. Toshkent. O’quv-ta’lim metodika” bosmaxonasi. 2015 y. O’zROO’MTV 2009.26.02. dagi “51”-sonli buyrug‘i.
4. Douglas C. Giancoli. Physics. Principles with Applicathions. 2004 USA ISBN-13 978-0-321-62592-2.
5. Physics for Scientists and Engineers, Raymond A. Serway, John W. Jewett. 9th Edition, 2012.
6. S.G. Kaypnazarov. "Fizika I kursı boyinsha prezentaciyalıq multimediali shınıǵıwlar toplamı". Elektron oqıw qollanba. Nókis. 2022 j. O’zR OO’MTV 2021.31.05 dagi “237”-sonli buyrug‘i.
7. “Fizika-1 kursi bo'yicha taqdimot multimediali ma'ruzalar to'plami”. Elektron o'quv qo'llanma. Toshkent. 2019 y. O’zR OO’MTV 2019.04.10 dagi “892”-sonli buyrug‘i.



# PEDAGOGIKALÍQ DÁSTÚRIY QURALLAR

- <https://phet.colorado.edu/en/simulation/color-vision>

**Color Vision**

The screenshot shows a simulation titled "Color Vision". It features a 3D model of a human head with a magnifying glass over the eye area, set against a dark background with yellow dots. To the right are three colored light sources (red, green, blue) and their corresponding color wheels. Below the head are control buttons for play/pause, volume, and settings, along with logos for PhET and HTML5. At the bottom are "DOWNLOAD" and "EMBED" buttons.

- Photons
- Monochromatic Light
- White Light

DONATE

PhET is supported by  
**BMG**  
BILUM MEDIA GROUP

and educators like you.

fbtwpr

# PEDAGOGIKALÍQ DÁSTÚRIY QURALLAR

- <https://phet.colorado.edu/en/simulation/wave-interference>

## Wave Interference

The screenshot shows a simulation titled "Wave Interference". On the left, there's a visualization of two waves forming interference patterns. A play button is overlaid on the center of the wave pattern. To the right of the visualization is a control panel with sliders for Frequency, Amplitude, and Separation, and checkboxes for Lock and Graph. At the bottom of the simulation area, there are navigation buttons for back, forward, and search, along with a "PhET" logo and an HTML5 logo. Below the simulation are two buttons: "DOWNLOAD" with a downward arrow icon and "EMBED" with a double bracket icon.

- Interference
- Double Slit
- Diffraction

DONATE

PhET is supported by



and educators like you.

