Difrakcijos ir dispersijos slopinimas optinio parametrinio stiprinimo metu

Dokt. S. Orlovas
VU FF KEK

Pranešimo planas

- Įvadas
- Difrakcijos ir dispersijos reiškiniai
- Netiesiniai tribangiai procesai
- Difrakcijos ir dispersijos slopinimas netiesinėje terpėje

Įvadas

- Paprasčiausias bangų lygties sprendinys

$$E(x,y,z,t)=e^{i\left(\boxed{k_x x+k_y y+k_z z}-\omega t\right)}$$

k – bangos vektorius

“Sėdi” erdviniame spektre

Pasako “kur” sklinda banga

ω - bangos dažnis

“Sėdi” laikiniame spektre

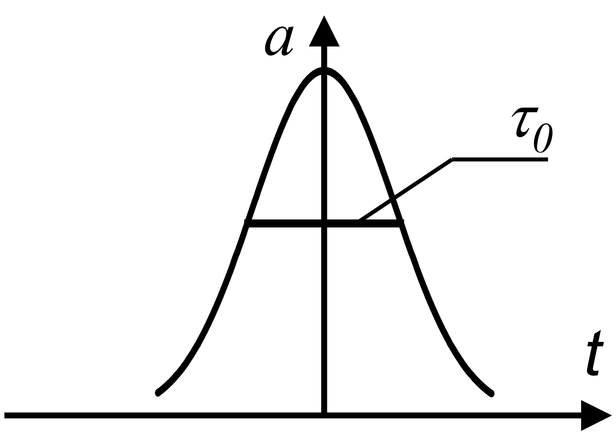
Pasako bangos “spalvą”

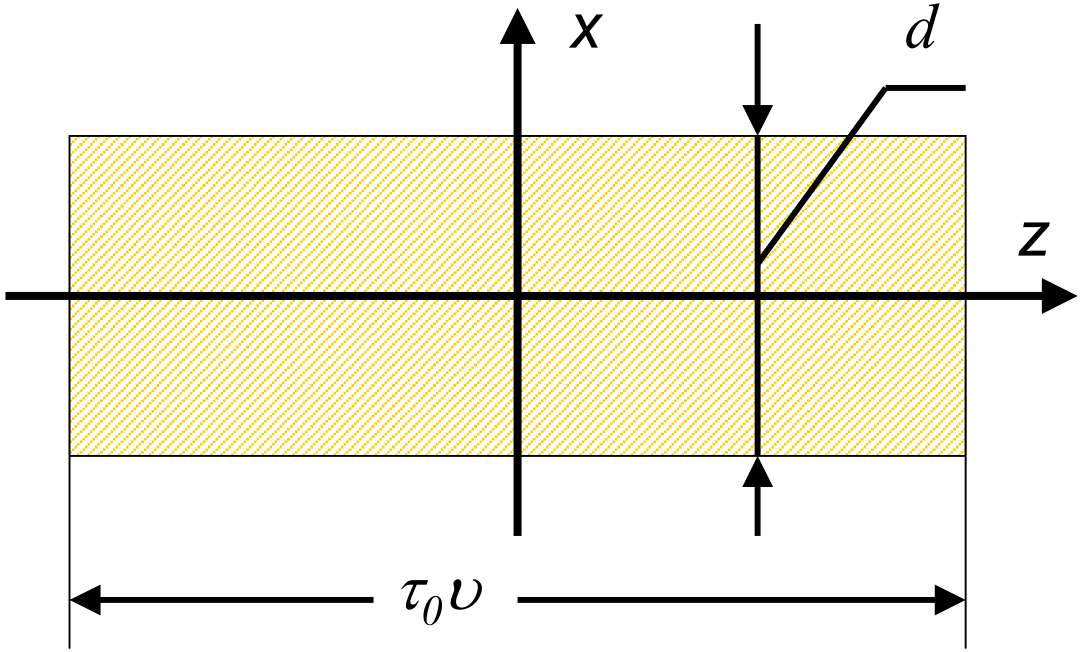
Plokščioji banga yra begalinė laike ir erdvėje

Įvadas

- Šviesos pluoštas – baigtinis erdvėje, o impulsas – laike.

$$a(t) = a_0 \exp\left(-\frac{t^2}{\tau_0^2}\right)$$

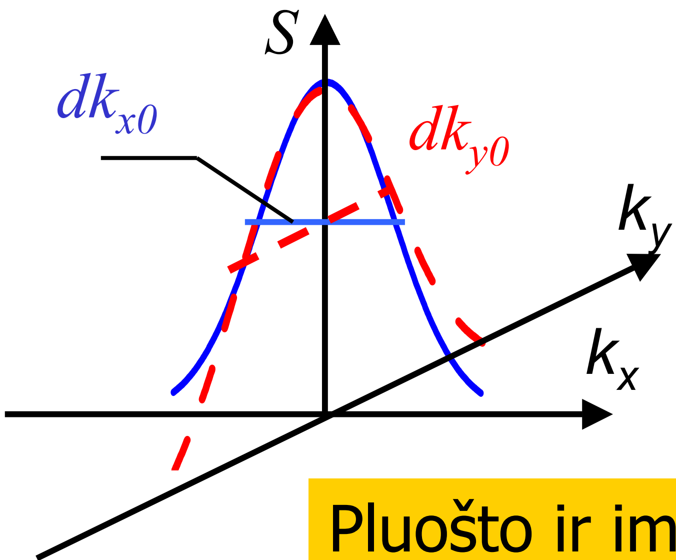


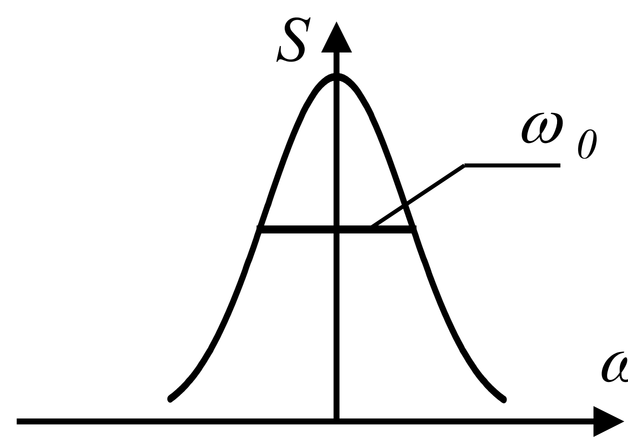


Pluoštų ir impulsų energija baigtinė

Įvadas

- Pluoštų erdviniai ir impulsų laikiniai spektrai





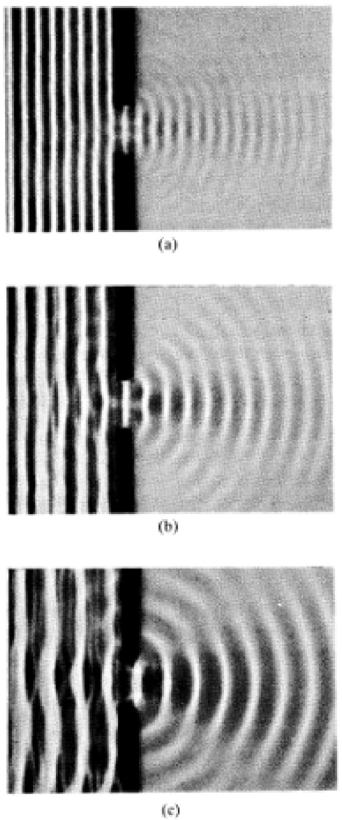
Pluošto ir impulso spektrai **baigtiniai**

Pluoštas yra sudarytas iš **skirtingom kryptimis** keliaujančių,
o impulsas – iš **skirtingai virpančių** (t.y. skirtingų **spalvų**) pl. bangų

Šviesos difrakcija

- Apibrėžimas
  - “Bet koks šviesos spindulių nukrypimas nuo tiesės, nepaaiškinamas šviesos atspindžiu arba lūžiu, yra vadinamas šviesos difrakcija”
- Pavyzdžiai
  - Difrakcinė gardėlė ir pan.
  - Šviesos pluoštų sklidimas

Šviesos difrakcijos pavyzdžiai

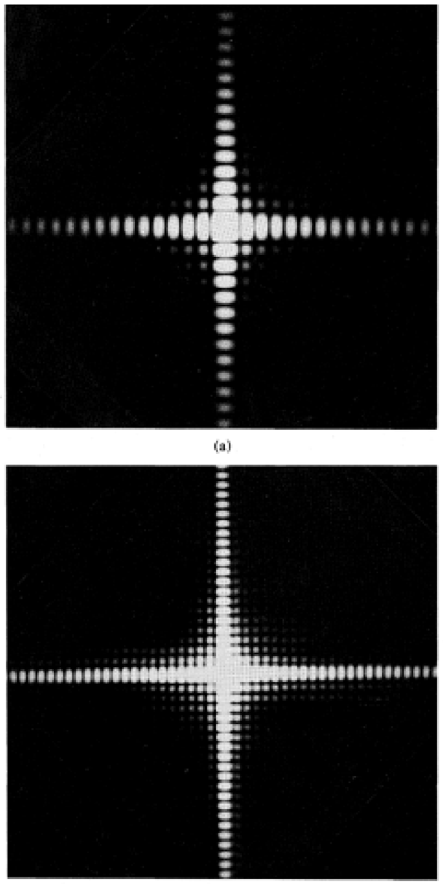


(a)
(b)
(c)

Klasikiniai pavyzdžiai

Sklidimas pro plyšį

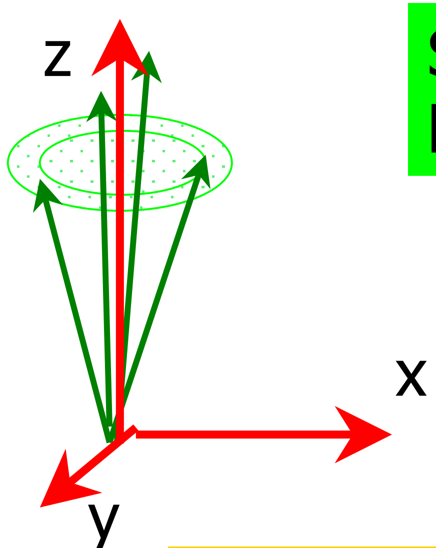
Stačiakampė apertūra



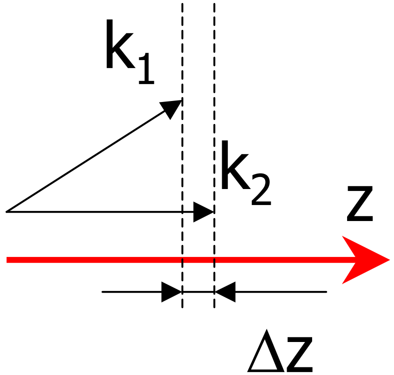
(a)

Šviesos pluoštų difrakcija

- Pluoštai sudaryti iš skirtingomis kryptimis sklindančių pl. bangų



Skirtingos bangos nusklinda skirtingą kelią z kryptimi.



Tuo būdu, tarp pluoštą sudarančių bangų atsiranda fazių skirtumas – pluoštas **DIFRAGUOJA**

Parabolinė difrakcijos lygtis ir difuzijos lygtis

- Parabolinė difrakcijos lygtis

$$\left[\frac{\partial}{\partial t}+\frac{i}{2k}\Delta_{\perp}\right]A(r,z)=0$$

- Krūvininkų [dalelių] difuzijos lygtis

$$\left[\frac{\partial}{\partial t}+D\Delta_{\perp}\right]A(r,z)=0$$

- Difrakcija – difuzija su menamu difuzijos koeficientu. Šviesos difrakcija gimininga dalelių difuzijai.

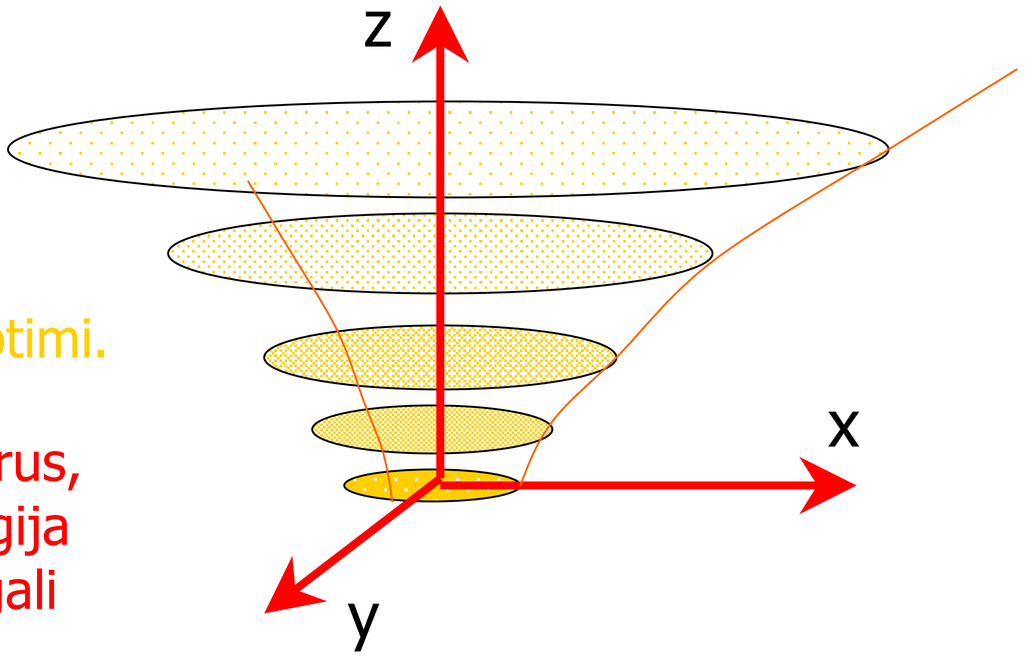
Šviesos difrakcija – fotonų difuzija

- Amplitudė turi fotonų tankio prasmė

Pluoštui sklindant,
fotonai "difunduoja" skersinėje plokštumoje ir pluoštas plečiasi arba "difraguoja".

Esminis skirtumas –
fotonai nedifunduoja išilginė kryptimi.

Fotonai turi papildomus parametrus, susijusius su pluošto fazė. Analogija **nėra pilna**. Pluošto matmenys gali mažėti.



Medžiagos dispersija

- Bangų lygtis

$$\left[\Delta_{\perp} - \frac{1}{\upsilon^2}\frac{\partial^2}{\partial t^2}\right]E(x,y,z,t) = 0$$

- Vakuume

$$\upsilon = \omega/k$$

- Bet medžiagoje

$$\upsilon = \omega n(\omega)/k$$

- Medžiagos lūžio rodiklis priklauso nuo bangos dažnio! Šis reiškinys yra vadinamas dažninė dispersija, arba medžiagos dispersija.

Dispersijos fizikinė kilmė

- EM bangai [šviesai] $\mathbf{E}=\mathbf{E}_0\cos(\omega t)$ sklindant medžiagoje, ji priverčia elektronus svyruot savu dažniu.

$$m\ddot{\mathbf{r}} + m\nu\dot{\mathbf{r}} + m\omega_0^2\mathbf{r} = e\mathbf{E}_0\cos(\omega t)$$

- Yra indukuojamas dipolinis molekulės momentas **P**.

$$\left(-\omega^2 - i\nu\omega + \omega_0^2\right)\mathbf{P} = \frac{Ne^2}{m}\mathbf{E} + \frac{4\pi}{3}\frac{Ne^2}{m}\mathbf{P}$$

Dispersija – medžiagos atsakas į EM lauką

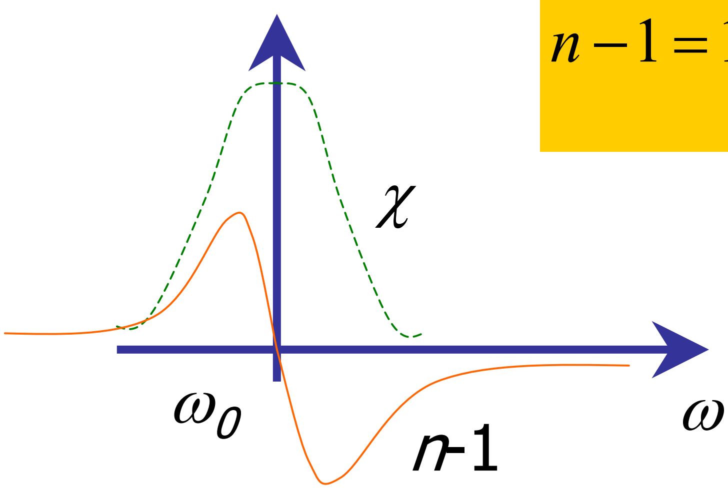
- Priverstinių svyravimų amplitudė priklauso nuo dažnio [rezonansas].
- EM bangos sklidimo medžiagoje atveju rezonanso atveju yra didžiausia sugertis, lūžio rodiklis lygus vienetui.

$$n-1=1+\frac{1}{2}\frac{\omega_0^2-\omega^2}{\left(\omega_0^2-\omega^2\right)^2+\omega^2\nu^2}$$

Lūžio rodiklis

Sugertis

$$\chi=\frac{\omega_p^2}{2}\frac{\omega\nu}{\left(\omega_0^2-\omega^2\right)^2+\omega^2\nu^2}$$



Artutiniai metodai

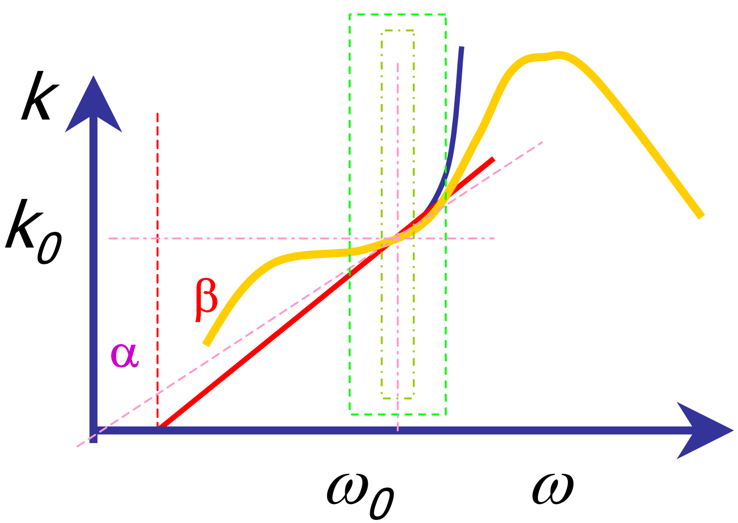
- Šviesos signalo sklidimo dispersinėje terpėje skaičiavimą galima supaprastinti artutinio metodo pagalba.
- Bangos vektoriaus priklausomybę nuo dažnio galima ištiesinti
  - I artinys - tiesinė
  - II artinys - kvadratinė
  - Aukštesnių eilių artiniai

Narių kiekis priklauso nuo spektro platumo

$$k(\omega) = \boxed{\boxed{k_0(\omega_0) + \left(\frac{\partial k}{\partial \omega}\right)_{\omega_0} (\omega - \omega_0)} + \frac{1}{2}\left(\frac{\partial^2 k}{\partial \omega^2}\right)_{\omega_0} (\omega - \omega_0)^2} + \ldots$$

Dispersijos kreivė

- Dispersijos kreivė yra pakeičiama tiesė, parabolė



Ia.

IIa.

Grupinis greitis

$$\frac{1}{\upsilon_g} = \left(\frac{\partial k}{\partial \omega}\right)_{\omega_0} = \tan\beta$$

Fazinis greitis

$$\frac{1}{\upsilon_f} = \frac{k_0}{\omega_0} = \tan\alpha$$

Dispersijos lygtis

- Iš bangų lygties gaunama ir antro artinio lygtis

$$\left[\frac{\partial}{\partial z}+\frac{ik''_{\omega}}{2}\frac{\partial}{\partial^2\tau}\right]A\left(\tau=t-z/\upsilon_g\,,z\right)=0$$

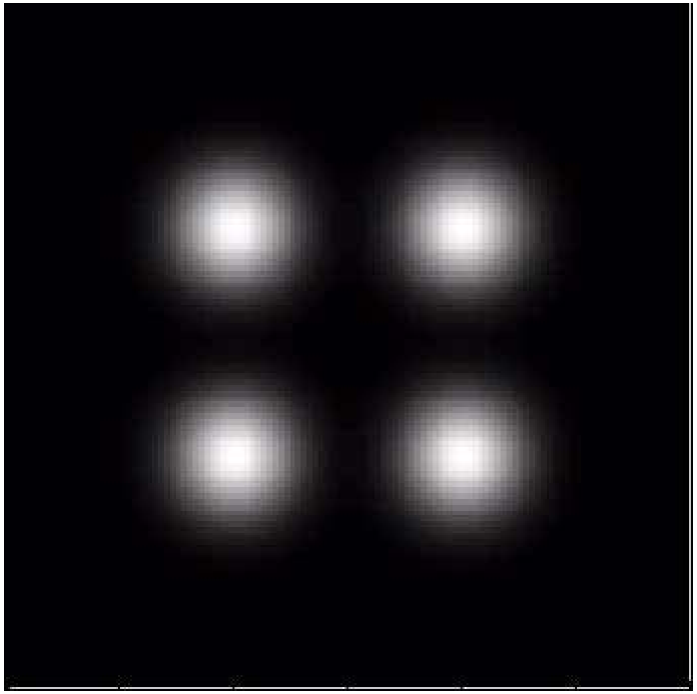
- Lygtis yra parabolinė. Dispersija II artinyje – “savotiška difuzija”. Skirtingos spalvos impulse keliauja skirtingais greičiais.

Problemos

- Informacijos perdavime naudojami pluoštai difrakcijos metu plinta. Norint perduoti informacija nukenčia skyra
- Dėl medžiagos dispersijos nukenčia atitinkamai informacijos laikinė skyra.

Pavyzdys

- Sumodeliuokime informacijos pernešimą laisvoje erdvėje



Pluoštai plinta – difraguoja. Informacija po kažkokio atstumo prarandama.

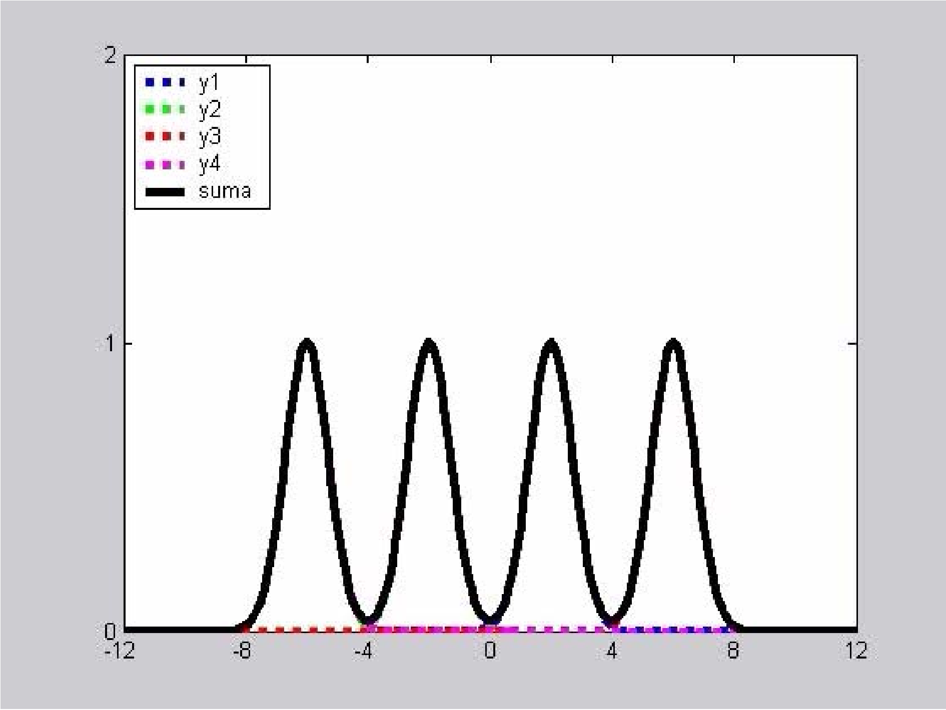
Difrakcija – yra viena iš informacijos perdavimo rykščių.

Pavyzdys

- Sumodeliuosime laike atskirtos informacijos perdavimą

Laikui bėgant informacija prarandama

Dispersija – yra kita informacijos perdavimo rykščių. **Baisesnė. ;)**



Difrakcijos ir dispersijos slopinimas

- Tiesinėje terpėje su difrakcijos ir dispersijos reiškiniais galima kovoti konstruktyvios interferencijos pagalba

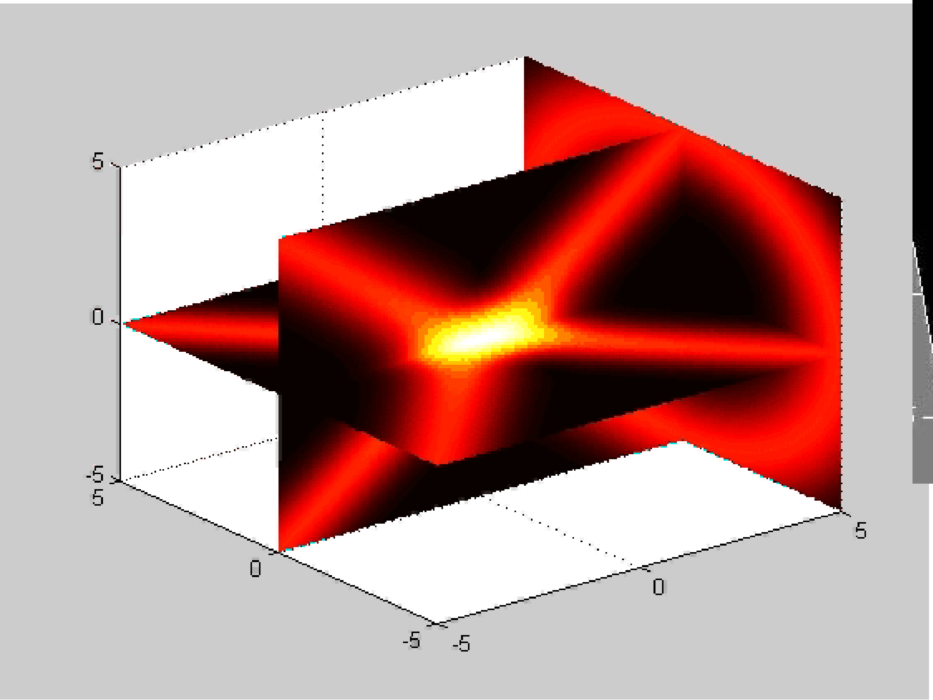
  - Pliusas: Galime perduoti informacija be nuostolių

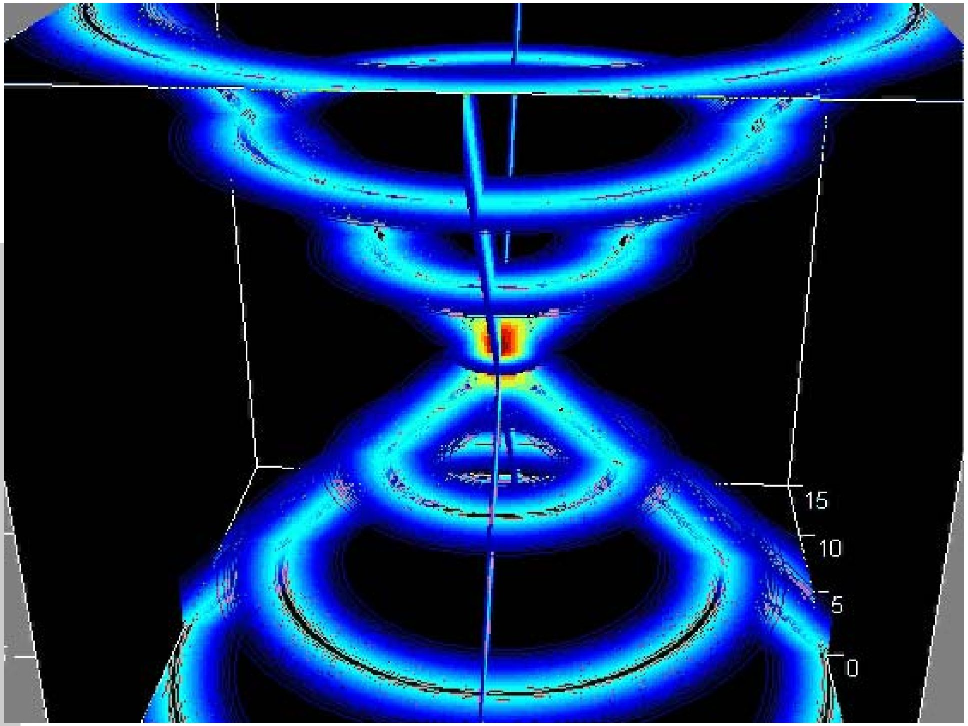
  - Minusas: Sudėtinga pluošto struktūra.


T H E P H A N T O M M E N A C E

Galutinis sprendinys

- “Džedajų” kardai





Arba “X – bangos”

Alternatyva: netiesinė optika

- Netiesinė optika (LRC duona)
  - Šviesai sklindant medžiagoje, medžiagos molekulės poliarizuojasi. Medžiagos poliarizuojatumas priklauso nuo lauko stiprio tiesiškai **P** ~ **E**.
  - Šį rezultatą mes gavome, manydami, kad elektronas atome svyruoja panašiai kaip svarmuo ant spyruoklės – pagal HUKO dėsnį : q**E**=-k**r**.
  - Mechanikoje yra žinoma, kad HUKO dėsnis galiuoja tik mažiems nuokrypiams, panašiai yra ir atome.
  - Medžiagos atsakas [poliarizuojatumas] šio atveju priklauso nuo lauko stiprio **netiesiškai**.

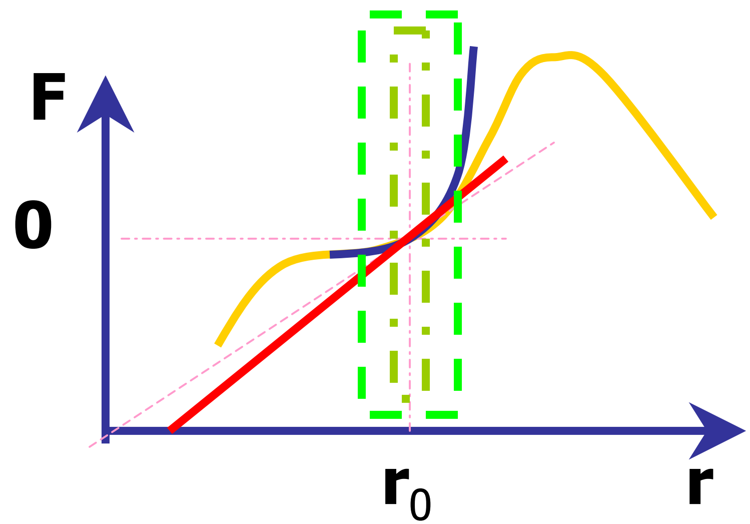
Anharmoninis osciliatorius

- Osciliatorius neaprašomas Huko dėsniu

$$m\ddot{\mathbf{r}} + m\nu\dot{\mathbf{r}} + m\omega_0^2\mathbf{r}(1 - \xi\mathbf{r} - \zeta\mathbf{r}^2 - \dots) = e\mathbf{E}$$

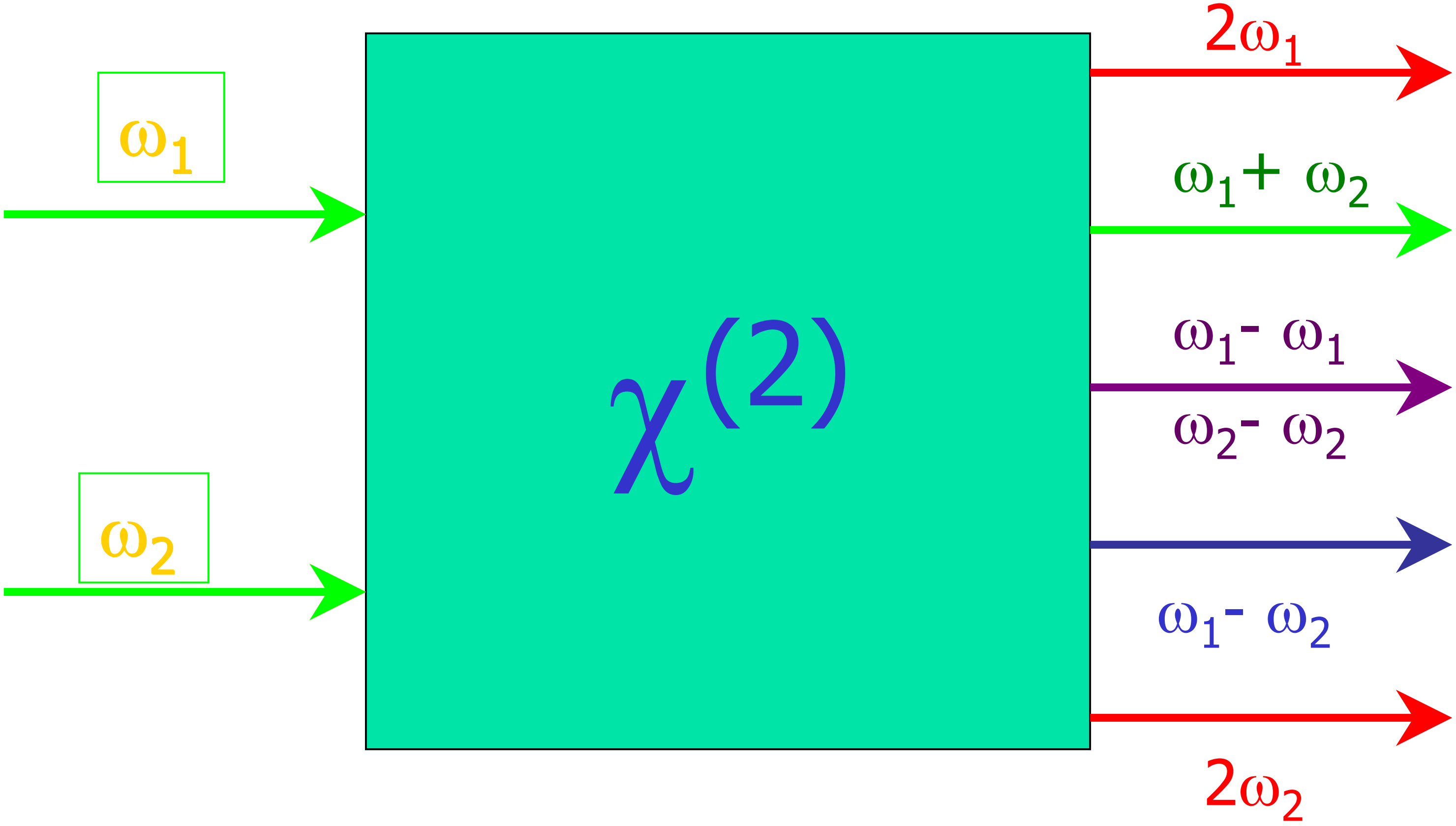
kvadratinis

kubinis



Tribangė sąveika ($\chi^{(2)}$)

$$\omega_m \pm \omega_n = \omega_p$$



Tribangės sąveikos lygtys

$$\frac{dE_1(z)}{dz} = -i\sigma_1\omega_1 E_2^*(z)E_3(z)e^{i\Delta kz},$$
$$\frac{dE_2(z)}{dz} = -i\sigma_2\omega_2 E_1^*(z)E_3(z)e^{i\Delta kz},$$
$$\frac{dE_3(z)}{dz} = -i\sigma_3\omega_3 E_1(z)E_2(z)e^{-i\Delta kz}.$$

kur Δk – banginis išderinimas

$\Delta k = k_3 - k_2 - k_1$ o σ_i yra netiesinis koeficientas

Lygtis yra netiesinės – sprendžiamos skaitmeniškai

Energetiniai sąryšiai

- Užrašome lygtis, kuomet $\Delta k=0$

$$\frac{E_1^*}{\omega_1}\frac{dE_1}{dz} = -i\sigma_1 E_1^* E_2^* E_3,$$

$$\frac{E_2^*}{\omega_2}\frac{dE_2}{dz} = -i\sigma_2 E_2^* E_1^* E_3,$$

$$\frac{E_3^*}{\omega_3}\frac{dE_3}{dz} = -i\sigma_3 E_3^* E_2 E_1.$$

$$\longrightarrow \quad \frac{1}{\omega_1}\frac{dS_1}{dz} = \frac{1}{\omega_2}\frac{dS_2}{dz} = -\frac{1}{\omega_3}\frac{dS_3}{dz}.$$

S_i – bangos energija

Šie energetiniai sąryšiai yra vadinami Menli-Rou sąryšiais

Jei dvejų bangų galia didėja, tai trečios - mažėja

Menli-Rou sąryšių prasmė

- Fotono energija $E_{ph} = \hbar\omega$, bangoje yra N fotonų, tai bangos energija yra $S = NE_{ph}$.
- Menli-Rou sąryšiai perrašomi

$$\frac{1}{\omega_1}\frac{d\left(N_1\hbar\omega_1\right)}{dz} = \hbar\frac{dN_2}{dz} = -\hbar\frac{dN_3}{dz}. \longrightarrow \frac{dN_1}{dz} = \frac{dN_2}{dz} = -\frac{dN_3}{dz}.$$

Menli-Rou sąryšiai nusako skirtingos spalvos fotonų kitimą

Dažnio ω_1 ir ω_2 fotonai atsiranda [nyksta] tuo pat greičiu kaip ir nyksta [atsiranda] ω_3 dažnio fotonai.

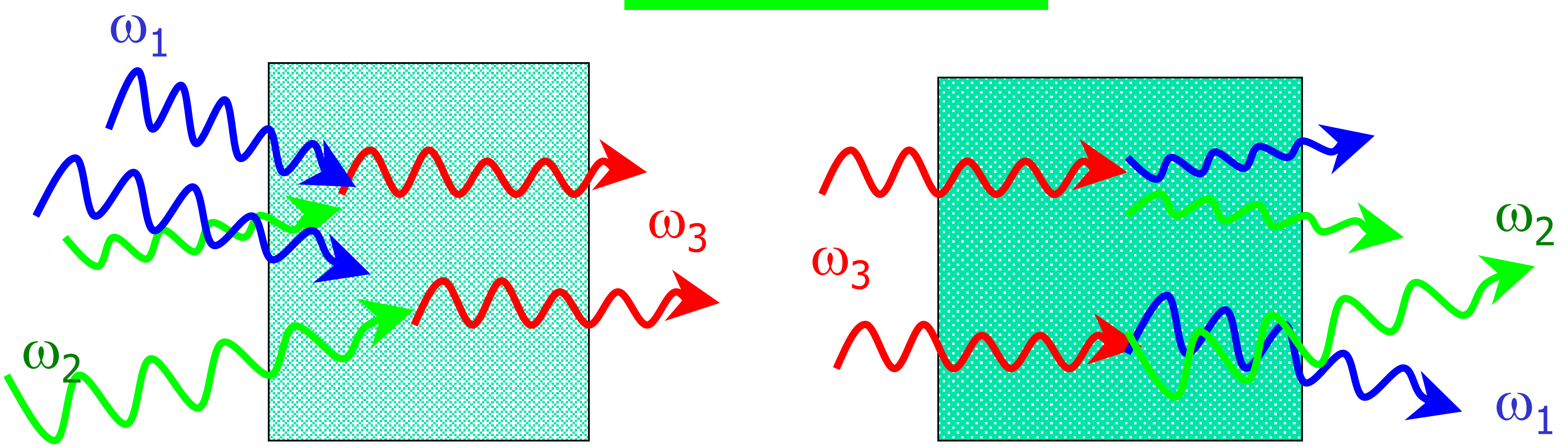
Fazinio sinchronizmo prasmė

- Tribangėje sąveikoje dalyvauja trys fotonai!

$$\omega_m \pm \omega_n = \omega_p$$

Šis sąryšis turi energijos tvermės dėsnio prasmę

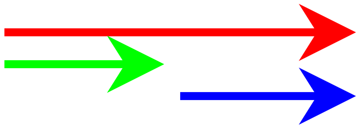
$$\hbar\omega_m \pm \hbar\omega_n = \hbar\omega_p$$



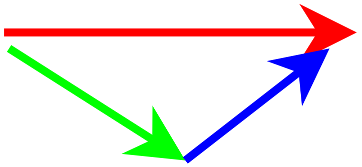
Fazinio sinchronizmo prasmė

- Sąlyga $\Delta k=0$ atitinka judėsio kiekio tvermės dėsnį fotonams

$$\mathbf{k}_3 = \mathbf{k}_2 \pm \mathbf{k}_1 \longrightarrow \hbar\mathbf{k}_3 = \hbar\mathbf{k}_2 \pm \hbar\mathbf{k}_1$$



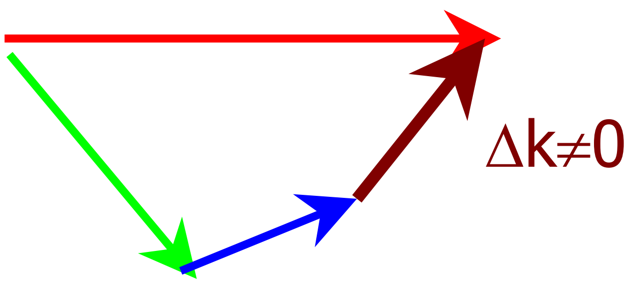
Kolinearus sinchronizmas



Nekolinearus sinchronizmas

Neoptimali sąveika

- Tai sąveika, kuomet nėra fazinio sinchronizmo $\Delta k \neq 0$



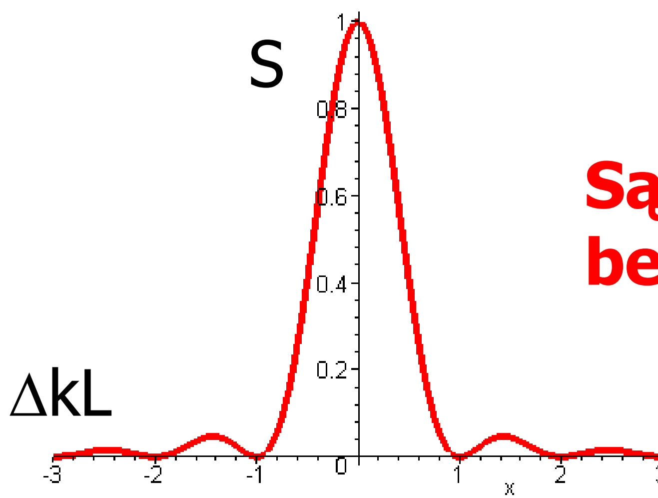
Tarkime, kad E_1 ir E_2 yra pastovūs

$$\omega_1 + \omega_2 = \omega_3$$

Iš lygčių gauname

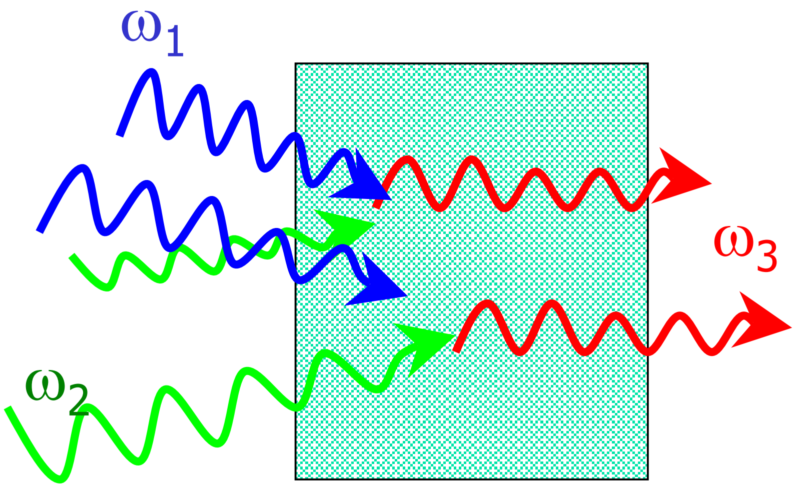
$$E_3(z) \sim E_1 E_2 \left(e^{i\Delta kL} - 1\right)$$

$$S_3(z) \sim \left[\frac{\sin(\Delta kL)}{\Delta kL}\right]^2$$



Sąveika vyksta, bet neoptimaliai

Parametrinis stiprinimas



Optiniame parametriniame stiprintuve vyksta energijos mainai tarp kaupinimo ir signalo bei šalutinės bangų

Klausimėlis (ne LRT)

- Kaip elgiasi pluoštas optinių parametrinių procesų metų?
- Žinoma, kad gali vykti stiprinimas, energetiniai mainai ir t.t.
- Bet kaip ar pluoštas
  - Difraguoja
  - Disperguoja?
- Ieškome atsakymo

Difrakcija ir dispersija OPS

- Išsigimęs režimas (šalutinė ir kaupinimo bangos vienodo dažnio)

$$\frac{\partial A_1}{\partial z} = -\frac{1}{u_1}\frac{\partial A_1}{\partial t} - \gamma_1\frac{\partial A_1}{\partial x} + \frac{\mathrm{i}}{2}g_1\frac{\partial^2 A_1}{\partial t^2} - \frac{\mathrm{i}}{2k_1}\left(\frac{\partial^2}{\partial x^2} + \frac{\partial^2}{\partial y^2}\right)A_1 + \mathrm{i}\sigma_1 A_3 A_2^*,$$
$$\frac{\partial A_2}{\partial z} = -\frac{1}{u_2}\frac{\partial A_2}{\partial t} - \gamma_2\frac{\partial A_2}{\partial x} + \frac{\mathrm{i}}{2}g_2\frac{\partial^2 A_2}{\partial t^2} - \frac{\mathrm{i}}{2k_2}\left(\frac{\partial^2}{\partial x^2} + \frac{\partial^2}{\partial y^2}\right)A_2 + \mathrm{i}\sigma_2 A_3 A_1^*,$$

Lygtis atrodo “baugiai”, bet tik “atrodo”

Išsprendus lygtis gauname

- Sprendinys bus

"eksponentės"

$$f_1 = C_1\, e^{(p+iq_n)z} + C_2\, e^{(-p+iq_n)z},$$

Menami dydžiai rodiklyje, jei jie "niekiniai" – tvarka.

- Kur koeficientai nustatomi iš "griozdų"

Fazė - nesvarbu

$$p = \sqrt{G^2 - \xi^2},$$

$$\xi = \frac{\Delta_1 - \Delta_2}{2} = \left(\frac{1}{u_1} - \frac{1}{u_2}\right)\frac{\Omega}{2} + \frac{g_1 + g_2}{4}\Omega^2 - (\gamma_1 - \gamma_2)\frac{k_x}{2} - \frac{k_x^2 + k_y^2}{4}\left(\frac{1}{k_1} + \frac{1}{k_2}\right),$$

$$q_n = -\frac{\Delta_1 + \Delta_2}{2} = -\left(\frac{1}{u_1} + \frac{1}{u_2}\right)\frac{\Omega}{2} - \frac{g_1 - g_2}{4}\Omega^2 + (\gamma_1 + \gamma_2)\frac{k_x}{2} - \frac{k_x^2 + k_y^2}{4}\left(\frac{1}{k_1} - \frac{1}{k_2}\right),$$

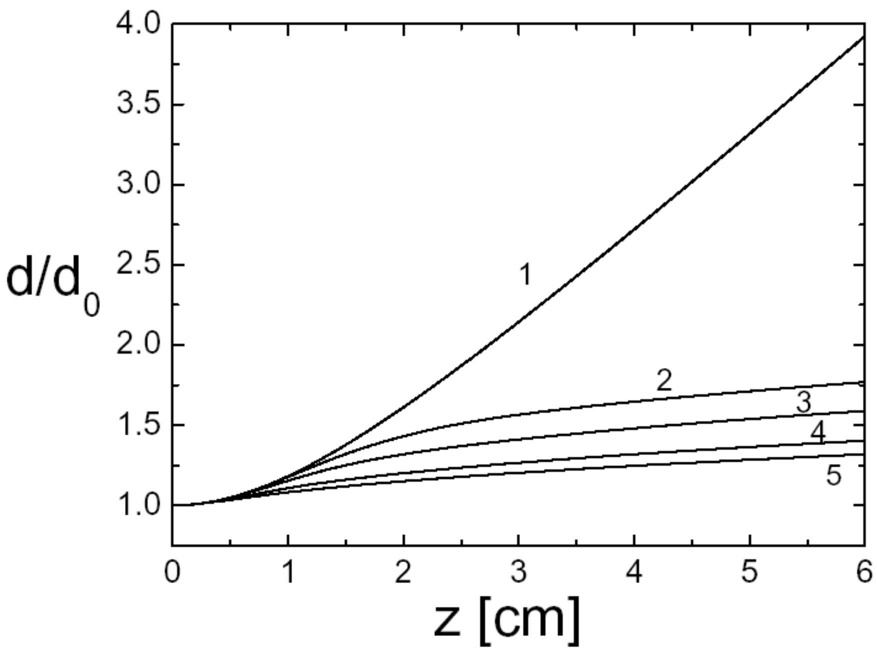
Turi būti "niekinis"

dispersija

difrakcija

Lygčių analizė

- Difrakcijos procesas

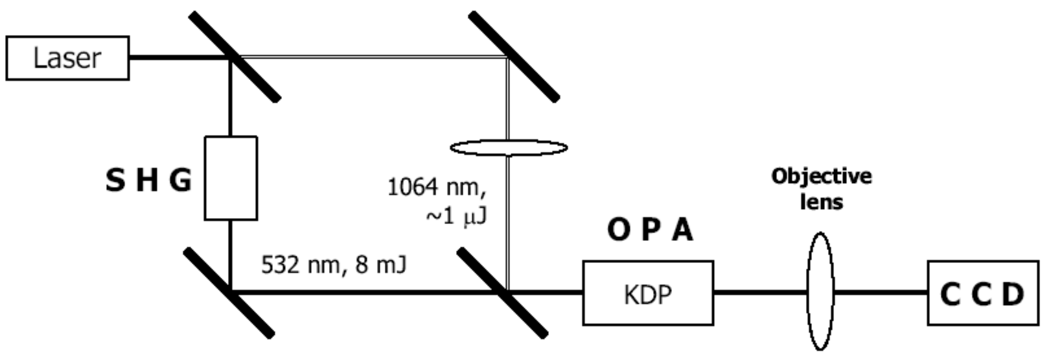


Pluošto matmenys nekinta!

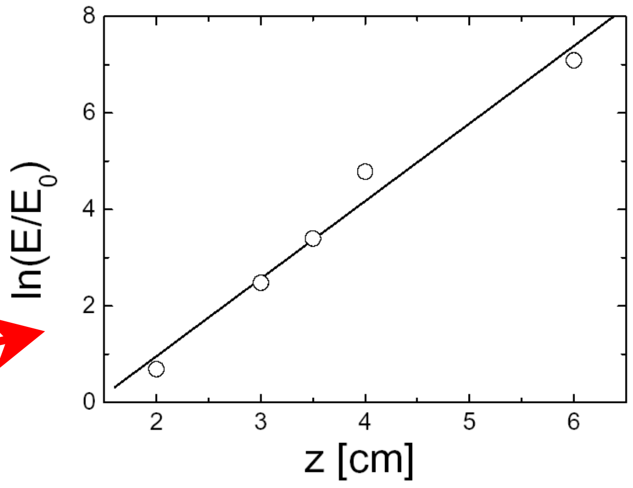
Parinkę pradines sąlygas galime nuslopiti difrakciją!

Eksperimentas

- Buvo atliktas eksperimentas



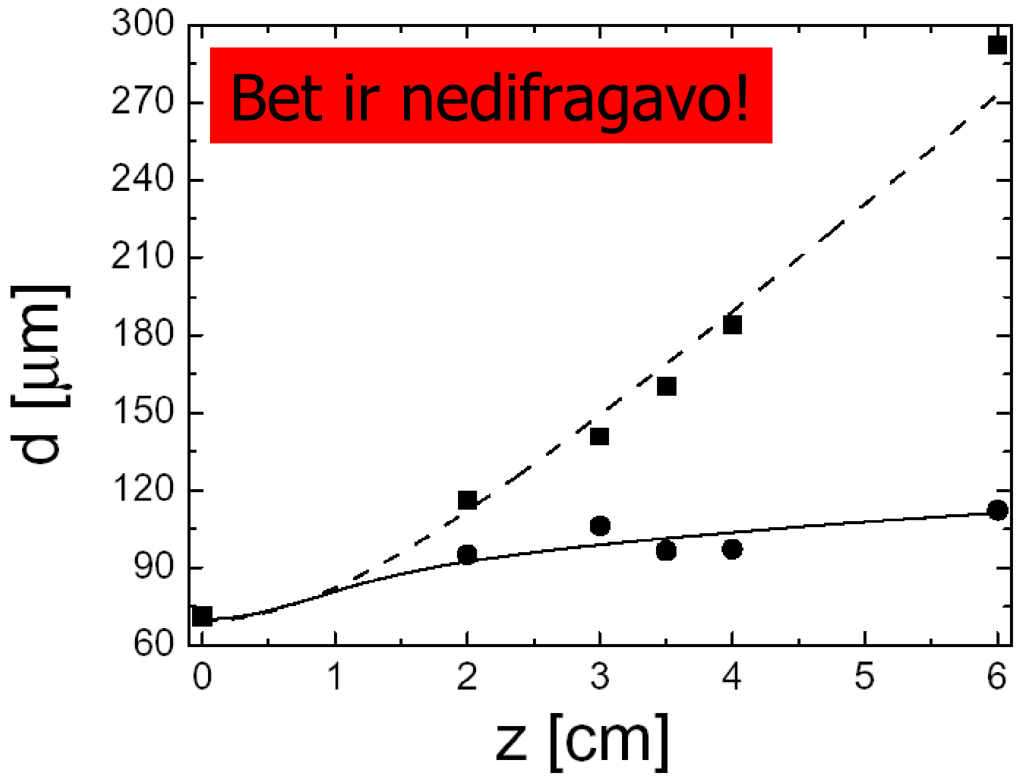
Eksperimento shema



Buvo imami skirtingo ilgio kristalai

Pluoštas buvo stiprinimas

Palyginimas su teorija



Išvada: tai veikia!

Dispersijos slopinimas

- Teorija yra.

- REIKALINGAS **EXPERIMENTAS**

HAPPY END

- Ačiū už dėmesį!