

# Šviesos sūkuriai

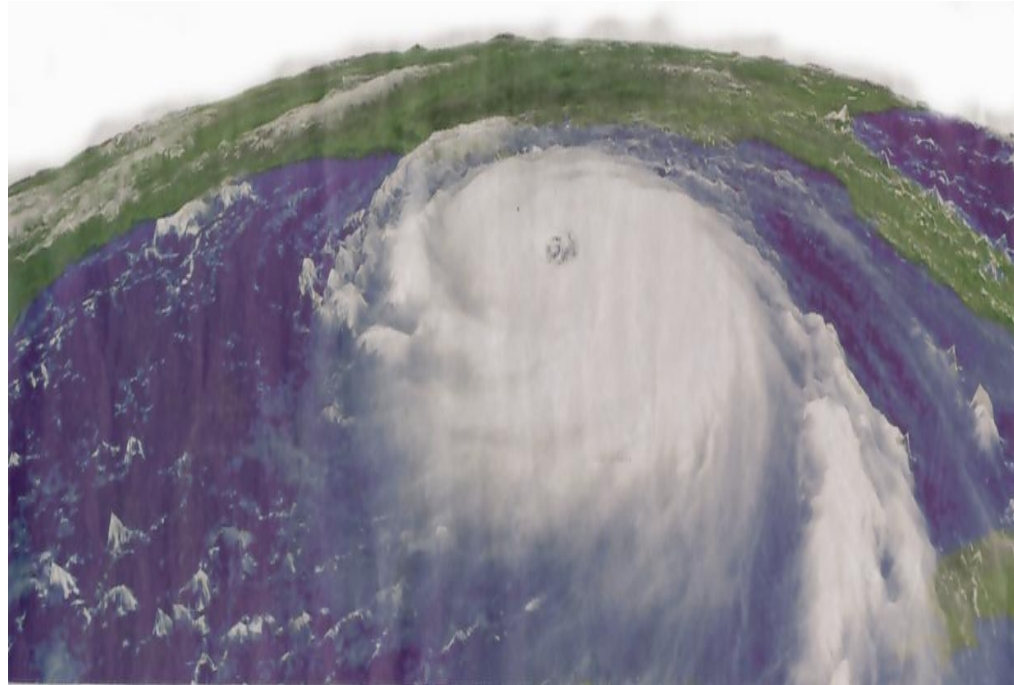
Šviesos sūkuriai. Lagero-Gauso pluoštai

Šviesos sūkurių formavimas

Šviesos sūkurių analizė

Šviesos sūkurių netiesinės optinės transformacijos

Optiniai pincetai



Katrina Hurrigan at the coast of Louisiana August 2005

(National Oceanic and Atmospheric Administration/AFP/M.Wolff)

# Šviesos sūkuriai

## A. Šviesos sūkuriai. Lagero-Gauso pluoštai

Be anksčiau nagrinėtų Gauso ir Ermito-Gauso šviesos pluoštų yra dar viena rūšis pluoštų turinčių labai įdomias savybes – tai šviesos sūkuriai, dar vadinami Lagero-Gauso pluoštais, pluoštais su fazės dislokacija, šviesos pluoštai su orbitiniu judesio kiekiu momentu (optical vortices, Lager-Gaussian beams, beams with phase dislocations).

Trumpai šviesos sūkurys gali būti apibūdintas taip: banga kurios bangos frontas turi sraigtinį paviršių (helikoidas) arba  $m$  helikoidų sistema su ta pačia ašimi vadinamas optine sraigatine dislokacija arba tiesiog šviesos sūkuriumi ( $m$  - sveikas skaičius (teigiamas arba neigiamas), nusako sūkurio topologinį krūvį ir dislokacijos laipsnį). Šviesos sūkuriai pagal analogiją galėtų būti siejami su periodiniais defektais kristaluose. Literatūroje galima sutikti įvairių tokių pluoštų pavadinimų – faziškai erdvėje moduluoti šviesos pluoštai, optinės sraigtinės (helikoidinės) dislokacijos, stacionari hibridinė  $TEM_{01}^*$  moda - “riestainis”, tamsieji solitonai ar tiesiog šviesos sūkuriai.

Šiai dienai yra žinoma nemažai eksperimentinių ir teorinių darbų, kai šviesos sūkurys buvo formuojamas lazerių rezonatoriuose, pasirinkus tam tikrus parametrus. Tačiau pats populiariausias ir paprasčiausias sūkurių gavimo būdas - panaudojant kompiuteriu sumodeliuotas hologramas. Šiuo metu pagrindiniai darbai susiję su minėtų pluoštų tiesinėmis transformacijomis, savybių tyrimais, tačiau yra ir darbų apie šviesos sūkurių transformacijas netiesinių sąveikų metu. Literatūroje pasirodo ir siūlymų praktikoje panaudoti kai kurias šviesos sūkurių savybes. Jie jau taikomi labai mažų objektų sukimui, tikimasi kad šviesos sūkuriai bus naudojami ir izotopams atskirti.

# Šviesos sūkuriai

## A. Šviesos sūkuriai. Lagero-Gauso pluoštai

Klasikinė skaliarinė bangų teorijos lygtis cilindrinėse koordinatėse:

$$\left( \Delta - \frac{1}{c^2} \frac{\partial^2}{\partial t^2} \right) E(\rho, \varphi, z, t) = 0$$

Šios skaliarinės bangų teorijos lygties sprendinys cilindrinėje koordinačių sistemoje, monochromatinei šviesos bangai sklindančiai ašies kryptimi, gali būti užrašytas taip:

$$E(\rho, \varphi, z, t) = \rho^{|m|} \exp(im\varphi + ikz - i\omega t)$$

čia  $\omega$  yra šviesos bangos kampinis dažnis,  $\lambda$  yra bangos ilgis,  $k=2\pi/\lambda$  bangos skaičius,  $\rho$ ,  $\varphi$ ,  $z$  - yra cilindrinės koordinatės.

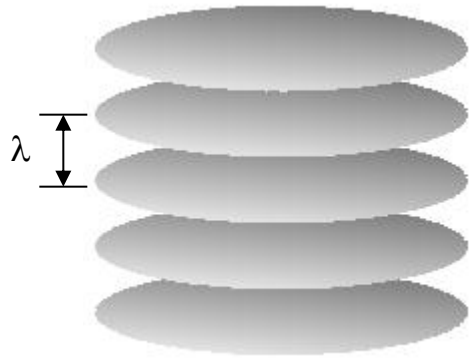
Šio sprendinio fazė priklauso nuo azimutinio kampo padauginto iš sveiko skaičiaus (teigiamo arba neigiamo). Šviesos bangos frontas yra helikoidinis paviršius arba  $m$  helikoidų sistema su tapačia ašimi ir jis aprašomas lygybe:

$$m\varphi + kz = const.$$

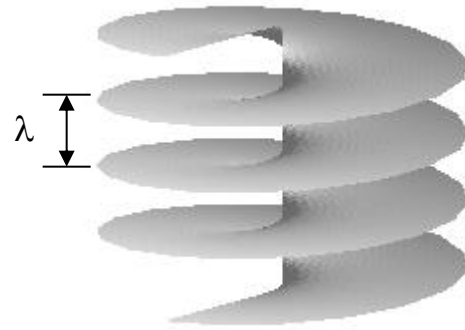
Sveikas skaičius  $m$  nusako šviesos sūkurio topologinį krūvį arba sraigtinės dislokacijos laipsnį. Esant vienam pilnam bangos fronto apsisukimui apie ašį, bangos fazė pasikeičia dydžiu  $2\pi m$ , t.y. fazių skirtumas tarp dviejų kaimyninių paviršių yra lygus  $2\pi$ . Topologinio krūvio ženklas nurodo kuria kryptimi sukasi šviesos sūkurio bangos frontas (pagal laikrodžio rodyklę  $m>0$ , prieš  $m<0$ ). Šviesos sūkurio centre fazė yra neapibrėžta, o bangos amplitudė lygi 0.

# Šviesos sūkuriai

## A. Šviesos sūkuriai. Lagero-Gauso pluoštai



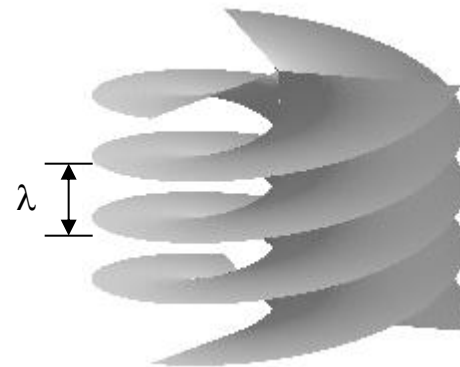
Gauso pluoštas  $m=0$



Šviesos sūkurys  $m=+1$



Šviesos sūkurys  $m=+1$



Šviesos sūkurys  $m=+1$

# Šviesos sūkuriai

## A. Šviesos sūkuriai. Lagero-Gauso pluoštai

Realią amplitudę aprašo skaliarinės bangų lygties paraksialinis artinys:

$$\frac{1}{\rho} \frac{\partial}{\partial \rho} \left( \rho \frac{\partial E}{\partial \rho} \right) + \frac{1}{\rho^2} \frac{\partial^2 E}{\partial \varphi^2} + 2jk \frac{\partial E}{\partial z} = 0.$$

Šios lygties sprendinys:

$$E(\rho, \varphi, z) = E_S \frac{\rho_S}{\omega_S} \left( \frac{\rho}{\omega_S} \right)^{|m|} \exp\left(-\frac{\rho_S^2}{\omega_S^2}\right) \exp(j\Phi_S(\rho, \varphi, z))$$

čia  $\rho_S$  yra pluošto spindulys sąsmaukoje,  $E_S$  reali amplitudė, šviesos bangos kampinis dažnis,  $\lambda$  yra bangos ilgis,  $k=2\pi/\lambda$  bangos skaičius,  $\rho$ ,  $\varphi$ ,  $z$  - yra cilindrinės koordinatės.

$$\omega_S = \sqrt{\rho_S^2 + \left( \frac{2z}{k\rho_S} \right)^2} \quad - \text{pluošto skersiniai matmenys.}$$

$$\Phi_S(\rho, \varphi, z) = -(|m|+1) \arctan\left( \frac{2z}{k\rho^2} \right) + \frac{k\rho^2}{2R_S(z)} + m\varphi + kz \quad - \text{pluošto fazė.}$$

$$R(z) = z + \frac{k^2 \rho_S^4}{4z} \quad - \text{pluošto bangos fronto kreivumo radiusas.}$$

# Šviesos sūkuriai

## A. Šviesos sūkuriai. Lagero-Gauso pluoštai

Plokštumoje  $z = 0$ :

$$E(\rho, \varphi, 0) = E_S \left( \frac{\rho}{\omega_S} \right)^{|m|} \exp \left( -\frac{\rho_S^2}{\omega_S^2} + jm\varphi \right),$$

$$E(x, y, 0) = E_S \left( \frac{x + j \operatorname{sgn}(m)y}{\rho_S} \right)^{|m|} \exp \left( -\frac{x^2 + y^2}{\rho_S^2} \right).$$

Šviesos sūkurio intensyvumo skirstinys yra žiedo pavidalo, sūkurio centre ( $\rho = 0$ ) amplitudė lygi nuliui, o atstume  $\rho = \rho_{\max}$ , kai  $0 = z$ , šviesos sūkurio amplitudė yra maksimali ir lygi:

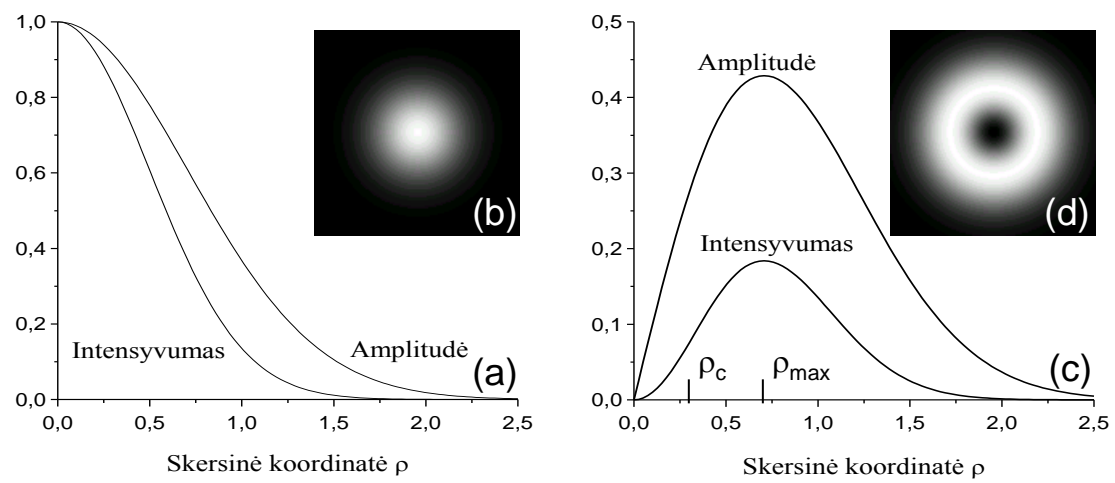
$$E_{\max} = E_S \left( \frac{|m|}{2e} \right)^{|m|}.$$

Atstumas kuriame šviesos sūkurio amplitudė yra maksimali su pluošto spinduliu yra susietas sąryšiu

$$\rho_{\max} = \rho_S \left( \frac{|m|}{2} \right)^{1/2}$$

# Šviesos sūkuriai

## A. Šviesos sūkuriai. Lagero-Gauso pluoštai



Gauso pluošto amplitudės ir intensyvumo skirstiniai (a, b), ir sūkurinio pluošto amplitudės ir intensyvumo skirstiniai (c, d). Gauso ir sūkurinio pluoštų parametrai yra vienodi:  $E_s=1$  ir  $\rho_s=1$ .

# Šviesos sūkuri

## A. Šviesos sūkuri. Lagero-Gauso pluoštai

$$\Phi(\rho, \varphi, z) = -\arctan \frac{z}{z_R} + \frac{k\rho^2}{2R_s(z)} + m\varphi' \quad z_R = k\rho_s^2/2 \quad - \text{Reilėjaus ilgis}$$

↑  
Gouy fazē

↑  
bangos fronto kreivumas

↑  
azimutinē fazēs priklausomybē

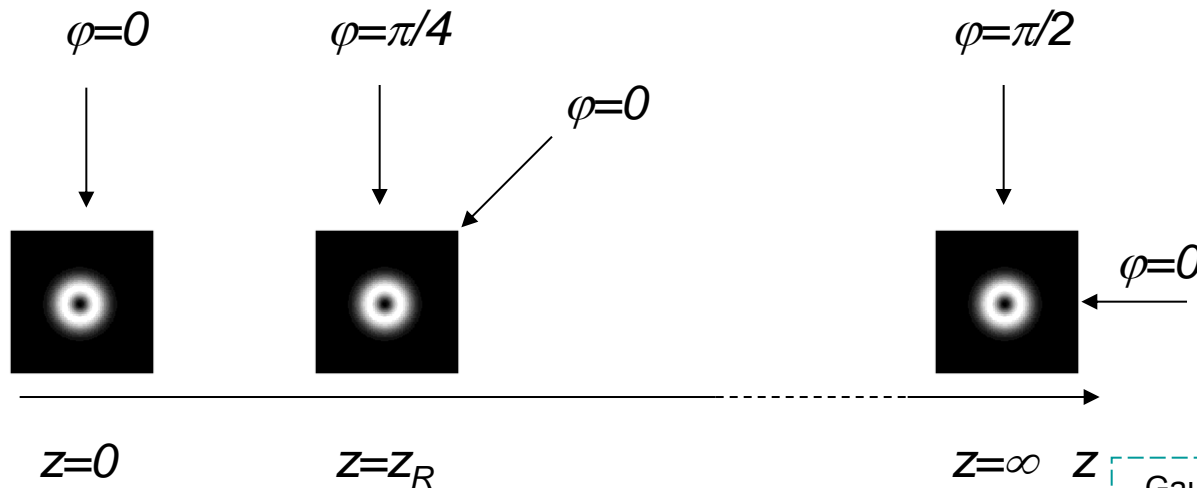
$$\varphi' = \varphi - \operatorname{sgn}(m) \arctan \left( \frac{z}{z_R} \right) \quad \Omega = \frac{d\varphi}{dz} = -\frac{\operatorname{sgn}(m)}{z_R} \frac{1}{1 + (z/z_R)^2}$$

Sūkuri sukimosi kampinis greitis



# Šviesos sūkuriai

## A. Šviesos sūkuriai. Lagero-Gauso pluoštai

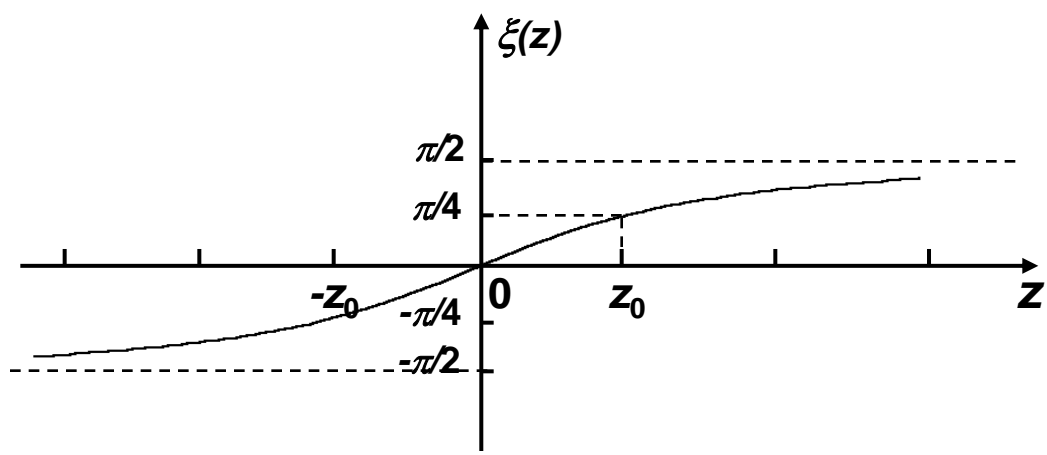


Plokščios bangos fazė

$$\varphi(\rho, z) = kz - \zeta(z) + k \frac{\rho^2}{2R(z)}$$

Gauso pluošto fazės vėlinimas lyginant su plokščia banga

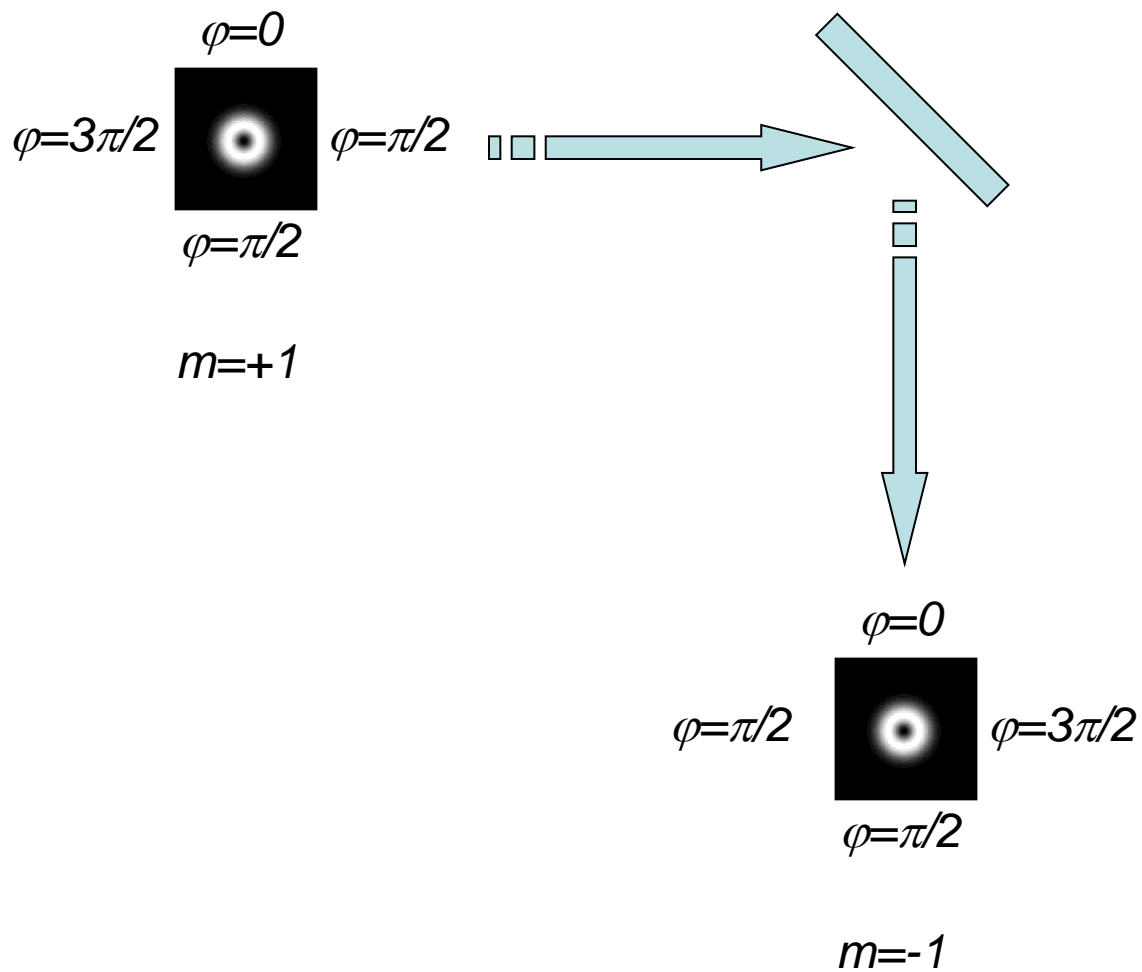
Narys atsakingas už fazės vėlinimą dėl bangos fronto kreivumo radiuso kitimą



# Šviesos sūkuriai

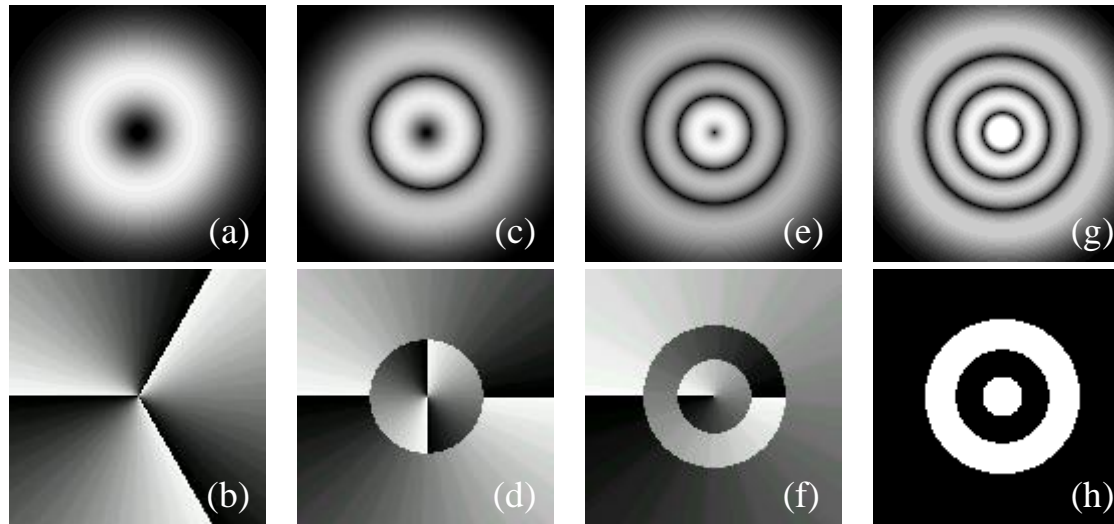
## A. Šviesos sūkuriai. Lagero-Gauso pluoštai

Šviesos sūkurio atspindys



# Šviesos sūkuriai

## A. Šviesos sūkuriai. Lagero-Gauso pluoštai



$p=0; m=3.$

$p=1; m=2.$

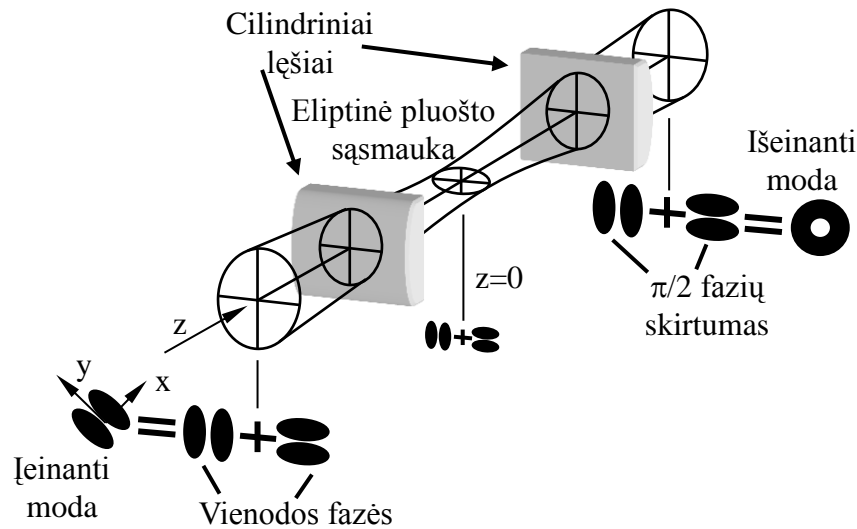
$p=2; m=1.$

$p=3; m=0.$

LG šviesos sūkurinių pluoštų intensyvumo skirstiniai (a, c, e, g) ir faziniai portretai (b, d, f, h). Po paveikslėliais užrašyti atitinkami LG sūkurinių pluoštų indeksai  $p$  ir  $m$ . Fazinių portretų paveikslėliuose juoda spalva atitinka fazę lygią nuliui, o balta – . Tarpinės fazės vertės atitinka pilka spalva.  $p$  – radialinis indeksas.

# Šviesos sūkuriai

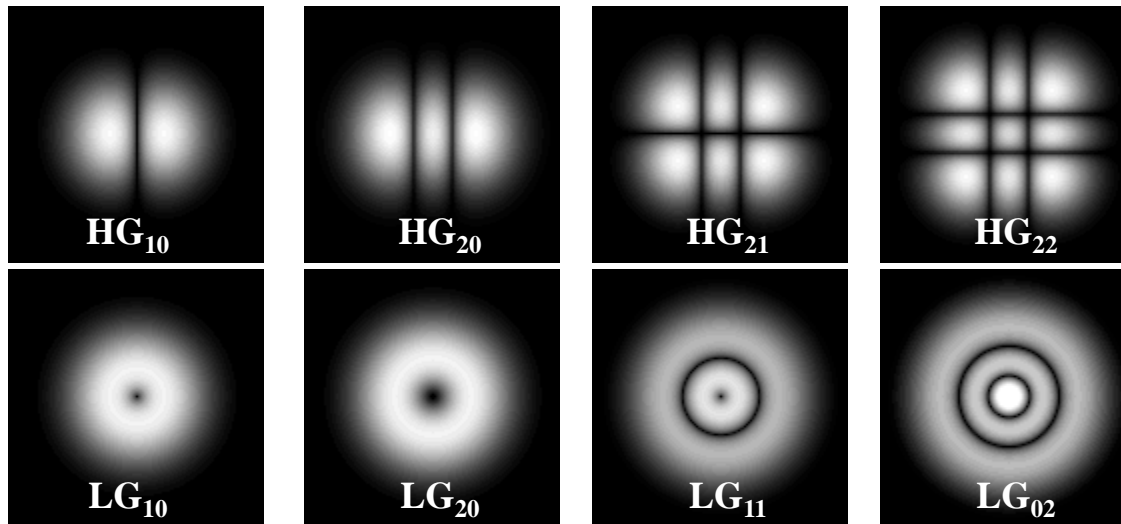
## A. Šviesos sūkuriai. Šviesos sūkurių formavimas



Cilindrinų lęšių konverteris Hermito ir Gauso ( $n=1$ ,  $l=0$ ) modos konvertavimui į atitinkamą Lagero ir Gauso ( $m=1$ ,  $p=0$ ) modą. Cilindriniai lęšiai, kurių židinių nuotoliai  $f$ , yra atskirti atstumu  $f/2^{1/2}$ . Įeinančio pluošto Reilio ilgis (sąsmaukos ilgis) yra lygus  $(1+1/2^{1/2})f$ .

# Šviesos sūkuriai

## A. Šviesos sūkuriai. Šviesos sūkurių formavimas



Ermito ir Gauso modų transformavimas į atitinkamas Lagero ir Gauso modas su cilindrinį lęšiu modų konverteriu. Viršutinėje eilėje pavaizduotos Ermito ir Gauso modos, o apatinėje – jai atitinkamos Lagero ir Gauso modos.

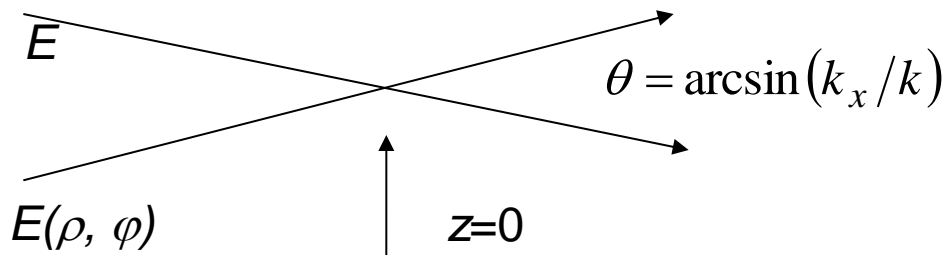
# Šviesos sūkuriai

## A. Šviesos sūkuriai. Šviesos sūkurių formavimas

Šviesos sūkurių formavimas holograma

Jeigu turime šviesos sūkurį: 
$$E(\rho, \varphi) = E_s \left( \frac{\rho}{\rho_s} \right)^{|m|} \exp\left(-\frac{\rho^2}{\rho_s^2} + im\varphi\right)$$

Ir plokščią bangą: 
$$E = E_0 e^{ik_x x}$$



$$I = \left| R_0 e^{ik_x x} + E_0 \left( \frac{r}{d} \right)^{|m|} e^{im\varphi} e^{-r^2/d^2} \right|^2 = R_0^2 + E_0^2 \left( \frac{r}{d} \right)^{2|m|} e^{-2r^2/d^2} + 2R_0 E_0 \left( \frac{r}{d} \right)^{|m|} e^{-r^2/d^2} \cos(k_x x - m\varphi)$$

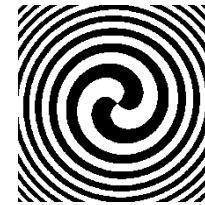
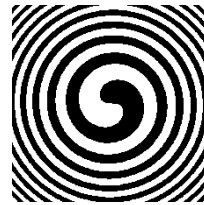
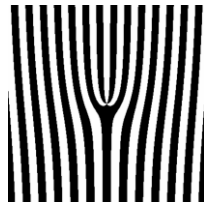
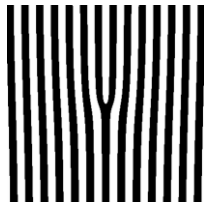
# Šviesos sūkūriai

A. Šviesos sūkūriai. Šviesos sūkūrių formavimas

C:\program files\Interferencija\Interferencija



Interferencija.exe

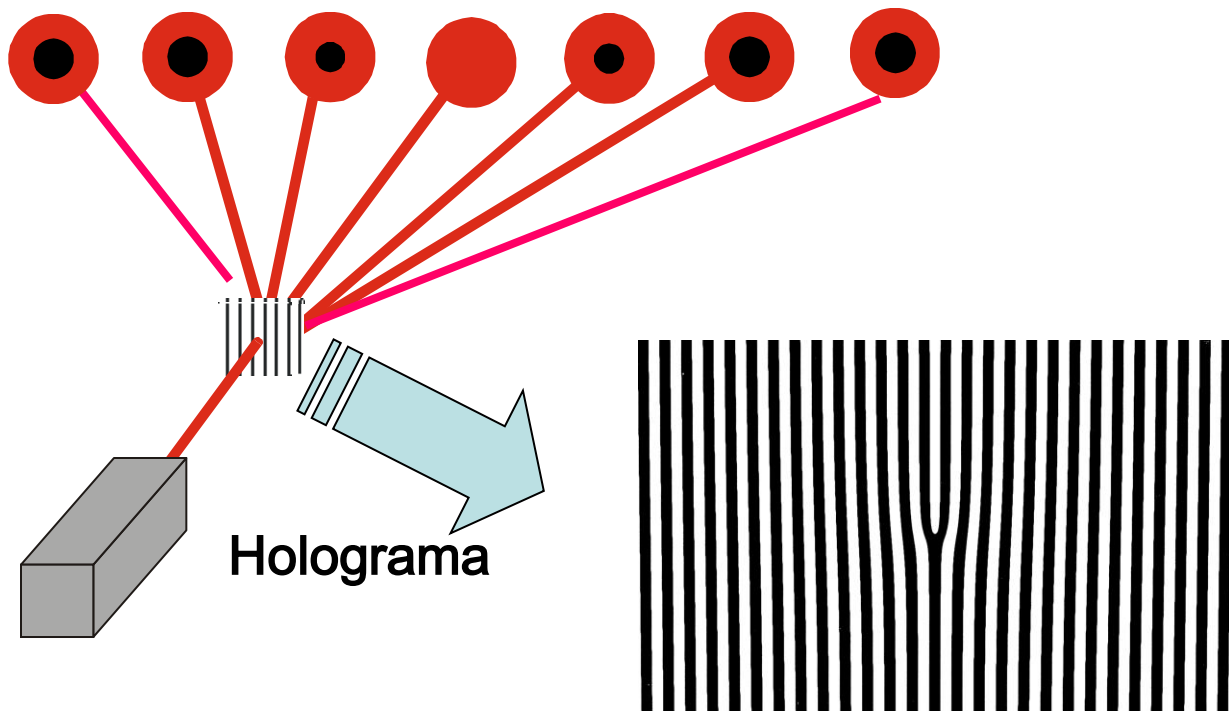


# Šviesos sūkuriai

A. Šviesos sūkuriai. Šviesos sūkurių formavimas

Šviesos sūkuriai, kurių topologiniai krūviai:

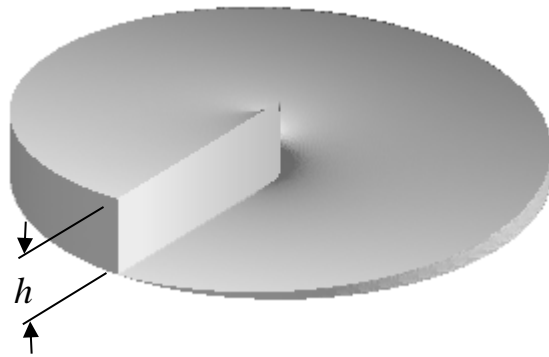
... -3 -2 -1 0 +1 +2 +3 ....





# Šviesos sūkuriai

## A. Šviesos sūkuriai. Šviesos sūkurių formavimas



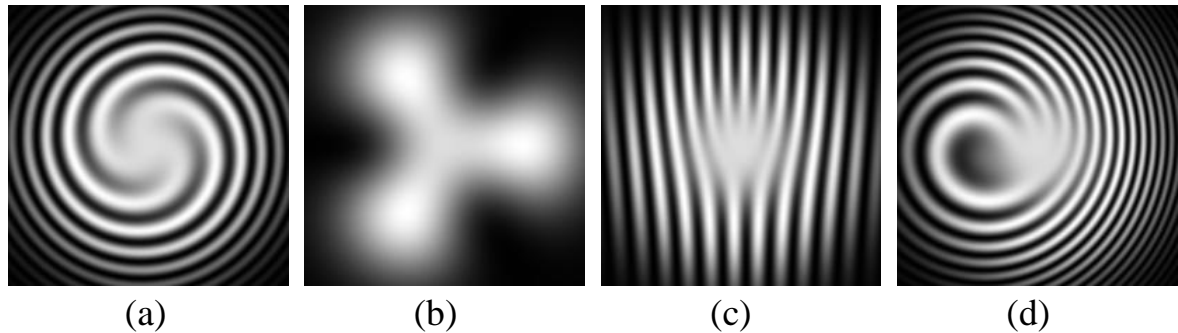
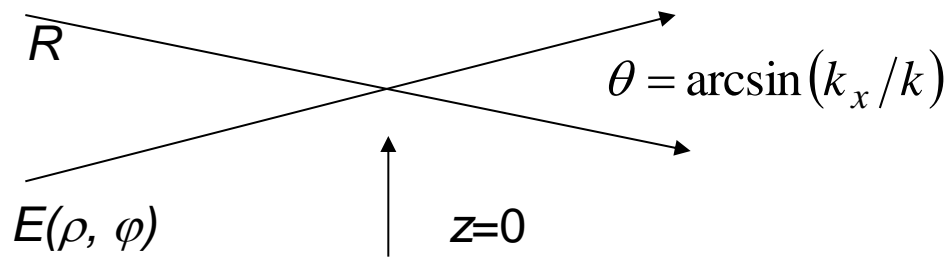
Spiralinė fazinė plokštelė

$$A(r, \varphi) = a_0 \exp(im\varphi) \exp\left(-\frac{r^2}{d^2}\right)$$

$$h = \frac{\lambda}{2\pi n} \varphi, (\varphi = 0 \dots 2\pi)$$

# Šviesos sūkuriai

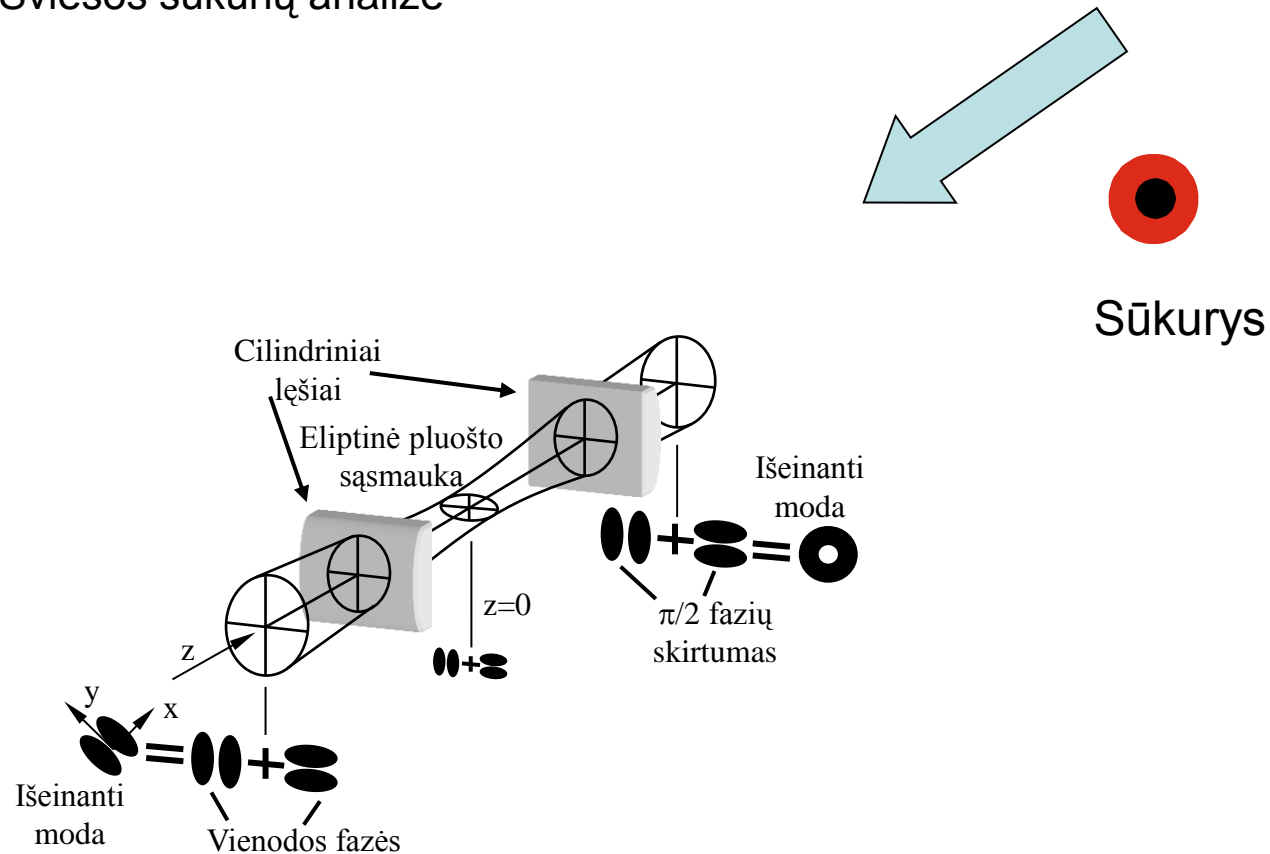
## A. Šviesos sūkuriai. Šviesos sūkurių analizė



Gauso pluošto ir šviesos sūkurių ( $m=3$ ) interferencijos intensyvumo skirstiniai. (a) ir (b) pav. pateikti kolinearos (abi bangos sklinda ta pačia kryptimi) interferencijos intensyvumo skirstiniai, o (c) ir (d) pav. pavaizduota ne kolinearos (tarp interferuojančių bangų sklidimo kryptių yra tam tikras kampas) interferencijos intensyvumo skirstiniai.

# Šviesos sūkuriai

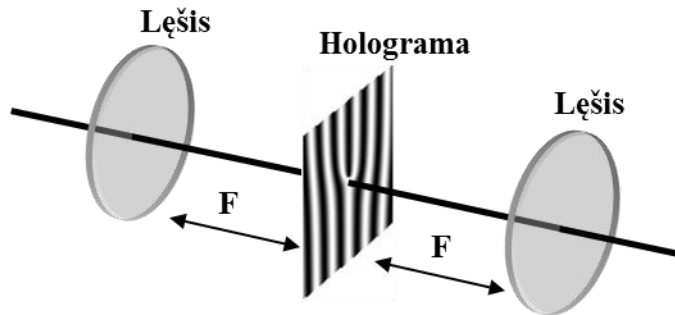
## A. Šviesos sūkuriai. Šviesos sūkurių analizė



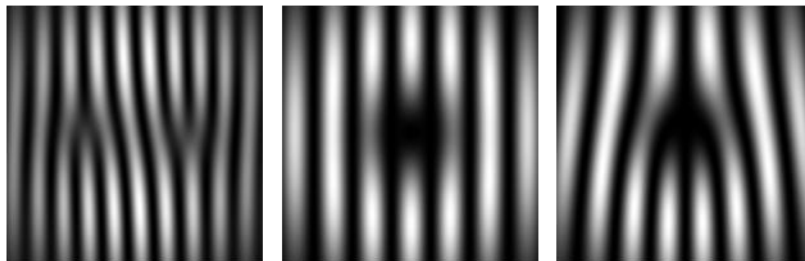
Cilindrinų lęšių konverteris Lagero ir Gauso ( $n=1$ ,  $l=0$ ) modos konvertavimui į atitinkamą Ermito ir Gauso ( $m=1$ ,  $p=0$ ) modą. Cilindriniai lęšiai, kurių židinių nuotoliai  $f$ , yra atskirti atstumu  $f/2^{1/2}$ . Įeinančio pluošto Reilio ilgis (sąsmaukos ilgis) yra lygus  $(1+1/2^{1/2})f$ .

# Šviesos sūkuriai

## A. Šviesos sūkuriai. Šviesos sūkurių analizė



Optinės Furjė transformacijos atpažinimo schema.

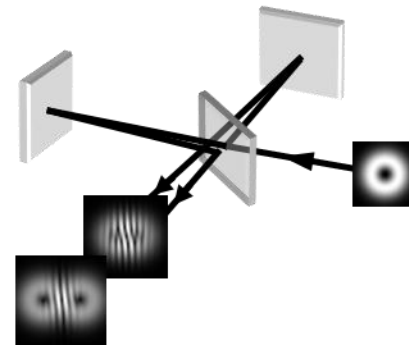


(a)

(b)

(c)

Vienetinio topologinio krūvio šviesos sūkuriu interferencijos Maikelsono interferometre intensyvumo skirstiniai



Šviesos sūkuriu interferencija Maikelsono interferometre

## Šviesos slėgis

Šviesos slėgis gali būti apskaičiuotas (statmenam kritimui ir kai nėra sklaidos) pagal išraišką:

$$p = \frac{I}{c}(1 - k + \rho),$$

čia  $I$  - šviesos intensyvumas ( $\text{W}/\text{m}^2$ ),  $c$  – šviesos greitis,  $k$  – pralaidumo koeficientas,  $\rho$  - atspindžio koeficientas.

Veidrodiniam paviršiui virš Žemės šis slėgis yra  $\sim 4,6 \times 10^{-6} \text{ N}/\text{m}^2$ .

Elektromagnetinės spinduliuotės slėgis yra tai kaip kiekvienas judantis objektas greičiu  $v$  ir turintis energiją taip pat turi judėjimo impulsą  $p = Ev/c^2$ .

Elektrodinamikoje elektromagnetinio lauko slėgis aprašomas elektromagnetinio lauko energijos-impulso tenzoriumi