ЦИКЛ НАУКОВИХ ПРАЦЬ В ГАЛУЗІ СИНГУЛЯРНОЇ ОПТИКИ

Ангельський О.В., Баженов В.Ю., Бекшаєв О.Я.,
Бліох К.Ю., Васнєцов М.В., Влох Р.О.,
Мохунь І.І., Скаб І.П.

Представлено Інститутом фізики НАН України

Подана на здобуття Державної премії України у галузі науки і техніки у 2020 р.

Авторський колектив

АНГЕЛЬСЬКИЙ Олег Вячеславович - професор, доктор фізико-математичних наук, директор Інституту фізико-технічних та комп'ютерних наук **Чернівецького національного університету імені Юрія Федьковича**

БАЖЕНОВ Володимир Юрійович - старший науковий співробітник, кандидат фізико-математичних наук, старший науковий співробітник відділу газової електроніки **Інституту фізики НАН України**

БЕКШАЄВ Олександр Янович - старший науковий співробітник, доктор фізико-математичних наук, завідувач лабораторії оптики та лазерної фізики Науково-дослідного Інституту фізики **Одеського національного університету імені І.І. Мечникова**

БЛІОХ Костянтин Юрійович - старший науковий співробітник, кандидат фізико-математичних наук, Теоретична лабораторія квантової фізики, **кластер RIKEN для передових досліджень, Вакоши, Сайтама 351-0198, Японія**

ВАСНЄЦОВ Михайло Вікторович - професор, доктор фізико-математичних наук, провідний науковий співробітник відділу оптичної квантової електроніки **Інституту фізики НАН України**

ВЛОХ Ростислав Орестович - професор, доктор фізико-математичних наук, директор **Інституту фізичної оптики імені О.Г. Влоха МОН України**

МОХУНЬ Ігор Іванович - професор, доктор фізико-математичних наук, професор кафедри кореляційної оптики **Чернівецького національного університету імені Юрія Федьковича**

СКАБ Ігор Петрович - старший науковий співробітник, доктор фізико-математичних наук, заступник директора **Інституту фізичної оптики імені О.Г. Влоха МОН України**

Загальна характеристика роботи

Цикл досліджень, започаткований у 1989 році, включає в себе перші лабораторні виявлення оптичних вихорів та розробку методики виготовлення синтезованих граток-голограм для утворення регулярних пучків з оптичними вихорами. Досліджено оптичні вихори з нецілим значенням топологічного заряду. В нелінійних середовищах виявлено динамічний процес утворення та анігіляції оптичних вихорів, що започаткувало нелінійну сингулярну оптику.

Виявлено, що у перерахунку "на фотон" орбітальний кутовий момент становить ціле число у одиницях константи Планка. Продемонстровано існування обертального ефекту Доплера для вихрової моди. Здійснено кодування інформації методом орбітального кутового моменту. Вперше виявлено порушення закону збереження топологічного заряду та отримане співвідношення нецілого топологічного заряду.

Виявлено механізми і основні закономірності виникнення та взаємодії топологічних дефектів оптичних характеристик неоднорідно збурених твердотільних середовищ. Продемонстрована можливість генерації оптичних вихорів за допомогою ефектів параметричної кристалооптики під дією неоднорідних полів та при акустооптичній взаємодії.

Розвинуто фундаментальні концепції, що стосуються глибинних зв’язків між внутрішньою структурою хвильових полів та їх глобальною еволюцією. Розроблено загальну теорію спін-орбітальних перетворень світлового поля, встановлено тісні взаємозв'язки геометричних та динамічних параметрів полів і розкрито подвійну геометро-динамічну природу спін-орбітальних явищ. Розглянуті питання генерації оптичних сингулярностей різного типу, у т.ч. поліхроматичних полях.

Всі зазначені результати отримано вперше, і в сукупності утворюють цілісну концепцію, яка розкриває фізичні і прикладні аспекти топологічних властивостей і сингулярностей світлових полів. Авторами створено новий розділ фізичної оптики, а запропонований термін "сингулярна оптика" увійшов у базу ключових слів та рубрикаторів наукових видань.

Кількість публікацій: *275, в т.ч. 4 монографії (2 - видані за кордоном), 11 розділів монографій (видані за кордоном), 259 статей (239 – у англомовних журналах з імпакт-фактором). Отримано 1 патент України на винахід.*

Загальна кількість посилань на публікації авторів/h-індекс роботи, згідно баз даних складає відповідно:

Web of Science – ***10063 / 51****, Scopus –* ***10699 / 53****, Google Shcolar –* ***14332 / 57****.*

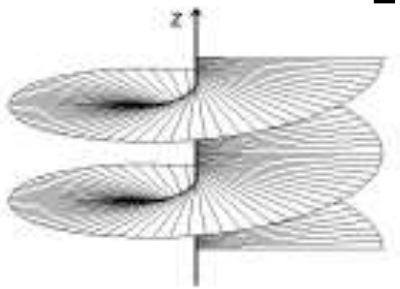
За цією тематикою захищено ***5 докторських*** *та* ***24 кандидатських дисертацій****.*

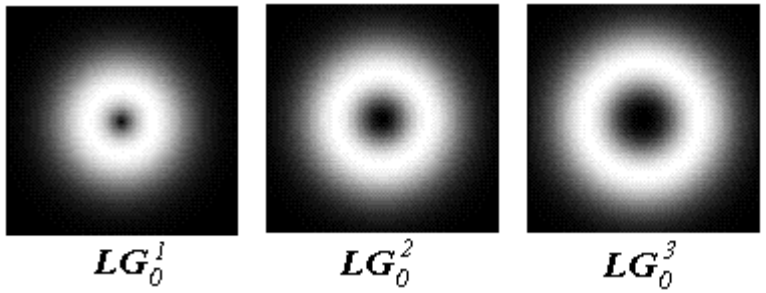
Явище дислокацій хвильових фронтів. Сингулярна оптика

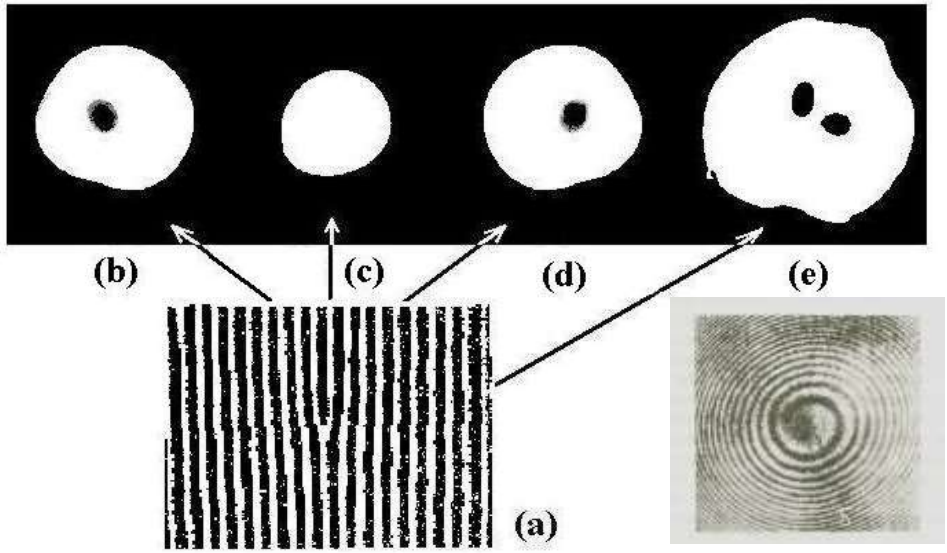
Оптичні вихори, як пучки з хвильовим фронтом у вигляді гелікоїда, були отримані вперше в Інституті фізики НАН України за допомогою синтезованої дифракційної гратки у 1989 р.

Фаза та вигляд мод Лагерра-Гаусса з гелікоїдальним хвильовим фронтом:

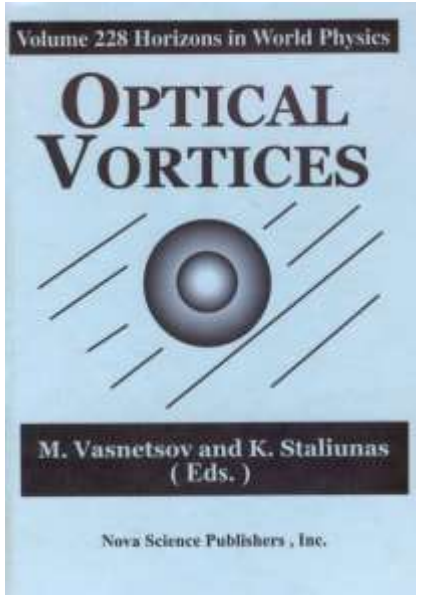
$$\Phi(\rho,\varphi,z) = kz + \frac{k\rho^2}{2R(z)} + l\varphi - (|l|+1)\arctan\left(\frac{z}{z_R}\right)$$

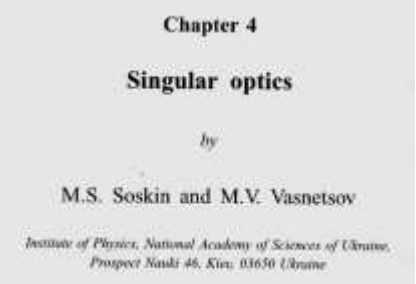






Перша гратка з розгалуженою смугою, перші пучки з оптичними вихорами, перша монографія з сингулярної оптики (2000), перша реалізація оптичного зв'язку на принципі кодування орбітального кутового моменту фотона (2004).




Chapter 4

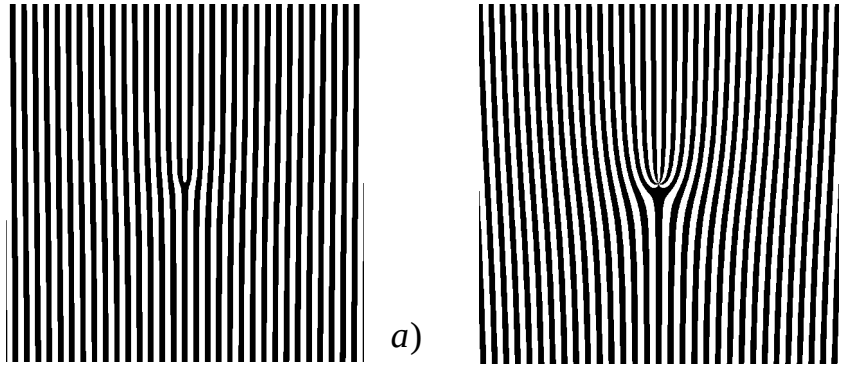
Singular optics

by

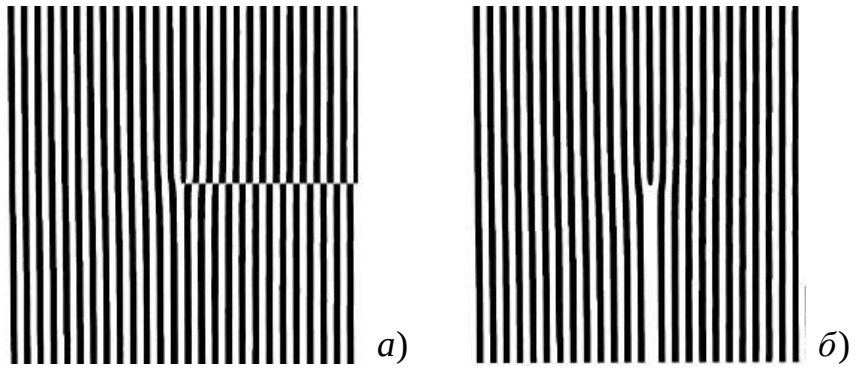
M.S. Soskin and M.V. Vasnetsov

Institute of Physics, National Academy of Sciences of Ukraine, Prospect Nauki 46, Kiev, 03650 Ukraine

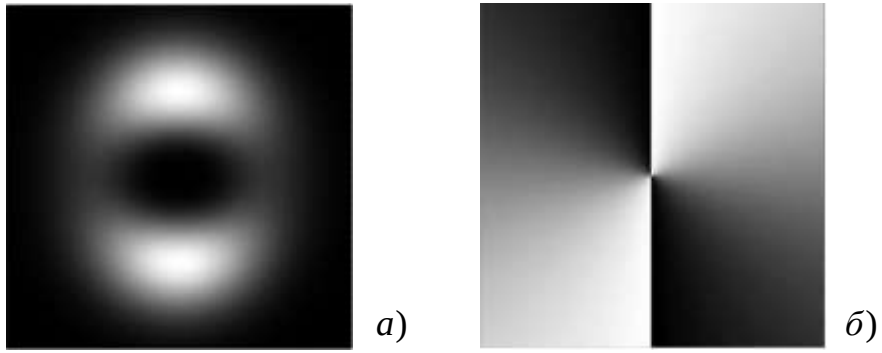
Від синтезованої гратки до орбітального кутового моменту фотона



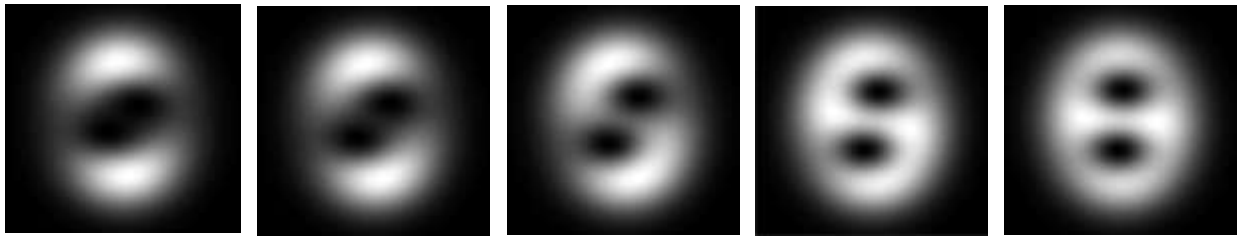
Зразки шаблонів для виготовлення граток на фотоплівці: (а) для ОВ заряду 1, (б) заряду 5.



Шаблони для утворення ОВ заряду ½.



Розподіли інтенсивності (а) та фази (б) у площині перетяжки пучка, що несе анізотропний вихор з топологічним зарядом 1(коефіцієнт анізотропії 1,5).



Розраховане обертання пари ОВ при розповсюдженні пучка.

Розрахунок зміни у перерізі пучка при розповсюдженні показав, що відбувається загальне обертання, у напрямку, що визначається знаком заряду ОВ. Цей ефект приводить до важливого висновку існування моменту імпульсу.

“Оптичний вихор” володіє орбітальним кутовим моментом, який у перерахунку “на фотон” становить *mħ*, де *ħ* - стала Планка; *m* – заряд вихору.

Квантування орбітального кутового моменту

Встановлення квантування орбітального кутового моменту фотона дозволило використати цю властивість для кодування та передачі інформації, в т.ч. у вільному просторі.

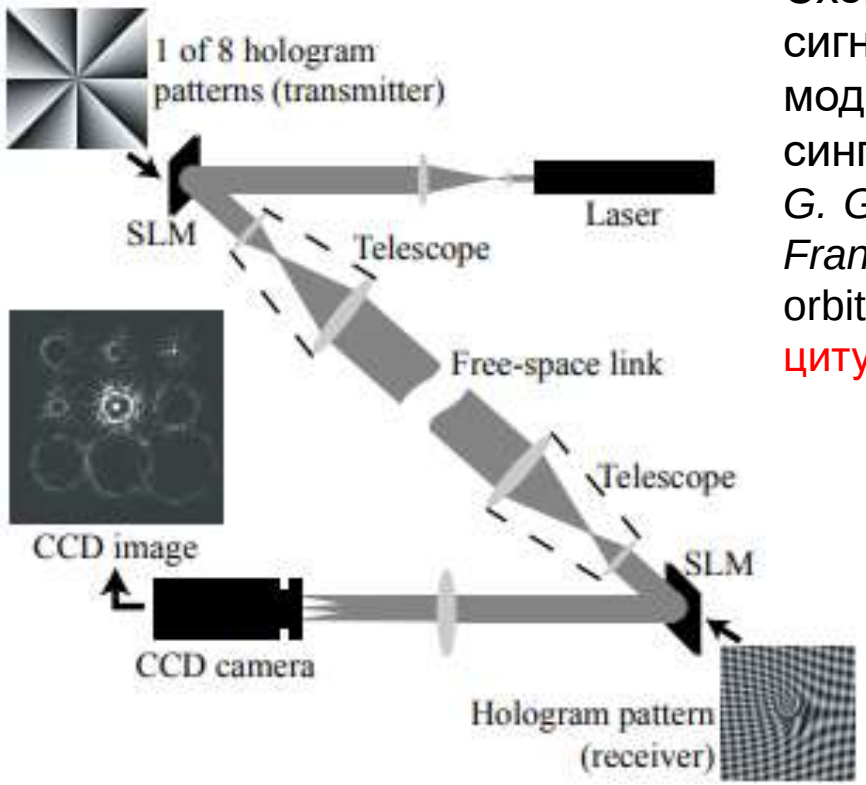
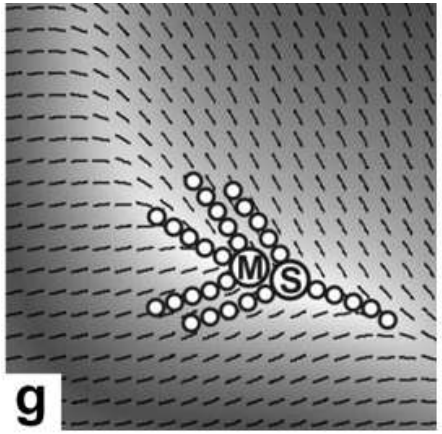


Схема кодування, передачі у вільному просторі та декодування сигналу оптичного пучка з ОКМ. Лазер освітлює SLM (просторовий модулятор світла), який при відбиванні створює потрібний сингулярний пучок.

G. Gibson, J. Courtial, M. Padgett, M. Vasnetsov, V. Pas'ko, S. Barnett, S. Franke-Arnold, Free-space information transfer using light beams carrying orbital angular momentum, Optics Express 12, 5448 (2004). (близько 2000 цитувань)

Поляризаційна сингулярна оптика – вперше пояснила розподіл особливих точок у випадково-поляризованих оптичних полях *"A Monstar portrait in the interior", Journal of Optics (2016)*.



За 30 років роботи був створений новий самостійний розділ сучасної фізичної оптики, а запропонований термін „сингулярна оптика" на сьогоднішній день увійшов у базу ключових слів та рубрикаторів наукових видань.

Сингулярна параметрична кристалооптика

- Вперше виявлені механізми і встановлені основні закономірності виникнення та взаємодії топологічних дефектів (ТД) оптичних характеристик неоднорідно збурених твердотільних середовищ, що приводять до формувань поляризаційних сингулярностей оптичного поля, дислокацій хвильового фронту і оптичних вихорів (ОВ).
- Розроблено нові методи формування сингулярних пучків, що переносять ОВ за допомогою ефектів параметричної кристалооптики в монокристалах під дією неоднорідних механічних і електричних полів та при акустооптичній і акустогіраційній взаємодіях.
- Виявлена можливість керування ефективністю спін-орбітального (СКМ-ОКМ) перетворення зовнішніми полями і можливість просторового керування положенням вихрового пучка при акустооптичній взаємодії.

Сингулярності векторного поля при неоднорідних механічних напруженнях

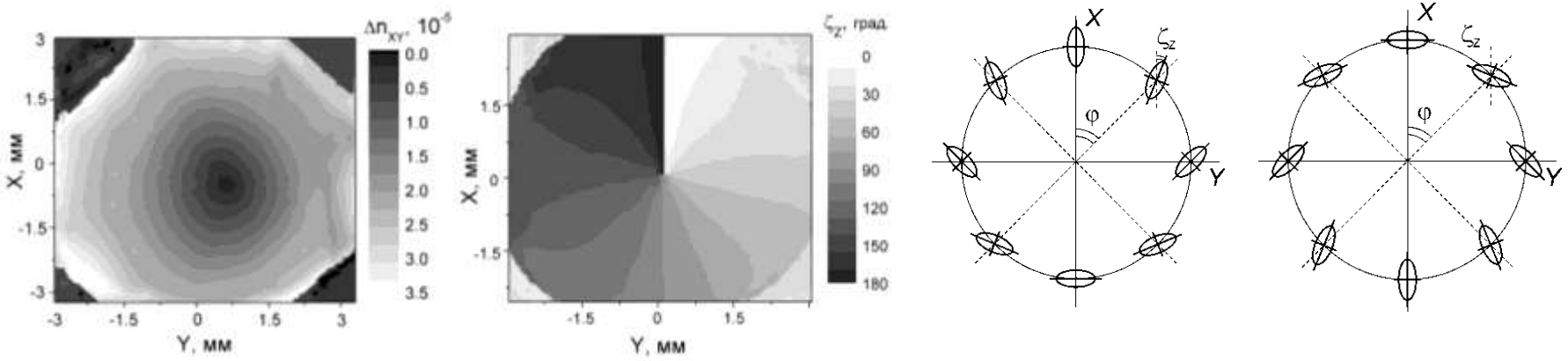
Скручування кристалічного стержня, наприклад навколо осі Z (кристал $LiNbO_3$), індукує неоднорідні розподіли:

1) механічних напружень $\sigma_4 = \dfrac{2M_z}{\pi R^4} X$ та $\sigma_5 = \dfrac{2M_z}{\pi R^4} Y$

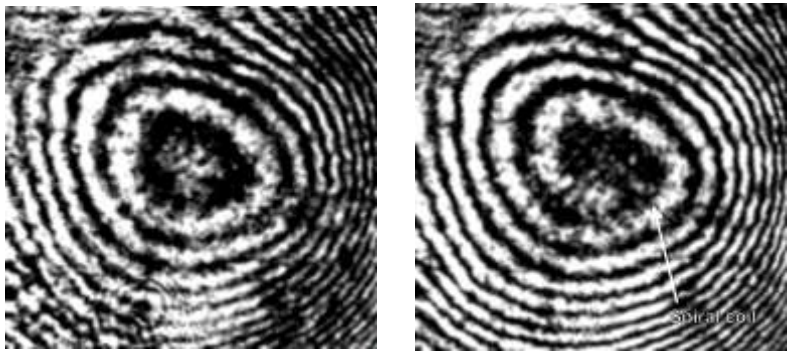
2) двопроменезаломлення $\Delta n = n_0^3 \pi_{14} \sqrt{\sigma(Y)_5^2 + \sigma(X)_4^2} = n_0^3 \pi_{14} \dfrac{2M_z}{\pi R^4} \sqrt{Y^2 + X^2}$

3) орієнтації оптичної індикатриси $\tan 2\zeta_z = \dfrac{\sigma_5}{\sigma_4} = \dfrac{Y}{X} = \tan\varphi$ або $\zeta_z = \varphi / 2$

Сингулярності векторного поля при неоднорідних механічних напруженнях



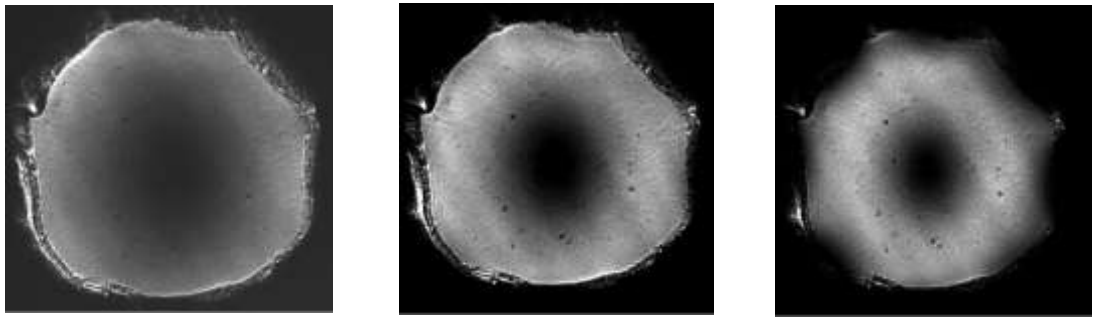
Експериментальні розподіли двопроменезаломлення і кута повороту оптичної індикатриси індукованих крученням M_Z=63.77×10^{-3} Н×м та змодельовані картини орієнтації оптичної індикатриси для двох протилежних напрямків моменту кручення в кристалах $LiNbO_3$ (площина XY).



а) M_Z=0 *б*) M_Z=0.098 Н×м

Інтерференція сферичних хвиль (а) та сферичної і вихрової хвиль (б). Кристали $LiNbO_3$ без (а) і з прикладеним моментом кручення (б).

Керування ефективністю СКМ-ОКМ перетворення за допомогою зміни моменту кручення



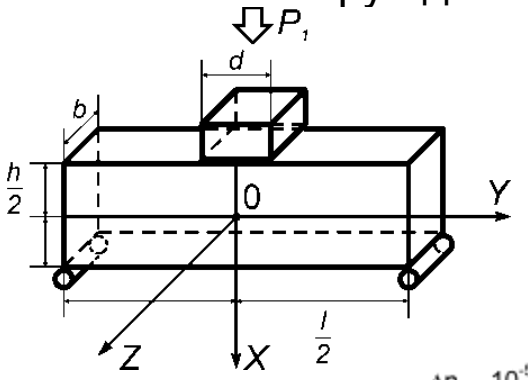
M_Z=0.064 Н×м M_Z=0.098 Н×м M_Z=0.162 Н×м

Розподіли інтенсивності в оптичному вихорі одиничного заряду при різних значеннях моменту кручення, прикладеного до кристалу $LiNbO_3$.

Сингулярності векторного поля при неоднорідних механічних напруженнях

Поперечний згин кристалічного (скляного) бруска формує 2D неоднорідно напружений стан середовища, який внаслідок п'єзооптичного ефекту приводить до азимутального розподілу орієнтації оптичної індикатриси та конічного розподілу оптичного двопроменезаломлення, з нульовим значенням у вершині конуса, і, як наслідок, до можливості виникнення поляризаційної сингулярності та генерації оптичного вихору одиничного заряду.

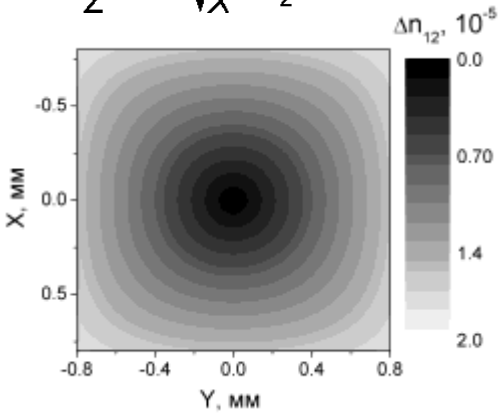
За певного розміру зразка та способу прикладання поперечного згину виникає поляризаційна сингулярність з силою дефекту ½

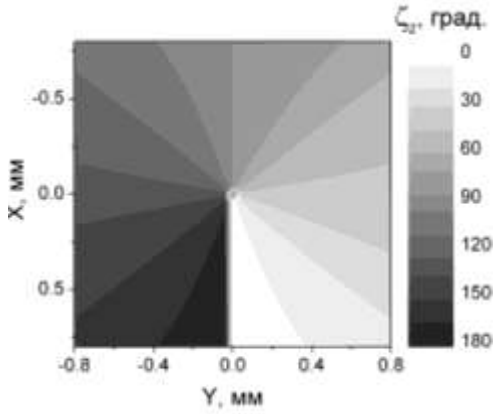


$$при \quad d = l - \sqrt{l^2 - 2h^2}:$$

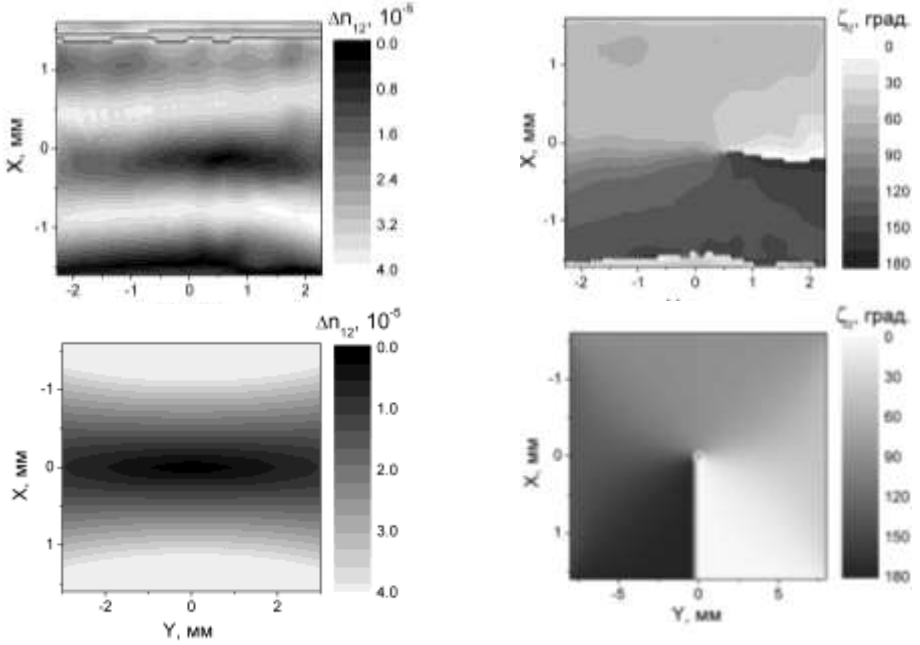
$$\Delta n_{12} = -\frac{3n_o^3 P_1 l}{2bh^3}\pi_{66}\sqrt{X^2+Y^2}$$

$$\tan 2\zeta_Z = \tan\varphi \quad або \quad \zeta_Z = \varphi/2$$





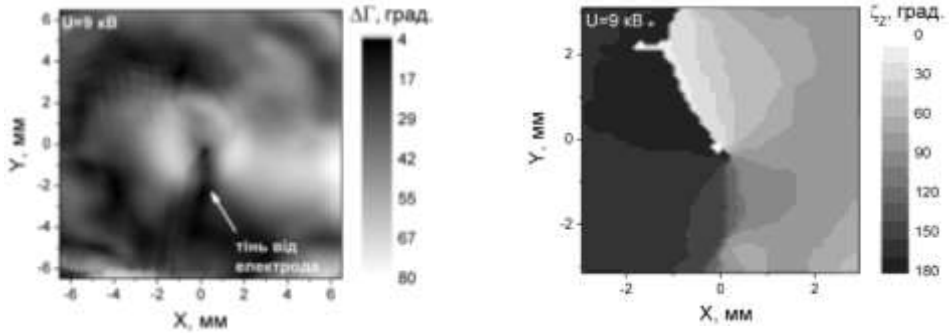
Розподіли індукованого двопроменезаломлення та кута повороту оптичної індикатриси в кристалі $LiNbO_3$ при поперечному згині.



Експериментальні (а, б) та розраховані (в, г) розподіли Δn_{12} (а, в) та ζ_Z для кристалу $LiNbO_3$, зігнутого навантаженням, розподіленим по всій верхній поверхні кристалічного зразка.

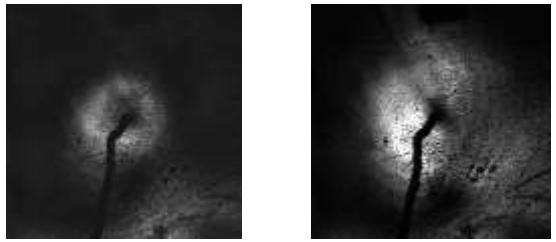
Сингулярності векторного поля, індуковані неоднорідними електричними полями

Електричне поле конічної конфігурації в ацентричних кристалах (груп симетрії, які містять осі симетрії третього порядку або інверсійні осі шостого порядку) внаслідок електрооптичного ефекту Покельса може приводити до утворення ТД орієнтації оптичної індикатриси, конусоподібного розподілу індукованого двопроменезаломлення з нульовим значенням у вершині конуса – утворення сингулярної точки та генерації оптичного вихору одиничного заряду.



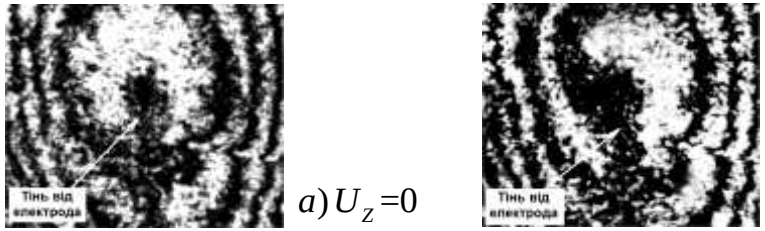
Розподіли індукованих різниці фаз та кута повороту оптичної індикатриси в кристалі $LiNbO_3$ (U=9 кВ).

Керування ефективністю СКМ-ОКМ перетворення зміною прикладеної напруги



Розподіли інтенсивності в оптичному вихорі одиничного заряду при різних значеннях електричної напруги, прикладеної до кристалу $Bi_{12}GeO_{20}$ (а – 6 кВ, б – 9 кВ).

$$\tan 2\zeta_Z = E_X / E_Y = \cot\varphi \quad або \quad \zeta_Z = \pi/4 - \varphi/2$$



а) U_Z=0 *б)* U_Z=6 кВ

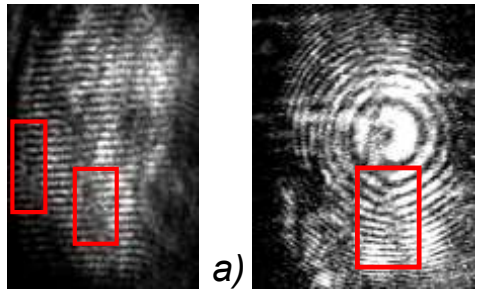
Інтерференція сферичних хвиль (а) та сферичної і вихрової хвиль (б). Кристали $Bi_{12}GeO_{20}$ без (а) і з прикладеним електричним полем (б).

Вихори подвійного заряду можуть індукуватись за допомогою ефекту Керра в кристалах, текстурах і ізотропних середовищах, які належать до груп симетрії 622, 6mm, 6/mmm, 6, 6/m, ∞/m, ∞, ∞2, ∞mm, ∞/mmm, ∞/∞/mmm і ∞/2.

$$\tan 2\zeta_Z = \frac{2E_1E_2}{E_1^2 - E_2^2} = \tan 2\varphi \quad або \quad \zeta_Z = \varphi$$

Спін-орбітальне перетворення при акустооптичній та акустогіраційній взаємодіях

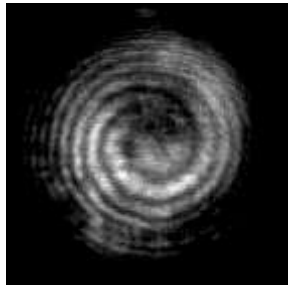
Експериментально виявлено виникнення оптичних вихорів з дробовими зарядами в процесі **акустооптичної дифракція** Брегга (мережі ОВ у широкому дифрагованому пучку внаслідок відбивання від товстої АО гратки, що містить розщеплені та зміщені (вилкоподібні) смуги).



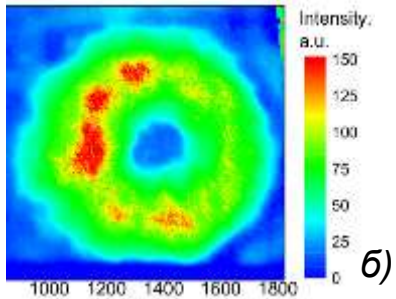
а) б)

Інтерференція пучка, що переносить ОВ з опорним пучком з плоским (а) і сферичним (б) хвильовими фронтами.

При АО дифракції Брегга зберігаються профіль інтенсивності і фазова структура оптичного вихора.



а)



б)

Спіральна інтерференційна картина, при інтерференції АО дифрагованого сферичного гауссівського пучка і вихрового пучка (а); розподіл інтен-сивності в АО дифрагованому вихровому пучку (б).

Просторове керування положенням вихрового пучка при АО взаємодії може бути використане для оптичного захоплення та маніпулювання мікрочастинками та контрольованої адресації світлових пучків з різним орбітальним моментом імпульсу.

а)

б)

в)

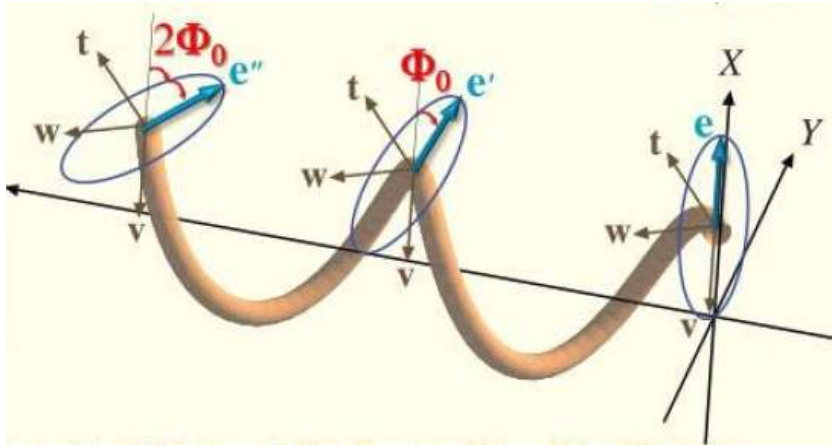
г)

АО дифракція Брегга подвійно зарядженого оптичного вихора на двох акустичних хвилях, що збуджувались в АО дефлекторі з кристалу TeO_2: а) з частотами 85 та 95 МГц; б) 91 і 95 МГц, в) 92 і 95 МГц, г) 95 і 95 МГц.

При колінеарній **акустогіраційній взаємодії** між поздовжньою акустичною хвилею та циркулярно поляризованою плоскою оптичною хвилею, що поширюються вздовж оптичної осі в оптично одновісних гіротропних кристалах, дифраговане оптичне випромінювання матиме протилежну циркулярну поляризацію та переносити ОВ подвійного заряду.

Спінові, вихрові, геометричні і топологічні явища у хвильовій фізиці

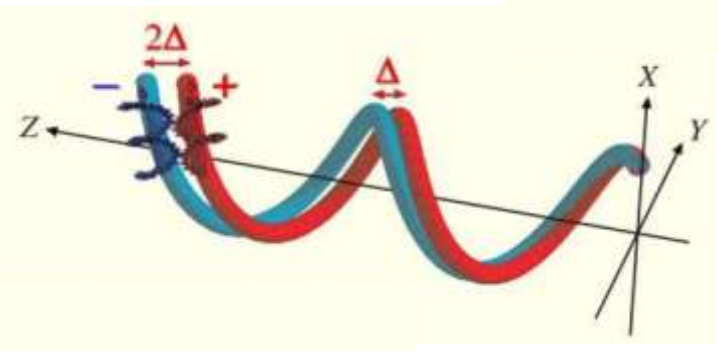
- Розвинуто фундаментальні теоретичні концепції, що стосуються глибинних зв’язків між внутрішньою структурою хвильових полів та їх глобальною еволюцією.
- На цій основі виконано масштабні дослідження взаємодії зовнішніх і внутрішніх ступенів вільності електромагнітних полів, побудовано відповідний математичний апарат і виявлено фундаментальні зв’язки з загальною теорією фізичних полів та з квантовими аспектами неголономності (калібрувальні поля, топологічна фаза тощо).
- Розроблено загальну теорію спін-орбітальних перетворень світлового поля, встановлено тісні взаємозв'язки геометричних та динамічних параметрів полів і розкрито подвійну геометро-динамічну природу та фізичні механізми спін-орбітальних явищ.



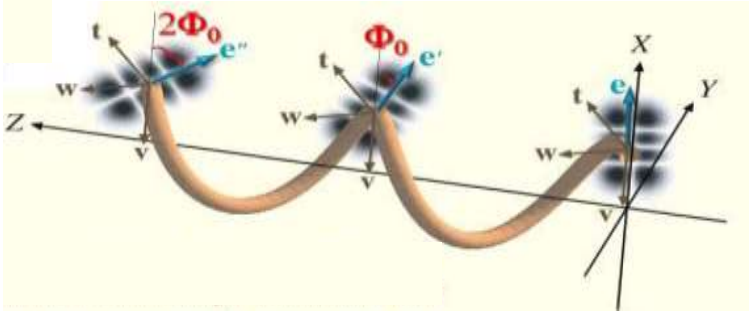
Обертання площини поляризації світлового пучка з складною 3D траєкторією. Лагранжіан поля включає член $\mathbf{L}_{\mathrm{SOI}}$ з калібрувальним потенціалом Беррі A, $\mathbf{L}_{\mathrm{SOI}} = \sigma \mathbf{A} \cdot \dot{\mathbf{k}} = \mathbf{S} \cdot \mathbf{\Omega}$, відповідальним за спін-орбітальну взаємодію (σ – спіральність пучка, $\mathbf{k}$ – хвильовий вектор, $\mathbf{S}$ – вектор спіну, $\mathbf{\Omega}$ – кутова швидкість обертання траєкторії).

Топологічна фаза $\Phi = \int \mathbf{L}_{\mathrm{SOI}} d\tau$ (змінна інтегрування та диференціювання – довжина траєкторії τ) .

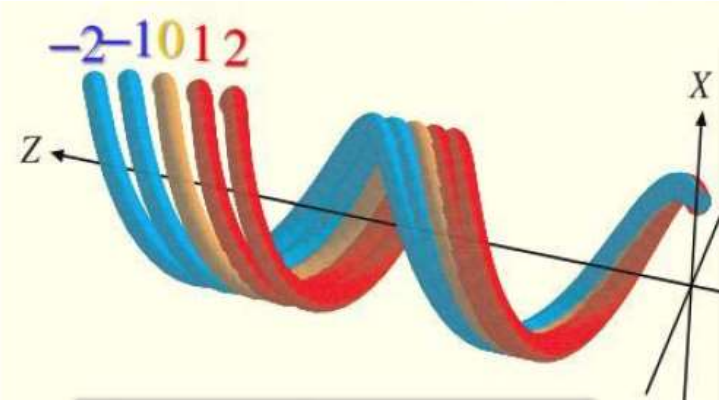
Спінові, вихрові, геометричні і топологічні явища у хвильовій фізиці



Поляризаційно-залежний зсув траєкторії: променеві рівняння $\dot{\mathbf{k}}_c = k\nabla \ln n,\ \dot{\mathbf{r}}_c = \mathbf{t} - \sigma \mathbf{F} \times \dot{\mathbf{k}}$ містять члени, подібні силі Коріоліса.



Взаємодія внутрішніх і зовнішніх орбітальних ступенів вільності: обертання поперечного профілю після відновлення параметрів траєкторії. Лагранжіан $\mathbf{L}_{\mathrm{OOI}} = \ell \mathbf{A} \cdot \dot{\mathbf{k}} = \mathbf{L}_{\mathrm{int}} \cdot \mathbf{\Omega}$, ℓ - топологічний заряд вихора, $\mathbf{L}_{\mathrm{int}}$ – внутрішній ОКМ пучка (див. слайд 17).



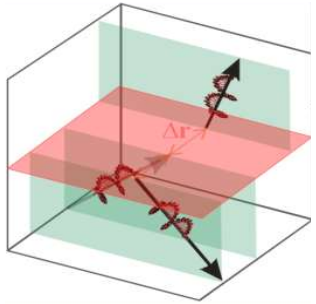
Поперечний зсув траєкторії вихрового пучка, залежний від топологічного заряду. Ефективна спіральність виражається сумою $\sigma + \ell$.

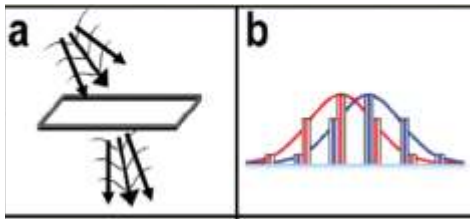
Схожі ефекти в електронних пучках описуються аналогічно через додатковий член у лагранжіані:

$$\hat{\mathbf{A}} = \frac{\hat{\mathbf{S}} \times \mathbf{p}}{2p^2}\left(1 - \frac{m}{E}\right),\ \hat{\mathbf{L}}_{\mathrm{SOI}} = \hat{\mathbf{A}} \cdot \dot{\mathbf{p}}$$

Спінові, вихрові, геометричні і топологічні явища у хвильовій фізиці

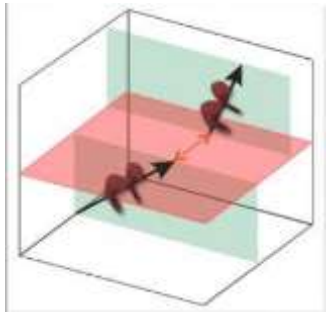
Ті ж принципи діють при інших перетвореннях світлових полів, наприклад:

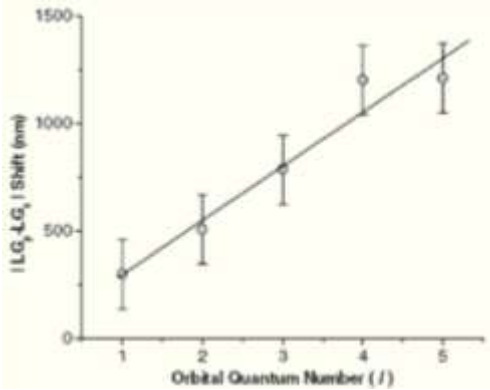




Заломлення та відбиття: поперечний зсув пучка, **залежний від циркулярної поляризації**.

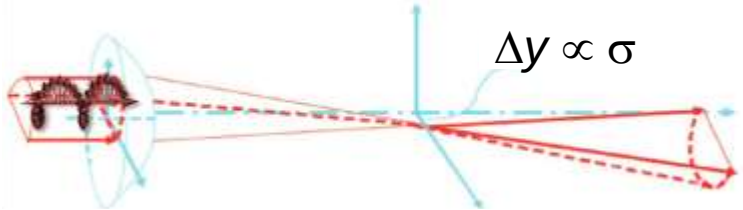
Навіть цілком симетричний циркулярно поляризований пучок (наприклад, гауссівський) має асиметрію в розподілі складових кутового спектру (спектру плоских хвиль). Різниця коефіцієнтів заломлення (відбиття) окремих складових призводить до трансформації профілю пучка в цілому.





Заломлення та відбиття: поперечний зсув, **залежний від сингулярної будови** пучка.

Величина зсуву пропорційна топологічному заряду оптичного вихора. В обох ситуаціях внутрішній кутовий момент пучка частково перетворюється у зовнішній та навпаки. При цьому сумарний кутовий момент пучка зберігається.



Фокусування несиметричного пучка: положення центру фокальної плями залежить від циркулярної поляризації та сингулярної структури.

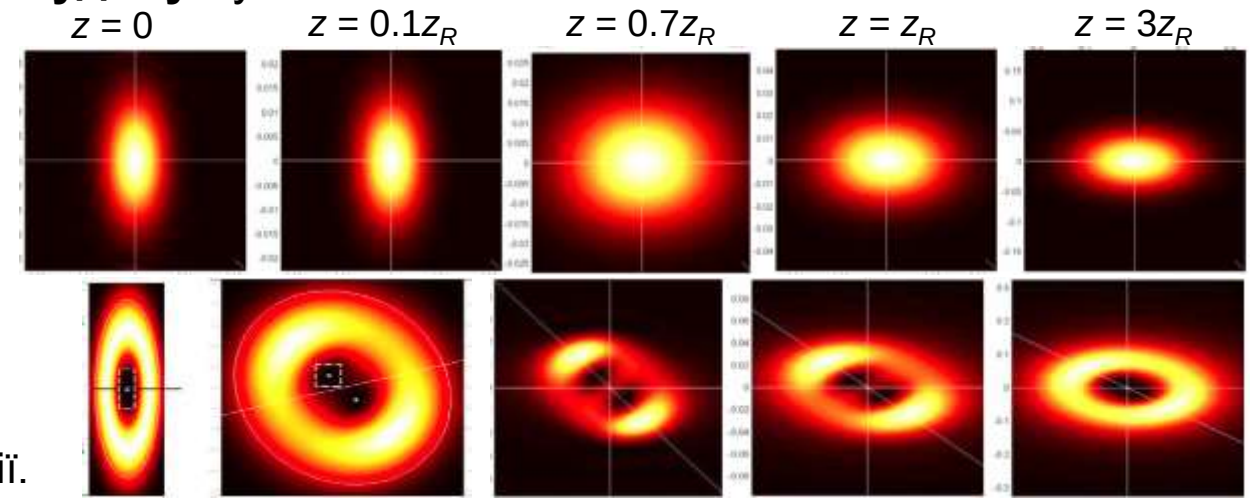
В усіх випадках існує “прихована” асиметрія поздовжньої компоненти поля падаючого пучка, яка частково “проникає” у поперечні компоненти (при відбитті/заломленні) або підсилюється (при фокусуванні).

Спінові, вихрові, геометричні і топологічні явища у хвильовій фізиці

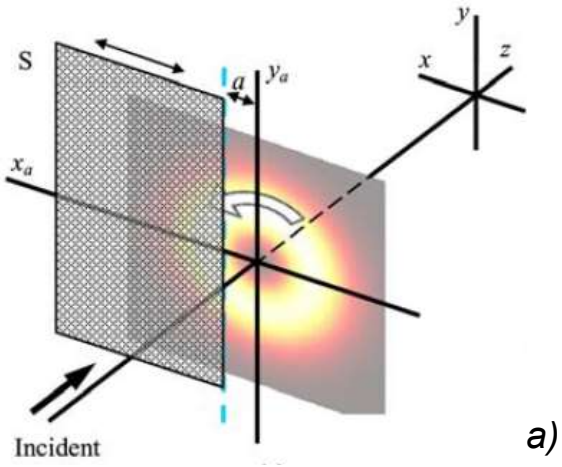
Внутрішні рухи впливають на поширення, перетворення та дифракцію сингулярного пучка в оптичних системах (оптичні ефекти Холла, Магнуса).
З іншого боку, такі перетворення дають можливість **візуалізації внутрішніх рухів** і наочно **демонструють складну внутрішню будову** пучка.

Трансформація звичайного асиметричного гауссового пучка (z_R – довжина Релея): при поширенні пучок по-різному «розтягується» в різних напрямах.

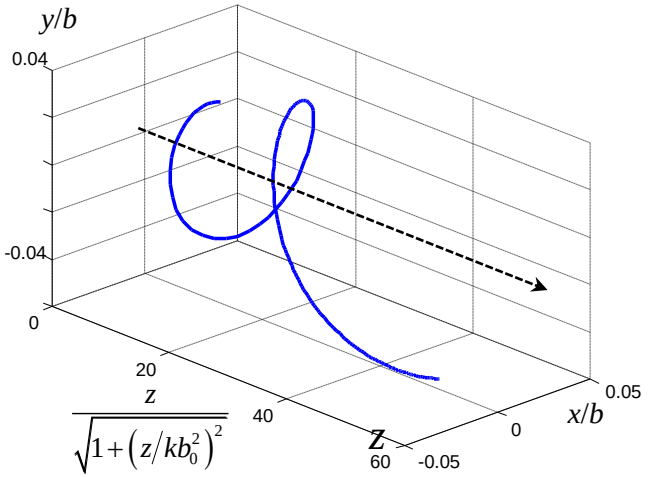
Трансформація вихрового пучка з топологічним зарядом 2: багатозарядний ОВ розпадається на декілька однозарядних, пучок у цілому повертається в напрямі циркуляції енергії.



Дифракція ОВ пучка: сингулярна точка зсувається з осі, багатозарядний ОВ розпадається на декілька однозарядних, які поширюються вздовж спіралевидних траєкторій, закручених прротилежно напряму циркуляції енергії.



а)



б)

Топологічні властивості, сингулярності та динамічні характеристики структурованих світлових полів

- Встановлено і обґрунтовано виняткову роль динамічних характеристик (ДХ) як засобів опису і змістовної характерізації структурованих і сингулярних світлових полів.
- Розроблена повна узгоджена система ДХ, на основі якої сформована цілісна концепція, що розкриває фізичні і прикладні аспекти топологічних властивостей і сингулярностей структурованих світлових полів.
- Виявлено фізичні принципи та механізми взаємодії внутрішніх (поляризаційних) і зовнішніх ступенів вільності світла, їх проявів при поширенні, заломленні, фокусуванні, дифракції сингулярних світлових полів. Запропоновано концепцію візуалізації вихрової природи сингулярних полів при перетвореннях, що порушують їх симетрію.

Динамічні характеристики електромагнітних полів

Монохроматичне поле: електричний і магнітний вектори

$$\mathcal{E}(\mathbf{r},t)=\mathrm{Re}\left[\mathbf{E}(\mathbf{r})\exp(-i\omega t)\right],\qquad \mathcal{H}(\mathbf{r},t)=\mathrm{Re}\left[\mathbf{H}(\mathbf{r})\exp(-i\omega t)\right]$$

1. Густина енергії $W=W^e+W^m=\dfrac{1}{16\pi}\left(\varepsilon|\mathbf{E}|^2+\mu|\mathbf{H}|^2\right),$

2. Густина потоку енергії **S** пропорційна кінетичному імпульсу Абрагама, **S** = $c^2\mathbf{P}^A$: $\mathbf{P}^A=\dfrac{1}{8\pi c}\mathrm{Re}\left(\mathbf{E}^*\times\mathbf{H}\right)$

3. Густина кінетичного імпульсу (Мінковського) $\mathbf{P}=\dfrac{\varepsilon\mu}{8\pi c}\mathrm{Re}\left(\mathbf{E}^*\times\mathbf{H}\right)=\mathbf{P}_O+\mathbf{P}_S$

Динамічні характеристики електромагнітних полів

4. Канонічна (спін-орбітальна) декомпозиція кінетичного імпульсу:

$$\mathbf{P}_O = \frac{1}{16\omega}\mathrm{Im}\left[\varepsilon\mathbf{E}^*\cdot(\nabla)\mathbf{E} + \mu\mathbf{H}^*\cdot(\nabla)\mathbf{H}\right], \qquad \mathbf{P}_S = \frac{1}{2}\nabla\times\mathbf{S}$$

5. Густина спінового кутового моменту (СКМ, спіну) $\mathbf{S} = \frac{1}{16\pi\omega}\mathrm{Im}\left(\varepsilon\mathbf{E}^*\times\mathbf{E} + \mu\mathbf{H}^*\times\mathbf{H}\right)$

6. Орбітальний момент імпульсу (ОКМ) відносно лабораторної точки відліку $\mathbf{L} = \mathbf{r}\times\mathbf{P}_O$

7. ОКМ відносно енергетичного центру поля (внутрішній) $\mathbf{L}_{\mathrm{int}} = (\mathbf{r}-\mathbf{r}_C)\times\mathbf{P}_O$; ОКМ зовнішній $\mathbf{L}_{\mathrm{ext}} = \mathbf{r}_C\times\mathbf{P}_O$

8. Реактивний імпульс $\Pi = \frac{1}{8\pi c}\mathrm{Im}\left(\mathbf{E}^*\times\mathbf{H}\right)$

Орбітальний (канонічний) імпульс $\mathbf{P}_O$ і зовнішній ОКМ $\mathbf{L}_{\mathrm{ext}}$ відображають роль **просторових зовнішніх ступенів вільності**, спіновий імпульс $\mathbf{P}_S$ і СКМ $\mathbf{S}$ відображають роль **поляризаційних ступенів вільності**, внутрішній ОКМ $\mathbf{L}_{\mathrm{ext}}$ описує роль **внутрішніх потоків енергії** у сингулярному оптичному полі.

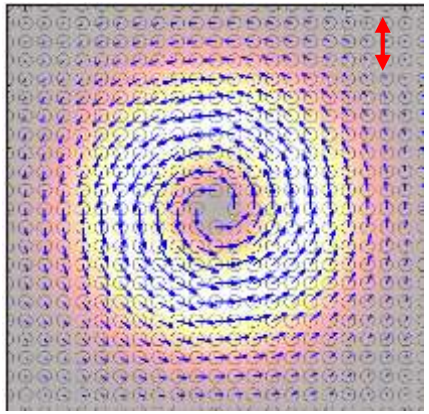
Механічна дія на частинку з поляризовністю α_e, α_m:

(1) Світловий тиск визначається орбітальним імпульсом: $\mathbf{F}_{pres} \propto \frac{1}{\varepsilon}\mathrm{Im}(\alpha)\mathbf{P}_O$

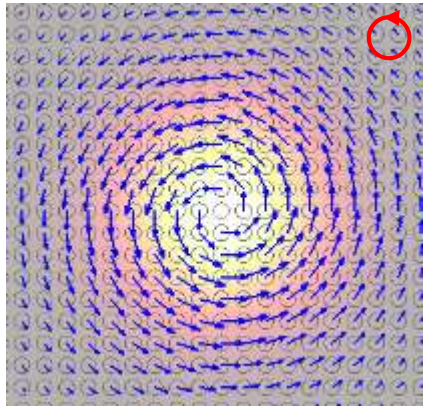
(2) Крутний момент визначається спіном: $\mathbf{T} \propto \frac{1}{\varepsilon}\left(\mathrm{Im}\,\alpha - \frac{2k^3}{3\varepsilon}|\alpha|^2\right)\mathbf{S}$

(3) Екстраординарні (аномальні) сили: $-\frac{1}{3}\frac{k^3}{\varepsilon\mu}\mathrm{Re}\left(\alpha_e^*\alpha_m\right)\left(\mathbf{P}_S + \mathbf{P}_O\right) - \frac{1}{3}k^3\,\mathrm{Im}\left(\alpha_e^*\alpha_m\right)\Pi$

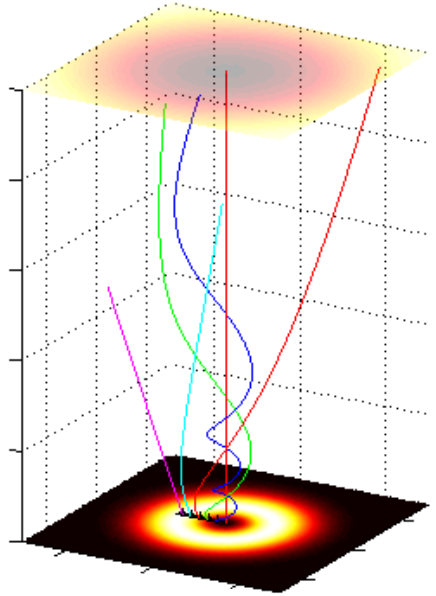
Просторові картини імпульсу і потоків енергії в сингулярних полях



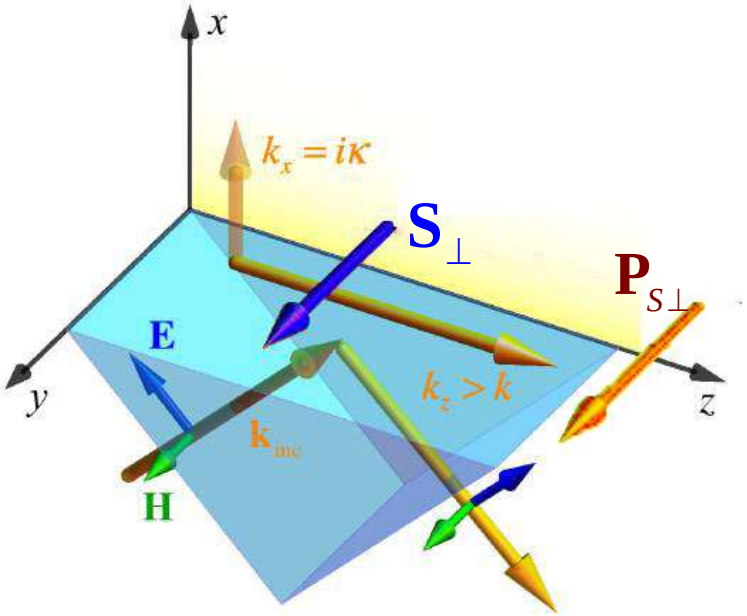
Орбітальний імпульс ($\mathbf{P}_O$) у вихровому пучку

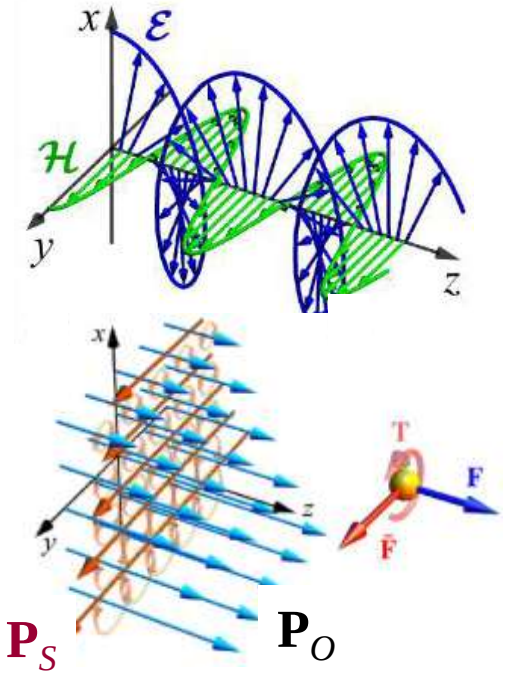


Спіновий імпульс ($\mathbf{P}_S$) у циркулярно-поляризованому полі



Поширення енергії в оптичному вихорі





Екстраординарні поперечні спін $\mathbf{S}$ та імпульс $\mathbf{P}_S$ в еванесцентній хвилі: підтверджено в експериментах з чутливістю 10^{-15} Н

Динамічні характеристики у неоднорідних і дисперсійних середовищах

Діелектрична і магнітна проникності залежать від частоти.
Вирази динамічних характеристик “дисперсійно-модифіковані”.

Формула для енергії відома (Л. Бріллюен, 1921): $\tilde{W} = \frac{1}{16\pi}\left(\tilde{\varepsilon}|\mathbf{E}|^2 + \tilde{\mu}|\mathbf{H}|^2\right)$, $\begin{pmatrix}\tilde{\varepsilon}\\ \tilde{\mu}\end{pmatrix} = \frac{d}{d\omega}\begin{pmatrix}\omega\varepsilon\\ \omega\mu\end{pmatrix}$

Нові результати для складових імпульсу і кутового моменту:

Канонічний (орбітальний)імпульс: $\tilde{\mathbf{P}}_O = \frac{1}{16\omega}\mathrm{Im}\left[\tilde{\varepsilon}\mathbf{E}^* \cdot (\nabla)\mathbf{E} + \tilde{\mu}\mathbf{H}^* \cdot (\nabla)\mathbf{H}\right]$,

Спін і орбітальний момент імпульсу: $\tilde{\mathbf{S}} = \frac{1}{16\pi\omega}\mathrm{Im}\left(\tilde{\varepsilon}\mathbf{E}^* \times \mathbf{E} + \tilde{\mu}\mathbf{H}^* \times \mathbf{H}\right)$, $\tilde{\mathbf{L}} = \mathbf{r} \times \tilde{\mathbf{P}}_O$

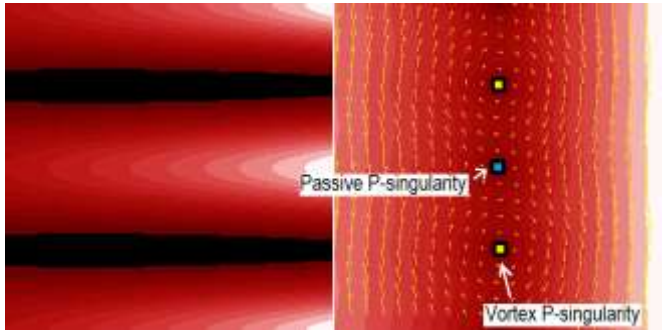
Спіновий імпульс: $\tilde{\mathbf{P}}_S = \frac{1}{2}\nabla \times \tilde{\mathbf{S}} = \frac{1}{32\pi\omega}\nabla \times \mathrm{Im}\left(\tilde{\varepsilon}\mathbf{E}^* \times \mathbf{E} + \tilde{\mu}\mathbf{H}^* \times \mathbf{H}\right)$

Дисперсійні поправки застосовуються саме до $\mathbf{P}_O$ та $\mathbf{P}_S$, тобто складові канонічного розкладу імпульсу постають як фундаментальні величини, а сам кінетичний імпульс утворюється як їх сума:

$$\tilde{\mathbf{P}} = \tilde{\mathbf{P}}_O + \tilde{\mathbf{P}}_S$$

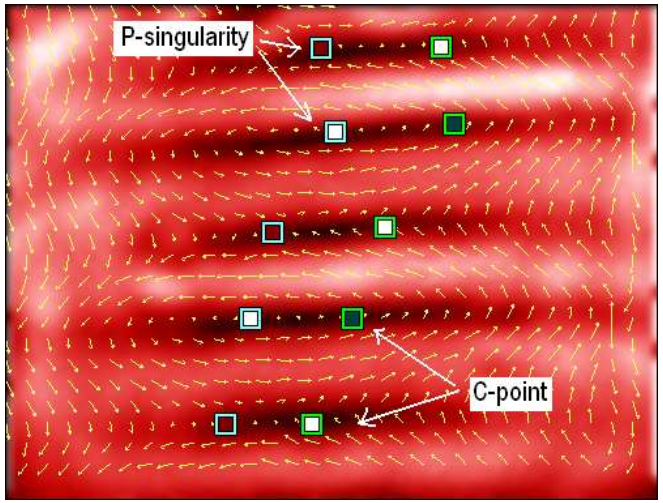
Від когерентної сингулярної оптики до кореляційної оптики

Інтерферометрічні методи синтезу сингулярностей. Поліхроматичні сингулярності.



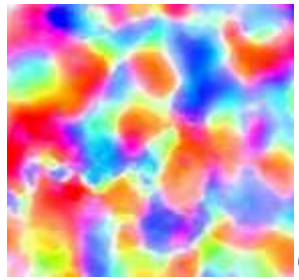
а) б)

Ланцюжки вихорів, утворених в результаті суперпозиції близьких за інтенсивністю хвиль. а – розподіл інтенсивності, б – розподіл характеристик поперечної компоненти вектора Умова-Пойнтінга.

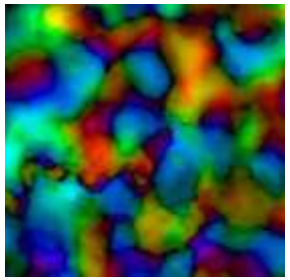


Ланцюжки С-точок, утворених в результаті суперпозиції близьких за інтенсивністю ортогонально лінійно поляризованих хвиль. Розподіл характеристик поперечної компоненти вектора Умова-Пойнтінга. Експериментальні дані.

а)

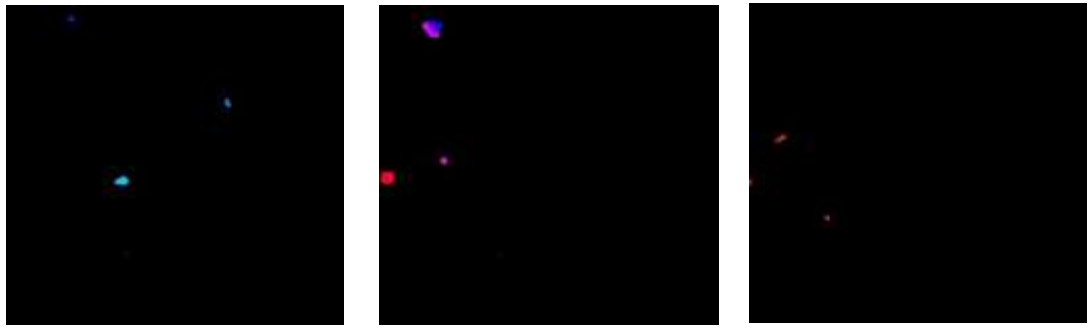


б)



в)

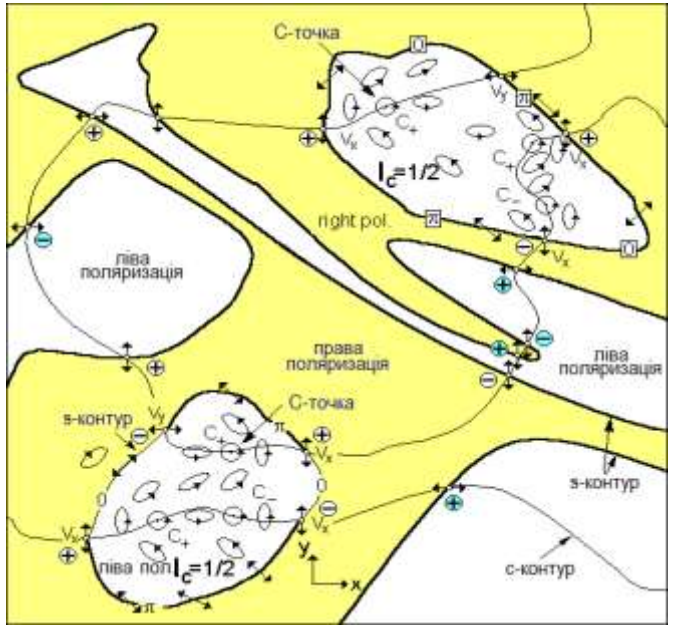
Фрагмент поліхроматичного спекл-поля, отриманого в результаті розсіювання на матовому склі (а), фрагмент оброблений за допомогою хромоскопу (б) та інверсному хромоскопу (в).



Координатний розподіл нулів спектральних компонент.

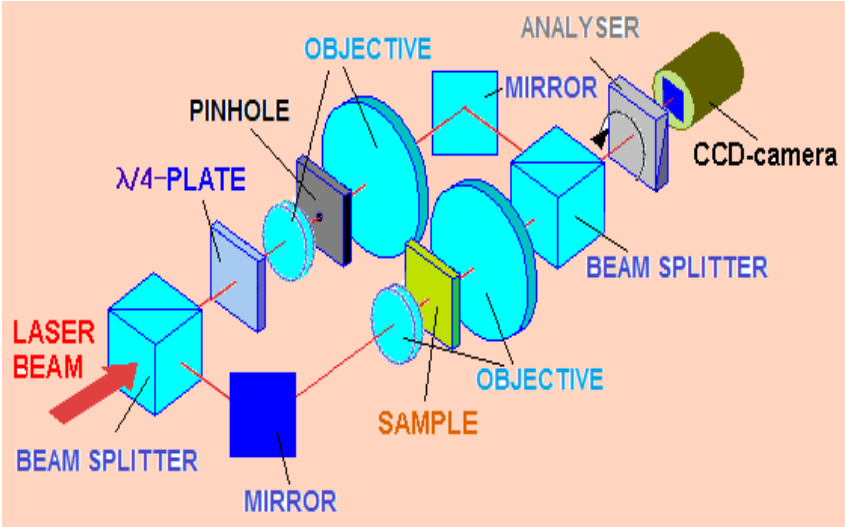
Інтерферометрічні методи дослідження поляризаційних сингулярностей

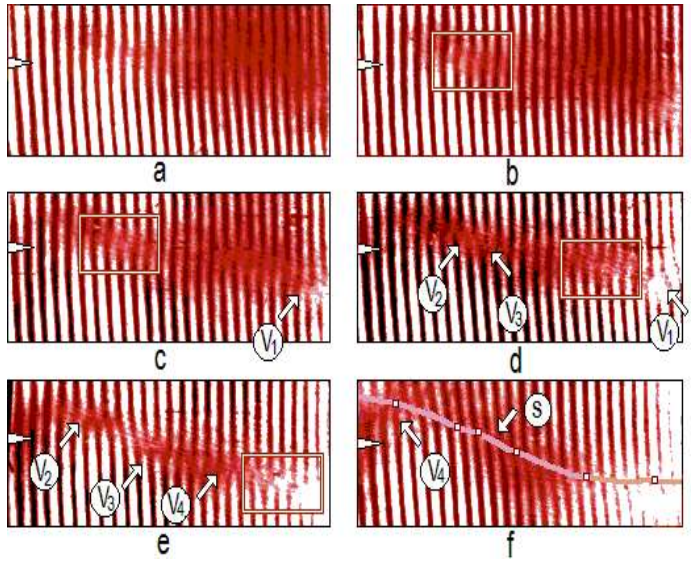
Знаковий принцип для С-точок



Дві сусідні С-точки, безпосередньо з'єднані еквіазимутальною лінією мають індекси різних знаків.

Інтерферометрічні методи дослідження поляризаційних сингулярностей





Визначення позиції s-контура за допомогою інтерферометрії лінійно поляризованих проекцій векторного поля.

Зв'язок між С-точками та вихорами лінійно поляризованої проекції, розташованими на s-контурі

$$\sum_{i}^{N} h_i I_{Ctot} = S_{Ctot} = \frac{1}{2} S_{tot},$$

де h_i – спінорний фактор в i-й області поляризації; N – кількість областей із різним напрямком циркуляції вектора поля, S_{Ctot} – сумарний топологічний заряд C-точок, обмежених s-контурами, S_{tot} – сумарний топологічний заряд вихорів лінійно поляризованої проекції поля, розташованих на s-контурах, обмежуючих область з C-точками.

Пойнтінг-сингулярності

Миттєві компоненти вектора Умова-Пойнтінга

$$P_x \approx -\frac{c}{4\pi k}(E_x T_2 - E_y T_1)$$

$$P_y \approx -\frac{c}{4\pi k}(E_y T_2 + E_x T_1),$$

$$P_z \approx \frac{c}{4\pi}(E_x^2 + E_y^2)$$

де

$$T_1 = E_x \Phi_x^y - E_y \Phi_y^x + \frac{A_x^y}{A_x} E_{x,\pi/2} - \frac{A_y^x}{A_y} E_{y,\pi/2}$$

$$T_2 = E_x \Phi_x^x + E_y \Phi_y^y + \frac{A_x^x}{A_x} E_{x,\pi/2} + \frac{A_y^y}{A_y} E_{y,\pi/2},$$

$$E_i = A_i(t)\cos\left[\Phi_i(t) - 2\pi\nu t\right]$$

$$E_{i,\pi/2} = A_i(t)\sin\left[\Phi_i(t) - 2\pi\nu t\right],$$

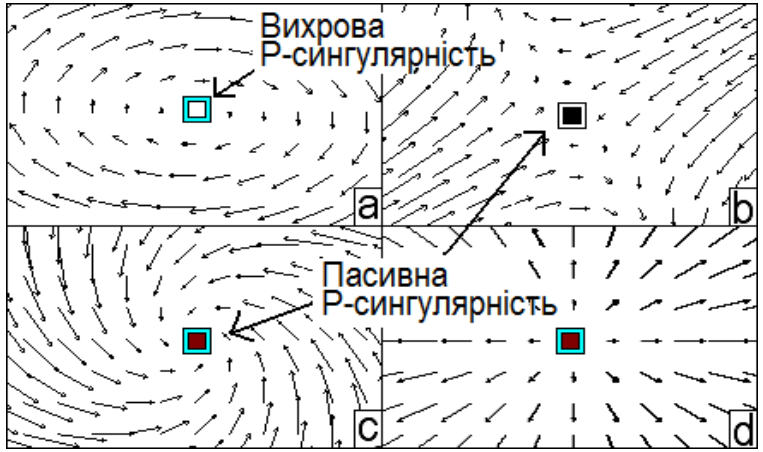
A_i, Φ_i – амлітуди та фази ортогональних компонент, A_i^l, Φ_i^l – відповідні похідні, $i, l = x, y$

Усереднені компоненти вектора Умова-Пойнтінга

$$\bar{P}_x \approx -\frac{c}{16\pi k}[(s_0 + s_1)\Phi_x^x + (s_0 - s_1)\Phi_y^x - \frac{\partial s_2}{\partial y}],$$

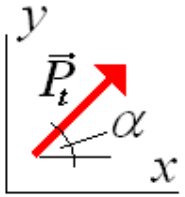
$$\bar{P}_y \approx -\frac{c}{16\pi k}[(s_0 + s_1)\Phi_x^y + (s_0 - s_1)\Phi_y^y - \frac{\partial s_2}{\partial x}],$$

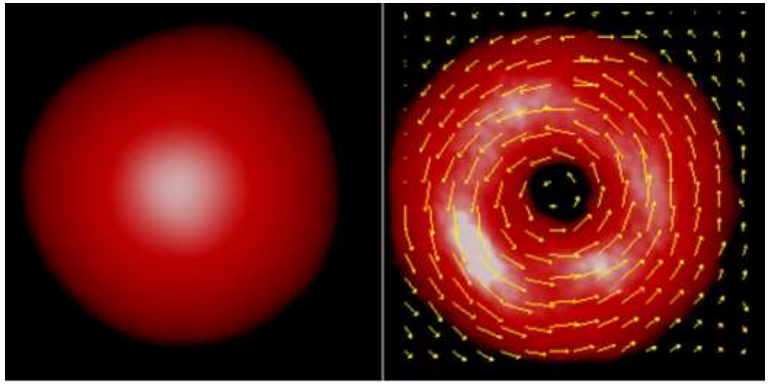
$$\bar{P}_z \approx \frac{c}{8\pi} s_0,$$ де s_i – параметри Стокса



Умова виникнення Пойнтінг-сингулярності

$$P_x = 0$$
$$P_y = 0$$



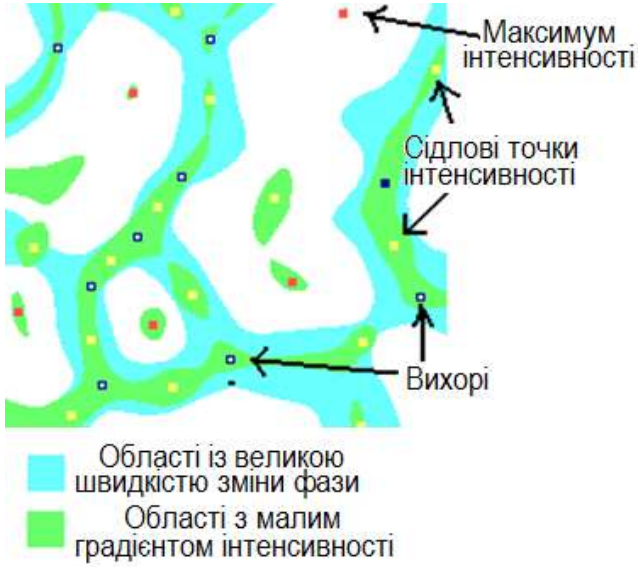


а) б)

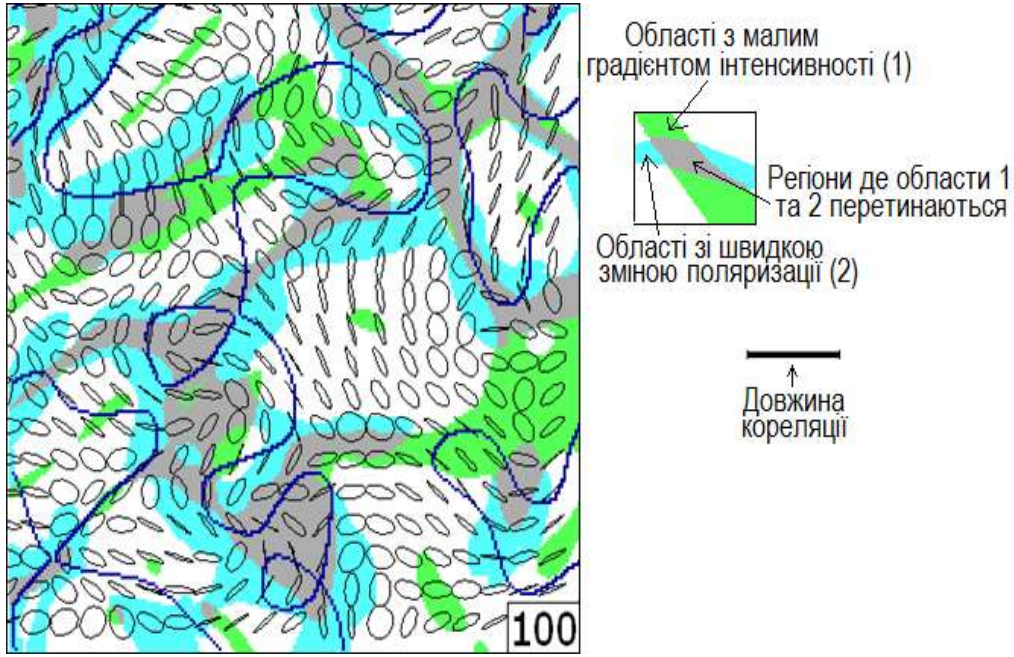
Поведінка поперечної компоненти вектора Умова-Пойнтінга циркулярно поляризованого Гаусова пучка. Експериментальні дані.
а – розподіл інтенсивності в перерізі пучка;
б – розподіли модуля та азимута поперечної компоненти вектора Умова-Пойнтінга. Довжина стрілочок відповідає модулю вектора. Орієнтація вказує на азимут компоненти.
В центрі пучка вихрова Пойнтінг-сингулярність.

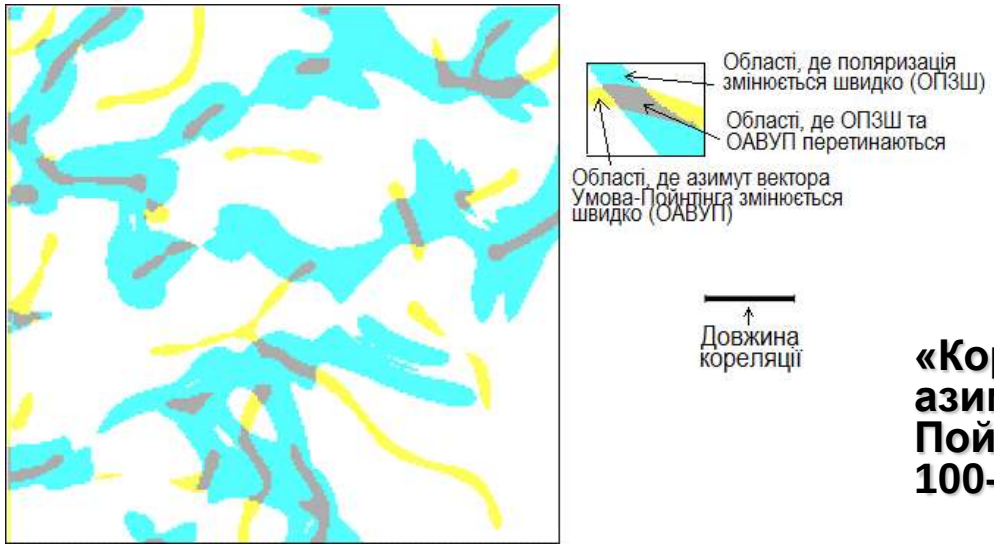
Кореляція між різними параметрами оптичної хвилі

«Антикореляція» між інтенсивністю та фазою. Скалярне випадкове поле.



«Антикореляція» між інтенсивністю та поляризацією. Векторне випадкове поле зі 100-відсотковою інтегральною деполяризацією.





«Кореляція» між поляризацією та поведінкою азимута поперечної компоненти вектора Умова-Пойнтінга. Векторне випадкове поле зі 100-відсотковою інтегральною деполяризацією

Момент імпульсу в околі С-точки. Дія евансцентної хвилі на фізичну систему

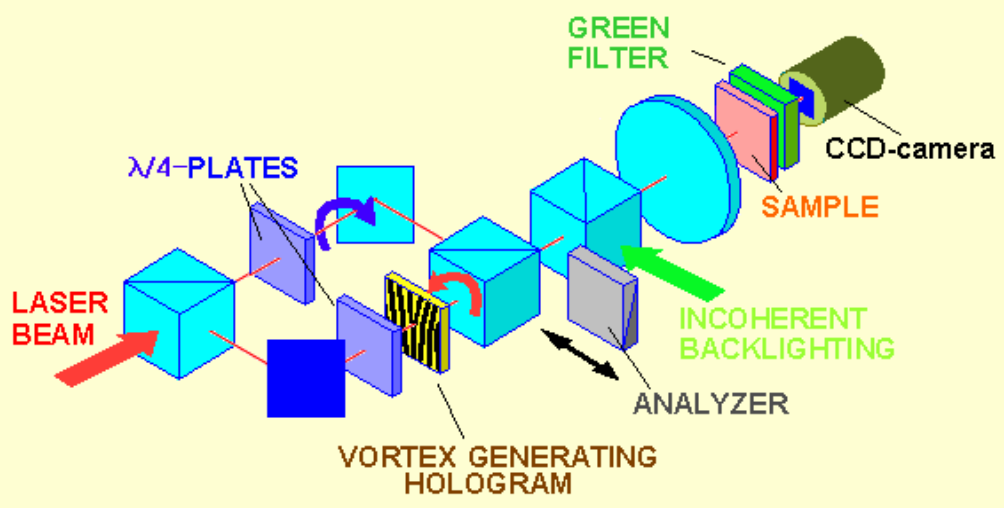
Компоненти вектора Умова-Пойнтінга в околі С-точки

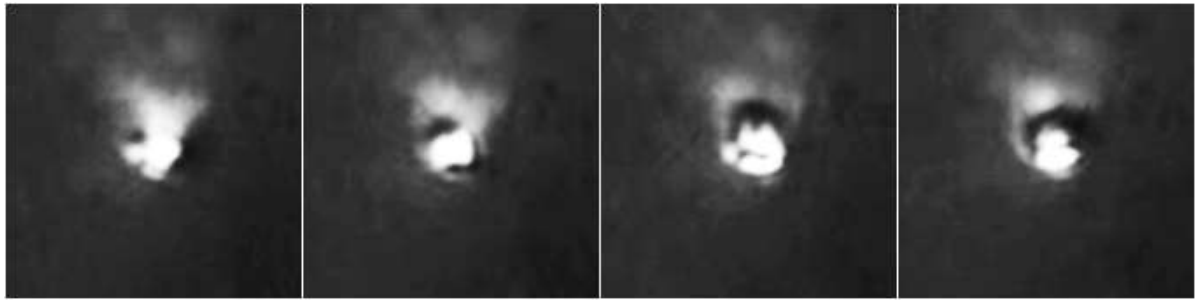
за умовою $S = -h$

(S – топологічний заряд, h – спінорний фактор)

$$\bar{P}_x \approx -\frac{c}{4\pi k} 2S\{\sin[2(\omega t - kz)] - y\},$$

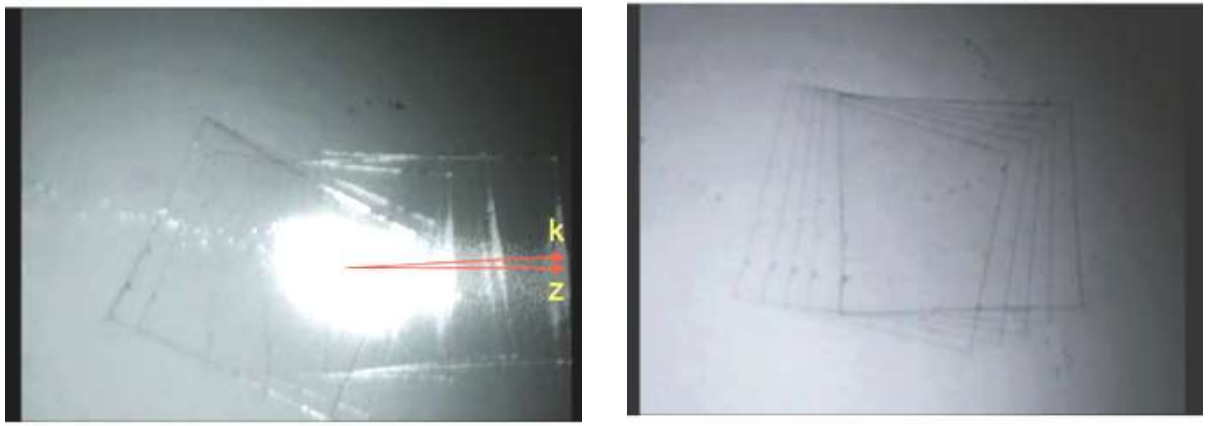
$$\bar{P}_y \approx -\frac{c}{4\pi k} 2S\{\cos[2(\omega t - kz)] + y\}$$





Обертання захопленої прозорої мікро-частинки завдяки кутовому моменту, що виникає в околі С-точки.

Дія евансцентної хвилі на фізичну систему



а) б)

Рух пластини, під дією евансцентної хвилі. (а) Обертання і прямолінійний рух пластини (потужність лазера 1 Вт) та (б) повернення пластини в початкове положення при вимкненому лазері.

THE SERIES OF SCIENTIFIC WORKS IN THE FIELD OF SINGULAR OPTICS

Submitted by the Institute of Physics of the National Academy of Sciences of Ukraine

List of authors

- **ANGELSKY Oleh Vyacheslavovych** - professor, doctor of physics and mathematics, director of the Institute of physical, technical and computer sciences of Yuriy Fedkovych Chernivtsi National University.
- **BAZHENOV Volodymyr Yuriyovych** – Senior researcher, candidate of physics and mathematics, Senior researcher of the department of gas electronics of the Institute of Physics of NAS of Ukraine.
- **BEKSHAEV Oleksandr Yanovych** – Senior researcher, doctor of physics and mathematics, Head of the laboratory of optics and laser physics of the Scientific and Research Institute of Physics of Odessa I.I.Mechnikov National University.
- **BLIOKH Kostyantyn Yuriyovych** – Senior researcher, candidate of physics and mathematics, Senior research scientist, Theoretical quantum physics laboratory, RIKEN Claster for Pioneering Research, Wako-shi, Saitama, 351-0198, Japan.
- **VASNETSOV Mikhaylo Viktorovych** - professor, doctor of physics and mathematics, Leading researcher of the department of optical quantum electronics of the Institute of Physics of NAS of Ukraine.
- **Vlokh Rostyslav Orestovych** – professor, doctor of physics and mathematics, director of the O.G.Vlokh Institute of Physical Optics of the Ministry of Education and Science of Ukraine.
- **MOKHUN Ihor Ivanovych** - professor, doctor of physics and mathematics, professor of correlation optics department of Yuriy Fedkovych Chernivtsi National University.
- **SKAB Ihor Petrovych** - Senior researcher, doctor of physics and mathematics, vice-director of the O.G.Vlokh Institute of Physical Optics of the Ministry of Education and Science of Ukraine.

ANNOTATION

The studies started in 1989 have included a first laboratory detection of optical vortices and a development of methods for fabricating synthesized-grating holograms. This has been aimed at formation of beams bearing optical vortices, as well as detailed studies of the properties of these vortices, phase structure of their wave fronts, and regularities of their interference. The stability against perturbation properties have been analyzed for the optical vortices with the topological charges higher than unity. The rotation of non-axial optical vortices around the beam axis during phase change of their components has been revealed. The role of Gouy phase in the spatial transformation of the combined beam has been investigated for the first time. In case of the combined beams and in the course of birth and annihilation of optical vortices, violation of the conservation law for the topological charge has been detected. An interference ratio for the orbital angular momentum of the beam components has been obtained. The synthesized optical vortices with non-integer topological charges have been investigated both experimentally and theoretically. A method for generating beams with non-integer topological charges has been suggested. A dynamic process of formation and annihilation of optical vortices has been revealed in active media. These and the other experiments (e.g., generation of second-optical harmonics of the beam with optical vortex and rotation of the wavefront of the optical vortex at four-wave mixing) have given rise to the branch of nonlinear singular optics. It has been revealed that, in ‘per photon’ terms, the orbital angular momentum represents an integer of the units of Planck’s constant. The existence of Doppler rotational effect for the optical-vortex mode has been demonstrated. The first experiments have been carried out in order to transmit a signal using the principle of information encoding by the method of orbital angular momentum. It has been established that a presence of optical vortex in one of the components leads to a so-called C-point of circular polarization in the field with elliptical polarization around it. Thus, the topological transformations of singular structures in randomly polarized fields have become completely understood.

The mechanisms and the basic laws have been revealed that govern the appearance and interactions of topological defects of different optical characteristics in inhomogeneously perturbed solid-state media. They lead to formation of polarization singularities in the optical fields, dislocations of wave front and optical vortices. Moreover, the fundamental possibilities for appearance of singular beams carrying optical vortices with the aid of parametric crystal optical effects in single crystals under the influence of inhomogeneous mechanical stresses or electric fields and in the presence of acousto-optic and acousto-gyration interactions have been demonstrated. This enables various possibilities for controlling the efficiency of spin-to-orbital conversion by external fields and performing spatial control of the position of the vortex beam in case of acousto-optic interactions.

Fundamental theoretical concepts have been developed, which are concerned with deep relations between the internal structure of the wave fields and their global evolution, including that occurring in multidimensional abstract spaces. On this basis, extensive studies for the interactions of external and internal degrees of freedom in electromagnetic fields have been carried out, a relevant mathematical apparatus

ANNOTATION

has been constructed, and fundamental relations have been found with the general theory of physical fields and the quantum aspects of inhomogeneity (calibration fields, topological phase, etc.). A general theory of spin-to-orbital conversion of the light field has been developed. Close relationships of the geometric and dynamic parameters of the fields have been established, and a dual geometric–dynamic nature of the spin-orbital phenomena has been revealed. A unified concept has been created, and mechanisms of the influence of internal state and singular structure of light beams on the processes of their propagation, reflection, refraction, focusing, scattering and other transformations have been revealed. The exceptional role of dynamic characteristics as a means for description and meaningful characterization of the light fields has been established and substantiated. Physical principles and mechanisms for the interactions between the internal (polarization) and external degrees of freedom of light have been revealed. A self-consistent system of dynamic characteristics has been developed, on the basis of which an integrated concept can be formed, which reveals the physical and applied aspects of topological properties and singularities of the structured light fields.

The problems of generation of optical singularities of different types have been considered, including the case of singularities appearing in polychromatic fields. The mechanisms for optical-singularity networks have been established. The links (or primary correlations) between the systems of singularities of different types have been found. The effect of singular-field structures on the other physical systems has been analyzed.

All these results have been obtained for the first time. They have received the approval of world scientific community, as evidenced by the appropriate citation indices. Together, they form a holistic concept that reveals the physical and applied aspects of the topological properties and the singularities of light fields.

In summary, one can note that, within some 30 years of extensive work, a new independent branch of modern physical optics has been created. As a consequence, the term ‘singular optics’ suggested by us is now included in the base of keywords and the rubrics of scientific publications.

Number of publications: *275, incl. 4 monographs (2 - published abroad), 11 chapters of monographs (11 - published abroad), 259 articles (239 - in English-language journal with impact-factor). 1 patent of Ukraine for invention has been received.*

The total number of citations to author publications/h-index of work, according to the databases is respectively:

Web of Science – ***10063 / 51****, Scopus –* ***10699 / 53****, Google Shcolar –* ***14332 / 57****.*

5 doctor *and* ***24 candidate dissertations*** *are defended on this subject.*