



STUDIJŲ DALYKO (MODULIO) APRAŠAS

Dalyko (modulio) pavadinimas	Kodas
Kvantinė optika	

Anotacija
<p>Kursas pradamas nuo stochastinio ir ergodinio proceso apibrėžimo bei pagrindinių jo statistinių charakteristikų aprašymo. Aptariama Winerio ir Khintchino teorema. Parodomas ryšis tarp elektromagnetinės bangos laikinių ir erdvinų koherentiškumo savybių bei šios bangos kvantinės būsenos. Susipažinama su Hanbury, Brown'o ir Twiss'o eksperimentu bei jo klasikine ir kvantine interpretacija. Vėliau aptariamas elektromagnetinio lauko kvantavimas, paliečiant fotono lokalizavimo klausimą. Apibrėžiamos Foko, koherentinės bei suspaustos kvantinės būsenos. Tuomet įvedama bendriausia fizikinės sistemos būsenos aprašymo forma – tankio operatorius. Apibrėžiamos klasikinės ir neklasikinės šviesos būsenos sąvokos. Aptariamas apibendrinto lazerio modelio ir tiesinio stiprintuvo spinduliuojamos šviesos kvantinis aprašymas ir fotonų statistika. Susipažinama su pagrindinių optinių elementų (pluošto daliklio, lęšio, fazinės plokštelės, sklidimo laisvoje erdvėje) kvantiniu aprašymu. Aptariama netiesinės optikos reiškinių (antros harmonikos generacijos ir parametrinės fluorescencijos) kvantinė optika. Susipažinama su Einšteino, Podolskio ir Roseno paradoksu bei Belo nelygybe. Apariami eksperimentiniai Belo nelygybės tikrinimo būdai.</p>

Dėstytojas (-ai)	Padalinys (-iai)
Koordinuojantis: doc. dr. Vygandas Jarutis	Lazerinių tyrimų centras
Kitas (-i):	

Studijų pakopa	Dalyko (modulio) tipas
Magistras (antroji)	Privalomas

Įgyvendinimo forma	Vykdyto laikotarpis	Vykdyto kalba (-os)
Paskaitos	2 semestras	Lietuvių

Reikalavimai studijuojančiajam	
Išankstiniai reikalavimai: Turi būti išklaustyti kursai „Bendroji fizika“ (optika) ir „Kvantinė mechanika“.	Gretutiniai reikalavimai (jei yra):

Dalyko (modulio) apimtis kreditais	Visas studento darbo krūvis	Kontaktinio darbo valandos	Savarankiško darbo valandos
5	140	48	92

Dalyko (modulio) tikslas: studijų programos ugdomos kompetencijos
Suvokti optinių kvantinių reiškinių pasireiškimo sąlygas ir specifiką.

Dalyko (modulio) studijų siekiniai	Studijų metodai	Vertinimo metodai
Gebėjimas taikyti specifinius matematinius metodus analizuojant kvantinių sistemų būsenas.	Paskaitos, pratybos. savarankiškas darbas.	Testas.
Gebėjimas aprašyti realius optinius elementus (pvz., pluošto daliklis, fazinė plokštelė, lęšis) matematiniais operatoriais ir teoriškai modeliuoti paprasčiausius eksperimentus.	Paskaitos, pratybos. savarankiškas darbas.	Testas.
Žinios apie apibendrintą kvantinį lazerio modelį, tiesinį stiprintuvą, klasikinę ir neklasikinę šviesos būsenas, tankio operatoriaus sąvoka.	Paskaitos, pratybos. savarankiškas darbas.	Testas.
Žinios apie EPR paradoksą, Belo nelygybę, supintas būsenas.	Paskaitos.	Testas.

Temos	Kontaktinio darbo valandos							Savarankiškų studijų laikas ir užduotys	
	Paskaitos	Konsultacijos	Seminarai	Pratybos	Laboratoriniai darbai	Praktika	Visas kontaktinis darbas	Savarankiškas darbas	Užduotys
1. Statistinės signalo charakteristikos. Pagrindinės autokoreliacinės f-jos savybės. Vinerio ir Chinčino teorema	2		1				3	6	Namų darbai.
2. Koherentiškumo sąvokos kvantinė interpretacija.	2		1				3	4	Namų darbai.
3. Ket ir bra vektoriai ir jų taikymas. Heizenbergo neapibrėžtumo sąryšis. Tolydaus spektro operatoriai. Sistemos evoliucijos operatorius.	2		1				3	6	Namų darbai.
4. Šviesos detektavimas pusiau klasikinėje teorijoje. Fotostatistika. Fluktuojančių šviesos laukų statistika.	2		1				3	6	Namų darbai.
5. Fotonų koncepcija. Brawn ir Twiss eksperimentas. Fotonų grupavimas ir anti-grupavimas.	2		1				3	6	Namų darbai.
6. Laisvojo elektromagnetinio lauko kvantavimas. Ar galima sukonstruoti fotono banginę f-ją?	2		1				3	6	Namų darbai.
7. Fotonas, Foko būsenos. Operatoriai Heizenbergo atvaizdavime.	2		1				3	6	Namų darbai.
8. Elektromagnetinio lauko judesio kiekio operatorius. Elektromagnetinio lauko judesio kiekio momento operatorius	2		1				3	6	Namų darbai.
9. Elektromagnetinio lauko fazės operatorius. Intensyvumo operatorius	2		1				3	6	Namų darbai.
10. Koherentinės būsenos. Suspaustos būsenos. Tankio operatoriaus koncepcija. Koherentinių būsenų pilnumas ir ortogonalumas.	2		1				3	6	Namų darbai.
11. Optinė ekvivalentiškumo teorema normaliosios sandaugos operatoriams. Klasikinės srovės kuriamas elektromagnetinis laukas.	2		1				3	6	Namų darbai.
12. Pluošto daliklis. Kvantuoto elektromagnetinio lauko sklidimas. Plonasis lęšis ir fazinė plokštelė.	2		1				3	6	Namų darbai.
13. Nuostolių įskaitymas kvantinėse sistemose. Dviejų lygmenų atomo modelis ir sąveika su elektromagnetiniu lauku. Kvantinis lazerio modelis.	2		1				3	6	Namų darbai.
14. Lazerinės spinduliuotės fotonų statistika. Tiesinis stiprintuvas.	2		1				3	6	Namų darbai.
15. Netiesinė kvantinė optika. Antros harmonikos	2		1				3	6	Namų darbai.

generacija. Parametrinė šviesos konversija. Parametrinis procesas nuo 1 kaupinimo fotono.									
16. EPR paradoksas. Belo nelygybė.	2		1				3	4	Namų darbai.
Iš viso	32		16				48	92	

Vertinimo strategija	Svoris proc.	Atsiskaitymo laikas	Vertinimo kriterijai
Egzaminas (testas)	100%	Semestro pabaigoje	Testą sudaro 30 klausimai iš viso kurso. Klausimai turi po 5 atsakymo variantus iš kurių tik vienas teisingas. Už teisingai pasirinktą atsakymą skiriamas 1 balas. Už neteisingai pasirinktą atsakymą 0 balų. Didžiausias galimas balų skaičius 30. Galutinis pažymys skaičiuojamas pagal formulę $10 \times (\text{teisingi atsakymai}) / 30$ apvalinant šią vertę iki artimiausio sveiką skaičiaus.

Autorius	Leidimo metai	Pavadinimas	Periodinio leidinio Nr. ar leidinio tomas	Leidimo vieta ir leidykla ar internetinė nuoroda
Privaloma literatūra				
H.A. Bachor ir T.C. Ralph	2004	A Guide to Experiments in Quantum Optics		Wiley-VCH, Weinheim
L.Mandel ir E.Wolf	1995	Optical Coherence and Quantum Optics		Cambridge Press, Cambridge
Papildoma literatūra				
R. Loudon	2000	The Quantum Theory of Light		Oxford University Press, New Yourk
M.O. Scully ir M. S. Zubairy.	1997	Quantum Optics		Cambridge University Press, Cambridge



COURSE UNIT DESCRIPTION

Course unit title	Code
Quantum Optics	

Annotation
<p>The course begins by introducing the concept of stochastic and ergodic process and its main statistical characteristics. The Wiener-Khintchine theorem is discussed. The connection between temporal and spatial coherence properties of classical electromagnetic wave and its quantum state is demonstrated. Hanbury, Brown and Twiss experiment is discussed from classical and quantum theories points of view. The course is continued by developing the basic tools of quantum optics. The question of photon localization is discussed briefly. The pure quantum states such as Fock, coherent and squeezed states are introduced. Then the concept of the density operator of general quantum state is developed. The quantum description of some optical elements (such as beam splitter, lens, phase plate, free propagation in space) is presented. The quantum model of laser and linear amplifier is given and its photon statistics is discussed. The classification of all optical states into classical and non-classical is described. The nonlinear optic processes such as second harmonic generation and spontaneous parametric down conversion are interpreted using tools of quantum optics. Einstein, Podolsky, Rosen paradox and Bell inequality are discussed.</p>

Lecturer(s)	Department, Faculty
Coordinating: assoc. prof., dr. Vygandas Jarutis Other:	Laser Research Center

Study cycle	Type of the course unit
Master (second)	Mandatory

Mode of delivery	Semester or period when it is delivered	Language of instruction
Lectures	Semester 2	Lithuanian

Requisites	
Prerequisites: General course of physics (optics), Quantum Mechanics.	Co-requisites (if relevant):

Number of ECTS credits allocated	Student's workload (total)	Contact hours	Individual work
5	140	48	92

Purpose of the course unit: programme competences to be developed		
To get general knowledge about quantum phenomena in optics.		
Learning outcomes of the course unit	Teaching and learning methods	Assessment methods
To know how to apply a specific mathematical methods to describe light state.	Lectures, practice, home works.	Test.
To know how real optical elements (such as beam splitter, phase plate, lens) can be described by appropriate operators.	Lectures, practice, home works.	Test.
The quantum model of laser. Linear amplifier. The classical and non-classical state of light. The density operator.	Lectures, practice, home works.	Test.
EPR paradox. Bell inequality.	Lectures.	Test.

Course content: breakdown of the topics	Contact hours							Individual work: time and assignments	
	Lectures	Tutorials	Seminars	Workshops	Laboratory work	Internship/work placement	Contact hours, total	Individual work	Assignments
1. The statistical characteristics of signal. Autocorrelation function and its properties. Wiener-Khinchine theorem.	2		1				3	6	Home work.
2. Temporal and spatial coherence. Volume of coherence and quantum interpretation of it.	2		1				3	4	Home work.
3. Ket and bra vectors. Heisenberg inequality. Operators of continuum spectra.	2		1				3	6	Home work.
4. Semi classical theory of photoelectric detection of light. Photoelectric counting statistics of a fluctuating field.	2		1				3	6	Home work.
5. Conception of a photon. The Hanbury Brown-Twiss effect (semi-classical treatment). Bunching and anti-bunching.	2		1				3	6	Home work.
6. Quantization of the free electromagnetic field. The problem of photon wave function.	2		1				3	6	Home work.
7. The photon. Fock states. Heisenberg representation.	2		1				3	6	Home work.
8. Momentum of the quantized field. Angular momentum of the quantized field.	2		1				3	6	Home work.
9. Phase and intensity operators for the quantized field.	2		1				3	6	Home work.
10. Coherent states of the electromagnetic field. Squeezed states of light. Density operator. Coherent states as a basis; non-orthogonality and over-completeness.	2		1				3	6	Home work.
11. The optical equivalence theorem for normally ordered operators. The field produced by a classical current	2		1				3	6	Home work.
12. Quantum description of a beam splitter, a phase plate, a thin lens and the free propagation of electromagnetic field.	2		1				3	6	Home work.
13. Interaction between light and a two-level atom. The quantum model of single-mode laser.	2		1				3	6	Home work.
14. Photon statistics of quantum laser. Linear amplifier.	2		1				3	6	Home work.
15. Quantum effects in nonlinear optics. Second harmonic generation. Parametric light generation. Parametric generation for 1 photon.	2		1				3	6	Home work.

16. EPR paradox, Bell inequality.	2		1			3	4	Home work.
Total	32		16			48	92	

Assessment strategy	Weight %	Deadline	Assessment criteria
The test.	100	At the end of the semester.	The test is composed from 30 questions from all course with 5 possible answers for each question. There is only one correct answer for each question. The value for good answer is 1 and 0 for wrong answer. The final rating is $10 \times (\text{number of correct answers}) / 30$ rounded to integer value.

Author	Publishing year	Title	Issue of a periodical or volume of a publication; pages	Publishing house or internet site
Required reading				
H.A. Bachor ir T.C. Ralph	2004	A Guide to Experiments in Quantum Optics		Wiley-VCH, Weinheim
L.Mandel ir E.Wolf	1995	Optical Coherence and Quantum Optics		Cambridge Press, Cambridge
Recommended reading				
R. Loudon	2000	The Quantum Theory of Light		Oxford University Press, New Yourk
M.O. Scully ir M. S. Zubairy.	1997	Quantum Optics		Cambridge University Press, Cambridge