

## A-I – Základní informace o žádosti o akreditaci

Název vysoké školy:

**České vysoké učení technické v Praze**

Název součásti vysoké školy:

**Fakulta jaderná a fyzikálně inženýrská**

Název studijního programu:

**Kvantové technologie** (navazující magisterský studijní program)

Typ žádosti o akreditaci:

**udělení akreditace**

Schvalující orgán:

**Vědecká rada FJFI ČVUT**

**Vědecká rada ČVUT**

Datum schválení žádosti:

**Vědecká rada FJFI ČVUT: 3. 10. 2019**

**Vědecká rada ČVUT: 22. 10. 2019**

Odkaz na elektronickou podobu žádosti:

<https://www.fjfi.cvut.cz/ak2019>

přihlašovací údaje: jméno: heslo:

Odkazy na relevantní vnitřní předpisy:

- **Vnitřní předpisy ČVUT v Praze:**  
<https://www.cvut.cz/vnitřni-předpisy>
- **Vnitřní předpisy ČVUT FJFI v Praze:**  
<https://www.fjfi.cvut.cz/cz/fakulta/uredni-deska>  
<https://www.fjfi.cvut.cz/cz/studium/předpisy>
- **Zpráva o vnitřním hodnocení**  
<https://www.fjfi.cvut.cz/ak2019>

ISCED F:

0533

B-I – Charakteristika studijního programu			
Název studijního programu	Kvantové technologie		
Typ studijního programu	navazující magisterský		
Profil studijního programu	akademicky zaměřený		
Forma studia	prezenční		
Standardní doba studia	2 roky		
Jazyk studia	český		
Udělovaný akademický titul	Ing.		
Rigorózní řízení	ne	Udělovaný akademický titul	-
Garant studijního programu	doc. Ing. Martin Štefaňák, PhD.		
Zaměření na přípravu k výkonu regulovaného povolání	ne		
Zaměření na přípravu odborníků z oblasti bezpečnosti České republiky	ne		
Uznávací orgán	-		
Oblast(i) vzdělávání a u kombinovaného studijního programu podíl jednotlivých oblastí vzdělávání v %			
Oblast vzdělávání č. 11 - Fyzika – 100%			
Cíle studia ve studijním programu			
Navazující magisterský studijní program <b>Kvantové technologie</b> je multidisciplinární studijní program, který cílí na výchovu špičkových odborníků v oblastech kvantové informace a komunikace, kvantové optiky, fyziky a techniky laserů, pevných látek a nanomateriálů, kteří se zapojí do výzkumu a vědecko-technické praxe. Hlavní část studia se soustředí na pokročilé oblasti kvantové fyziky a jejich aplikace ve fyzice pevných látek, interakce světla s hmotou nebo v kvantové informatice. Během studia jsou studenti vedeni k samostatnému analytickému myšlení a ke schopnosti uplatňovat osvojené metody v řadě oblastí fyziky a jejích technologických aplikací. Velký důraz je kladen na přípravu studenta na samostatnou výzkumnou práci. Součástí studia je individuální studentský projekt (výzkumný úkol) směřující k diplomové práci. Poznatky získané během diplomové práce vedou zpravidla ke vzniku původních výsledků publikovatelných v odborném tisku.			
Profil absolventa studijního programu			
<i>Znalosti:</i> Absolvent získá široké vědomosti v moderních partiích fyziky, zejména v oblasti kvantové teorie, fyziky pevných látek a laserů. V závislosti na specializaci absolventa jsou pak jeho znalosti dále prohloubeny v oblastech kvantové optiky, kvantové informace, laserů nebo fyziky nanomateriálů. Absolventi mohou přímo pokračovat v navazujícím doktorském studiu ve stejném nebo příbuzném oboru.			
<i>Dovednosti:</i> Použití metod a postupů z různých oblastí matematiky a fyziky pro řešení teoretických i reálných inženýrských výzkumných a vědeckých problémů v oblastech kvantové teorie, klasické a kvantové optiky, kvantové teorie informace, teorie pevných látek, fyziky a techniky laserů. Využití moderní výpočetní techniky a laboratorních přístrojů. Schopnost sledovat nové trendy v dané oblasti a rychlá orientace v mezioborové problematice, analýza problémů a syntéza výsledků. K očekávaným charakteristickým rysům absolventa patří také odpovědný přístup ke svěřeným úkolům a schopnost prezentovat získané výsledky na vysoké úrovni.			
<i>Kompetence:</i> Absolventi se uplatní ve školství, výzkumu i v průmyslu díky analytickému způsobu práce, systematickému přístupu danému nabytými znalostmi a schopnosti pracovat s moderní výpočetní technikou. Mohou pracovat na vysokých školách, v ústavech akademie věd a vývojových centrech velkých podniků, či v jiných výzkumných organizacích. Kompetence absolventů leží zejména ve vývoji moderních technologií s aplikacemi např. v nanomateriálech, metrologii, informatice a bezpečné komunikaci. Kromě odborných kompetencí mají schopnost uspět i na řídicích pozicích.			

### **Pravidla a podmínky pro tvorbu studijních plánů**

Studium v navazujícím magisterském studijním programu odpovídá zákonu o vysokých školách č. 111/98 Sb. ve znění pozdějších předpisů, Studijnímu a zkušebnímu řádu ČVUT v Praze a má standardní dobu studia 2 roky s minimálním počtem 120 získaných kreditů definovaných dle ECTS. Studijní plány jsou strukturovány do 4 semestrů s obdobím výuky o délce 13 týdnů. Jedna vyučovací hodina má délku 50 min. Charakteristika studijních plánů:

- studijní plány určují povinnost vypracovat pod vedením školitele a obhájit dvousemestrální ročníkovou práci (tzv. výzkumný úkol) na zadané téma související s výzkumem v dané oblasti,
- v tematické návaznosti na výzkumný úkol studijní plány zahrnují dvousemestrální individuální práci studenta na tématu diplomové práce obhajované při státních závěrečných zkouškách.

Studijní plány umožňují doplnit znalosti poskytované povinnými a povinně volitelnými předměty pomocí předmětů volitelných a získat tak předepsaný počet kreditů. Nabídku volitelných předmětů tvoří všechny předměty vyučované v navazujícím magisterském na FJFI ČVUT v Praze. Konkrétní příklady doporučených volitelných předmětů jsou uvedeny v části D-I.

### **Podmínky k přijetí ke studiu**

Podmínkou přijetí ke studiu v navazujícím magisterském studijním programu je kromě splnění podmínek zákona č. 111/98 Sb. o vysokých školách a o změně a doplnění dalších zákonů v platném znění absolvování bakalářského studia ve stejném nebo příbuzném programu, úspěšné absolvování přijímací zkoušky a znalost českého nebo slovenského jazyka prokázaná maturitní zkouškou, případně certifikovanou zkouškou z češtiny pro cizince úrovně alespoň B2. Přijímací zkouška má písemnou formu a ověřují se v ní znalosti z teoretického předmětu (fyzika) v rozsahu příslušného bakalářského studia. Děkan fakulty může prominout přijímací zkoušku uchazečům, kteří absolvovali odpovídající bakalářský program na FJFI ČVUT v Praze nebo program odpovídající úrovně na jiné vysoké škole. Podmínky přijímacího řízení jsou upřesňovány při jeho vyhlašování děkanem pro každý akademický rok.

### **Návaznost na další typy studijních programů**

Tento studijní program navazuje na připravovaný bakalářský studijní program **Kvantové technologie**. Na studijní program navazuje doktorský studijní program **Kvantové technologie** uskutečňovaný na FJFI ČVUT v Praze.

B-IIa – Studijní plány a návrh témat prací							
Označení studijního plánu		Kvantové technologie					
Povinné předměty							
Název předmětu	Kód	Rozsah	Způsob ověření	Počet kred.	Vyučující	Roč./ Sem.	Prof. zákl.
Povinné předměty doporučeného studijního plánu pro 1. ročník (24 kr. + 28 kr.)							
Quantum Information and Communication	02KIK	39p+13 c	zápočet, zkouška	4	doc. Ing. Martin Štefaňák, Ph.D. (p-100%) Aurél Gábris, Ph.D. (c-100%)	1/Z	ZT
Kvantová optika 1	02KO1	26p+26 c	zápočet, zkouška	4	prof. Ing. Igor Jex, DrSc. (p-100%) Ing. Václav Potoček, Ph.D. (c-100%)	1/Z	ZT
Kvantová teorie pole 1	02KTPA1	52p+26 c	zápočet, zkouška	8	doc. Ing. Martin Štefaňák, Ph.D. (p-75%) Ing. Mgr. Petr Jizba, Ph.D. (p-25%) Ing. Václav Zatloukal, Ph.D. (c-100%)	1/Z	ZT
Kvantové generátory optického záření 1	12KGOZ1	26p+0c	zkouška	2	prof. Ing. Helena Jelínková, DrSc. (p-50%) Ing. Michal Jelínek, Ph.D. (p-25%) Ing. Michal Němec, Ph.D. (p-25%)	1/Z	ZT
Výzkumný úkol 1	00VUKT1	78c	zápočet	6	doc. Ing. Martin Štefaňák, Ph.D. (o-50 %) Ing. Jan Šulc Ph.D. (o-25%) Ing. Petr Sedlák, Ph.D. (o-25%)	1/Z	
Kvantová optika 2	02KO2	26p+26 c	zápočet, zkouška	4	prof. Ing. Igor Jex, DrSc. (p-100%) Ing. Václav Potoček, Ph.D. (c-100%)	1/L	PZ
Kvantová teorie pole 2	02KTPA2	52p+26 c	zápočet, zkouška	8	doc. Ing. Martin Štefaňák, Ph.D. (p-75%) Ing. Mgr. Petr Jizba, Ph.D. (p-25%) Ing. Václav Zatloukal, Ph.D. (c-100%)	1/L	PZ
Teorie pevných látek 1	11TPLA1	26p+26 c	zápočet, zkouška	4	doc. Ing. Hanuš Seiner, Ph.D. (p-100%) Mgr. Jaroslav Hamrle, Ph.D. (c-100%)	1/L	ZT
Kvantové generátory optického záření 2	12KGOZ2	26p+26 c	zápočet, zkouška	4	Ing. Jan Šulc, Ph.D. (p-100%, c-100%)	1/L	PZ
Výzkumný úkol 2	00VUKT2	104c	klasifikovaný zápočet	8	doc. Ing. Martin Štefaňák, Ph.D. (o-50 %) Ing. Jan Šulc Ph.D. (o-25%) Ing. Petr Sedlák, Ph.D. (o-25%)	1/L	
Povinné předměty doporučeného studijního plánu pro 2. ročník (22 kr. + 20 kr.)							
Kvantová teorie pole 3	02KTPA3	52p+26 c	zápočet, zkouška	8	Ing. Mgr. Petr Jizba, Ph.D. (p-100%) Ing. Václav Zatloukal, Ph.D. (c-100%)	2/Z	
Teorie pevných látek 2	11TPLA2	26p+26 c	zápočet, zkouška	4	Mgr. Jaroslav Hamrle, Ph.D. (p-100%, c-100%)	2/Z	PZ
Diplomová práce 1	00DPKT1	130c	zápočet	10	doc. Ing. Martin Štefaňák, Ph.D. (o-50 %) Ing. Jan Šulc Ph.D. (o-25%) Ing. Petr Sedlák, Ph.D. (o-25%)	2/Z	

Diplomová práce 2	00DPKT2	260c	zápočet	20	<b>doc. Ing. Martin Štefaňák, Ph.D.</b> (o-50 %) Ing. Jan Šulc Ph.D. (o-50%) Ing. Petr Sedlák, Ph.D. (o-50%)	2/L	
-------------------	---------	------	---------	----	---	-----	--

**Poznámka:** Studijní plány umožňují doplnit znalosti poskytované povinnými a povinně volitelnými předměty pomocí předmětů volitelných a získat tak předepsaný počet kreditů. Nabídku volitelných předmětů tvoří všechny předměty vyučované v bakalářském studiu na FJFI ČVUT v Praze. Konkrétní příklady doporučených volitelných předmětů jsou uvedeny v části D-I.

Vysvětlivka: Garant předmětu je vyznačen tučně, role vyučujících jsou p – přednášející, c – cvičící, o – organizace studentských seminářů a dohled nad individuální prací studentů na kvalifikačních pracích

### Součásti SZZ a jejich obsah

Státní závěrečné zkoušky zahrnují:

- obhajobu diplomové práce
- prezentaci písemných posudků vedoucího práce a alespoň jednoho oponenta s návrhy klasifikace práce
- ústní část zkoušky z jednoho předmětu obecného základu a ze dvou předmětů odborného zaměření s možností výběru.

Pro studijní program **Kvantové technologie** je předmětem obecného základu studijního programu:

#### Metody kvantových technologií

Předměty odborného zaměření s možností výběru jsou:

- **Kvantová teorie pole**
- **Kvantová optika**
- **Teorie pevných látek**
- **Kvantové generátory optického záření**
- **Kvantová informace a komunikace**

Předmět **Metody kvantových technologií** státních závěrečných zkoušek má tyto okruhy otázek:

1. Relativistický vodíkový atom – relativistická částice ve sféricky symetrickém elektromagnetickém poli, řešení vodíkového atomu pomocí Diracovy rovnice, jemná a hyperjemná struktura vodíku.
2. Symetrie a jejich aplikace v relativistické kvantové teorii – reprezentace Lorentzovy grupy, invariance Klein-Gordonovy a Diracovy rovnice vůči Lorentzovým transformacím, diskrétní symetrie C, P a T.
3. Kvantování volných polí – kanonické kvantování skalárního a bispinorového pole, kreační a anihilační operátory, Fockův prostor.
4. Laser jako kvantový generátor záření – interakce rezonančního záření s látkou, inverze populace hladin kvantových soustav, principy zesilování optického záření, princip generace laserového záření, základní elementy laserového generátoru.
5. Vlastnosti laserového záření – spektroskopické vlastnosti laserového záření, prostorová a časová koherence, šíření laserových svazků a jejich transformace.
6. Matematické metody kvantové optiky – operátorová exponenciála, posunovací operátory, uspořádací teorémy pro Heisenbergovu algebru,  $su(2)$  a  $su(1,1)$ , Baker–Campbell–Hausdorffova věta a její zvláštní případy, Fourierova transformace, Diracova delta funkce.
7. Interakce světla s hmotou – Ramanův rozptyl, dvouhladinové atomy, dipólová aproximace, Jaynes–Cummingsův model, rezonanční a mimorezonanční přechody, nahé a oděné vlastní stavy, dipólová síla, výměna hybnosti a momentu hybnosti mezi fotonem a částicí hmoty.
8. Pohyb elektronu v periodickém potenciálu – mnohaelektronová vlnová funkce, Blochovy funkce, pásová struktura pevných látek, metody výpočtu elektronové struktury pevných látek.
9. Kvazičástice v pevných látkách – statistická rovnováha, transportní jevy v pevných látkách, aplikace Greenových funkcí v pevných látkách.
10. Kvantová informace v konečně rozměrných systémech - von Neumannova entropie, dvoučásticové separabilní a provázané čisté stavy, Schmidtův rozklad, smíšené bipartitní stavy, redukovaná matice hustoty, kvantové operace, úplně pozitivní zobrazení zachovávající stopu, částečná transpozice.

Obsah tohoto předmětu státních závěrečných zkoušek je dán povinnými předměty studijního programu:

02KTPA1 Kvantová teorie pole 1

02KO1 Kvantová optika 1

11TPLA1	Teorie pevných látek 1
12KGOZ1	Kvantové generátory optického záření 1
02KIK	Quantum Information and Communication

Předmět **Kvantová teorie pole** státních závěrečných zkoušek má tyto okruhy otázek:

1. Relativistická vlnová rovnice pro skalární částici, Klein-Gordonova rovnice, Klein-Gordonova rovnice ve Feshbach-Villarsově reprezentaci, řešení pro volnou skalární částici, rovnice continuity a její problémy, nerelativistická limita, Kleinův paradox.
2. Relativistická vlnová rovnice pro částici se spinem  $\frac{1}{2}$ , Diracova rovnice, Lorentzova grupa a její reprezentace, invariance Diracovy rovnice vůči vlastním Lorentzovým transformacím a bilineární formy, řešení Diracovy rovnice pro volnou částici, Diracova, Weylova a Majoranova reprezentace, rovnice continuity a její problémy, zitterbewegung, nerelativistická limita.
3. Relativistická částice ve vnějším elektromagnetickém poli, princip minimální vazby, relativistická částice ve sféricky symetrickém poli, kompatibilní pozorovatelné, řešení vodíkového (a vodíku podobného) atomu pomocí Diracovy rovnice, relativistické korekce energetického spektra atomu vodíku, spektrum s jemnou strukturou.
4. Kanonické kvantování skalárního pole, algebra pozorovatelných a částicová interpretace, kanonické kvantování Diracova pole, nerelativistická limita, Fockův prostor a reprezentace obsazovacích čísel.
5. Symetrie a zákony zachování, teorém E. Noetherové a Wardovy identity, diskretní P, T a C symetrie, explicitní tvary P, T a C operatorů pro diracovskou částici, antičástice.
6. Normální uspořádání, Feynmanův propagátor pro skalární a Diracovo pole, interagující pole, Wickův teorém a poruchová teorie, rozptylové procesy, S a T matice a Feynmanova pravidla, optický teorém a unitárnost, účinný průřez a rozpad nestabilní částice, renormalizace pro teorii  $\phi^4$ .
7. První kvantování pomocí dráhového integrálu, druhé kvantování a funkcionální integrál, partiční suma a Wickův teorém, Wardovy identity a anomálie, funkcionální integrál a nerelativistická limita, poruchový počet Greenových funkcí prostřednictvím Feynmanových diagramů pro skalární pole, dimenzionální regularizace, generující funkcionály W a  $\Gamma$ , souvislé a 1PI diagramy, práce s Feynmanovými diagramy a jejich výpočet.
8. Grassmannovy proměnné a Berezinův funkcionální integrál pro fermionovská pole, poruchový počet Greenových funkcí prostřednictvím Feynmanových diagramů pro fermionovská pole, Feynmanovy diagramy a jejich výpočet.
9. Kvantová elektrodynamika, základní rozptylové procesy v QED, výpočet S-matice pro Comptonův rozptyl, elektron-pozitronovou anihilaci, Møllerův rozptyl a Bhabhův rozptyl, S-matice a LSZ formalismus, Lehmanova reprezentace pro Greenovy funkce.
10. Yang-Millova pole a jejich kvantování, Faddeev-Popovova duchová pole, kalibrace a 't Hooftův trik, Goldstonův teorém a Higgsův mechanismus, Callan-Symanzikova rovnice renormalizační grupy a  $\beta$  funkce, poruchový výpočet  $\beta$  funkce pro skalární pole, koncept asymptotické svobody, pojem efektivní teorie.

Obsah tohoto předmětu státních závěrečných zkoušek je dán povinnými předměty studijního programu:

02KTPA1	Kvantová teorie pole 1
02KTPA2	Kvantová teorie pole 2

Předmět **Kvantová optika** státních závěrečných zkoušek má tyto okruhy otázek:

1. Přehled klasické optiky: odvození vlnové rovnice z Maxwellových rovnic, Helmholtzova rovnice a její paraxiální aproximace, rovnice eikonálu, vlnoplocha, rovinné a sférické vlny, gaussovský svazek, monochromatické a kvazimonochromatické vlny, vlnový balík, polarizační stavy.
2. Kvantizace elektromagnetického pole: rozklad pole do superpozice harmonických módů, elektrické a magnetické pole jednoho módu, Hamiltonián, použití principu korespondence, kreační a anihilační operátory, bosonový charakter fotonů.

3. Diskrétní a spojitý soustavy módů: spojitá varianta kanonických komutačních relací a Hamiltoniánu, módy optické dutiny a volného prostoru, přechod mezi časovou a frekvenční, souřadnicovou a hybnostní reprezentací, Gaussovy a Hermite–Gaussovy módy.
4. Významné stavy optických módů: Fockovy stavy, koherentní stavy, stlačené stavy, termální stavy, stlačené vakuum, zápisy rozkladu jednotkového operátoru, operace posunu a stlačování, koherentní, stlačené a jednočásticové stavy soustavy více módů.
5. Koherence a interference: kvantový popis děliče svazku, korelační funkce, Hanbury Brown–Twissův jev, Hong–Ou–Mandelův jev, Mach–Zehnderův interferometr, Michelsonův interferometr, průchod vlnového balíku, vakuové módy jako zdroj šumu a popis ztrát.
6. Detekce kvantového světla: měření intenzity a polarizace, popis interakce silného lokálního oscilátoru s měřeným polem, homodynní detektor, heterodynní detektor, kvadratury světelného módu, střední hodnota a střední kvadratická odchylka kvadratur.
7. Spinový moment hybnosti světla: kvantizace spinu jednoho fotonu, nedostupnost trojrozměrné reprezentace  $s=1$  operátorů, helicity a její pozorovatelná, Pauliho matice, Poincarého sféra polarizačních stavů, efekty měření, rotace a depolarizace jako geometrické transformace, polarizace jako nosič kvantového bitu informace.
8. Orbitální moment hybnosti světla: báze Laguerre–Gaussových módů, rozvětvená mřížka, spirální vlnová destička, prostorový modulátor, q-destička, kvantizace orbitálního momentu jednotlivého fotonu, konverze mezi spinovým a orbitálním momentem hybnosti.
9. Nelineární kvantová optika: nelineární závislost polarizace na intenzitě, vyšší harmonické složky, parametrické procesy druhého a třetího řádu, spontánní parametrická sestupná konverze jako stlačování, fázový soulad, generace jednotlivých fotonů.
10. Kvantová optika na fázovém prostoru: charakteristická funkce, Wignerova funkce, Glauber–Sudarshanova funkce, Husimiova funkce, kvazidistribuční vlastnosti, popis pozorovatelných veličin na fázovém prostoru, posun, stlačování a časový vývoj jako geometrické transformace fázového prostoru.

Obsah tohoto předmětu státních závěrečných zkoušek je dán povinnými předměty studijního programu:

02KO1 Kvantová optika 1

02KO2 Kvantová optika 2

Předmět **Teorie pevných látek** státních závěrečných zkoušek má tyto okruhy otázek:

1. Struktura a poruchy kondenzovaných látek – makroskopická souměrnost krystalů, krystalové mřížky, kapalně krystaly, nanokrystaly, amorfni látky.
2. Vazebné síly v krystalech, kmity krystalové mřížky (akustické a optické větve, fonony), měrné teplo krystalové mřížky.
3. Schrödingerova rovnice pro pevné látky (adiabatická aproximace, jedoelektronová aproximace), řešení Schrödingerovy rovnice v Hartreeho - Fockově aproximaci, Blochova teorie pohybu elektronů v periodickém poli krystalu.
4. Model volných elektronů v pevné látce, reciproký prostor, Fermiho energie a Fermiho plocha, hustota stavů. Základní metody výpočtů elektronové struktury pevných látek, pásová struktura různých druhů pevných látek.
5. Výpočet elektronové struktury pomocí teorie hustotního potenciálu. Kohn-Shamova rovnice, výměně-korelační potenciály. Popisy vlnové funkce v periodickém potenciálu.
6. Boltzmannova kinetická rovnice, rozptyl elektronů na kmitech mřížky a na ionizovaných příměsích, relaxační doba vodivostních elektronů v kovech a polovodičích, základní transportní jevy.
7. Fyzika kovů – model volných elektronů, elektrické, magnetické a tepelné vlastnosti, supravodivost.
8. Fyzika dielektrik – orientační, iontová a elektronová polarizace, optické vlastnosti, feroelektrika, fázové přechody.
9. Fyzika polovodičů – vlastní a příměsové polovodiče, elektrická vodivost, Hallův jev, kontaktní jevy, PN přechody, fotoelektrické vlastnosti, povrchové vlastnosti, tranzistory.



10. Magnetické vlastnosti pevných látek - fenomenologické teorie fero-, anti ferro- a feri- magnetizmu, Heisenbergova kvantová teorie feromagnetizmu, spinovná teorie feromagnetizmu. Výměnná, spin-orbitální a Zeemanova interakce.

Obsah tohoto předmětu státních závěrečných zkoušek je dán povinnými předměty studijního programu:

11TPLA1 Teorie pevných látek 1

11TPLA2 Teorie pevných látek 2

Předmět **Kvantové generátory optického záření** státních závěrečných zkoušek má tyto okruhy otázek:

1. Fyzikální model laseru – Liouvilleova rovnice pro laser jako uzavřený kvantový systém, základy kvantové teorie tlumení, markovovská aproximace a řídicí rovnice pro evoluci tlumené kvantové soustavy, Pauliho řídicí rovnice.
2. Poloklasická teorie interakce rezonančního záření s prostředím - hamiltonián interakce záření s prostředím, dvouhladinová aproximace, rovnice pro polarizaci a inverzi populace hladin dvouhladinového prostředí, teorie disperze a spektrální charakteristiky rezonančního prostředí
3. Šíření impulzu rezonančním prostředím – rovnice pro popis šíření signálu s pomalu proměnnou obálkou, zesílení a absorpce záření při nekoherentním šíření impulzů, jevy spojené s koherentním šířením impulzů.
4. Poloklasický popis laseru - rychlostní rovnice pro laser s krátkým rezonátorem, prahová podmínka generace laseru, výstupní charakteristika laseru, přechodový režim laseru, rychlostní rovnice pro Q-spínaný laser a jejich řešení, zesílená spontánní emise a laser bez rezonátoru.
5. Laserový rezonátor - otevřený rezonátor a jeho stabilita, módy otevřeného rezonátoru podélné a příčné a jejich spektrum, gaušovský svazek a jeho základní parametry, ztráty v laserovém rezonátoru, stabilizace a přeladování vlnové délky laserového záření.
6. Typy laserů a jejich základní charakteristiky – pevnolátkové lasery, plynové lasery, barvivové lasery, polovodičové lasery, rentgenové lasery, lasery s volnými elektrony.
7. Metody generace krátkých laserových impulzů – aktivní a pasivní Q-spínání a Q-spínače, spínání ziskem, režim a metody synchronizace módů, pásmově omezený impulz, vliv disperze a jeho kompenzace, tvarování ultrakrátkých impulzů.
8. Zesilování a generace nových vlnových délek laserového záření - vysokovýkonové zesilovače laserového záření, mezní výkon zesilovače, metody zesilování ultrakrátkých laserových impulzů, parametrické a ramanovské zesilovače a generátory, vysoko-energetické laserové systémy.
9. Plně kvantový popis laseru – kvazidistribuční funkce a uspořádání operátorů, evoluce kvazidistribuční funkce a Fokkerova-Planckova rovnice, hamiltonián interakce záření s prostředím, Fokkerova-Planckova rovnice pro laserový systém, adiabatická eliminace atomových proměnných, laser v aproximaci Van der Polova oscilátoru.
10. Aplikace laserového záření – aplikace laserového záření v průmyslu, aplikace laserového záření v medicíně, aplikace laserového záření při zpracování dat, využití koherence laserového záření v aplikacích, bezpečnost při práci s laserovým zářením.

Obsah tohoto předmětu státních závěrečných zkoušek je dán povinnými předměty studijního programu:

12KGOZ1 Kvantové generátory optického záření 1

12KGOZ2 Kvantové generátory optického záření 2

Předmět **Kvantová informace a komunikace** státních závěrečných zkoušek má tyto okruhy otázek:

1. Kvantová informace – qubit, čisté a smíšené stavy, Blochova sféra, von Neumannova entropie, kvantový registr.
2. Kvantové provázání – redukováná matice hustoty, Bellovy stavy, Bellovy nerovnosti, míry provázání, kvantová teleportace.
3. Diskriminace kvantových stavů – nemožnost klonování kvantového stavu, POVM měření, diskriminace s minimální chybou, jednoznačná diskriminace.
4. Kvantový přenos klíče - protokoly BB84 and BB92, bezpečnost kvantového přenosu klíče.
5. Kvantové brány a univerzalita – model kvantového počítání pomocí bran, základní kvantové brány, výpočetní univerzalnost.



6. Kvantové algoritmy – Deutschův algoritmus, Deutschův-Jozsův algoritmus, kvantová Fourierova transformace, Shorův algoritmus, RSA algoritmus, Groverův vyhledávací algoritmus, výpočetní složitost, kvantová výhoda.
7. Kvantová informace v realistických systémech – kvantové operace, dekoherence, kvantová korekce chyb.
8. Realizace kvantových obvodů – základní principy, lineární optika, dutinová kvantová elektrodynamika, iontové pasti.
9. Další přístupy ke kvantovému počítání – kvantové počítání založené na měření, adiabatické kvantové počítání.
10. Kvantové procházky – kvantová procházka na přímce ve spojitém a diskrétním čase, interference trajektorií, balistické šíření, kvantové procházky na konečných grafech, vyhledávání pomocí kvantové procházky.

Obsah tohoto předmětu státních závěrečných zkoušek je dán povinnými předměty studijního programu:

02KIK                      Quantum Information and Communication

### **Další studijní povinnosti**

Studijní plány určují studentům povinnost vypracovat a obhájit v rámci studentských projektů postupně dvě práce, vždy pod vedením jmenovaného školitele a na zadané téma odpovídající studijnímu programu. V prvním ročníku studia se jedná o výzkumný úkol, ve druhém ročníku o diplomovou práci. Výzkumný úkol studenti obhajují před jmenovanou komisí na katedře, diplomovou práci obhajují při státních závěrečných zkouškách. Ve standardních případech tyto práce na sebe navazují. Změna školitele a tématu mezi jednotlivými pracemi se ale přípouští. Nároky na samostatnost práce studenta a jeho originální přínos se postupně zvyšují.

### **Návrh témat magisterských prací a témata obhájených prací**

Úplné znění uvedených prací je k dispozici na webové stránce akreditačního spisu. Veškeré závěrečné práce jsou zveřejněny prostřednictvím systému Ústřední knihovny ČVUT v Praze, uloženy jsou v jejím lokálním pracovišti FJFI ČVUT v Praze, Břehová 7, Praha 1 a v elektronickém archivu prací FJFI ČVUT v Praze umožňujícím dálkový přístup. Závěrečné práce vedené externisty jsou pod dohledem určeného akademického pracovníka fakulty.

#### **Příklady obhájených magisterských (diplomových) prací s příbuznou tematikou:**

1. T. Štefková: *Lokalizace na manhattanské mřížce*, diplomová práce FJFI ČVUT v Praze, obor Matematická fyzika, katedra fyziky (KF), školitel I. Jex, 2018.
2. S. Skoupý: *Vyhledávání a přenos stavu pomocí kvantové procházky*, diplomová práce FJFI ČVUT v Praze, obor Matematická fyzika, KF, školitel M. Štefaňák, 2017.
3. J. Mareš: *Kvantové procházky na perkolovaných grafech*, diplomová práce FJFI ČVUT v Praze, obor Matematická fyzika, KF, školitel I. Jex, 2014.
4. J. Maryška: *Kvantové sítě s tříčásticovými interakcemi*, diplomová práce FJFI ČVUT v Praze, obor Matematická fyzika, KF, školitel I. Jex, 2013.
5. B. Csanaková: *Koherentně buzený Fe:CdMnTe laser*, diplomová práce FJFI ČVUT v Praze, obor Laserová technika a elektronika, katedra fyzikální elektroniky (KFE), školitel H. Jelínková, 2018.
6. J. Kratochvíl: *Laditelné lasery Tm:GGAG a Tm, Ho:GGAG*, diplomová práce FJFI ČVUT v Praze, obor Laserová technika a elektronika, KFE, školitel J. Šulc, 2018.
7. Z. Dočekalová: *Kvantové tunelování a nízkoteplotní zpožděná rekombinace v scintilačních materiálech*, diplomová práce FJFI ČVUT v Praze, obor Inženýrství pevných látek, katedra inženýrství pevných látek (KIPL), školitel E. Mihoková, 2014.
8. F. Hájek: *Luminiscence InGaN/GaN a InGaN/InGaN scintilačních heterostruktur*, diplomová práce FJFI ČVUT v Praze, obor Inženýrství pevných látek, katedra Inženýrství pevných látek (KIPL), školitel J. Oswald, 2018.

#### **Návrhy budoucích témat diplomových prací pro studijní program Kvantové technologie:**

1. *Interakce kvantových chodců způsobená měřením* (KF FJFI ČVUT v Praze)
2. *Vzorkování bosonů (Boson sampling)* (KF FJFI ČVUT v Praze)
3. *Interference fotonů z Gaussovských stavů* (KF FJFI ČVUT v Praze)
4. *Optimalizace diodově buzeného Nd:CaF<sub>2</sub>/SrF<sub>2</sub> laseru generujícího sub-pikosekundové pulsy* (KFE FJFI ČVUT v Praze)
5. *Neklasické kvantové stavy světla a možnosti jejich aplikací* (KFE FJFI ČVUT v Praze)
6. *Luminiscence nanodiamantových částic řízená povrchovou terminací: nové detekční principy* (KIPL FJFI ČVUT v Praze)
7. *Teoretické studium nábojových stavů v nanostrukturách* (KIPL FJFI ČVUT v Praze)

# BIII – Povinné předměty

Vysvětlivky:

Hlavní formy výuky: přednáška (p) / cvičení (c) / seminář (s) / laboratorní práce (l)

Způsoby zakončení: zápočet (z) / zkouška (zk) / klasifikovaný zápočet (kz)

Role vyučujících: garant předmětu (zodpovídá za realizaci předmětu) /

přednášející (vyučuje přednášky) /

cvičící (vyučuje cvičení) /

organizátor (organizuje výuku předmětu) /

zkoušející (uzavírá předmět způsoby jeho zakončení)

## 1. ročník

Název předmětu	Kód
Quantum Information and Communication	02KIK
Kvantová optika 1	02KO1
Kvantová teorie pole 1	02KTPA1
Kvantové generátory optického záření 1	12KGOZ1
Výzkumný úkol 1	00VUKT1
Kvantová optika 2	02KO2
Kvantová teorie pole 2	02KTPA2
Teorie pevných látek 1	11TPLA1
Kvantové generátory optického záření 2	12KGOZ2
Výzkumný úkol 2	00VUKT2

### B-III – Charakteristika studijního předmětu

<b>Název studijního předmětu</b>		Quantum Information and Communication					
<b>Typ předmětu</b>		povinný, ZT			<b>doporučený ročník / semestr</b>		1/Z
<b>Rozsah studijního předmětu</b>		39p+13c	<b>hod.</b>	52	<b>kreditů</b>	4	<b>kód</b> 02KIK
<b>Prerekvizity, korekvizity, ekvivalence</b>							
<b>Způsob ověření studijních výsledků</b>		zápočet, zkouška			<b>Forma výuky</b>	přednáška, cvičení	
<b>Forma způsobu ověření studijních výsledků a další požadavky na studenta</b>							
zápočet za aktivní účast na cvičení, písemná a ústní zkouška							
<b>Garant předmětu</b>		doc. Ing. Martin Štefaňák, PhD.					
<b>Zapojení garanta do výuky předmětu</b>		Přednášející, zkoušející					
<b>Vyučující</b>							
doc. Ing. Martin Štefaňák, PhD. - přednášející, zkoušející Aurél Gábris, Ph.D. - cvičící							
<b>Stručná anotace předmětu</b>							
<b>Poznámka:</b> Předmět je přednášen v angličtině.							
<b>Abstract:</b> Quantum theory brought new ideas to the theory of information leading which ultimately lead to the theory of quantum information, computation and communication. The lecture introduces the basic concepts of quantum information e.g. quantum algorithms (Shor's and Grover's), entanglement, quantum teleportation, quantum cryptography and quantum error correction. It also provides an introduction to modern parts of quantum information, e.g. measurement-based and adiabatic quantum computation and quantum walks.							
<b>Outline of the lecture:</b> 1. Qubit, Bloch sphere, von Neumann entropy 2. Quantum correlations, entanglement and its measures, reduced density operator 3. Quantum teleportation, quantum key distribution 4. Quantum gates and circuits, Deutsch algorithm, universal quantum gates 5. Shor's factorization, quantum Fourier transformation 6. Grover's search algorithm 7. Quantum operations, decoherence, POVM measurements 8. Quantum state discrimination 9. Quantum error correction 10. Measurement-based and adiabatic quantum computation 11. Realizations of quantum computing 12. Quantum walks							
<b>Outline of the exercises:</b> Solving problems to illustrate the theory from the lecture							
<b>Keywords:</b> Qubit, quantum gate, entanglement, Shor's algorithm, Grover's algorithm, state discrimination, quantum walks							
<b>Studijní literatura a studijní pomůcky</b>							
Key references: [1] M. A. Nielsen, I. L. Chuang, Quantum computation and quantum information, Cambridge Univ. Press, 2013. [2] J. A. A. Bergou, M. Hillery, Introduction to the Theory of Quantum Information Processing, Springer, 2015.							
Recommended references: [3] M. Dušek, Koncepční otázky kvantové teorie, Olomouc, 2002. (in Czech) [4] G. Alber, Quantum Information, Springer, Berlin 2002. [5] D. Bruss, G. Leuchs, Lectures on Quantum Information, Wiley-VCH, Weinheim, 2007.							

### B-III – Charakteristika studijního předmětu

Název studijního předmětu		Kvantová optika I					
Typ předmětu		povinný, ZT			doporučený ročník / semestr		4/Z
Rozsah studijního předmětu		26p+26c	hod.	52	kreditů	4	kód 02KO1
Prerekvizity, korekvizity, ekvivalence							
Způsob ověření studijních výsledků		zápočet, zkouška			Forma výuky	přednáška a cvičení	
Forma způsobu ověření studijních výsledků a další požadavky na studenta							
zápočet za aktivní účast na cvičení, písemná a ústní zkouška							
Garant předmětu		prof. Ing. Igor Jex, DrSc.					
Zapojení garanta do výuky předmětu		přednášející, zkoušející					
Vyučující							
prof. Ing. Igor Jex, DrSc. - přednášející, zkoušející Ing. Václav Potoček, Ph.D. - cvičící							
Stručná anotace předmětu							
<p><b>Anotace:</b></p> <p>Předmět vychází ze znalostí klasické teorie optiky a buduje nad ní kvantovou optiku jakožto semiklasickou teorii vhodnou pro popis chování světla v interakci s makroskopickými i mikroskopickými objekty. Přednáška si klade za cíl vybudovat robustní teorii umožňující popisovat a předpovídat množství jevů a poskytnout praktické metody k výpočtům.</p> <p><b>Osnova:</b></p> <ol style="list-style-type: none"> <li>1. Přehled klasické optiky: rovinné vlny, Gaussův paprsek, polarizace</li> <li>2. Kvantizace elektromagnetického pole, kanonické komutační relace, diskrétní a spojitý případ</li> <li>3. Matematické metody kvantové optiky, operátorové uspořádací teorémy</li> <li>4. Koherentní a stlačené stavy, statistické a neklasické stavy světla</li> <li>5. Interferometry a děliče paprsků: jednofotonový a koherentní obraz, model průchodu pulzu</li> <li>6. Homodynní a heterodynní optická detekce</li> <li>7. Kvantová korelace světla: Hanbury Brown–Twiss a Hong–Ou–Mandel</li> <li>8. Dutinová kvantová elektrodynamika, řídicí rovnice útlumu světla</li> <li>9. Interakce světla s atomem, Jaynes–Cummingsův model</li> <li>10. Nelineární optika a interakce fotonů v prostředí: PDC, Kerrův efekt</li> </ol> <p><b>Anotace cvičení:</b></p> <p>Procvičování příkladů na probraná témata – odpovídá osnově přednášky výše.</p> <p><b>Klíčová slova:</b></p> <p>optika, kvantová optika, Fockův prostor, foton, vakuum, koherentní stav, stlačený stav, interferometr</p>							
Studijní literatura a studijní pomůcky							
<p>Povinná literatura:</p> <p>[1] E. Wolf, L. Mandel, Optical coherence and quantum optics, Cambridge Univ. Press, Cambridge 1995          [2] G. New, Introduction to Nonlinear Optics, Cambridge Univ. Press, Cambridge 2011</p> <p>Doporučená literatura:</p> <p>[3] G. S. Agarwal, Quantum Optics, Cambridge Univ. Press, Cambridge 2012          [4] S. M. Barnett, P. M. Radmore, Methods in Theoretical Quantum Optics, Oxford University Press, Oxford 2002</p>							

### B-III – Charakteristika studijního předmětu

Název studijního předmětu	Kvantová teorie pole 1						
Typ předmětu	povinný, ZT			doporučený ročník / semestr			1/Z
Rozsah studijního předmětu	52p+26c	hod.	78	kreditů	8	kód	02KTPA1
Prerekvizity, korekvizity, ekvivalence							
Způsob ověření studijních výsledků	zápočet, zkouška			Forma výuky	přednáška a cvičení		
Forma způsobu ověření studijních výsledků a další požadavky na studenta	zápočet za aktivní účast na cvičení, písemná a ústní zkouška						
Garant předmětu	doc. Ing. Martin Štefaňák, Ph.D.						
Zapojení garanta do výuky předmětu	přednášející, zkoušející						
Vyučující							

doc. Ing. Martin Štefaňák, PhD. - přednášející, zkoušející

Ing. Petr Jizba, Ph.D. - přednášející

Ing Václav Zatloukal, Ph.D. - cvičící

## Stručná anotace předmětu

**Anotace:**

Přednáška si klade za cíl seznámit posluchače s technickou a aplikační stránkou kvantové teorie pole. Důraz probírané látky bude hlavně kladen na: rovnice relativistické kvantové mechaniky, kanonické kvantování skalárního a bispinorového pole, poruchový počet (Feynmanova pravidla) a základy renormalizace. Přednášený materiál může také sloužit jako vhodný základ pro další studium, např. v oblasti exaktně řešitelných systémů, teorii kritických jevů, molekulární chemii a biochemii či kvantové gravitaci.

**Osnova:**

1. Relativistické vlnové rovnice
  - a) Klein-Gordonova rovnice
  - b) Diracova rovnice
2. Lorentzova grupa a její reprezentace.
3. Invariance Diracovy rovnice vůči vlastním Lorentzovým transformacím a bilineární formy
4. Řešení Diracovy rovnice pro volnou částici
5. Nabitá relativistická částice ve vnějším elektromagnetickém poli
6. Kanonické kvantování skalárního pole
7. Algebra pozorovatelných a částicová interpretace
8. Kanonické kvantování Diracova pole
9. Symetrie a zákony zachování, teorém Noetherové
10. Feynmanův propagátor pro skalární a Diracovo pole
11. Interagující pole, Wickův teorém a poruchová teorie
12. Rozptylové procesy, S matice a Feynmanova pravidla
13. Učinný průřez a rozpad nestabilní částice
14. Renormalizace pro teorii  $\phi^4$

### Anotace cvičení:

Procvičování příkladů na probraná témata – odpovídá osnově přednášky výše.

**Klíčová slova:** Klein-Gordonova rovnice, Diracova rovnice, Kvantové skalární a bispinorové pole, Poruchový počet, Feynmanova pravidla, Renormalizace

## Studijní literatura a studijní pomůcky

Povinná literatura:

- [1] C. Itzykson a J.-B. Zuber, Quantum Field Theory, (Dover Publications, Inc., New York, 2005)  
[2] W. Greiner a J. Reinhard, Field Quantization, (Springer, New York, 2012)

Doporučená literatura:

- [3] P. Ramond, *Field Theory: A Modern Primer*, (Westview Press, London, 2001)
- [4] H. Kleinert, *Particles and Quantum Fields*, (World Scientific, London, 2017)

### B-III – Charakteristika studijního předmětu

<b>Název studijního předmětu</b>	Kvantové generátory optického záření 1						
<b>Typ předmětu</b>	povinný, ZT			<b>doporučený ročník / semestr</b>			1/Z
<b>Rozsah studijního předmětu</b>	26p	<b>hod.</b>	26	<b>kreditů</b>	2	<b>kód</b>	12KGOZ1
<b>Prerekvizity, korekvizity, ekvivalence</b>							
<b>Způsob ověření studijních výsledků</b>	zkouška			<b>Forma výuky</b>	přednáška		
<b>Forma způsobu ověření studijních výsledků a další požadavky na studenta</b>							
písemná a ústní zkouška							
<b>Garant předmětu</b>	prof. Ing. Helena Jelínková, DrSc.						
<b>Zapojení garanta do výuky předmětu</b>	přednášející, zkoušející						
<b>Vyučující</b>							
prof. Ing. Helena Jelínková, DrSc. - přednášející, zkoušející Ing. Michal Jelínek, PhD. - přednášející Ing. Michal Němec, PhD. - přednášející							
<b>Stručná anotace předmětu</b>							
<b>Anotace:</b> Cílem přednášky je seznámit posluchače s principy a elementy moderních kvantových generátorů optického záření a jejich technickým řešením.							
<b>Osnova:</b>							
<ol style="list-style-type: none"> <li>1. Světlo jako elektromagnetické záření. Látka jako soubor kvantových soustav. Interakce optického záření s látkou. Princip laseru.</li> <li>2. Klasifikace laserů a jednotlivé druhy dle aktivního prostředí.</li> <li>3. Laserový oscilátor. Laserový zesilovač. Impulsní a ustálený režim. Distorze zesilovaného signálu.</li> <li>4. Otevřené rezonátory. Stabilita. Módy podélné a příčné. Prvky otevřených rezonátorů. Podmínka generace laseru.</li> <li>5. Gaussovský svazek jako aplikace základního příčného módu. ABCD metoda. Šíření optického záření rezonančním prostředím.</li> <li>6. Dynamika generace laseru. Rychlostní rovnice pro různé režimy generace laseru.</li> <li>7. Q-spínání. Akustooptické a elektrooptické modulátory a Q-spínače.</li> <li>8. Synchronizace módů. Nelineární prvky pro modulaci Q a generaci harmonických frekvencí.</li> <li>9. Generace záření nových vlnových délek pomocí stimulovaného Ramanova rozptylu. Up-konverzní lasery.</li> <li>10. Vysokovýkonové zesilovače. Mezní výkon. Lasery s volnými elektrony.</li> <li>11. Lasery s vysokým stupněm koherence. Řízení doby trvání laserového impulsu. Metody generace velmi krátkých laserových impulsů. Vysoko-energetické laserové systémy.</li> <li>12. Koherentní a nekoherentní šíření impulsu. Optické solitony. Fotonové echo. Superradiace. Zesílená spontánní emise. Lasery bez rezonátoru.</li> </ol>							
<b>Klíčová slova:</b> Laserový generátor, laserový zesilovač, koherentní záření, Gaussovské svazky, laserová technika							
<b>Studijní literatura a studijní pomůcky</b>							
Povinná literatura:							
[1] O. Svelto. Principles of lasers. Springer, 2010							
[2] M. Dantus. Femtosecond Laser Shaping: From Laboratory to Industry. CRC Press 2017							
Doporučená literatura:							
[3] R. Paschotta. Encyclopedia of laser physics and technology. Wiley-VCH, Berlin 2008							
[4] G. A. Reider. Photonics. Springer, 2016							



### B-III – Charakteristika studijního předmětu

Název studijního předmětu	Výzkumný úkol 1						
Typ předmětu	povinný			Doporučený ročník / semestr			1/2
Rozsah studijního předmětu	78c	Hodin	78	Kreditů	6	Kód	00VUKT1
Prerekvizity, korekvizity, ekvivalence							
Způsob ověření studijních výsledků	zápočet		Forma výuky	samostatná práce			
Forma způsobu ověření studijních výsledků a další požadavky na studenta							
zápočet za aktivní činnost v rámci tématu práce							
Garant předmětu	doc. Ing. Martin Štefaňák, Ph.D.						
Zapojení garanta do výuky předmětu	organizace předmětu, zkoušející						
Vyučující							
doc. Ing. Martin Štefaňák, Ph.D.		organizace předmětu, zkoušející					
Ing. Jan Šulc, Ph.D.		organizace předmětu					
Ing. Petr Sedlák, Ph.D.		organizace předmětu					
Stručná anotace předmětu							
<b>Anotace:</b> Výzkumný úkol na zvoleném tématu probíhá pod vedením vybraného školitele, na základě zadání schváleného garantem oboru a vedoucím katedry. Školitel pravidelně dohlíží na činnost studenta v průběhu semestru formou osobních schůzek a konzultací.							
<b>Osnova:</b> Téma výzkumného úkolu a pokyny pro její vypracování jsou obsaženy v zadání.							
Zápočet je studentovi udělen, jestliže školitel potvrdí aktivní práci studenta na zadaném tématu a dostatečný pokrok v plnění zadání práce.							
<b>Klíčová slova:</b> Výzkumný úkol.							
Studijní literatura a studijní pomůcky							
Literatura a další pomůcky jsou dány zadáním práce.							

### B-III – Charakteristika studijního předmětu

<b>Název studijního předmětu</b>	Kvantová optika 2						
<b>Typ předmětu</b>	povinný, PZ			<b>doporučený ročník / semestr</b>			4/L
<b>Rozsah studijního předmětu</b>	26p+26c	<b>hod.</b>	52	<b>kreditů</b>	4	<b>kód</b>	02KO2
<b>Prerekvizity, korekvizity, ekvivalence</b>							
<b>Způsob ověření studijních výsledků</b>	zápočet, zkouška			<b>Forma výuky</b>	přednáška a cvičení		
<b>Forma způsobu ověření studijních výsledků a další požadavky na studenta</b>							
zápočet za aktivní účast na cvičení, písemná a ústní zkouška							
<b>Garant předmětu</b>	prof. Ing. Igor Jex, DrSc.						
<b>Zapojení garanta do výuky předmětu</b>	přednášející, zkoušející						
<b>Vyučující</b>							
prof. Ing. Igor Jex, DrSc. - přednášející, zkoušející Ing. Václav Potoček, Ph.D. - cvičící							

### Stručná anotace předmětu

**Anotace:**

Přednáška navazuje na Kvantovou optiku 1 a doplňuje moderní oblasti terminologie a výpočetních metod moderní kvantové optiky ve fázovém prostoru. Rovněž rozšiřuje aplikační oblast na kontinua módů a disipativní procesy. Zahrnuje i stručný přehled současných výzkumných oblastí v teoretické i praktické rovině a aplikací kvantové optiky v experimentálním výzkumu.

## Osnova:

1. Popis stavu světla ve fázovém prostoru: charakteristická a Wignerova funkce
2. Měření Wignerovy funkce: inverzní Radonova transformace
3. Další kvazidistribuční funkce: Glauber–Sudarshan, Husimi, Dirac
4. Popis typických stavů světla pomocí kvazidistribučních funkcí
5. Operace posunu, stlačování a časového vývoje jako transformace fázového prostoru
6. Disipativní procesy, Wigner–Weisskopfův model, Fermiho zlaté pravidlo
7. Mechanické efekty světla na atomech, Ramanův rozptyl
8. Spinový a orbitální moment hybnosti světla, optické elementy pro manipulaci s nimi
9. Praktická kvantová optika: laserové chlazení, magneto-optické pasti, optické mřížky
10. Fotony jako nosič kvantové informace, kvantová komunikace

**Anotace cvičení:**

Procvičování příkladů na probraná témata – odpovídá osnově přednášky výše.

**Klíčová slova:**

kvantová optika, fázový prostor, Wignerova funkce, kvazidistribuční funkce, orbitální moment hybnosti světla

## Studijní literatura a studijní pomůcky

9	Povinná literatura:
---	---------------------

- [1] W. P. Schleich, *Quantum Optics in Phase Space*, Wiley-VCH, Berlin 2001  
[2] G. S. Agarwal, *Quantum Optics*, Cambridge Univ. Press, Cambridge 2012

Doporučená literatura:

- [3] S. M. Barnett, P. M. Radmore, *Methods in Theoretical Quantum Optics*, Oxford University Press, Oxford 2002

### B-III – Charakteristika studijního předmětu

<b>Název studijního předmětu</b>	Kvantová teorie pole 2						
<b>Typ předmětu</b>	povinný, PZ			<b>doporučený ročník / semestr</b>			1/L
<b>Rozsah studijního předmětu</b>	52p+26c	<b>hod.</b>	78	<b>kreditů</b>	8	<b>kód</b>	02KTPA2
<b>Prerekvizity, korekvizity, ekvivalence</b>							
<b>Způsob ověření studijních výsledků</b>	zápočet, zkouška			<b>Forma výuky</b>	přednáška a cvičení		
<b>Forma způsobu ověření studijních výsledků a další požadavky na studenta</b>							
zápočet za aktivní účast na cvičení, písemná a ústní zkouška							
<b>Garant předmětu</b>	doc. Ing. Martin Štefaňák, PhD.						
<b>Zapojení garanta do výuky předmětu</b>	přednášející, zkoušející						
<b>Vyučující</b>							
doc. Ing. Martin Štefaňák, PhD. - přednášející, zkoušející Ing. Petr Jizba, Ph.D. - přednášející Ing Václav Zatloukal, Ph.D. - cvičící							
<b>Stručná anotace předmětu</b>							
<b>Anotace:</b> Přednáška si klade za cíl seznámit posluchače s technickou a aplikační stránkou Feynmanova funkcionálního integrálu. Přednáška se soustřeďuje na prohloubení znalosti v moderních pasážích relativistické a nerelativistické kvantové teorie pole a statistické fyziky. Přednášený materiál může také sloužit jako vhodný základ pro další studium, např. v oblasti exaktně řešitelných systémů, teorii kritických jevů, molekulární chemii a biochemii či kvantové gravitaci.							
<b>Osnova:</b> 1. První kvantování pomocí dráhového integrálu 2. Druhé kvantování a funkcionální integrál 2. Funkcionální integrály, partiční suma a Wickův teorém 3. Teorem E. Noetherové a anomálie 4. Poruchový počet Greenových funkcí prostřednictvím Feynmanových diagramů – skalární pole, generující funkcionály $W$ a $\Gamma$ 5. Grassmannovy proměnné a Berezinův funkcionální integrál pro fermionovská pole 6. Poruchový počet Greenových funkcí prostřednictvím Feynmanových diagramů – fermionovská pole 7. S-matrice a LSZ formalismus 8. Goldstonův teorém a Higgsův mechanismus 9. Kalibrační pole a jejich kvantování 10. Callan-Symanzikova rovnice renormalizační grupy a $\beta$ funkce 11. Některé spektrální vlastnosti 2-bodových korelačních funkcí							
<b>Anotace cvičení:</b> Procvičování příkladů na probraná témata – odpovídá osnově přednášky výše.							
<b>Klíčová slova:</b> Funkcionální integrál, Poruchový počet, Kalibrační pole, Feynmanovy diagramy, Spontánní narušení symetrie							
<b>Studijní literatura a studijní pomůcky</b>							
Povinná literatura: [1] M. Blasone, P. Jizba and G. Vitiello, Quantum Field Theory and its Macroscopic Manifestations, Boson Condensation, Ordered Patterns and Topological Defects, (Imperial College Press, London, 2011) [2] A. Altland and B. Simons, Condensed Matter Field Theory, (Cambridge University Press, Singapore, New York, 2013)							
Doporučená literatura: [3] E. Fradkin, Field Theories of Condensed Matter Physics, (Cambridge University Press, New York, 2013) [4] H. Kleinert, Particles and Quantum Fields, (World Scientific, London, 2017)							

## B-III – Charakteristika studijního předmětu

Název studijního předmětu	Teorie pevných látek 1						
Typ předmětu	povinný, ZT			doporučený ročník / semestr		1/L	
Rozsah studijního předmětu	26p+26c	hod.	52	kreditů	4	kód	11TPLA1
Prerekvizity, korekvizity, ekvivalence							
Způsob ověření studijních výsledků	zápočet, zkouška			Forma výuky	přednáška a cvičení		
Forma způsobu ověření studijních výsledků a další požadavky na studenta							
zápočet za aktivní účast na cvičení, písemná a ústní zkouška							
Garant předmětu	doc. Ing. Hanuš Seiner, Ph.D.						
Zapojení garanta do výuky předmětu	přednášející, zkoušející						
Vyučující							

doc. Ing. Hanuš Seiner, Ph.D. - přednášející, zkoušející  
Mgr. Jaroslav Hamrle, Ph.D. - cvičící

### Stručná anotace předmětu

#### Anotace:

Obsahem přednášky je výklad základních fyzikálních vlastností krystalických pevných látek (PL). Posluchače uvede do teorie pásové struktury PL a vysvětlí základní rozdělení PL na kovy, polovodiče a dielektrika. Obsahem jsou též magnetické vlastnosti PL, supravodivost a vlastnosti povrchů - obory, jež jsou nejvíce zmiňovány v souvislosti se stavbou kvantových počítačů.

#### Osnova:

1. Chemické vazby v PL
2. Struktura krystalů
3. Mechanické vlastnosti PL
4. Tepelné vlastnosti PL
5. Klasická teorie elektrické vodivosti kovů.
6. Kvantová teorie elektrické vodivosti kovů.
7. Polovodiče
8. Dielektrika
9. Magnetické vlastnosti PL
10. Supravodivost
11. Povrchy na nanostruktury
12. Akustické a optické fonony, plazmony, magnony

#### Anotace cvičení:

Procvičování příkladů na probraná témata – odpovídá osnově přednášky výše.

**Klíčová slova:** fyzikální vlastnosti krystalů, kovy, polovodiče, dielektrika

### Studijní literatura a studijní pomůcky

Povinná literatura:

- [1] Steven H. Simon: The Oxford Solid State Basics, OUP Oxford, 2013
- [2] Philip Hofmann: Solid State Physics: An Introduction, 2008

Doporučená literatura:

- [3] Charles Kittel: Introduction to Solid State Physics, 8th Edition, 2005

### B-III – Charakteristika studijního předmětu

<b>Název studijního předmětu</b>	Kvantové generátory optického záření 2						
<b>Typ předmětu</b>	povinný, PZ			<b>doporučený ročník / semestr</b>			1/L
<b>Rozsah studijního předmětu</b>	26p+26c	<b>hod.</b>	52	<b>kreditů</b>	4	<b>kód</b>	12KGOZ2
<b>Prerekvizity, korekvizity, ekvivalence</b>							
<b>Způsob ověření studijních výsledků</b>	zápočet, zkouška			<b>Forma výuky</b>	přednáška, cvičení		
<b>Forma způsobu ověření studijních výsledků a další požadavky na studenta</b>							
zápočet za aktivní účast na cvičeních, písemná a ústní zkouška							
<b>Garant předmětu</b>	Ing. Jan Šulc, Ph.D.						
<b>Zapojení garanta do výuky předmětu</b>	přednášející, cvičící, zkoušející						
<b>Vyučující</b>							
Ing. Jan Šulc, Ph.D. - přednášející, cvičící, zkoušející							
<b>Stručná anotace předmětu</b>							

**Anotace:**

Předmět je zaměřen na odvození zákonitosti činnosti kvantových generátorů z obecných principů kvantové statistické fyziky. Přednáška si klade za cíl uvést teoretické základy činnosti laserového generátoru s využitím poloklasického a plně kvantového popisu interakce rezonančního záření s vázanými elektrony.

## Osnova přednášky:

1. Fyzikální model laseru – laser jako uzavřený systém, Liouvilleova rovnice
2. Kvantová teorie tlumení – řídicí rovnice pro evoluci tlumené kvantové soustavy
3. Poloklasická teorie interakce záření s prostředím – odezva dvouhladinového rezonančního prostředí
4. Šíření stacionárních signálů, disperzní vlastnosti rezonančního prostředí
4. Poloklasický popis šíření optických impulzů
5. Dynamika laserů v aproximaci rychlostních rovnic
6. Spektrální vlastnosti laserového záření - přitahování frekvencí, homogenní a nehomogenní rozšíření čáry
7. Generace ultrakrátkých impulzů – laser se synchronizovanými módy, odvození parametrů generovaného záření
8. Kvantový popis obecných systémů - kvazidistribuční funkce pro popis stavu elektromagnetického pole, časový vývoj kvazidistribuční funkce, Fokkerova-Planckova rovnice pro tlumený harmonický oscilátor
9. Fokkerova-Planckova rovnice pro soubor tříhladinových kvantových soustav
10. Kvantová teorie laseru - kvantový model laseru, Fokkerova-Planckova rovnice pro laserový systém

### Osnova cvičení:

1. Evoluce statistického operátoru, poruchová teorie
2. Řídící rovnice v interakčním a Schrödingerově obraze
3. Řídící rovnice pro tlumený harmonický oscilátor
4. Disperzní a nelineární vlastnosti rezonančního prostředí
5. Laserový zesilovač, saturace zesílení, ztráty, ASE
6. Numerický model volné generace a Q-spínání laseru, pasivní Q-spínání
7. Kvazidistribuční funkce pro vybrané stavy elektromagnetického pole
8. Uspořádání operátorů obecných kvantových systémů, operátory nezávislých kvantových soustav
9. Řešení Fokkerovy-Planckovy rovnice pro tlumený harmonický oscilátor
10. Řešení Fokkerovy-Planckovy rovnice pro laser v aproximaci Van der Polova oscilátoru

**Klíčová slova:**

Fyzika laserů, poklasická teorie laseru, řídící rovnice, šíření rezonančního záření, plně kvantová teorie laseru, Fokkerova-Planckova rovnice, rychlostní rovnice

## Studijní literatura a studijní pomůcky

Povinná literatura:

- [1] Vrbová, M., Šulc, J.: Interakce rezonančního záření s látkou, Skriptum ČVUT, Praha, 2006.  
[2] Drummond, P. D., Hillery, M.: The Quantum Theory of Nonlinear Optics, Cambridge University Press, 2014.

Doporučená literatura:

- [3] Louisell, W. H.: Quantum statistical properties of radiation, John Wiley & Sons, New York, 1973. (dostupné v knihovně FJFI ČVUT)
- [4] Orszag, M.: Quantum Optics, Springer, 2016.
- [5] Saleh, B. E. A., Teich, M. C.: Základy fotoniky - 3. díl, Matfyzpress, Praha, 1995.

### B-III – Charakteristika studijního předmětu

Název studijního předmětu	Výzkumný úkol 2						
Typ předmětu	povinný			Doporučený ročník / semestr			1/L
Rozsah studijního předmětu	104c	Hodin	104	Kreditů	8	Kód	00VUKT2
Prerekvizity, korekvizity, ekvivalence							
Prerekvizity absolvování předmětu 00VUKT1							
Způsob ověření studijních výsledků	klasifikovaný zápočet		Forma výuky		samostatná práce		
Forma způsobu ověření studijních výsledků a další požadavky na studenta							
Práce jsou průběžně kontrolovány školitelem a příslušnou katedrou, klasifikovaný zápočet udělen po úspěšné obhajobě před komisí.							
Garant předmětu	doc. Ing. Martin Štefaňák, Ph.D.						
Zapojení garanta do výuky předmětu	organizace předmětu, zkoušející						
Vyučující							
doc. Ing. Martin Štefaňák, Ph.D.		organizace předmětu, zkoušející					
Ing. Jan Šulc, Ph.D.		organizace předmětu					
Ing. Petr Sedlák, Ph.D.		organizace předmětu					
Stručná anotace předmětu							
<b>Anotace:</b> Výzkumný úkol na zvoleném tématu probíhá pod vedením vybraného školitele, na základě zadání schváleného garantem oboru a vedoucím katedry. Školitel pravidelně dohlíží na činnost studenta v průběhu semestru formou osobních schůzek a konzultací.							
<b>Osnova:</b> Téma výzkumného úkolu a pokyny pro její vypracování jsou obsaženy v zadání.							
Klasifikovaný zápočet je studentovi udělen, jestliže splní požadavky zadání práce a odevzdá řádně vypracovaný výzkumný úkol dle formálních pravidel předepsaných katedrou a obhájí jej před komisí určenou garantujícím pracovištěm.							
<b>Klíčová slova:</b> Výzkumný úkol.							
Studijní literatura a studijní pomůcky							
Literatura a další pomůcky jsou dány zadáním práce.							



## **BIII – Povinné předměty**

### **2. ročník**

Název předmětu	Kód
Kvantová teorie pole 3	02KTPA3
Teorie pevných látek 2	11TPLA2
Diplomová práce 1	00DPKT1
Diplomová práce 2	00DPKT2

### B-III – Charakteristika studijního předmětu

Název studijního předmětu		Kvantová teorie pole 3					
Typ předmětu		povinný			doporučený ročník / semestr		2/Z
Rozsah studijního předmětu		52p+26c	hod.	78	kreditů	8	kód 02KTPA 3
Prerekvizity, korekvizity, ekvivalence		Prerekvizity absolvování předmětů 02KTPA1, 02KTPA2					
Způsob ověření studijních výsledků		zápočet, zkouška			Forma výuky		přednáška, cvičení
Forma způsobu ověření studijních výsledků a další požadavky na studenta		zápočet za aktivní účast na cvičení, písemná a ústní zkouška					
Garant předmětu		Ing. Petr Jizba, Ph.D.					
Zapojení garanta do výuky předmětu		přednášející, zkoušející					
Vyučující		Ing. Petr Jizba, Ph.D. - přednášející, zkoušející Ing Václav Zatloukal, Ph.D. - cvičící					
Stručná anotace předmětu		<p><b>Anotace:</b></p> <p>Přednáška si klade za cíl seznámit posluchače s pokročilejšími partiemi Feynmanova funkcionálního integrálu. Přednáška se soustřeďuje na prohloubení znalosti v moderních pasážích relativistické a nerelativistické kvantové teorie pole a statistické fyziky. Přednášený materiál může také sloužit jako vhodný základ pro další studium, např. v oblasti exaktně řešitelných systémů, teorii kritických jevů, molekulární chemii a biochemii či kvantové gravitaci.</p> <p><b>Osnova:</b></p> <ol style="list-style-type: none"> <li>1. Teorie neabelovských Yang-Millsových polí, volba kalibrace a Faddeev-Popovův determinant</li> <li>2. Dimenzionální regularizace</li> <li>3. Efektivní akce a efektivní potenciál</li> <li>4. Dimenzionální transmutace a Cellemann-Weinbergův mechanismus</li> <li>5. Spontánní narušení symetrie (Higgsův mechanismus) a kolektivní jevy</li> <li>6. Renormalizační grupa, Wetterich-Polchinski funkcionální renormalizační grupa a jednoduché aplikace</li> <li>7. Topologické systémy</li> <li>8. Kvantová teorie pole při konečných teplotách</li> <li>9. Nerovnovážné kvantově polní systémy</li> </ol> <p><b>Anotace cvičení:</b></p> <p>Procvičování příkladů na probraná témata – odpovídá osnově přednášky výše.</p> <p><b>Klíčová slova:</b></p> <p>neabelovská Yang-Millsovská pole, Vicesmyčkové poruchové efekty, Topologické systémy, Kvantování při konečných teplotách</p>					
Studijní literatura a studijní pomůcky		<p>Povinná literatura:</p> <p>[1] M. Blasone, P. Jizba and G. Vitiello, Quantum Field Theory and its Macroscopic Manifestations, Boson Condensation, Ordered Patterns and Topological Defects, (Imperial College Press, London, 2011)</p> <p>[2] A. Altland and B. Simons, Condensed Matter Field Theory, (Cambridge University Press, Singapore, New York, 2013)</p> <p>Doporučená literatura:</p> <p>[3] E. Fradkin, Field Theories of Condensed Matter Physics, (Cambridge University Press, New York, 2013)</p> <p>[4] H. Kleinert, Particles and Quantum Fields, (World Scientific, London, 2017)</p>					

### B-III – Charakteristika studijního předmětu

<b>Název studijního předmětu</b>	Teorie pevných látek 2						
<b>Typ předmětu</b>	povinný, PZ			<b>doporučený ročník / semestr</b>			2/Z
<b>Rozsah studijního předmětu</b>	26p+26c	<b>hod.</b>	52	<b>kreditů</b>	4	<b>kód</b>	11TPLA2
<b>Prerekvizity, korekvizity, ekvivalence</b>							
<b>Způsob ověření studijních výsledků</b>	zápočet, zkouška			<b>Forma výuky</b>	přednáška a cvičení		
<b>Forma způsobu ověření studijních výsledků a další požadavky na studenta</b>							
zápočet za aktivní účast na cvičení, písemná a ústní zkouška							
<b>Garant předmětu</b>	Mgr. Jaroslav Hamrle, Ph.D.						
<b>Zapojení garanta do výuky předmětu</b>	přednášející, cvičící, zkoušející						
<b>Vyučující</b>							
Mgr. Jaroslav Hamrle, Ph.D. - přednášející, cvičící, zkoušející							

### Stručná anotace předmětu

**Anotace:** Obsah přednášky vychází z kvantově-mechanického popisu krystalických pevných látek (PL) a poskytuje solidní základ teoretického popisu základních fyzikálních vlastností PL.

**Osnova:**

1. Pole fermionů, Hartreeho-Fokova aproximace, variační princip výpočtu základního stavu.
2. Mnohočásticové kvantové systémy, elektronový plyn, teorie hustotního potenciálu.
3. Metoda téměř volných elektronů, metoda těsně vázaných elektronů.
4. Jednoelektronové popisy vlnové funkce v pevné látce, APW, OPW, pseudopotenciály.
5. Blochovy funkce, Wannierovy funkce.
6. Brillouinova zóna, symetrie.
7. Elektron-fononová interakce, polarony.
8. Dynamika elektronů v magnetickém poli: de Hass-van Alphenův jev, cyklotronová rezonance.
9. Výpočet pásové struktury a Fermiho ploch.
10. Polovodiče: pásová struktura, příměšové stavy, cyklotronová rezonance.
11. Topologické vlastnosti PL, Berryho křivost, Chernův náboj, povrchové elektronové stavy.
12. Aplikace Greenových funkcí v PL.

### Anotace cvičení:

Procvičování příkladů na probraná témata – odpovídá osnově přednášky výše.

**Klíčová slova:**

mnohočasticové kvantové systémy, Blochovy funkce, Greenovy funkce, kvazičástice v PL

## Studijní literatura a studijní pomůcky

Povinná literatura:
---------------------

- [1] Steven H. Simon: The Oxford Solid State Basics, OUP Oxford, 2013  
[2] J. Patterson, B. Bailey, Solid State Physics: Introduction to the Theory, 2010

Doporučená literatura:

- [3] R.M. Martin, *Electronic Structure: Basic Theory and Practical Methods*, 2012  
 [4] Philip Hofmann: *Solid State Physics: An Introduction*, 2008

### B-III – Charakteristika studijního předmětu

Název studijního předmětu	Diplomová práce 1						
Typ předmětu	povinný			Doporučený ročník / semestr			2/Z
Rozsah studijního předmětu	130c	Hodin	130	Kreditů	10	Kód	00DPKT1
Prerekvizity, korekvizity, ekvivalence							
Prerekvizity absolvování předmětu 00VUKT2							
Způsob ověření studijních výsledků	zápočet		Forma výuky	samostatná práce			
Forma způsobu ověření studijních výsledků a další požadavky na studenta							
zápočet za aktivní činnost v rámci tématu práce							
Garant předmětu	doc. Ing. Martin Štefaňák, Ph.D.						
Zapojení garanta do výuky předmětu	organizace předmětu, zkoušející						
Vyučující							
doc. Ing. Martin Štefaňák, Ph.D.		organizace předmětu, zkoušející					
Ing. Jan Šulc, Ph.D.		organizace předmětu					
Ing. Petr Sedlák, Ph.D.		organizace předmětu					
Stručná anotace předmětu							
<b>Anotace</b> Diplomová práce na zvoleném tématu probíhá pod vedením vybraného školitele, na základě zadání schváleného garantem, vedoucím katedry a děkanem. Školitel pravidelně dohlíží na činnost studenta v průběhu semestru formou osobních schůzek a konzultací.							
<b>Osnova:</b> Téma diplomové práce a pokyny pro její vypracování jsou obsaženy v zadání.							
Zápočet je studentovi udělen, jestliže školitel potvrdí aktivní práci studenta na zadaném tématu a dostatečný pokrok v plnění zadání práce.							
<b>Klíčová slova:</b> Diplomová práce.							
Studijní literatura a studijní pomůcky							
Literatura a další pomůcky jsou dány zadáním práce.							

### B-III – Charakteristika studijního předmětu

<b>Název studijního předmětu</b>	Diplomová práce 2						
<b>Typ předmětu</b>	povinný			<b>Doporučený ročník / semestr</b>			2/L
<b>Rozsah studijního předmětu</b>	260c	<b>Hodin</b>	260	<b>Kreditů</b>	20	<b>Kód</b>	00DPKT2
<b>Prerekvizity, korekvizity, ekvivalence</b>							
<b>Prerekvizity</b> absolvování předmětu 00DPKT1							
<b>Způsob ověření studijních výsledků</b>	zápočet			<b>Forma výuky</b>	samostatná práce		
<b>Forma způsobu ověření studijních výsledků a další požadavky na studenta</b>							
zápočet za aktivní činnost v rámci tématu práce							
<b>Garant předmětu</b>	doc. Ing. Martin Štefaňák, Ph.D.						
<b>Zapojení garanta do výuky předmětu</b>	organizace předmětu, zkoušející						
<b>Vyučující</b>							
doc. Ing. Martin Štefaňák, Ph.D.		organizace předmětu, zkoušející					
Ing. Jan Šulc, Ph.D.		organizace předmětu					
Ing. Petr Sedlák, Ph.D.		organizace předmětu					
<b>Stručná anotace předmětu</b>							
<b>Anotace</b> Diplomová práce na zvoleném tématu probíhá pod vedením vybraného školitele, na základě zadání schváleného garantem, vedoucím katedry a děkanem. Školitel pravidelně dohlíží na činnost studenta v průběhu semestru formou osobních schůzek a konzultací.							
<b>Osnova:</b> Téma diplomové práce a pokyny pro její vypracování jsou obsaženy v zadání.							
Zápočet je studentovi udělen, jestliže splní požadavky zadání práce a odevzdá řádně vypracovanou diplomovou práci dle formálních pravidel předepsaných katedrou.							
<b>Klíčová slova:</b> Diplomová práce.							
<b>Studijní literatura a studijní pomůcky</b>							
Literatura a další pomůcky jsou dány zadáním práce.							