

OPĆE INFORMACIJE		
Naziv kolegija	Napredna kvantna mehanika	
Studijski program	Sveučilišni DIPLOMSKI STUDIJ FIZIKA	
Status kolegija	Obvezni	
Semestar	1.	
Bodovna vrijednost i način izvođenja nastave	ECTS bodovi	8
	Broj sati (P+V+S)	45+30+15
Nositelj kolegija	doc. dr. sc. Arash Ranjbar	
Kontakt	aranjbar@phy.uniri.hr	
Vrijeme i mjesto konzultacija	Po dogovoru	
Suradnik na kolegiju	Velimir Labinac, v. pred.	
Kontakt	vlabinac@uniri.hr	
Vrijeme i mjesto konzultacija	Po dogovoru	
Jezik izvođenje nastave	Engleski	
Web stranica kolegija	Portal sustava Merlin (srce.hr)	
Vrijeme i mjesto izvođenja nastave	Prema rasporedu sati objavljenom na mrežnoj stranici Fakulteta za fiziku.	
Izravna (učionička) nastava	45P+30V+15S, 100 %	
Virtualna nastava	0%	
Ispitni rokovi	03.02.2027.	
	17.02.2027.	
	02.07.2027.	
	03.09.2027.	

OPIS KOLEGIJA	
1.1. Ciljevi kolegija	Uvod u temeljne postulate kvantne mehanike, razumijevanje matematičkog okvira kvantne mehanike, a posebno koncepta simetrija i očuvanih naboja koji su u osnovi kvantno-mehaničkih sustava. Uvod u približne i varijacijske metode u kvantnoj mehanici i učenje naprednih tema iz kvantne mehanike s modernim primjenama, poput teorije raspršenja i prepletenosti.
1.2. Uvjeti za upis kolegija	Završen preddiplomski studij, potrebno je predznanje iz kolegija Kvantna mehanika, Klasična mehanika i Elektrodinamika.
1.3. Očekivani ishodi učenja za kolegij	Postizanje visoke razine razumijevanja koncepata, metoda, tehnika i matematičkog formalizma kvantne mehanike koja omogućuje studentima da budu pripremljeni ne samo za napredne tečajeve Atomske i molekularne fizike, Fizike čvrstog stanja i astrofizike i fizike elementarnih čestica, već i za aktivno sudjelovanje u znanstvenim istraživanjima. Ishodi uglavnom uključuju razumijevanje:

11. Principa simetrije u kvantnim sustavima
12. Približnih i varijacijskih tehnika prikladnih za rješavanje perturbativnih rješenja kvantne mehanike
13. Teorije raspršenja i S-matrice u kvantnoj mehanici
14. Kvantne obrade nabijenih čestica u elektromagnetskim poljima
15. Nelokalnih značajki kvantne mehanike i primjena

1.4. Sadržaj kolegija

Pregled osnova kvantne mehanike (QM): Stanja, Hilbertov prostor, Vjerojatnost, Stanja kontinuuma, Delta funkcije, Distribucije, Opservable, Operatori, Matrični prikaz, princip neodređenosti, projekcijski operatori

Simetrije i zakoni očuvanja u QM-u: Unitarni operatori, Wignerov teorem, Neunitarni operatori, Translacijske simetrije u QM-u, prostorne i vremenske translacije, Spin, Rotacijska simetrija, Multipleti kutnog momenta, Bozoni i fermioni, Unutarne simetrije, Diskretne simetrije

Aproksimativne metode i vremenski neovisna teorija perturbacija: Teorija perturbacija prvog reda, Nedegenerirana i degenerirana stanja, Zeemanov efekt, Starkov efekt prvog reda, Teorija perturbacija drugog reda, UV i IR divergencije, Starkov efekt drugog reda

Varijacijske metode u QM-u: Born-Oppenheimerova aproksimacija, WKB aproksimacija, Slomljene simetrije

Aproksimativne metode i vremenski ovisna teorija perturbacija: Teorija perturbacija prvog reda, vremenski ovisni potencijali, interakcijska slika, primjene, adijabatska aproksimacija, Berryjeva faza

Teorija raspršenja: Raspršenje potencijala, Lippmann-Schwingerova jednadžba, amplituda raspršenja, optički teorem, Bornova aproksimacija, Coulombovo raspršenje, Eikonalova aproksimacija, S-matrica, parcijalno širenje vala, vremenski ovisna teorija perturbacije

Nabijene čestice u elektromagnetskim poljima: Kanonska formulacija, invarijante kalibracije, Landauove energetske razine, Aharonov-Bohmov efekt

Kvantno sprezanje: Paradoksi kvantnog sprezanja, uvod u kvantno računarstvo

Formulacija putnog integrala kvantne mehanike: Recept za putni integral, evaluacija propagatora slobodnih čestica, ekvivalentnost Schrodingerovoj jednadžbi, izvođenje putnog integrala

1.5. Obvezna literatura

1. J. J. Sakurai: Modern Quantum Mechanics (Addison-Wesley; 1994)
2. R. Shankar: Principles of Quantum Mechanics (Plenum Press; 1994)
3. S. Weinberg: Lectures on Quantum Mechanics (Cambridge University Press; 2013)

1.6. Dopunska literatura

1. D. J. Griffiths, Introduction to Quantum Mechanics, (Cambridge University Press; 2016)
2. David Tong, Lectures on Topics in Quantum Mechanics
(<https://www.damtp.cam.ac.uk/user/tong/aqm/topicsinqm.pdf>)
3. David Tong, Lectures on Theoretical Physics: volume 3 Quantum Mechanics (Cambridge University Press; 2025)

1.7. Obveze studenata, ocjenjivanje i vrednovanje rada studenata tijekom nastave i na završnom ispitu

Sustav ocjenjivanja

Aktivnost koja se ocjenjuje	Udio aktivnosti u ECTS bodovima	Maksimalan broj bodova
Pohađanje nastave	2,0	/
Kontinuirana provjera znanja (kolokviji)	2,0	50
Seminar	2,0	20
Završni ispit	2,0	30
UKUPNO	8	100

Opisi aktivnosti koje se ocjenjuju

Kontinuirana provjera znanja (maksimalno 50 bodova)

Tijekom predavanja studenti redovito dobivaju domaće zadaće, minimalno 10 zadataka (10 x 3 boda). Uz to će se održati i pisani međuispit (1 x 20 bodova).

Seminar (maksimalno 20 bodova)

Svaki student dobiva temu koju treba pripremiti za seminar i prezentirati tijekom vježbi.

Završni ispit (maksimalno 30 bodova)

Uvjet za izlazak na završni ispit je minimalno 25 bodova (od mogućih 50) na domaćim zadaćama i međuispitu te minimalno 35 bodova (od mogućih 70) tijekom predavanja.

Student može ostvariti maksimalno 30 bodova. Na završnom (pismenom i usmenom) ispitu student može dobiti bodove prema sljedećim kriterijima:

- 1 – 7 bodova - zadovoljava minimalne kriterije,
- 8 – 18 bodova - dobar, ali s primjetnim nedostacima,
- 19 – 27 bodova - prosječan, s ponekom greškom,
- 28 – 30 bodova - iznadprosječan, izuzetan odgovor.

Studenti koji skupe 34,9 ili manje ocjenskih bodova tijekom nastave, nisu zadovoljili, ocjenjuju se ocjenom F i moraju ponovo upisati kolegij.

Ukoliko je završni ispit pozitivan, konačna ocjena određuje se zbrajanjem bodova prikupljenih na svim elementima koji su se procjenjivali i donosi se prema sljedećim kriterijima:

- 90 – 100 bodova A Izvrstan (5)
- 75 – 89,9 bodova B Vrlo dobar (4)
- 60 – 74,9 bodova C Dobar (3)
- 50 – 59,9 bodova D Dovoljan (2)

1.8. Dodatne informacije

POPIS TEMA PO TJEDNIMA NASTAVE			
Tjedan	Oblik nastave*	Sati	Tema
1.	P1	1.5	Pregled osnova kvantne mehanike, Hilbertov prostor, vjerojatnost, stanja kontinuuma, opservabli, distribucije
1.	P2	1.5	Pregled osnova kvantne mehanike, operatori, matrični prikaz, princip neodređenosti, projekcijski operatori
1.	V1,V2	2	Vježbe: primjeri i zadaci
2.	P3	1.5	Unitarni operatori, Wignerov teorem, Neunitarni operatori

2.	P4	1.5	Prostorno-vremenske translacijske simetrije
2.	V3,V4	2	Vježbe: primjeri i zadaci
3.	P5	1.5	Spin, rotacijske simetrije,
3.	P6	1.5	Multipleti kutnog momenta
3.	V5,V6	2	Vježbe: primjeri i zadaci
4.	P7	1.5	Bozoni i fermioni, unutarnje simetrije
4.	P8	1.5	Diskretne simetrije
4.	V7,V8	2	Vježbe: primjeri i zadaci
5.	P9	1.5	Teorija perturbacija prvog reda neovisna o vremenu za nedegenerirana stanja
5.	P10	1.5	Teorija perturbacija prvog reda neovisna o vremenu za degenerirana stanja, Zeemanov efekt, Starkov efekt prvog reda
5.	V9,V10	2	Vježbe: primjeri i zadaci
6.	P11	1,5	Teorija perturbacija neovisna o vremenu drugog reda, UV i IR divergencije, Starkov efekt drugog reda
6.	P12	1.5	Varijacijske metode, Born-Oppenheimerova aproksimacija
6.	S1,S2	2	Seminar studenata.
7.	P13	1.5	WKB aproksimacija, Narušene simetrije
7.	P14	1.5	Teorija perturbacija prvog reda ovisna o vremenu, vremenski ovisni potencijali, Interakcijska slika
7.	V11,V12,	2	Vježbe: primjeri i zadaci
8.	P15	1.5	Primjeri teorije vremenski ovisne perturbacije, adijabatska aproksimacija*, Berryjeva faza*
8.	P16	1.5	Ispit
8.	S3,S4	2	Seminar studenata.
9.	P17	1.5	Teorija raspršenja, potencijalno raspršenje, Lippmann-Schwingerova jednadžba
9.	P18	1.5	Amplituda raspršenja, optički teorem
9.	V13,S5	2	Vježbe: primjeri i zadaci. Seminar studenata.
10.	P19	1.5	Bornova aproksimacija, Coulombovo raspršenje, Eikonalova aproksimacija
10.	P20	1.5	S-matrica, širenje parcijalnih valova
10.	S6,S7	2	Seminar studenata.
11.	P21	1.5	Nabijena čestica u elektromagnetskom polju, kanonska formulacija
11.	P22	1.5	Baždarske invarijante, Landauove energetske razine
11.	V14,S8	2	Vježbe: primjeri i zadaci. Seminar studenata.
12.	P23	1.5	Aharonov-Bohmov efekt
12.	P24	1.5	Opis kvantnog sprežanja
12.	S9,S10	2	Seminar studenata.
13.	P25	1.5	Paradoksi kvantnog sprežanja, EPR, Bellov teorem
13.	P26	1.5	Uvod u qubite i kvantno računanje
13.	S11,S12	2	Seminar studenata.
14.	P27	1.5	Recept za putni integral
14.	P28	1.5	Evaluacija propagatora slobodnih čestica

14.	V15,S13	2	Vježbe: primjeri i zadaci. Seminar studenata.
15.	P29	1.5	Ekvivalentnost Schrodingerovoj jednačbi
15.	P30	1.5	Izvođenje putnog integrala
15.	S14,S15	2	Seminar studenata.

*Napomena: navesti ukoliko se određeni sat/tema izvodi online

KONSTRUKTIVNO POVEZIVANJE			
ISHODI UČENJA	SADRŽAJ	AKTIVNOSTI ZA NASTAVNIKE I STUDENTE (metode poučavanja i učenja)	METODE VREDNOVANJA
I1. Definirati matricu gustoće;Očekivana vrijednost, operatora za miješana stanja	Čista i miješana stanja, matrica gustoće	Izlaganje Rasprava Rješavanje problemskih zadataka	Analiza pisanih provjera znanja i vještina (domaća zadaća, kolokvij, ispit) Sposobnost razumijevanja, pripreme i prezentiranja seminara (seminar)
I2. Definirati simetrije; Opisati konačnu i infinitezimalnu transformaciju, te naći očekivanu vrijednost opservable nakon transformacije.	Opći formalizam operatora simetrije. Infinitezimalne transformacije i generatori.	Izlaganje Rasprava Rješavanje problemskih zadataka	Analiza pisanih provjera znanja i vještina (domaća zadaća, kolokvij, ispit) Sposobnost razumijevanja, pripreme i prezentiranja seminara (seminar)
I3. Naći operatore i generatore translacija u prostoru i vremenu. Naći operatore prostorne i vremenske inverzije.	Specifične transformacije: translacija i inverzija prostora i vremena	Izlaganje Rasprava Rješavanje problemskih zadataka	Analiza pisanih provjera znanja i vještina (domaća zadaća, kolokvij, ispit) Sposobnost razumijevanja, pripreme i prezentiranja seminara (seminar)
I4. Definirati Eulerove kutove i naći reprezentaciju rotacije	Matrična reprezentacija rotacije. Eulerovi kutovi.	Izlaganje Rasprava Rješavanje problemskih zadataka	Analiza pisanih provjera znanja i vještina (domaća zadaća, kolokvij, ispit) Sposobnost razumijevanja, pripreme i prezentiranja seminara (seminar)
I5. Izvesti Diracovu jednačbu, definirati Diracove matrice.	Diracova jednačba. Kovarijantni oblik.	Izlaganje Rasprava Rješavanje problemskih zadataka	Analiza pisanih provjera znanja i vještina (domaća zadaća, kolokvij, ispit) Sposobnost razumijevanja, pripreme i prezentiranja seminara (seminar)
I6. Pokazati simetrije Diracove jednačbe	Transformacije simetrije u relativističkoj kvantnoj	Izlaganje Rasprava	Analiza pisanih provjera znanja i vještina (domaća

	mehanici.	Rješavanje problemskih zadataka	zadaca, kolokvij, ispit) Sposobnost razumijevanja, pripreme i prezentiranja seminara (seminar)
I7. Izračunati relativističke korekcije energije vodikovog atoma	Fina struktura vodikova spektra	Izlaganje Rasprava Rješavanje problemskih zadataka	Analiza pisanih provjera znanja i vještina (domaća zadaća, kolokvij, ispit) Sposobnost razumijevanja, pripreme i prezentiranja seminara (seminar)
I8. Definirati operatore stvaranja i uništenja čestica.	Višečestični sistemi. Fermioni i bozoni. Operatori stvaranja i uništenja čestice.	Izlaganje Rasprava Rješavanje problemskih zadataka	Analiza pisanih provjera znanja i vještina (domaća zadaća, kolokvij, ispit) Sposobnost razumijevanja, pripreme i prezentiranja seminara (seminar)
I9. Definirati spregnutost. Izvesti i objasniti Bellovu nejednakost. Objasniti EPR paradoks	Spregnutost, bellova nejednakost, EPR paradoks.	Izlaganje Rasprava Rješavanje problemskih zadataka	Analiza pisanih provjera znanja i vještina (domaća zadaća, kolokvij, ispit) Sposobnost razumijevanja, pripreme i prezentiranja seminara (seminar)
I10. Nabijene čestice u elektromagnetskim poljima	Kanonska formulacija, invarijante kalibracije, Landauove energetske razine, Aharanov-Bohmov efekt	Izlaganje Rasprava Rješavanje problemskih zadataka	Analiza pisanih provjera znanja i vještina (domaća zadaća, kolokvij, ispit) Sposobnost razumijevanja, pripreme i prezentiranja seminara (seminar)
I11. Varijacijske metode i Aproksimativne metode u QM-u	Born-Oppenheimerova aproksimacija, WKB aproksimacija, Slomljene simetrije, Teorija perturbacija prvog reda, vremenski ovisni potencijali, interakcijska slika, primjene, adijabatska aproksimacija, Berryjeva faza	Izlaganje Rasprava Rješavanje problemskih zadataka	Analiza pisanih provjera znanja i vještina (domaća zadaća, kolokvij, ispit) Sposobnost razumijevanja, pripreme i prezentiranja seminara (seminar)
I12. Definirati i objasniti integrale po stazi, te ga povezati s propagatorom u valnoj mehanici	Integrali po stazi. Veza s propagatorom. Objašnjenje Hamiltonova principa u klasičnoj mehanici.	Izlaganje Rasprava Rješavanje problemskih zadataka	Analiza pisanih provjera znanja i vještina (domaća zadaća, kolokvij, ispit) Sposobnost razumijevanja, pripreme i prezentiranja seminara (seminar)