

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	Profesor, Zoran Kaliman	
Kontakt	kaliman@uniri.hr	
Vrijeme i mjesto konzultacija	Po dogovoru, ured O-111	
Suradnik na kolegiju	Velimir Labinac, v. pred.	
Kontakt	vlabinac@uniri.hr	
Vrijeme i mjesto konzultacija	Po dogovoru, ured O-0..	
Jezik izvođenje nastave	hrvatski	
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	dd.mm.gggg (po želji upisati sat) – dodati retke ukoliko nudite više datuma	
	dd.mm.gggg (po želji upisati sat)	
	dd.mm.gggg (po želji upisati sat)	
	dd.mm.gggg (po želji upisati sat)	

OPIS KOLEGIJA
1.1. Ciljevi kolegija
Upoznavanje s preciznom definicijom kvantne mehanike na osnovu temeljnih postulata. Dublje fizikalno razumijevanje matematičkih formulacija kvantne mehanike, posebice uloge simetrije na transformacije u prostoru i vremenu. Razumijevanje različitih slika kvantne mehanike i prijelaza prema teoriji polja.
1.2. Uvjeti za upis kolegija
Završen preddiplomski studij i položen kolegij iz osnova kvantne mehanike na preddiplomskom studiju ili kreditiranom studiju cijelo-životnog obrazovanja.
1.3. Očekivani ishodi učenja za kolegij
OPĆI PRINCIPI KVANTNE MEHANIKE I SIMETRIJE
<ol style="list-style-type: none"> Definirati matricu gustoće; Očekivana vrijednost operatora za mješana stanja Definirati simetrije; Opisati konačnu i infinitezimalnu transformaciju, te naći očekivanu vrijednost opservable nakon transformacije. Naći operatore i generatore translacija u prostoru i vremenu. Naći operatore prostorne i vremenske inverzije.
ROTACIJA I ANGULARNI MOMENTI

4. Definirati Eulerove kutove i naći reprezentaciju rotacije
5. Izvesti formulu za zbrajanje angularnih momenata. Definirati Clebsch – Gordanove koeficijente i pokazati način na koji se računaju

INTEGRALI PO STAZI

6. Objasniti i dobiti izraz za propagator u valnoj mehanici, te ga povezati s amplitudom prijelaza
7. Definirati i objasniti integrale po stazi, te ga povezati s propagatorom u valnoj mehanici

RELATIVISTIČKA KVANTNA MEHANIKA

8. Izvesti Klein – Gordonovu jednadžbu. Opisati rješenja KG jednadžbe
9. Izvesti Diracovu jednadžbu, definirati Diracove matrice.
10. Pokazati simetrije Diracove jednadžbe
11. Izračunati relativističke korekcije energije vodikovog atoma

VIŠEČESTIČNI SISTEMI I DRUGA KVANTIZACIJA

12. Definirati operatore stvaranja i uništenja čestica.
13. Izraziti jednočestične relacije u višečestičnom jeziku

DRUGA KVANTNA REVOLUCIJA

14. Definirati spregnutost. Izvesti i objasniti Bellovu nejednakost. Objasniti EPR paradoks

Objasniti teorem o ne – kloniranju, kvantnu teleportaciju

1.4. Sadržaj kolegija

Temeljni postulati kvantne mehanike. Matematičke osnove kvantne mehanike. Simetrije u kvantnoj mehanici. Angularni moment. Integrali po stazi. Relativistička kvantna mehanika. Druga kvantizacija I osnove kvantne teorije polja. Druga kvantna revolucija

1.5. Obvezna literatura

1. Ivan Supek, *Teorijska fizika i struktura materije*, 1. i 2. dio, Školska knjiga, Zagreb, 1977.
2. Nouredine Zettili, *Quantum Mechanics {small Concepts and Applications*, Wiley, England, 2007.
3. Bipin R. Desai, *Quantum Mechanics {small with Basic Field Theory*, Cambridge university press, Cambridge, 2010
4. Jun John Sakurai, *Advanced Quantum Mechanics*, Addison – Wesley, USA, 1967

1.6. Dopunska literatura

1. Steven Weinberg, *Lectures on Quantum Mechanics*, Cambridge university Press, NY, 2015
2. Jochen Pade, *Quantum Mechanics for Pedestrians 2: Applications and Extensions*, Springer, Switzerland, 2014
3. Franz Schwabl, *Quantum Mechanics*, Springer, berlin, 2007

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

Pohadanje vježbi (0 bodova)

Studenti su obvezni dolaziti na vježbe i mogu izostati (opravdano ili neopravdano) najviše **5 puta**. U suprotnom, student gubi pravo polaganja kolegija i mora ga sljedeće godine ponovo upisati ukoliko želi nastaviti studij.

Aktivnost na nastavi (maksimalno 10 bodova)

Studenti su obvezni rješavati domaće zadaće zadane na vježbama. Redovitom predajom domaćih zadaća student može ostvariti maksimalno 10 bodova. Redovitom predajom smatra se predaja u roku od dva tjedna od zadavanja. Student može predati domaće zadaće sa zakašnjenjem, i time ostvariti maksimalno 3 boda.

Pismeni zadaci (kolokviji / ispit) (maksimalno 40 bodova)

Mogućih 40 bodova za pismene zadatke student može skupiti na dva načina:

1. Kolokviji: Tijekom nastave kolegija, bit će organizirana tri kolokvija. Ukupan broj zadataka na tri kolokvija je 8, svaki zadatak ima 5 bodova. Prolaz na kolokviju ostvaruje se uz minimalno 40% zadataka ispravno riješenih ili ukupno minimalno 50% na sva tri kolokvija.
2. Ispit: Nakon održanih svih termina vježbi bit će organiziran pismeni ispit (dva u zimskom, jedan u ljetnom i jedan u jesenskom ispitnom roku). Zadaci na pismenom ispitu obuhvaćat će ukupno gradivo vježbi i biti opširniji od zadataka na kolokviju. Prolaz na pismenom ispitu ostvaruje se uz minimalno 50% zadataka ispravno riješenih.

Moguć je izlazak na ispit i nakon izlaska na kolokvije. U tom slučaju student ostvaruje bodove za pismene zadatke samo na pismenom ispitu. Nije moguće zbrajanje ostvarenih bodova na kolokvijima i ispitu.

Seminarski rad (maksimalno 10 bodova)

Na seminaru iz kolegija Kvantna mehanika studenti su dužni samostalno izraditi i izložiti seminar s temama iz kvantne fizike i primjena u užim područjima moderne fizike. Studenti teme mogu izabrati iz vodećih svjetskih časopisa iz fizike namijenjenih širem čitateljstvu: American Journal of Physics, Physics Today, European Journal of Physics ili sličnih. Seminarski radovi moraju biti pripremljeni kao PowerPoint prezentacija i izloženi pred ostalim studentima u trajanju od 10 - 15 min. Studenti su dužni prisustvovati svim seminarskim izlaganjima i aktivno sudjelovati u diskusiji nakon seminara.

Završni ispit (maksimalno 40 bodova)

Student može ostvariti maksimalno 40 bodova. Za prolaz na završnom ispitu potrebno je ostvariti minimalno 50%

Ako student ne odgovori pozitivno na završnom ispitu, nije položio ispit, bez obzira na ranije skupljene bodove.

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)
0 – 49.9 bodova	E	Nedovoljan (1)

1.8. Dodatne informacije

POPIS TEMA PO TJEDNIMA NASTAVE			
Tjedan	Oblik nastave*	Sati	Tema
1.	P	3	Uvodno predavanje, upoznavanje s kolegijem i obvezama. Simetrije: matrica gustoće
1.	V	3	Vektori stanja i operatori
2.	P	3	Prostorna translacija, vremenska translacija, paritet
2.	V	3	Operator vremenske evolucije. Schrödingerova i Heisenbergova slika
	P	3	Vremenska inverzija; Lieva algebra: SO(3) i SU(2) grupe
	V	3	Interakcija čestica i klasičnog EM polja zračenja

	P	3	Rotacije: Eulerovi kutovi; reprezentacija operatora rotacije;
	V	3	Potencijali i baždarne transformacije
	P	3	Zbrajanje angularnih momenata
	V	3	Aproksimacija nagle promjene. Adijabatska aproksimacija
	P	3	Integrali po stazi: propagatori, integrali po stazi
	V	3	Propagator. Feynmanovi integrali po putanji
	P	3	Feynmanova formulacija
	V	3	Operator rotacije. Angularni moment
	P	3	Relativistička kvantna mehanika: Klein – Gordonova jednadžba
	V	3	Zbrajanje angularnog momenta. Tenzorski operatori
	P	3	Diracova jednadžba; Diracova jednadžba u vanjskom polju
	V	3	Operator gustoće
	P	3	Simetrije Diracove jednadžbe: Angularni moment, parnost, konjugacija naboja, vremenska inverzija, CPT
	v	3	Simetrije u kvantnoj mehanici
	P	3	Sferno -simetrično polje, rješenja s negativnom energijom, relativističke korekcije na Schroedingerovu jednadžbu
	V	3	Atomska struktura
	P	3	Relativističke korekcije atoma vodika
	V	3	Lippmann-Schwingerova jednadžba.Matrica raspršenja
	P	3	Druga kvantizacija: Operatori stvaranja i unistenja čestica, diskretne i kontinuirane varijable
	V	3	Sustavi mnoštva identičnih čestica. Reprezentacija broja čestica
	P	3	Druga kvantna revolucija: Spregnutost, Bellova nejednakost
	V	3	Kvantna teorija zračenja
	P	3	EPR paradoks, kvantna informacija
	V	3	Klein-Gordonova i Diracova jednadžba: jednostavni problemi

*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
1. Definirati matricu gustoće; Očekivana vrijednost operatora za miješana stanja	Čista i miješana stanja, matrica gustoće	Izlaganje, rasprava, rješavanje numeričkih zadataka, rješavanje problemskih zadataka. Samostalni rad.	Analiza pisanih provjera znanja i vještina (domaća zadaća, kolokvij, ispit) Usmene provjere znanja i vještina (završni ispit) Opažanje izvedbe studenta u nekoj aktivnosti (aktivnost u nastavi)

2. 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 numeričkih zadataka, rješavanje problemskih zadataka. Samostalni rad.	Analiza pisanih provjera znanja i vještina (domaća zadaća, kolokvij, ispit) Usmene provjere znanja I vještina (završni ispit) Opažanje izvedbe studenta u nekoj aktivnosti (aktivnost u nastavi)
3. 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 numeričkih zadataka, rješavanje problemskih zadataka. Samostalni rad.	Analiza pisanih provjera znanja i vještina (domaća zadaća, kolokvij, ispit) Usmene provjere znanja I vještina (završni ispit) Opažanje izvedbe studenta u nekoj aktivnosti (aktivnost u nastavi)
4. Definirati Eulerove kutove i naći reprezentaciju rotacije	Matrična reprezentacija rotacije. Eulerovi kutovi.	Izlaganje, rasprava, rješavanje numeričkih zadataka, rješavanje problemskih zadataka. Samostalni rad.	Analiza pisanih provjera znanja i vještina (domaća zadaća, kolokvij, ispit) Usmene provjere znanja I vještina (završni ispit) Opažanje izvedbe studenta u nekoj aktivnosti (aktivnost u nastavi)
5. Izvesti formulu za zbrajanje angularnih momenata. Definirati Clebsch – Gordanove koeficijente i pokazati način na koji se računaju	Zbrajanje dva i više angularnih momenata. Računanje Clebsch-Gordanovih koeficijenata.	Izlaganje, rasprava, rješavanje numeričkih zadataka, rješavanje problemskih zadataka. Samostalni rad.	Analiza pisanih provjera znanja i vještina (domaća zadaća, kolokvij, ispit) Usmene provjere znanja I vještina (završni ispit) Opažanje izvedbe studenta u nekoj aktivnosti (aktivnost u nastavi)
6. Objasniti i dobiti izraz za propagator u valnoj mehanici, te ga povezati s amplitudom prijelaza	Propagator i amplituda prijelaza u kvantnoj mehanici.	Izlaganje, rasprava, rješavanje numeričkih zadataka, rješavanje problemskih zadataka. Samostalni rad.	Analiza pisanih provjera znanja i vještina (domaća zadaća, kolokvij, ispit) Usmene provjere znanja I vještina (završni ispit) Opažanje izvedbe studenta u nekoj aktivnosti (aktivnost u nastavi)
7. 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 numeričkih zadataka, rješavanje problemskih zadataka. Samostalni rad.	Analiza pisanih provjera znanja i vještina (domaća zadaća, kolokvij, ispit) Usmene provjere znanja I vještina (završni ispit) Opažanje izvedbe studenta u nekoj aktivnosti (aktivnost u nastavi)

8. Izvesti Klein – Gordonovu jednadžbu. Opisati rješenja KG jednadžbe	Klein-Gordonova jednadžba, problemi i rješenja.	Izlaganje, rasprava, rješavanje numeričkih zadataka, rješavanje problemskih zadataka. Samostalni rad.	Analiza pisanih provjera znanja i vještina (domaća zadaća, kolokvij, ispit) Usmene provjere znanja I vještina (završni ispit) Opažanje izvedbe studenta u nekoj aktivnosti (aktivnost u nastavi)
9. Izvesti Diracovu jednadžbu, definirati Diracove matrice.	Diracova jednadžba. Diracove matrice. Kovarijantni oblik Diracove jednadžbe.	Izlaganje, rasprava, rješavanje numeričkih zadataka, rješavanje problemskih zadataka. Samostalni rad.	Analiza pisanih provjera znanja i vještina (domaća zadaća, kolokvij, ispit) Usmene provjere znanja I vještina (završni ispit) Opažanje izvedbe studenta u nekoj aktivnosti (aktivnost u nastavi)
10. Pokazati simetrije Diracove jednadžbe	Transformacije simetrije u relativističkoj kvantnoj mehanici.	Izlaganje, rasprava, rješavanje numeričkih zadataka, rješavanje problemskih zadataka. Samostalni rad.	Analiza pisanih provjera znanja i vještina (domaća zadaća, kolokvij, ispit) Usmene provjere znanja I vještina (završni ispit) Opažanje izvedbe studenta u nekoj aktivnosti (aktivnost u nastavi)
11. Izračunati relativističke korekcije energije vodikovog atoma	Fina i hiperfina struktura vodikova spektra.	Izlaganje, rasprava, rješavanje numeričkih zadataka, rješavanje problemskih zadataka. Samostalni rad.	Analiza pisanih provjera znanja i vještina (domaća zadaća, kolokvij, ispit) Usmene provjere znanja I vještina (završni ispit) Opažanje izvedbe studenta u nekoj aktivnosti (aktivnost u nastavi)
12. Definirati operatore stvaranja i uništenja čestica.	Višečestični sistemi. Fermioni i bozoni. Operatori stvaranja i uništenja čestice.	Izlaganje, rasprava, rješavanje numeričkih zadataka, rješavanje problemskih zadataka. Samostalni rad.	Analiza pisanih provjera znanja i vještina (domaća zadaća, kolokvij, ispit) Usmene provjere znanja I vještina (završni ispit) Opažanje izvedbe studenta u nekoj aktivnosti (aktivnost u nastavi)
13. Izraziti jednočestične relacije u višečestičnom jeziku	Hamiltonijan, broj čestica, impuls u višečestičnom jeziku.	Izlaganje, rasprava, rješavanje numeričkih zadataka, rješavanje problemskih zadataka. Samostalni rad.	Analiza pisanih provjera znanja i vještina (domaća zadaća, kolokvij, ispit) Usmene provjere znanja I vještina (završni ispit) Opažanje izvedbe studenta u nekoj aktivnosti (aktivnost u nastavi)

14. Definirati spregnutost. Izvesti i objasniti Bellovu nejednakost. Objasniti EPR paradoks	Spregnutost, bellova nejednakost, EPR paradoks.	Izlaganje, rasprava, rješavanje numeričkih zadataka, rješavanje problemskih zadataka. Samostalni rad.	Analiza pisanih provjera znanja i vještina (domaća zadaća, kolokvij, ispit) Usmene provjere znanja i vještina (završni ispit) Opažanje izvedbe studenta u nekoj aktivnosti (aktivnost u nastavi)
15. Objasniti teorem o ne – kloniranju, kvantnu teleportaciju.	Teorem o nekloniranju, kvantna teleportacija.	Izlaganje, rasprava, rješavanje numeričkih zadataka, rješavanje problemskih zadataka. Samostalni rad.	Analiza pisanih provjera znanja i vještina (domaća zadaća, kolokvij, ispit) Usmene provjere znanja i vještina (završni ispit) Opažanje izvedbe studenta u nekoj aktivnosti (aktivnost u nastavi)