

OPĆE INFORMACIJE		
Naziv kolegija	Opća relativnost	
Studijski program	Sveučilišni diplomski studij Fizika	
Status kolegija	obvezni	
Semestar	1.	
Bodovna vrijednost i način izvođenja nastave	ECTS bodovi	6
	Broj sati (P+V+S)	2+1+1
Nositelj kolegija	izv. prof. dr. sc. Tomislav Terzić	
Kontakt	<a href="mailto:tterzic@phy.uniri.hr">tterzic@phy.uniri.hr</a>	
Vrijeme i mjesto konzultacija		
Suradnik na kolegiju	dr. sc. Mateo Paulišić - izvođač	
Kontakt	<a href="mailto:mateo.paulisic@uniri.hr">mateo.paulisic@uniri.hr</a>	
Vrijeme i mjesto konzultacija	Prema dogovoru	
Jezik izvođenja nastave	Hrvatski	
Web stranica kolegija	Stranica kolegija na sustavu za učenje Merlin	
Vrijeme i mjesto izvođenja nastave	Prema rasporedu sati objavljenom na mrežnoj stranici Fakulteta za fiziku.	
Izravna (učionička) nastava	100%	
Virtualna nastava	0%	
Ispitni rokovi	13.02.2025.	
	27.02.2025.	
	26.06.2025.	
	04.09.2025.	

OPIS KOLEGIJA	
1.1. Ciljevi kolegija	Kurs opće relativnosti, kao teorije koja opisuje gravitacijsko međudjelovanje, na uvodnoj/srednjoj razini. Pored objašnjenja prirode gravitacijske sile ujedno služi i kao osnova za kolegije iz astrofizike, astročestistične fizike i kozmologije sa viših semestara.
1.2. Uvjeti za upis kolegija	Nema
1.3. Očekivani ishodi učenja za kolegij	Razumijevanje gravitacijske sile kao posljedice zakrivljenja prostor-vremena. Savladavanje matematičkog formalizma neophodnog za primjenu opće relativnosti u tehnologiji i znanstvenom istraživanju. Razumijevanje pojava i struktura uzrokovanih gravitacijom od onih vezanih za Zemlju, Sunčev sustav, Mliječni put, pa sve do Svemira kao cjeline i njegove povijesti. Izračunavanje efekata gravitacije. Sposobnost prosuđivanja u kojim situacijama se može primijeniti linearizirana teorija

gravitacije ili pak Newtonovsko približenje. Razvijanje i usavršavanje širih kompetencija vezanih uz primjenu složenih matematičkih tehnika na opis i modeliranje kompleksnih sustava.
1.4. Sadržaj kolegija
Princip ekvivalencije. Specijalna relativnost. Linearna relativistička teorija gravitacije. Primjene: gravitacijski pomak prema crvenom, zakrivljenje zraka svjetlosti, GPS sustav navigacije, gravitacijske leće. Gravitacija kao zakrivljenje prostor-vremena. Osnove diferencijalne geometrije. Geodetska jednadžba i trajektorije čestica i svjetlosti. Einstein-Hilbertova jednadžba. Schwarzschildovo rješenje. Post-Newtonovska aproksimacija. Testovi opće relativnosti u Sunčevom sustavu. Energija i impuls. Zvijezde: stabilnost i kolapsi. Crne rupe. Uvod u kozmologiju.
1.5. Obvezna literatura
H. C. Ohanian, R. Ruffini: Gravitation and Spacetime (3. edition, W. W. Norton & Co., 2013.)
1.6. Dopunska literatura
1. P. A. M. Dirac - General Theory of Relativity (Princeton University Press; 1996.) 2. Bernard Schutz - A First Course in General Relativity (Cambridge University Press (2009)) 3. James B. Hartle – Gravity: An Introduction to Einstein's General Relativity (2014, Pearson) 4. Sean Carroll - Spacetime and Geometry: An Introduction to General Relativity (Addison Wesley (2004))
1.7. Obveze studenata, ocjenjivanje i vrednovanje rada studenata tijekom nastave i na završnom ispitu
Aktivan odnos prema nastavi, rješavanje domaćih zadaća i kolokvija, te polaganje završnog ispita. Rad studenata na predmetu će se vrednovati i ocjenjivati tijekom nastave putem kolokvija i domaćih zadaća. Nakon toga studenti prilaze završnom ispitu.  Ocjena se formira putem dva kolokvija i završnog ispita. Studenti moraju postići više od 25% bodova na kolokvijima. U slučaju da student zaradi više od 50% bodova na kolokvijima ukupno, može dobiti ocjenu bez izlaska na završni ispit.
1.8. Dodatne informacije

POPIS TEMA PO TJEDNIMA NASTAVE			
Tjedan	Oblik nastave*	Sati	Tema
1.			Uvodne napomene. Newtonova teorija gravitacije: Gravitacijsko polje i potencijal. Energija gravitacijskog polja. Newtonov i Galilejev princip ekvivalencije. Eksperimentalne potvrde. Plimne sile.
2.			Specijalna relativnost: Lorentzove transformacije. Prostor Minkowskog. Kinematika. Tenzori i tenzorska polja. Tenzor energije-impulsa. Kovarijantni opis elektrodinamike. Još jedan "izvod" elektrodinamike.
3.			Linearizirana relativistička teorija gravitacije: Nerelativistički limes lineariziranih jednadžbi. Veza s Newtonovom gravitacijom. Korekcije. Geometrijska interpretacija – zakrivljeno prostor-

			vrijeme.
4.			Primjene linearizirane gravitacije: Polje sferno-simetrične materije. Gravitacijska dilatacija vremena. Zakretanje svjetlosti. Gravitacijske leće. Polje rotirajuće mase. Lens-Thirringov efekt
5.			Gravitacijski valovi: Ravni valovi. Gravitacijsko zračenje. Primjeri zračenja.
6.			Uvod u Riemannovu geometriju: Metrički tenzor. Geodezici. Paralelni transport. Kovarijantna derivacija. Riemannov tenzor. Geodetska devijacija i plimne sile.
7.			Einstein-Hilbertova jednačba. Jednačbe za materiju. Princip minimalnog vezanja na gravitaciju. Elektrodinamika u zakrivljenom prostor-vremenu. Sferno-simetrična geometrija: Schwarzschildovo rješenje. Birkhoffov teorem.
8.			Kolokvij.
9.			Sferno-simetrična geometrija: Trajektorije čestica i analiza orbita. Rješenja za kružnu orbitu. Klasični testovi opće relativnosti: Precesija Merkurovog perihela. Gravitacijska dilatacija vremena. Važnost za GPS sustav navigacije.
10.			Energija i impuls: Nepostojanje lokalne definicije. Zakon očuvanja za lokalizirane raspodjele materije.
11.			Sferno-simetrične zvijezde: Uvod u teoriju stabilnosti. Bijeli patuljci i neutronske zvijezde.
12.			Crne rupe: Schwarzschildova crna rupa. Horizont događaja i singularitet. Kruskalovo proširenje. Bijele rupe.
13.			Crne rupe: Rotirajuće crne rupe. Kerrovo rješenje. Čelavost crnih rupa. Ponašanje materije i zračenja u okolici i unutrašnjosti crne rupe. Penroseov proces.
14.			Uvod u kozmologiju: Homogenost i izotropnost prostora. Hubbleov zakon. Robertson-Walker geometrija.
15.			Uvod u kozmologiju: FRW kozmološki modeli. Horizonti i starost Svemira. Usporedba teorije i eksperimenta. Tamna materija i tamna energija.

\*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
Razumijevanje gravitacijske sile kao posljedice zakrivljenja prostor-vremena.	Geometrijska interpretacija – zakrivljeno prostor-vrijeme.	Izlaganje Rasprava Rješavanje numeričkih zadataka Rješavanje problemskih zadataka Samostalni rad	Analiza riješenih zadataka (domaća zadaća, pismeni ispit, pismeni kolokvij) Pitanja (usmeni kolokvij, završni ispit) Pitanja esejskog tipa (usmeni kolokvij)
Savladvanje matematičkog formalizma neophodnog za primjenu opće relativnosti u tehnologiji i znanstvenom istraživanju.	Uvod u Riemannovu geometriju: Metrički tenzor. Geodezici. Paralelni transport. Kovarijantna derivacija. Riemannov tenzor. Geodetska devijacija i plimne sile.	Izlaganje Rasprava Rješavanje numeričkih zadataka Rješavanje problemskih zadataka Samostalni rad	Analiza riješenih zadataka (domaća zadaća, pismeni ispit, pismeni kolokvij) Pitanja (usmeni kolokvij, završni ispit) Pitanja esejskog tipa (usmeni kolokvij)
Razumijevanje pojava i struktura uzrokovanih gravitacijom od onih vezanih za Zemlju, Sunčev sustav, Mliječni put, pa sve do Svemira kao cjeline i njegove povijesti.	Primjene linearizirane gravitacije: Polje sferno-simetrične materije. Gravitacijska dilatacija vremena. Zakretanje svjetlosti. Gravitacijske leće. Polje rotirajuće mase. Lens-Thirringov efekt. Uvod u kozmologiju	Izlaganje Rasprava Rješavanje numeričkih zadataka Rješavanje problemskih zadataka Samostalni rad	Analiza riješenih zadataka (domaća zadaća, pismeni ispit, pismeni kolokvij) Pitanja (usmeni kolokvij, završni ispit) Pitanja esejskog tipa (usmeni kolokvij)
Izračunavanje efekata gravitacije.	Trajektorije čestica i analiza orbita. Rješenja za kružnu orbitu. Klasični testovi opće relativnosti: Precesija Merkurovog perihela. Gravitacijska dilatacija vremena. Važnost za GPS sustav navigacije.	Izlaganje Rasprava Rješavanje numeričkih zadataka Rješavanje problemskih zadataka Samostalni rad	Analiza riješenih zadataka (domaća zadaća, pismeni ispit, pismeni kolokvij) Pitanja (usmeni kolokvij, završni ispit) Pitanja esejskog tipa (usmeni kolokvij)
Sposobnost prosuđivanja u kojim situacijama se može primijeniti linearizirana teorija	Linearizirana relativistička teorija gravitacije: Nerelativistički limes	Izlaganje Rasprava Rješavanje numeričkih zadataka	Analiza riješenih zadataka (domaća zadaća, pismeni ispit, pismeni kolokvij)

gravitacije ili pak Newtonovsko približenje.	lineariziranih jednadžbi. Veza s Newtonovom gravitacijom.	Rješavanje problemskih zadataka Samostalni rad	Pitanja (usmeni kolokvij, završni ispit) Pitanja esejskog tipa (usmeni kolokvij)
Razvijanje i usavršavanje širih kompetencija vezanih uz primjenu složenih matematičkih tehnika na opis i modeliranje kompleksnih sustava.	Osnove diferencijalne geometrije.	Izlaganje Rasprava Rješavanje numeričkih zadataka Rješavanje problemskih zadataka Samostalni rad	Analiza riješenih zadataka (domaća zadaća, pismeni ispit, pismeni kolokvij) Pitanja (usmeni kolokvij, završni ispit) Pitanja esejskog tipa (usmeni kolokvij)