

### Relativistická fyzika a astrofyzika

1. Einsteinův gravitační zákon – heuristické odvození/ odvození z Hamiltonova principu minimální akce.
2. Rovnice geodetiky – odvození z Hamiltonova principu minimální akce.
3. Lieova derivace a Killingovy vektory. Symetrie prostoročasu a pohybové konstanty.
4. Vnější Schwarzschildovo řešení, Birkhoffův teorém. Fyzikální singularita, souřadnicová singularita, horizont událostí. Eddingtonovy-Finkelsteinovy souřadnice, gravitační kolaps.
5. Maximální analytické rozšíření Schwarzschildova prostoročasu. Kruskalův a Penroseův diagram. Zdánlivý horizont.
6. Gravitační záření – linearizované Einsteinovy rovnice, rovinná gravitační vlna, Lorentzova kalibrace, TT kalibrace.
7. Relativistická sférická hvězda – Tolmanova-Oppenheimerova-Volkoffova rovnice, hvězda s konstantní hustotou energie.
8. FLRW kosmologie. Friedmannova rovnice, parametr hustoty. 1. věta termodynamiky, stavové rovnice kosmické látky.  $\Lambda$ CDM model vesmíru.
9. Model horkého velkého třesku. Primordiální nukleosyntéza, reliktní fotony a neutrina.

### Kvantové mechanika a kvantové teorie pole

1. Axiomy kvantové mechaniky a její matematické základy: Stavový vektor, Hilbertův prostor, operátor, komutátor. Diracova notace. Teorie reprezentací.
2. Přibližné metody v kvantové teorii a jejich aplikace: poruchová metoda, variační metoda. Starkův jev.
3. Teorie momentu hybnosti: komutační vztahy, vlastní hodnoty. Skládání momentů hybnosti. Jemná struktura spektrálních čar atomu vodíku. Zeemanův jev.
4. Vícečásticové soustavy: identické částice, operátor výměny částic, symetrické a antisymetrické vlnové funkce. Pauliho princip, bosony a fermiony. Obsazovací čísla.
5. Víceelektronové atomy: elektronová konfigurace, orbitaly. Atom helia a jeho stavy. Periodická soustava prvků.
6. Interakce kvantové soustavy s elektromagnetickým zářením: dlouhovlnné přiblížení, Fermiho zlaté pravidlo. Výběrová pravidla. Einsteinovy koeficienty.
7. Hilbertův prostor pro nekonečně mnoho volných částic. Formalismus kreačních a anihilačních operátorů. Fockův prostor. Pole jako lokální pozorovatelné veličiny a jejich obecné vlastnosti.
8. Základní přehled o teorii Lieových grup. Grupa  $SU(2)$  a její reprezentace. Relace mezi  $SU(2)$  a  $SO(3)$ . Skaláry, spinory a vektory.

9. Klasická teorie pole. Eulerovy-Lagrangeovy rovnice. Tensor energie a hybnosti. Symetrie, zachovávající se proudy a věta Noetherové.
10. Skalární teorie reálného a komplexního pole. Kleinova-Gordonova rovnice. Obecné řešení. Kanonické kvantování a propagátor pro skalární částici.
11. Vlastnosti Diracovy rovnice. Technologie gamma matic. Spin a magnetický moment elektronu. Kanonické kvantování a relace mezi spinem a statistikou.
12. Prokova rovnice a Maxwellovi rovnice. Helicita a stupně volnosti pro částici se spinem jedna.
13. Kalibrační invariance. Volba kalibrace. Propagátor pro nehmotnou a hmotnou částici se spinem jedna.

### **Statistická fyzika a kinetika**

1. Fázový objem, Definice rovnováhy, Fluktuace, Definice souboru, Ergodický problém, Liouvilleův teorém
2. Mikrokanonický soubor, partiční suma, stavová rovnice ideálního plynu
3. Kanonický soubor, stavová rovnice ideálního plynu
4. Princip maximální entropie, Boltzmannova konstrukce
5. Velký kanonický soubor, stavová rovnice ideálního plynu, dvou atomový plyn, interakce
6. Fázové přechody, klasifikace fázových přechodů a Ehrenfestovy rovnice, mechanismus vzniku nové fáze, kritický bod
7. Boltzmannova kinetická rovnice; transportní rovnice; zákon růstu Boltzmannovy entropie; spontánní přechod soustavy do rovnovážného stavu; nevratné procesy; lokálně rovnovážné soustavy; lineární termodynamika; Onsagerovy relace.

## Částicová fyzika

1. Nástin historie a současného stavu částicové fyziky. Klíčové objevy, experimenty a ideje.
2. Struktura a interakce částic. Leptony, kvarky, kalibrační bosony. Hadrony, mezony a baryony. Antičástice. Stabilní a nestabilní částice, rezonance.
3. Kinematika srážek a rozpadů. Zákony zachování, relativistické invarianty. Účinný průřez. Luminozita, podélná a příčná hybnost, (pseudo)rapidita. Střední doba života, diferenciální rozpadová šířka, větvičí frakce a větvičí poměr.
4. Experimentální metody částicové fyziky. Základní principy a typy urychlovačů. Fyzikální principy a typy detektorů, jejich charakteristiky. Urychlovací komplexy a detektorové soustavy.
5. Vlastnosti hadronů a leptonů. Hmotnost, náboj, spin, baryonové číslo, prostorová (P) parita, isospin a jeho třetí komponenta, nábojová (C) parita, G parita. Leptonová čísla, typy neutrin, sluneční neutrino.
6. Symetrie a grupy. Elementární teorie grup a jejich reprezentací. Isospin a grupa SU(2), grupa SU(3), základní reprezentace. Multiplety částic. Nábojová nezávislost silných interakcí.
7. Podivné částice. Zavedení podivnosti a hypernáboje. Objev Omega hyperonu. Rozpady kaonů, hypotéza Leeho a Yanga, Experiment paní Wu, regenerace a oscilace, narušení CP invariance. Projevy existence těžších kvarků, objev mezonu J/psi a Upsilon, t kvarku. Zobecněný Gell-Mannův a Nishijimův vzorec.
8. Studium struktury nukleonů pomocí rozptylu leptonů. Pružný a hluboce nepružný rozptyl elektronů, hustota náboje v jádrech a elektromagnetické formfaktory nukleonů. Kvarky, partony, strukturní funkce.

## Rozšířená kvantová teorie pole

1. Lieovy grupy, generátory, fundamentální a adjungovaná reprezentace. Ireducibilní reprezentace SU(2).
2. Struktura Lorentzovy grupy. Vztah mezi SO(3,1) a SU(2)xSU(2) algebry.  
Reprezentace vlastní Lorentzovi podgrupy.
3. Dráhový integrál pro volnou částici v relativistickém a nerelativistickém případě.
4. Definice účinného průřezu a rychlosti rozpadu.
5. Normální uspořádání, časové uspořádání a Wickova věta.
6. Interakční obraz. S matice. Poruchový rozvoj S operátoru.
7. Princip minimální elektromagnetické interakce. Lagrangián pro kvantovou elektrodynamiku. Feynmanova pravidla a Feynmanovy diagramy pro nejjednodušší procesy.
8. Ne-abelovské kalibrační teorie.

## Numerické metody, modelování ve fyzice a numerická relativita

1. Reprezentace fyzikálních veličin - skaláry, vektory matice jako pole. Diskretizace problému. Celá čísla, čísla s plovoucí desetinnou čárkou. Chyby: roundoff, truncation. Aritmetika v prostoru čísel s konečnou přesností a přenos chyb. Stabilita výpočtu.
2. Číselné řady a jejich konvergence. Vyčíslování funkcí. Polynomiální a racionální funkce.
3. Řešení lineárních algebraických rovnic: Gaussova-Jordanova eliminace. Gaussova eliminace se zpětnou substitucí. LU dekompozice.
4. Polynomiální interpolace, Lagrangeovy polynomy, chyba interpolace.
5. Řešení nelineárních algebraických rovnic: bracketing, metoda bisekce, metoda sečen, Brentova metoda, Newtonova-Raphsonova metoda.
6. Hledání minim jednorozměrných funkcí pomocí první derivace. Hledání minim vícerozměrných funkcí pomocí „Downhill Simplex“ metody.
7. Hledání kořenů polynomických rovnic  $n$ -tého řádu v reálném a v komplexním oboru.
8. Náhodná čísla: Generátory rovnoměrného rozdělení, systémové generátory vs. portabilní generátory náhodných čísel.
9. Generátor náhodných čísel s obecným rozdělením - transformační a rejekční metoda.
10. Numerická integrace: Klasické formule (otevřené, uzavřené, polootevřené) a algoritmy (lichoběžníkové, Simpsonovo pravidlo). Rombergova integrace.
11. Gaussovy kvadratury a ortogonální polynomy. Integrace pomocí Gaussových kvadratur a odhad chyby.
12. Obyčejné diferenciální rovnice: Problém počátečních podmínek, problém okrajových podmínek. Eulerova metoda, fixní integrační krok, adaptivní integrační krok.
13. Integrační schémata Runge-Kutta, odvození metody a analýza stability.
14. Fyzikálně relevantní parciální diferenciální rovnice (parabolická, hyperbolická, eliptická). Metody jejich numerického řešení (Leap-Frog, Lax-Wendroff, Gauss-Seidel). Von-Neumanova analýza stability numerického schématu řešení.
15. 3+1 rozklad Einsteinových rovnic. Foliace prostoročasu.
16. Numerické metody užívané v numerické relativitě: metoda konečných diferencí, spektrální metody.
17. Numerická lokalizace horizontu událostí.
18. Sféricky symetrické prostoročasy, 1+1 rozklad – numerická konstrukce černé díry za předpokladu sférické symetrie (principy).

### Rozšířená relativistická astrofyzika a kosmologie

1. Kerrova černá díra. Horizonty, ergosféra. Carterovy pohybové rovnice.
2. Černé díry s elektrickým nábojem. Reissnerova – Nordströmova černá díra, elektromagnetické pole, horizonty, Penroseův diagram. „No-hair“ teorém.
3. Penroseův proces extrakce energie z Kerrovy černé díry. Extrakce energie z Reissnerovy-Nordströmovy černé díry.
4. Zákony termodynamiky černých děr. Povrchová gravitace a povrchová teplota černé díry. Plocha horizontu černé díry a entropie.
5. Hawkingovo záření: důsledky kvantování skalárního pole na pozadí Schwarzschildovy černé díry.
6. Kosmologická konstanta. Schwarzschildův-de Sitterův prostoročas, horizonty. Statický poloměr a stabilita částice s nulovým momentem hybnosti na statickém poloměru.
7. Bránový model vesmíru Randalové-Sundruma, efektivní Einsteinovy rovnice na bráně. Řešení problému hierarchie.
8. Bránové černé díry a vliv „bulku“ na fyzikální procesy v poli bránových černých děr. Weylův bránový parametr.
9. Hořavova gravitace. Ultrafialové narušení Lorentzovy invariance.
10. Kehagiasova-Sfetsosova metrika. Hořavův parametr. Struktura kruhových geodetik.
11. Vnořovací diagramy – definice a konstrukce.
12. Traverzibilní červí díry: metrika, vlastnosti tenzoru energie-hybnosti pro traverzibilní červí díru, energetické podmínky a příklady jejich porušení. Červí díry a uzavřené časupodobné trajektorie, stroj času.
13. Skalární testovací pole ve Schwarzschildově metrickém poli, kvazinormální módy skalárních testovacích polí.
14. Ultrarelativistické srážky testovacích částic v poli černých děr.
15. Pohyb nabitých částic v okolí zmagnetizované černé díry.
16. FLRW modely vesmíru, modely s kosmologickou konstantou.
17. Standardní model Vesmíru a jeho problémy. Inflační hypotéza, inflatonové pole vs. kosmologická konstanta.