

**DEBRECENI EGYETEM**  
**TERMÉSZETTUDOMÁNYI ÉS TECHNOLÓGIAI KAR**

**FIZIKUS**  
**MESTERKÉPZÉSI SZAK**

2025-től

**DEBRECEN**  
2025

## Tartalomjegyzék

A fizikus mesterképzési szak alapadatai és követelményei.....	3
A nappali tagozatos Fizikus MSc szak tanterve (az óra és vizsgaterv táblázatos összegzése) .....	8
Tantárgyi programok.....	12
Szakmai törzsanyag .....	12
Atom-, molekula- és optikai fizika (Vibók Ágnes).....	15
Atommag és nukleáris asztrofizika (Zilizi Gyula) .....	17
Komplex rendszerek és statisztikus fizika és (Kun Ferenc).....	20
Kondenzáltanyag fizika (Erdélyi Zoltán).....	23
Környezetfizika (Csige István) .....	26
Kvantummechanikai rendszerek (Gulácsi Zsolt).....	29
Részecskefizika és alapvető kölcsönhatások (Kardos Ádám).....	32

## A fizikus mesterképzési szak alapadatai és követelményei

<b>Képzési terület:</b>	természettudomány
<b>Képzési ciklus:</b>	mesterképzés
<b>Szakért felelős kar:</b>	Természettudományi és Technológiai Kar
<b>Szakfelelős neve:</b>	Dr. Vibók Ágnes egyetemi tanár
<b>Képzési hely(ek) munkarenddel:</b>	<b>Debrecen – nappali</b>
<b>Képzési idő:</b>	4 félév
<b>Az oklevélhez szükséges kreditek száma:</b>	120 kredit
<b>Összes kontaktóra száma</b>	kb. 1330
<b>nappali tagozaton:</b>	kb. 1330
<b>levelező tagozaton:</b>	-
<b>Szakmai gyakorlat ideje, kreditje, jellege</b>	-
<b>nappali tagozaton:</b>	-
<b>levelező tagozaton:</b>	-

- 1. A mesterképzési szak megnevezése:** fizikus (Physics)
- 2. A mesterképzési szakon szerezhető végzettségi szint és a szakképzettség oklevélben szereplő megjelölése**  
végzettségi szint: mester- (magister, master; rövidítve: MSc-) fokozat  
szakképzettség: okleveles fizikus  
a szakképzettség angol nyelvű megjelölése: Physicist
- 3. Képzési terület:** természettudomány
- 4. A mesterképzésbe történő belépésnél előzményként elfogadott szakok:**
  - 4.1. Teljes kreditérték beszámításával vehető figyelembe:** a fizika alapképzési szak.
  - 4.2. A 9.2. pontban meghatározott kreditek teljesítésével elsősorban számításba vehető továbbá** a kémia, a környezettan, a villamosmérnöki, a vegyészmérnöki, a gépészmérnöki, a mechatronikai mérnöki, az anyagmérnöki, a mérnökinformatikus, a matematika alapképzési szak.
  - 4.3. A 9.2. pontban meghatározott kreditek teljesítésével vehetők figyelembe továbbá:** azok az alapképzési és mesterképzési szakok, illetve a felsőoktatásról szóló 1993. évi LXXX. törvény szerinti szakok, amelyeket a kredit megállapításának alapjául szolgáló ismeretek összevetése alapján a felsőoktatási intézmény kreditátviteli bizottsága elfogad.
- 5. A képzési idő félévekben:** 4 félév
- 6. A mesterfokozat megszerzéséhez összegyűjtendő kreditek száma:** 120 kredit  
a szak orientációja: elméletorientált (60-70 százalék)  
a diplomamunka elkészítéséhez rendelt kreditérték: 30 kredit  
a szabadon választható tantárgyakhoz rendelhető minimális kreditérték: 6 kredit
- 7. A szakképzettség képzési területek egységes osztályozási rendszere szerinti tanulmányi területi besorolása:** 441/0533
- 8. A mesterképzési szak képzési célja és a szakmai kompetenciák**

A képzés célja fizikusok képzése, akik tudományos szakemberekként alkalmasak az alapvető természeti jelenségekben megnyilvánuló fizikai törvényszerűségek elméleti értelmezésére és kísérleti tanulmányozására, komplex folyamatok modellezésére, modern technológiákat alkalmazó berendezések és mérőeszközök fejlesztésére és magas színvonalú üzemeltetésére, valamint jártasak az informatika és numerikus módszerek fizikai alkalmazásában. Felkészültek tanulmányaik doktori képzésben történő folytatására.

  - 8.1. Az elsajátítandó szakmai kompetenciák**
    - 8.1.1. A fizikus**
      - a) tudása**

Rendszerszinten és összefüggéseiben ismeri a fizika főbb témaköreinek átfogó elméleti és gyakorlati ismeretanyagát.

Ismeri a fizika elméleti, kísérleti, és számítógépes módszereit, valamint a matematika és az informatika fizikát érintő területeit.

Ismeri a tudományos kutatás, az önképzés és a kommunikáció magas szintű módszereit.

Tisztában van a modern fizika lehetséges fejlődési irányaival és határaival.

Magas szinten rendelkezik természettudományos ismeretekkel és az erre épülő gyakorlat elemeinek ismeretével, és rendszerezni tudja azokat.

Ismeri azokat a fizikával kapcsolatos terepi, laboratóriumi és gyakorlati anyagokat eszközöket és módszereket, melyekkel a szakmáját haladó szinten gyakorolni tudja.

Elmélyült és alapos szakmai tudással rendelkezik, amelynek alkalmazása szükséges természeti folyamatok, természeti erőforrások, élő és élettelen rendszerek szakterületéhez tartozó gyakorlati problémáinak megoldásához.

Összefüggéseiben átlátja szakterületének vizsgálható folyamatait, rendszereit, és tudományos problémáit.

Ismeri a fizika folyamatait leíró fogalomrendszert és terminológiát, valamint szakterületén széles körű szakirodalmi tájékozottsággal rendelkezik.

#### **b) képességei**

Képes a természeti jelenségekben megnyilvánuló fizikai törvényszerűségek felismerésére, e jelenségek tudományos igényű kísérleti tanulmányozására és elméleti értelmezésére.

Képes bekapcsolódni az alap-, illetve alkalmazott fizikai kutatást végző kutatócsoportok munkájába.

Képes fizikai törvényekre és csúcstechnológiai folyamatokra alapozott ipari, informatikai és mérési rendszerek magas színvonalú fejlesztésére és üzemeltetésére.

Képes az informatika fizikát érintő szakterületeinek művelésére.

Rendszeres szakmai önképzéssel képes a fizika új tudományos eredményeinek feldolgozására és munkája során ezek alkotó alkalmazására.

Képes szakterületének vizsgálható folyamatait és rendszereit a fizikai tudományok gyakorlatában elfogadott módszerekkel tesztelni.

A fizikai tudományokban szerzett elmélyült ismeretei alapján képes kísérletek tervezésére, kivitelezésére és kiértékelésére.

Képes a fizikához és rokon területeihez kapcsolódó tudományos kérdések megfogalmazására.

Képes tudásának folyamatos gyarapítására és tanulmányainak doktori képzés keretében történő folytatására.

Tanulmányai során szerzett ismeretei és problémamegoldó készsége segítségével képes önálló és irányító munkakörök betöltésére a fizika tudományos eredményeit vagy módszereit felhasználó egyéb területeken (szakigazgatás, környezetvédelem stb.).

#### **c) attitűdje**

Jellemző tulajdonságai a kreativitás, rugalmasság, a probléma felismerő és megoldó készség, az intuíció, a módszeresség és adatfeldolgozási képesség.

Törekszik a modern fizika új eredményeinek megismerésére és minél szélesebb körű alkalmazására.

Szakterületén megkülönbözteti a tudományosan megalapozott és a kellően alá nem támasztott állításokat.

Jellemzi a környezettel szembeni érzékenység, a szakmai továbbképzéshez szükséges pozitív hozzáállás, és elkötelezettség a minőségi munkára.

Rendelkezik kezdeményező, döntéshozatali képességgel és személyes felelősségvállalással.

Munkatársaival aktívan együttműködik, konstruktív módon vesz részt csoportmunkában, kellő gyakorlat esetén vezetői feladatokat lát el.

Szakterülete problémáit szakemberek és laikusok számára egyaránt szakszerűen megfogalmazza.

Folyamatosan törekszik ismeretei bővítésére, új képességek megszerzésére.

#### **d) autonómiája és felelőssége**

A modern fizika területén nagyfokú önállósággal rendelkezik átfogó és speciális szakmai kérdések kidolgozásában, szakmai nézetek képviselésében és megindoklásában.

Tudatosan és felelősséggel vállalja a természettudományos világnézetet.

Magas szintű fizikai ismeretei, valamint kritikai és rendszerszintű gondolkodásmódja birtokában felelősen működik együtt szűkebb szakterületének, továbbá más tudományterületek szakmai képviselőivel.

Terepi és laboratóriumi tevékenysége során megkülönböztetett környezettudatossággal jár el.

Tudományos kutatásait a legmagasabb etikai normák figyelembe vételével végzi.

Tisztában van a tudományos gondolkodás, a pontos fogalomalkotás fontosságával, véleményét ezek figyelembevételével alakítja ki.

## **9. A mesterképzés jellemzői**

### **9.1. Szakmai jellemzők**

A szakképzettséghez vezető tudományágak, szakterületek, amelyekből a szak felépül:

természettudományi ismeretek (matematika legfeljebb 8 kredit, informatika és mérés technika legfeljebb 12 kredit) 4-16 kredit;

a modern fizika szakmai ismeretei (atomok és molekulák fizikája legfeljebb 6 kredit, kondenzált anyagok

fizikája legfeljebb 6 kredit, mag- és részecskefizika legfeljebb 9 kredit, statisztikus fizika legfeljebb 6 kredit, haladó szintű fizika laboratórium legfeljebb 8 kredit) 20-30 kredit;

a fizika tudományág területéről specializáció nélküli vagy specializációs szakmai modul 30-60 kredit:

a) specializáció választása nélkül

a következő témakörök közül legalább egy témakör választása legalább 15 kredit:

haladó elméleti fizika, matematikai fizika, atom- és molekulafizika, kvantumrendszerek fizikája, statisztikus fizika, számítógépes fizika, szilárdtest-fizika, részecske- és magfizika, asztrofizika, csillagászat, biológiai fizika, orvosi fizika, fizikai anyagtudomány, optika és lézerfizika, lézer-anyag kölcsönhatás, környezetfizika;

egyéb szakmai tárgyak legalább 6 kredit;

b) sajátos kompetenciákat eredményező, a képző intézmény által ajánlott specializáció a modern fizika területéről 30-45 kredit.

### **9.2. A 4.2. és 4.3. pont tekintetében mesterképzési képzési ciklusba való belépés minimális feltételei:**

A mesterképzésbe való belépéshez szükséges minimális kreditek száma 65 kredit az alábbi területek szerinti felosztásban:

fizika, fizikai kémia, elektronika, műszaki fizika területéről legalább 25 kredit;

matematika, informatika, programozás, számítástechnika területéről (ebből matematika legalább 10 kredit) legalább 18 kredit;

egyéb természettudományos ismeretek (kémia, anyagtudomány, nukleáris és környezetvédelmi ismeretek, mérés, folyamatszabályozás, irányítástechnika).

A mesterképzésbe való felvétel feltétele, hogy a hallgató a korábbi tanulmányai alapján legalább 40 kredittel rendelkezzen. A hiányzó krediteket a felsőoktatási intézmény tanulmányi és vizsgaszabályzatában meghatározottak szerint meg kell szerezni.

## **10. Nyelvtanulás és nyelvvizsga**

Egy félév szaknyelvi kurzus teljesítése kötelező (mely gyakorlati jeggyel zárul), ami kiváltható egy a saját szakján meghirdetett legalább 2 kredit értékű angol nyelvű tárggyal.

### **Záróvizsga**

#### **A záróvizsga célja:**

A végzős hallgató szakmai ismereteinek ellenőrzése, különös tekintettel az ismeretek alkalmazásában nyújtott képességeire. A záróvizsgán a végzős hallgatónak bizonyítania kell, hogy képes a magas szintű szakmai feladatok önálló ellátására és a felmerülő problémák gyors és hatékony megoldására. A záróvizsgán ugyancsak számot kell adnia előadó és vitakészségéről valamint alapos tárgyi ismereteiről.

#### **A záróvizsgára bocsátás feltételei:**

Záróvizsgára csak az a hallgató bocsátható, aki a fizikus mesterképzési szak tantervében előírt valamennyi tanulmányi kötelezettségének eleget tett, beleértve a minimum 120 kredit teljesítését, illetve ezen krediteknek az egyes szakmacsoportokon belüli megoszlását is.

További feltétel, hogy a hallgató témavezetői útmutatásokkal, de önálló munkára alapozva készítse el a diplomadolgozatát, és azt a vizsgaidőszak kezdete előtt egy hónappal egy példányban bekötte nyújtsa be a témavezetőhöz és egy példányban elektronikusan (CD-n, vagy interneten) az egyetemi könyvtár részére. A dolgozatot külső (nem a témavezető tanszékéhez tartozó) bíráló értékeli, és javaslatot tesz a diplomamunka érdemjegyre a vizsgaidőszak kezdete előtt legalább egy héttel, majd a bírálónak a diplomadolgozatot a záróvizsga bizottság elnökéhez kell eljuttatnia.

#### **A záróvizsga lebonyolítása:**

A záróvizsga két részből áll:

- 1) a diplomamunka bemutatása és megvédése és
- 2) szóbeli szakmai vizsga a Záróvizsga Bizottság jelenlétében, előre rögzített tételek alapján.

#### **1) A diplomamunka bemutatása és megvédése**

A diplomamunka önálló fizikai kutatási probléma megoldását bemutató alkotás. A szakfelelős által jóváhagyott, az Intézet Oktatási Bizottsága által meghirdetett diplomamunka témákra a képzés 2. félévében kell jelentkezni. A témaválasztást az Oktatási Bizottsága hagyja jóvá. A kutatómunkát és a kész diplomadolgozatot a záróvizsga megkezdése előtt a bíráló értékeli és javaslatot tesz a diplomamunka minősítésére. Ha a diplomamunka értékelése elégtelen, a hallgatónak új diplomamunkát kell készítenie. Az új diplomamunkát leghamarabb egy évvel később lehet benyújtani. A diplomamunka pótlásának feltételeit és módját az intézet Oktatási Bizottsága állapítja meg. A diplomamunka bemutatása a záróvizsgán történik. A jelölt legfeljebb 10 percen ismerteti munkájának főbb eredményeit, majd válaszol a bíráló és a vizsgabizottság tagjai által feltett kérdésekre. A bírálónak kötelessége,

hogy a munkához kapcsolódóan kérdéseket tegyen fel, amelyek akár a hiányosságok, tévedések, akár a témával összefüggő általánosabb kérdések felvetését jelenthetik. A vita további részében az ülés valamennyi résztvevője tehet fel kérdéseket. A diplomamunka és a védés értékelése – a témavezető javaslatának figyelembevételével – az ötfokozatú skálán egyetlen érdemjeggyel történik.

### **A diplomamunka formai követelményei**

A diplomamunka min. 25 (a címlap és a tartalomjegyzék kivételével), laponként csak az egyik oldalra nyomtatott oldalakból áll. Főcím: 16 pt, alcímek: 14 pt, Szöveg: 12 pt, 1.5 sortáv. Margók: bal oldali és alsó: 3 cm; jobb oldali és felső: 2,5 cm. Az oldal alján folyamatos az oldalszámozás.

A diplomamunka felépítése: Címlap, „Nyilatkozat” (plagium), Tartalomjegyzék, Bevezetés, Irodalmi áttekintés, Saját munka kifejtése, Összefoglalás, Irodalomjegyzék, szükség esetén Mellékletek és függelék.

### **2) A szóbeli szakmai vizsga**

A végzős hallgatók szakmai ismereteinek ellenőrzése a vizsgabizottság tagjainak jelenlétében lezajló szóbeli vizsgán történik. A vizsga zárt, de a Vizsgabizottság Elnökének előzetes engedélye alapján megfigyelőként bárki megjelenhet. A számon kérendő ismereteket két témakörbe csoportosítjuk:

**A:** törzsanyag témakörök

**B:** a választott blokk témakörei

Az egyes témakörök tételes listáját az Intézet Oktatási Bizottsága állítja össze, és a vizsga megkezdése legalább 3 hónappal hallgatók számára hozzáférhetővé teszi az intézeti honlapon (<https://fizika.unideb.hu/fizikus-msc-zarovizsga>). A témakörök egyes tételei nem a korábbi vizsgák tételeinek megismétlését jelentik, hanem a magasabb szintű ismereteknek egy olyan összegző jellegű számonkérését, amely természetesen több ponton támaszkodik a korábbi ismeretekre is. A vizsgán minden hallgató 2 tételt húz, egyet az **A** témakörökből és egyet a választott blokkból összeállított **B** témakörökből. A jelölt mindkét témában 10-15 percen ad számot tudásáról, amelynek eredményét a vizsgabizottság zárt ülésen ötfokozatú skálán egy-egy érdemjeggyel értékeli. A diploma érdemjegyét az aktuális Tanulmányi- és Vizsgaszabályzat alapján határozzák meg.

### **Az oklevél minősítése**

A (MSc) mesterképzésben az oklevél minősítésének megállapítása az aktuális Tanulmányi- és vizsgaszabályzat alapján történik.

A Debreceni Egyetem Tanulmányi- és Vizsgaszabályzata alapján az oklevél minősítése:

kiváló	4,81 – 5,00
jeles	4,51 – 4,80
jó	3,51 – 4,50
közepes	2,51 – 3,50
elégséges	2,00 – 2,50

### **A képzés testnevelés és idegennyelv követelményei**

A fizikus mesterszakon az oklevél megszerzésének általános követelményeit a Debreceni Egyetem Tanulmányi- és Vizsgaszabályzata tartalmazza.

#### **Testnevelés**

A Debreceni Egyetem nappali mesterképzésben (MSc, MA) részt vevő hallgatóknak egy féléven keresztül heti két óra testnevelési foglalkozáson való részvétel kötelező. A testnevelési követelmények teljesítése a végbizonyítvány (abszolutorium) kiállításának feltétele. A testnevelés kurzus 1 kredit/félév kreditértékű.

A testnevelési kurzus felvétele a Neptun rendszerben a megadott határidőn belül lehetséges.

Felmentés kérhető egészségügyi okok vagy igazolt versenysport tevékenység alapján.

Felmentési kérelmeket a [www.sport.unideb.hu](http://www.sport.unideb.hu) honlapon található formanyomtatványon kell beadni.

Határidők: szeptember 30, ill. február 28.

Helye: Debreceni Egyetem Sporttudományi Koordinációs Intézet

### **Munkavédelem**

A végbizonyítvány (abszolutórium) kiállításának előfeltétele a **Munkavédelem kurzus teljesítése**. A kurzus 1 kredit/félév kreditértékű.

#### **A mesterséges intelligenciára vonatkozó ismeretek**

A Diplomamunka kurzusok keretében a hallgatók megismerkednek a mesterséges intelligencia tudományos életben történő alkalmazásának lehetőségeivel, korlátaival és előírásaival. A Fizikus MSc első félévében a szakmai törzsanyag keretein belül a Részecskefizika 1. (TTFME0104) és Környezetfizika laboratórium (TTFML0106) tantárgyaknál is találkozhatnak a mesterséges intelligencia alkalmazásával kapcsolatos ismeretekkel.

A mesterséges intelligencia tanulás során történő magas szintű alkalmazása érdekében a Természettudományi és Technológiai Karon a Debreceni Egyetem Multimédia és E-learning Technikai Központ szervezésében szabadon választható kurzus kerül meghirdetésre.

#### **Korrupció-megelőzési ismeretek**

Az ilyen jellegű ismeretek átadása az ÁJK által meghirdetett kurzus keretében történik, amelynek teljesítése kötelező.

#### **Idegennyelv**

Egy félév államilag finanszírozott, gyakorlati jeggyel záruló szaknyelvi kurzus teljesítése kötelező, ami kiváltható egy a hallgató saját szakján meghirdetett legalább 2 kredit értékű angol nyelvű tárggyal.

**I. A nappali tagozatos Fizikus MSc szak tanterve (az óra és vizsgaterv táblázatos összegzése)**

Tantárgy kódja	Tantárgy neve	Előtanulmányi feltétel	Tárgyfelelős	Értékelés módja (gyj, koll.)	Tanóra típusa	Tantárgy besorolása	Óraszám	Kredit
<b>ELSŐ FÉLÉV</b>								
TTFME0102	Kvantummechanika 2.		Dr. Nagy Sándor	k	előadás, gyakorlat	kötelező	28+14+0	4
TTFME0104	Részecskefizika 1.		Dr. Kardos Ádám	k	előadás, gyakorlat	kötelező	28+14+0	4
TTFME0105	Kondenzált anyagok 3.		Dr. Erdélyi Zoltán	k	előadás, gyakorlat	kötelező	28+14+0	4
TTFML0106	Környezetfizika laboratórium		Dr. Csige István	g	labor	kötelező	0+0+56	4
TTFME0101	Atom- és molekulafizika I.		Dr. Csehi András	k	előadás, gyakorlat	kötelező	28+14+0	4
TTFME0103	Statisztikus fizika 2.		Dr. Kun Ferenc	k	előadás, gyakorlat	kötelező	28+14+0	4
	*Szabadon választható			k/g	előadás/ gyakorlat/ labor	szabadon választható	28/14/56	6
<b>Össz. óraszám</b>							~140/168+ 70/84+56/112	
<b>Össz. kredit</b>								30
<b>MÁSODIK FÉLÉV</b>								
TTFME0121	Elektronszerkezeti módszerek és kvantumdinamika	TTFME0101	Dr. Vibók Ágnes	k	előadás, gyakorlat	kötelezően választható	28+14+0	5
TTFME0125	Atom- és molekulafizika II.	TTFME0101	Dr. Csehi András	k	előadás, gyakorlat	kötelezően választható	28+14+0	5
TTFME0163	Nukleáris asztrofizika		Dr. Fülöp Zsolt	k	előadás	kötelezően választható	28+0+0	3
TTFML0164	Magfizikai mérések		Dr. Zilizi Gyula	g	labor	kötelezően választható	0+0+56	4
TTFME0132	Számítógépes modellezés		Dr. Kun Ferenc	k	előadás, gyakorlat	kötelezően választható	28+14+0	5
TTFME0133	Fázisátalakulások és kritikus jelenségek 1.		Dr. Gulácsi Zsolt	k	előadás, gyakorlat	kötelezően választható	28+14+0	5
TTFME0134	Komplex hálózatok és alkalmazásaik		Dr. Nagy Sándor	k	előadás, gyakorlat	kötelezően választható	28+14+0	5
TTFME0141	Nanodiffúzió és szegregáció	TTFME0105	Dr. Erdélyi Zoltán	k	előadás	kötelezően választható	28+0+0	3
TTFML0144	Anyagtulajdonságok mérése	TTFME0105	Dr. Cserháti Csaba	g	labor	kötelezően választható	0+0+28	2
TTFME0151	Sugárvédelem és dozimetria		Dr. Erdélyiné Dr. Baradács Eszter	k	előadás, labor	kötelezően választható	28+0+14	4
TTFME0155	Légkörfizika		Dr. Csige István	k	előadás	kötelezően választható	28+0+0	3
TTFML0156	Környezetfizikai mérések		Dr. Erdélyiné Dr. Baradács Eszter	g	labor	kötelezően választható	0+0+28	2
TTFME0172	Kondenzált anyagok fizikája 4.		Dr. Gulácsi Zsolt	k	előadás, gyakorlat	kötelezően választható	28+14+0	5
TTFME0177	A Schwinger-Keldysh formalizmus alkalmazása		Dr. Nagy Sándor	k	előadás, gyakorlat	kötelezően választható	28+14+0	5
TTFME0114	Relativitáselmélet		Dr. Nagy Sándor	k	előadás, gyakorlat	kötelezően választható	28+14+0	5
<b>Össz. óraszám</b>							~168+84+84	
<b>Össz. kredit</b>								30

HARMADIK FÉLÉV								
TTFML0191	Diplomamunka 1			g	gyakorlat	kötelező	0+15+0	10
TTFME0122	Atomok és molekulák elektromágneses térben	TTFME0121	Dr. Vibók Ágnes	k	előadás, gyakorlat	kötelezően választható	28+14+0	5
TTFME0161	Haladó magfizika		Dr. Darai Judit	k	előadás, gyakorlat	kötelezően választható	28+14+0	4
TTFME0162	Nukleáris technika		Dr. Oláh László	k	előadás, gyakorlat	kötelezően választható	28+14+0	4
TTFME0165	Fejezetek napjaink magfizikájából		Dr. Darai Judit	k	előadás, gyakorlat	kötelezően választható	28+14+0	4
TTFME0131	Komplex rendszerek fizikája		Dr. Kun Ferenc	k	előadás, gyakorlat	kötelezően választható	28+14+0	5
TTFME0142	Számítógépes modellezés	TTFME0141	Dr. Erdélyi Zoltán	k	előadás, labor	kötelezően választható	14+0+42	5
TTFME0146	Transzmissziós és analitikai elektronmikroszkópia		Dr. Cserháti Csaba	k	előadás, gyakorlat, labor	kötelezően választható	28+14+14	5
TTFME0153	Környezetfizika 3.		Dr. Erdélyiné Dr. Baradács Eszter	k	előadás, gyakorlat	kötelezően választható	28+14+0	4
TTFME0154	Környezeti folyamatok modellezése		Dr. Erdélyiné Dr. Baradács Eszter	k	előadás, gyakorlat	kötelezően választható	28+14+0	4
TTFME0152	Nukleáris analitikai módszerek a környezetkutatásban		Dr. Molnár Mihály	k	előadás	kötelezően választható	28+0+0	3
TTFME0174	Kvantum Rendszerek Soktestproblémája 1.		Dr. Gulácsi Zsolt	k	előadás, gyakorlat	kötelezően választható	28+14+0	5
TTFME0112	Részecskefizika 2.	TTFME0104	Dr. Kardos Ádám	k	előadás, gyakorlat	kötelezően választható	28+14+0	4
TTFME0113	Kvantumtérelmélet	TTFME0114	Dr. Nándori István	k	előadás, gyakorlat	kötelezően választható	28+14+0	6
<b>Össz. óraszám</b>							~112+106+0/14	
<b>Össz. kredit</b>								30
NEGYEDIK FÉLÉV								
TTFML0192	Diplomamunka 2			g	gyakorlat	kötelező	0+30+0	20
TTFME0143	Mágnesség és nanomágnesség		Dr. Daróczy Lajos	k	előadás, gyakorlat, labor	kötelezően választható	28+14+14	5
TTFME0175	A funkcionális renormálási csoport módszer alapjai		Dr. Nándori István	k	előadás, gyakorlat	kötelezően választható	28+14+0	5
TTFME0176	Kvantum Rendszerek Soktestproblémája 2.	TTFME0174	Dr. Gulácsi Zsolt	k	előadás, gyakorlat	kötelezően választható	28+14+0	5
TTFME0111	Részecskefizikai standard modell	TTFME0113	Dr. Kardos Ádám	k	előadás, gyakorlat	kötelezően választható	28+14+0	5
<b>Össz. óraszám</b>							~ 56+58+0/14	
<b>Össz. kredit</b>								30

Az összkredit értékbe még beleértendő a 6 szabadon választható kredit, amelyeket lehetőség szerint az első félévben ajánlott felvenni (előadásként, gyakorlatként, ill. laborként).

A szabadon választható tárgyakat a TTK-n meghirdetett tárgyak közül lehet választani.

A kötelezően választható szakmai tárgyakat négy blokkból, egyenként 15-15 kredit értékben kell választani.

A kötelező tárgyak magyar nyelven, a kötelezően választható szakmai tárgyak pedig – igény/megegyezés szerint - angol nyelven is hallgathatók.

A Diplomamunka megkezdésének feltétele az első féléves törzsanyag tárgyak teljesítése.

## Blokkok

<b>Atom-, molekula- és optikai fizika (Vibók Ágnes)</b>					
Tárgy kódja	Tárgy neve	Óraszám	Számon- kérés	Össz. kredit	Előfeltétel
TTFME0121	Elektron szerkezeti módszerek és kvantumdinamika	2+1+0	k	5	TTFME0101
TTFME0122	Atomok és molekulák elektromágneses térben	2+1+0	k	5	TTFME0121
TTFME0125	Atom- és molekulafizika II.	2+1+0	k	5	TTFME0101

<b>Atommag és nukleáris asztrofizika (Zilizi Gyula)</b>					
Tárgy kódja	Tárgy neve	Óraszám	Számon- kérés	Össz. kredit	Előfeltétel
TTFME0161	Haladó magfizika	2+1+0	k	4	
TTFME0162	Nukleáris technika	2+1+0	k	4	
TTFME0163	Nukleáris asztrofizika	2+0+0	k	3	
TTFML0164	Magfizikai mérések	0+0+4	g	4	
TTFME0165	Fejezetek napjaink magfizikájából	2+1+0	k	4	

<b>Komplex rendszerek és statisztikus fizika (Kun Ferenc)</b>					
Tárgy kódja	Tárgy neve	Óraszám	Számon- kérés	Össz. kredit	Előfeltétel
TTFME0131	Komplex rendszerek fizikája	2+1+0	k	5	
TTFME0132	Számítógépes modellezés	2+1+0	k	5	
TTFME0133	Fázisátalakulások és kritikus jelenségek 1.	2+1+0	k	5	
TTFME0134	Komplex hálózatok és alkalmazásaik	2+1+0	k	5	

<b>Kondenzáltanyag fizika (Erdélyi Zoltán)</b>					
Tárgy kódja	Tárgy neve	Óraszám	Számon- kérés	Össz. kredit	Előfeltétel
TTFME0141	Nanodiffúzió és szegregáció	2+0+0	k	3	TTFME0105
TTFME0142	Számítógépes modellezés	1+3+0	k	5	TTFME0141
TTFME0143	Mágnesség és nanomágnesség	2+1+1	k	5	
TTFML0144	Anyagtulajdonságok mérése	0+0+2	g	2	TTFME0105
TTFME0146	Transzmissziós és analitikai elektronmikroszkópia	2+1+1	k	5	

<b>Környezetfizika (Csige István)</b>					
Tárgy kódja	Tárgy neve	Óraszám	Számon- kérés	Össz. kredit	Előfeltétel
TTFME0153	Környezetfizika 3.	2+1+0	k	4	
TTFME0154	Környezeti folyamatok modellezése	2+1+0	k	4	
TTFME0151	Sugárvédelem és dozimetria	2+0+1	k	4	
TTFME0155	Légkörfizika	2+0+0	k	3	
TTFML0156	Környezetfizikai mérések	0+0+2	g	2	
TTFME0152	Nukleáris analitikai módszerek a környezetkutatásban	2+0+0	k	3	

<b>Kvantummechanikai rendszerek (Gulácsi Zsolt)</b>					
Tárgy kódja	Tárgy neve	Óraszám	Számon- kérés	Össz. kredit	Előfeltétel
TTFME0172	Kondenzált anyagok fizikája 4.	2+1+0	k	5	
TTFME0174	Kvantum Rendszerek Soktestproblémája 1.	2+1+0	k	5	
TTFME0175	A Funkcionális Renormálási Csoport Módszer Alapjai	2+1+0	k	5	
TTFME0176	Kvantum Rendszerek Soktestproblémája 2.	2+1+0	k	5	TTFME0174
TTFME0177	A Schwinger-Keldysh formalizmus alkalmazása kvantumelméletekben	2+1+0	k	5	

Részecskefizika és alapvető kölcsönhatások (Kardos Ádám)					
Tárgy kódja	Tárgy neve	Óraszám	Számon- kérés	Össz. kredit	Előfeltétel
TTFME0114	Relativitáselmélet	2+1+0	k	5	
TTFME0113	Kvantumtérelmélet	2+1+0	k	6	TTFME0114
TTFME0112	Részecskefizika 2.	2+1+0	k	4	TTFME0104
TTFME0111	Részecskefizikai standard modell	2+1+0	k	5	TTFME0113

### A szak orientáltsága

A kötelező tárgyak körében az elméleti orientáltságú tárgyak creditszáma 80, aránya 66,6%  
A kötelező tárgyak körében a gyakorlati orientáltságú tárgyak creditszáma 40, aránya 33,3%,  
A szak orientáltsága elméleti (66,6%).

# Tantárgyi programok

## Szakmai törzsanyag

**A tantárgy neve:** Kvantummechanika 2.

**Kódja:** TTFME0102

**Óraszám/hét:** 2+1+0 (előadás+tantermi gyakorlat+laboratóriumi gyakorlat)

**Számonkérés módja:** K (kollokvium/gyakorlati jegy)

**Kredit:** 4

**Tárgyfelelős:** Dr. Nagy Sándor

**A kurzus célja,** hogy a hallgatók bővítsék az ismereteiket a kvantummechanika tárgykörében; megismerjék és használni tudják a kvantummechanika közelítő eljárásait; tisztában legyen a nemrelativisztikus kvantummechanika alkalmazhatóságának határaival, és megismerjék a relativisztikus kvantummechanika alapelemeit.

**Tematika:** Impulzusmomentum összeadása. Kvantum statisztikus mechanika. Klasszikus határeset, a WKB közelítés. Időfüggetlen perturbációs számítás, nemdegenerált és degenerált eset. Variációs módszerek. Időfüggő perturbációs számítás. Lippmann-Schwinger egyenlet, Born közelítés, optikai tétel. Rezonancia jelenségek a részecskék ütközésénél. Sokrészecskés rendszerek és közelítő módszerei, Hartee-Fock módszer, Thomas-Fermi módszer. A kvantummechanikai pályaintegrál. Relativisztikus kvantummechanika, Dirac-egyenlet, Lorentz szimmetria. A Dirac egyenlet megoldása szabad kvantumrészecskére. Propagátorok.

**Kötelező olvasmány:**

Nagy Sándor: Bevezetés a kvantummechanikába (elektronikus jegyzet)

**Ajánlott szakirodalom:**

J. J. Sakurai, Modern Quantum Mechanics (Addison-Wesley, 2011)

James D. Björken, Sidney D. Drell, Relativistic Quantum Mechanics (McGraw-Hill, 1964)

**A tantárgy neve:** Részecskefizika 1.

**Kódja:** TTFME0104

**Óraszám/hét:** 2+1+0 (előadás+tantermi gyakorlat+laboratóriumi gyakorlat)

**Számonkérés módja:** K (kollokvium/gyakorlati jegy)

**Kredit:** 4

**Tárgyfelelős:** Dr. Kardos Ádám

**A kurzus célja,** hogy a hallgatók megismerkedjenek a modern részecskefizika alapfogalmaival, a kvarkmodellel és az alapvető kölcsönhatásokkal; megismerkedjenek a nagyenergiás fizika kísérleti technikájával és azok gyakorlati alkalmazásával; megértsék a szimmetriák alapvető szerepét a mikrofizikában.

**Tematika:** Szimmetriák és részecskék. A sztatikus kvarkmodell. A szabad fermion. A kvarkmodell kísérleti bizonyítékai. Részecskegyorsítók. Részecskedetektorok. Eseményregisztrálás. A statisztikus tanulás (mesterséges intelligencia) szerepe az adatelemzésben. Alapkísérletek (paritásviág, anomális mágneses momentum). CP és CPT, a kaonok. Neutrínókísérletek. Orvosi alkalmazások. Kozmológiai alapismeretek.

**Kötelező olvasmány:**

Horváth Dezső, Trócsányi Zoltán: Bevezetés az elemi részecskék fizikájába, 1-15. fejezet, Typotex, Budapest, 2017.

agy Sándor: Bevezetés a kvantummechanikába (elektronikus jegyzet)

**Ajánlott szakirodalom:**

J. Leon Lederman: Az isteni a-tom avagy Mi a kérdés, ha a válasz a Világegyetem?, Typotex, Budapest.

Donald H. Perkins: Introduction to High Energy Physics, Addison-Wesley, Menlo Park, USA.

Francis Halzen and Alan D. Martin: Quarks and Leptons. An Introductory Course in Modern Particle Physics, John Wiley and Sons, New York.

**A tantárgy neve:** Kondenzált anyagok 3.

**Kódja:** TTFME0105

**Óraszám/hét:** 2+1+0 (előadás+tantermi gyakorlat+laboratóriumi gyakorlat)

**Számonkérés módja:** K (kollokvium/gyakorlati jegy)

**Kredit:** 4

**Tárgyfelelős:** Dr. Erdélyi Zoltán

**A kurzus célja,** hogy a hallgatók korábbi kvantummechanikai, hőtani, kondenzált anyagok tanulmányaikban szerzett ismeretekre alapozva bővítsék ismereteiket kondenzált anyagok fizikája területén; megismerjék a kétalkotós fázisdiagrammok kiszámolásának alapjait; megismerjék a diffúzió leírásának alapjait külső hajtóerők esetében; megismerjék az alapvető fázisátalakulásokat kétalkotós rendszerekben; megismerjék a határfelületek, szemcsehatárok szerepét szilárdtestekben és azok alapvető elméletét; elsajátítsák a diffrakció és reflektometria alapjait reciprokárcstér mellett, és azokat alkalmazni tudják röntgen- és neutrondiffrakcióra; elsajátítsák a doménmágnesség elméletének alapjait.

**Tematika:** Fázisdiagramok: Kétkotós rendszerek alapvető termodinamikai leírása, Calphad módszer alapkoncepciójának megismerése; Diffúzió külső hajtóerők esetében: Nernst-Einstein egyenlet, termodinamikai hajtóerő, intrinsic diffúziós együttható; Fázisátalakulások: spinodális bomlás, fáziszeváparáció, rend-rendezetlen átalakulás, nukleáció, martenzites átalakulások; Szegregáció: szegregáció hajtóereje, izotermák; Határfelületek, szemcsehatárok; Szemcsehatárdiffúzió: Harrison-féle osztályozás; Diffrakció, reflektometria: egydimenziós periodikus szerkezetek diffrakciós elmélete direkt- és reciprok térben, neutron -és röntgen diffrakció/reflektometria; Doménmágnesség.

**Kötelező olvasmány:**

Charles Kittel: Bevezetés a szilárd test fizikába, Műszaki könyvkiadó, Budapest

A.G. Guy: Fémfizika, Műszaki Könyvkiadó, Budapest, 1978

**Ajánlott szakirodalom:**

William D. Callister, Jr. David G. Rethwisch Materials Science and Engineering, An Introduction, Wiley

M.A. Omar: Elementary Solid State Physics, Principles and Applications CALPHAD (Calculation of Phase Diagrams): A Comprehensive Guide, Volume 1, 1st Edition, Editors: N. Saunders A.P. Miodownik

**A tantárgy neve:** Környezetfizika laboratórium

**Kódja:** TTFML0106

**Óraszám/hét:** 0+0+4 (előadás+tantermi gyakorlat+laboratóriumi gyakorlat)

**Számonkérés módja:** G (gyakorlati jegy)

**Kredit:** 4

**Tárgyfelelős:** Dr. Csige István

**A kurzus célja,** hogy a hallgatók betekintést nyerjenek olyan laboratóriumi kísérleti módszerek használatába, melyek alkalmasak a környezet egyes folyamatainak, jelenségeinek tanulmányozására; ismerjék meg az alkalmazott módszerek működési alapelveit és technikai részleteinek megértéséhez szükséges legfontosabb szakmai fogalmakat és mennyiségeket; képessé váljanak annak helyes megítélésére, hogy a megismert módszerek milyen környezetvizsgálati feladatok megoldásához használhatók; szerezzenek gyakorlati tapasztalatot a módszerek alkalmazásában a betekintés szintjén.

**Tematika:** Gamma-sugárzó radionuklidok meghatározása talajban. Környezeti alfa-radioaktivitás mérése nyomdetektorral. Környezeti vízminták tríciumkoncentrációjának mérése <sup>3</sup>He módszerrel. Radiokarbonos kormeghatározás és környezetkutató. Légköri aeroszol mintavétele és analízise PIXE módszerrel. Stabilizotóparány mérés. K-Ar kormeghatározás. Mesterséges intelligencia használata környezeti adatbázisokból történő adatgyűjtésre és egyes környezetfizikai problémák elemzésére. Környezeti minták röntgen-emissziós analízise. Az aktuális tanévben meghirdetett kurzus konkrét programját a tárgyfelelős oktató rögzíti a fenti kínálatból kiindulva, a gyakorlatvezető oktatókkal végzett egyeztetés útján, a gyakorlatvezető oktatók és a tárgyi feltételek aktuális hozzáférhetősége alapján.

**Kötelező olvasmány:**

Az egyes gyakorlatokra vonatkozóan a gyakorlatvezető oktatók által az adott tanévben kötelezően előírt adatforrások.

**Ajánlott szakirodalom:**

Az egyes gyakorlatokra vonatkozóan a gyakorlatvezető oktatók által az adott tanévben kötelezően előírt adatforrások.

**A tantárgy neve:** Atom- és molekulafizika I.

**Kódja:** TTFME0101

**Óraszám/hét:** 2+1+0 (előadás+tantermi gyakorlat+laboratóriumi gyakorlat)

**Számonkérés módja:** K (kollokvium/gyakorlati jegy)

**Kredit:** 4

**Tárgyfelelős:** Dr. Csehi András

**A kurzus célja,** hogy a hallgatók korábbi kvantummechanikai ismereteiket felhasználva megismerkedjenek az atom- és molekulafizika fogalomrendszerével, törvényszerűségeivel; képesek legyenek atomok és molekulák Schrödinger-egyenletének felírására és a megoldások diszkutálására; megismerkedjenek az atomok és molekulák elektronszerkezeti sajátágaival, valamint alapvető részecske- és fotonfizikai folyamataival; bővítsék ismereteiket az atom- és molekulafizikában használatos fizikai mennyiségekről; gyakorlatot szerezzenek egyszerű atomfizikai számítások végzésében.

**Tematika:** Egyelektronos atomok elektronszerkezete. Finom- és hiperfinom szerkezet, relativisztikus- és spinpálya korrekciók. Alkáli-fémek és többelektronos atomok elektronszerkezete. LS- és jj-csatolások. Stark-effektus és Zeeman-effektus. Időfüggő Schrödinger-egyenlet periodikus elektromágneses tér jelenlétében. Molekulák Schrödinger-egyenlete, a Born-Oppenheimer közelítés. Kétatomos molekulák spektruma: rotációs átmenetek, rovibrációs spektrumvonalak, elektronállapotok közötti átmenetek. Kiválasztási szabályok. Kétatomos molekulák elektronszerkezete. A H<sub>2</sub><sup>+</sup> molekulaion, molekulapályák. Többatomos molekulák aspektusa. Molekulák szimmetriája.

**Kötelező olvasmány:**

B. H. Bransden, C. J. Joachain: Physics of atoms and molecules, Longman Scientific & Technical

D. J. Griffiths: Introduction to Quantum Mechanics, Prentice-Hall: New Jersey

**Ajánlott szakirodalom:**

**Kapuy Ede, Török Ferenc: Az atomok és molekulák kvantumelmélete, Akadémiai kiadó, Budapest**

I. N. Levine: Quantum Chemistry, Prentice Hall, 5 edition

**A tantárgy neve:** Statisztikus fizika 2.

**Kódja:** TTFME0103

**Óraszám/hét:** 2+1+0 (előadás+tantermi gyakorlat+laboratóriumi gyakorlat)

**Számonkérés módja:** K (kollokvium/gyakorlati jegy)

**Kredit:** 4

**Tárgyfelelős:** Dr. Kun Ferenc

**A kurzus célja,** hogy a hallgatók korábbi statisztikus fizikai tanulmányaikra alapozva bővítsék ismereteiket a statisztikus fizika elméletének és modern alkalmazásainak területén; megismerjék a nem-egyensúlyi rendszerek statisztikus leírásának módszertanát és legfontosabb összefüggéseit; megismerjék, megértsék és leírják azokat a jelenségeket és alkalmazásokat, amelyek a nem-egyensúlyi statisztikus fizika segítségével értelmezhetők; gyakorlatot szerezzenek statisztikus fizikai számítások kivitelezésében.

**Tematika:** Időfüggő egyensúlyi fluktuációk, korrelációs függvények, sűrűségingadozások térbeli korrelációja. A korrelációs függvények szimmetria tulajdonságai. Fluktuációk spektrális felbontása, a spektrális sűrűség. A spektrális sűrűség és a korrelációs függvény Fourier transzformáltjának kapcsolata, a Wiener-Hincsin-tétel. Zajspektrum és szórás-kísérletek, a statikus szerkezeti faktor kísérleti meghatározása. Korrelációk és válaszfüggvények. Az általánosított szuszceptibilitás és kapcsolata az egyensúlyi fluktuációkkal. Fluktuáció-disszipáció tétel. A lineáris válasz elmélete. Nem-egyensúlyi sokaságok. Lineáris transzport, transzportegyütthatók, entrópiaprodukció. Elektromos- és hővezetés, Fick törvény. Kereszteffektusok, Seebeck- és Peltier-effektus, a Thomson-összefüggés. A transzportegyütthatók mátrixának szimmetriája, az Onsager-féle regressziós hipotézis, mikroszkopikus reverzibilitás, Onsager-féle reciprocitási törvény. Sztochasztikus folyamatok általános leírása, valószínűség számítási alapok. Véletlen folyamatok jellemzése véges idősorok eloszlásaival, momentumok, kumulánsok, kompatibilitási feltétel, feltételes valószínűség. Markov-folyamat, homogén Markov-folyamat. Chapman–Kolmogorov-egyenlet. Brown-mozgás, bolyongás. Einstein-modell. Diffúzió. Smoluchowski-féle tárgyalás. Négyzetes elmozdulás, diffúziós együttható. Centrális határeloszlás tétel. Brown-mozgás potenciálban. Vezetési jelenségek tárgyalása Brown-mozgásként, Nyquist-zaj. Diffúziós folyamatok, Fokker–Planck-egyenlet, Wiener-folyamat, Gauss-típusú fehér zaj. Langevin-egyenlet, autokorrelációs függvény. Az ekvivalens Fokker–Planck-egyenlet származtatása. Ornstein–Uhlenbeck-folyamat. Általánosítás több változóra. Fluktuáció-disszipáció tétel, fizikai tartalma és következményei. Master egyenlet származtatása, stacionárius megoldások, részletes egyensúly, időtükrözési invariancia. Véges állapotter esete. A Master egyenlettel vizsgálható jelenségek. A Master egyenlettel történő leírás kapcsolata a Monte Carlo szimulációs módszerekkel. A H-tétel és kapcsolata az entrópiával. A H-tétel alkalmazásai. A Boltzmann-féle transzportegyenlet, ütközési integrál. Az entrópia növekedése. Az ütközési integrál Master-egyenletre épülő származtatása, relaxációs idő közelítés, a klasszikus ideális gáz és az alapállapotú fermion gáz elektromos vezetőképessége.

**Kötelező olvasmány:**

Sailer Kornél, Statisztikus fizika 2. (egyetemi jegyzet, Debreceni Egyetem).

**Ajánlott szakirodalom:**

R. Kubo, M. Toda, and N. Hashitsume, Statistical Physics II – Nonequilibrium Statistical Mechanics (Springer Verlag, Heidelberg, 1985).

P.L. Krapivsky, S. Redner, and E. Ben-Naim, A Kinetic View of Statistical Physics (Cambridge University Press, 2010).

**A tantárgy neve:** Elektronszerkezeti módszerek és kvantumdinamika

**Kódja:** TTFME0121

**Óraszám/hét:** 2+1+0 (előadás+tantermi gyakorlat+laboratóriumi gyakorlat)

**Számonkérés módja:** K (kollokvium/gyakorlati jegy)

**Kredit:** 5

**Tárgyfelelős:** Dr. Vibók Ágnes

**Előfeltétel:** Atom- és molekulafizika I. (TTFME0101)

**A kurzus célja,** hogy a hallgatók korábbi atom és molekulafizikai tanulmányaikban szerzett ismeretekre alapozva megértsék, hogy a kétatomos molekulák esetétől eltekintve, a molekuláris rendszerek elektronszerkezetét és magdinamikáját külön szükséges tárgyalni; képessé váljanak a variációs és perturbációs típusú elektronszerkezeti módszerek elsajátítására és azok egyszerű esetekben történő alkalmazására; képessé váljanak a magdinamikát leíró időtől- függő Schrödinger-egyenlet felírására és egyszerűbb esetekben történő tárgyalására.

**Tematika:** Szabad atomok és molekulák Schrödinger-egyenlete. A tömegközéppont leválasztása. A Born-Oppenheimer és az adiabatikus közelítés. Atomi egységek. A differenciális Hellmann-Feynman tétel. Az integrális Hellmann-Feynman tétel. A viriál tétel. Variációs elv. Variációs módszerek. Lineáris variációs (Ritz) módszer. Eckart-egyenlőtlenség. Skálázás. Az elektron Schrödinger-egyenlet megoldására alkalmas közelítő módszerek. Rayleigh-Schrödinger perturbációs elmélet. Nem degenerált eset. Rayleigh-Schrödinger perturbációs elmélet: degenerált eset. Brillouin-Wigner perturbációs elmélet. Hullámfüggvények. Spinpályák. Antiszimmetrikus hullámfüggvények. Szinglett és triplett állapotok. Slater-determináns. Determináns hullámfüggvények. Determináns hullámfüggvények közötti mátrixelemek számítása. Konfigurációs kölcsönhatás módszere. Hartree-Fock módszer. Az önfenntartó (self-consistent- field , SCF) tér közelítés. Koopmans-tétel. Szingulett és triplett gerjesztések. Elektronkorreláció. MRCI és MCSCF módszerek. Az atommagok Schrödinger-egyenlete. Vibrációs sajátállapotok. Időtől függő perturbációszámítás (első- és másodrend). A nem sajátállapotból induló rendszer időfejlődése. A maghullámfüggvény időpropagációjára vonatkozó egyéb módszerek: véges differencia módszer és annak pontossága; a „split-operator” módszer, koordináta- és impulzusreprezentációk közötti kapcsolat. Az időfüggő maghullámfüggvény vizsgálata: kezdeti állapotok, autokorrelációs függvény, az elektronállapotok populációja, komplex elnyelő potenciálok, molekulák disszociációja.

**Kötelező olvasmány:**

Vibók Ágnes : Atomfizika, Egyetemi jegyzet, Kossuth Lajos Tudományegyetem, Debrecen, 1995.

Kapuy Ede és Török Ferenc: Az atomok és molekulák kvantumelmélete, Akadémiai Kiadó, Budapest, 1975.

D. R. Yarkony: Modern Electronic Structure Theory, World Scientific, 1995.

**Ajánlott szakirodalom:**

I. Mayer: Simple Theorems, Proofs, and Derivations in Quantum Chemistry, Kluwer Academic, 2003.

**A tantárgy neve:** Atomok és molekulák elektromágneses térben

**Kódja:** TTFME0122

**Óraszám/hét:** 2+1+0 (előadás+tantermi gyakorlat+laboratóriumi gyakorlat)

**Számonkérés módja:** K (kollokvium/gyakorlati jegy)

**Kredit:** 5

**Tárgyfelelős:** Dr. Vibók Ágnes

**Előfeltétel:** Elektronszerkezeti módszerek és kvantumdinamika (TTFME0121)

**A kurzus célja,** hogy a hallgatók korábbi atom és molekulafizikai tanulmányaikban szerzett ismeretekre alapozva megértsék, az elektromágneses tér és az anyag kölcsönhatásának lényeges aspektusait; képessé váljanak a perturbáció számítás segítségével egyszerű esetekre megoldani az elektromágneses tér és az anyag kölcsönhatását leíró Schrödinger-egyenletet és értelmezni a kapott megoldásokat; elsajátítsák a kvantum optika alapjait.

**Tematika:** Két és három állapotú atomok. Spin mátrixok, tulajdonságaik és algebrájuk. Spin multiplettek. Léptető operátorok két és három állapotú atomokra. A lineáris harmónikus oszcillátor. Léptető operátorok algebrája. Mátrix reprezentáció. Bevezetés a kvantumoptikába. Koherens és összenyomott állapotok. Impulzusmomentum operátorok algebrája. Spin- és pálya impulzusmomentumok sajátértékei és sajátvektorai. A két dimenziós izotróp oszcillátor. Léptető operátorok és algebrájuk. Sajátértékek és sajátvektorok. Impulzusmomentum algebra. Három dimenziós izotróp oszcillátor. Clebsch-Gordan együtthatók. Triplett, dublett és szinglett spin-állapotok és algebrájuk. Izospin és izomultiplettek. Időtől-függő Hamilton-operátor. Perturbatív sorfejtés. Első és másodrendű korrekciók. Sajátértékek, sajátfüggvények. Harmónikus és anharmonikus perturbáció. Perturbált oszcillátor. Fény- atom kölcsönhatás. Dipól közelítés. Nem elfajult első- rendű perturbációs korrekció. Spontán emisszió. Stimulált emisszió. Perturbált hidrogén atom. Hidrogén atom elektromos térben. Lineáris Stark-effektus. Hidrogén atom mágneses térben. Zeeman- effektus. Kétállapotú atom kölcsönhatása elektromágneses

térrel. Dipól közelítés. Rabi-model. Az RWA (rotating wave approximation) közelítés. A Jaynes-Cummings Hamilton-operátor és megoldása. Atom optika.

**Kötelező olvasmány:**

V. K. Thankappan: Quantum Mechanics, Wiley Eastern Limited, 1985.

**Ajánlott szakirodalom:**

C. C. Gerry, P. L. Knight: Introductory Quantum Optics, Cambridge University press, 2005.

**A tantárgy neve:** Atom- és molekulafizika II.

**Kódja:** TTFME0125

**Óraszám/hét:** 2+1+0 (előadás+tantermi gyakorlat+laboratóriumi gyakorlat)

**Számonkérés módja:** K (kollokvium/gyakorlati jegy)

**Kredit:** 5

**Tárgyfelelős:** Dr. Csehi András

**Előfeltétel:** Atom- és molekulafizika I. (TTFME0101)

**A kurzus célja,** hogy a hallgatók korábbi kvantummechanikai ismereteiket felhasználva megismerkedjenek az atom- és molekulafizika fogalomrendszerével, törvényszerűségeivel; képesek legyenek atomok és molekulák Schrödinger-egyenletének felírására és a megoldások diszkutálására; megismerkedjenek az atomok és molekulák elektronszerkezeti sajátjaival, valamint alapvető részecske- és foton-szórási folyamataival; bővítsék ismereteiket az atom- és molekulafizikában használatos fizikai mennyiségekről; gyakorlatot szerezzenek egyszerű atomfizikai számítások végzésében.

**Tematika:** Atomok és molekulák statisztikus fizikai tárgyalása. Tiszta és kevert állapotok. A sűrűségmátrix. A Liouville-Neumann-egyenlet és a Liouville-operátor. Környezeti hatások, a redukált sűrűségmátrix. Klasszikus szórás, alapfogalmak. Atomi ütközések, parciális hullámok, radiális egyenletek. Green-függvény. Kontúr integrálok. Born-sorfejtés. Szórás komplex potenciálon. Elektron-atom ütközések, a statikus kicserélődés és a szoros csatolás módszerek. Optikai potenciálok. Atomok gerjesztése ütközéssel, ionizáció, rezonanciák. Atom-atom és atom-molekula ütközések alacsony sebességen. Elektrongerjesztések és töltéskicserélődés.

**Kötelező olvasmány:**

Kapuy Ede, Török Ferenc: Az atomok és molekulák kvantumelmélete, Akadémiai kiadó, Budapest

**Ajánlott szakirodalom:**

Bransden, C. J. Joachain: Physics of atoms and molecules, Longman Scientific & Technical

**A tantárgy neve:** Haladó magfizika

**Kódja:** TTFME0161

**Óraszám/hét:** 2+1+0 (előadás+tantermi gyakorlat+laboratóriumi gyakorlat)

**Számonkérés módja:** K (kollokvium/gyakorlati jegy)

**Kredit:** 4

**Tárgyfelelős:** Dr. Darai Judit

**A kurzus célja,** hogy a hallgatók megismerkedjenek a különböző szimmetriafogalmakkal; megismerjék az atommag szerkezetmodelljeinek leírását és szimmetriákon alapuló kapcsolatukat, lássák az egyes modellek eredményességét a kísérleti eredmények leírásában, rendszerezésében, további eredmények előrejelzésében; felismerjék a szimmetriák mint rendező elvek szerepét a fizikai objektumok és jelenségek leírásában; lehetőséget kapjanak, hogy a kurzuson tanultak alapján a szimmetriafogalmakat más területeken is alkalmazzák.

**Tematika:** Magszerkezet. A héjmodell alapfogalmai, harmonikus oszcillátor, geometriai és dinamikai szimmetria, spin-pálya kölcsönhatás, mágikus számok. Deformált magállapotok, spontán szimmetriasértés, a rezgés és forgás folyadéksepp-modellje. Elliott-modell: a kollektivitás héjmodellje, dinamikailag sérült szimmetria. Wigner-féle szupermultiplettek, kvartettek, a mag fűrtmodellje, spektrumgeneráló és dinamikai algebrák. A kollektivitás bozon-modellje, szuperszimmetria. Fázisátmenetek atommagokban, hideg kvantumfázisok, kvázidinamikai szimmetria. A kollektivitás mikroszkopikus modellje, a héj-, kollektív és fűrtmodell kapcsolata, sokcsatornás szimmetria. Ab initio módszer, a törzsnélküli héjmodell. Egyéb szerkezetmodellek. Magreakciók. Közbensőmag-modell. Direkt reakciók. Pre-ekvilibrum modell. Magbomlások, a stabilitás határai. Egzotikus radioaktivitás. Spontán hasadás.

**Kötelező olvasmány:**

Muhin K.N.: Kísérleti magfizika, Tankönyvkiadó, Bp. 1985.

Raics P., Sükösd Cs.: Atommag- és részecskefizika. Könyvrészlet "A fizika alapjai" c. tankönyvben, VI. rész, 635-714 o. (Szerk: Eroszták J., Litz J. Nemzeti Tankönyvkiadó, Budapest, 2003)

Cseh J.: Rejtett szimmetriák, Fizikai Szemle L (2004). No.5. 165.

**Ajánlott szakirodalom:**

H.J. Lipkin: Lie groups for pedestrians, North-Holland Amsterdam, 1966

S.S.M.Wong: Nuclear Physics, John Wiley & Sons NY, 1998

D.J. Rowe, J.L. Wood: Fundamentals of Nuclear Models, World Scientific New Jersey, 2010

Cseh J.: Az atommagok kölcsönhatóbozon-modelljei, "Az atomenergia és magkutató újabb eredményei 8.", eds.:

I. Lovas, E. Koltay, Akadémiai Kiadó, Budapest, (1991) 281.

Cseh J.: Harmónia a bonyolultságban: Szimmetriák az atommagokban, Élet és Tudomány 57 (2002) 1451.

Cseh J., Darai J.: Egy atommag megnyújtásának története, Természet Világa, 2011 január, 14.o.

Cseh J.: Atommagok rezgése és forgása: fázisátmenetek hideg kvantumrendszerekben, Fizikai Szemle LXII (2012) No.1, 1.

Darai J., Cseh J.: Erősen deformált magállapotok és fűrtösödésük, Fizikai Szemle LXIV (2014) No.1, 6. 21.

T Dytrich, K. D. Sviratcheva, J. P. Draayer, C. Bahri and J. P. Vary: Ab initio symplectic no-core shell model, TOPICAL REVIEW, J. Phys. G. Nucl. Phys. 35 (2008) 123 101

P. Van Isacker: Symmetries in Nuclei, arXiv:1012.3611v1 [nucl-th]

J. Cseh: Algebraic models for shell-like quarteting of nucleons, Physics Letters B 743 (2015) 213

Angeli István: Kísérleti magfizika BSc, 2014,

[http://falcon.phys.klte.hu/kisfiz/Angeli/magfizika/BSc\\_0\\_Magfizika\\_2014.pdf](http://falcon.phys.klte.hu/kisfiz/Angeli/magfizika/BSc_0_Magfizika_2014.pdf)

**A tantárgy neve:** Nukleáris technika

**Kódja:** TTFME0162

**Óraszám/hét:** 2+1+0 (előadás+tantermi gyakorlat+laboratóriumi gyakorlat)

**Számonkérés módja:** K (kollokvium/gyakorlati jegy)

**Kredit:** 4

**Tárgyfelelős:** Dr. Oláh László

**A kurzus célja,** hogy a hallgatók Korábbi magfizikai alapoató tanulóyaikban megszerzett ismereteiket bővítsék az alap- és alkalmazott kutatásokban, valamint a technológiákban, műszaki tudományokban felhasználható kísérleti módszerekkel; megismerjék az atommagok alap- és gerjesztett állapotainak vizsgálatához szükséges mérés technikát; elsajátítsák a detektorok, elektronika, jel- és adatfeldolgozó komplex rendszerek működési elveit; bővítsék ismereteiket a részecskék/sugárzások anyaggal való kölcsönhatásaiból; rálássanak a részecskeazonosítás módszereire; megismerjék a részecskefizika helyzetérzékeny detektorait, a kalorimétereket;

átfogó képet kapjanak a neutronfizika alapjairól; megismerjék a neutrínó-detektálás fontosabb módszereit és alkalmazásait a részecske- és asztrofizikában; tisztában legyenek a nagyenergiájú fizika gyorsító berendezéseinek működésével; értsék a nukleáris energetika fizikai alapjait, technikai megvalósításukat, biztonsági kérdéseiket, előnyeiket és hátrányaikat más energiaforrásokhoz hasonlítva jártasságot szerezzenek a kiértékelés, hibaszámítás, megbízhatóság, érzékenység-becslés, függvényillesztés részleteiben; a szeminárium jellegű gyakorlatokon egy-egy fontosabb atommag- és részecskefizikai kísérlet elemzése, a nukleáris energetika kérdéseinek vizsgálata dolgozat és előadás formájában elmélyíti az előadások anyagát.

**Tematika:** Az atommag állapotainak, folyamatainak jellemzése, leírása. Mérhető mennyiségek az atommagfizikában. Sugárzások kölcsönhatásai az anyaggal: könnyű és nehéz töltött részecskék, semleges részecskék, gamma-sugárzás. Detektálás és spektrometria, az eszközök jellemző paraméterei. Az alapvető észlelő berendezések működésének alapjai: töltés szétválasztás (gázok, félvezetők), fénykeltés (szcintilláció, Csereknov-sugárzás). Aktivitásmérési módszerek különböző időtartományokban. Energia-, impulzus- és sebességmérés. A gamma-spektrometria jellegzetességei és eszközei; korrelációs mérések. Állapotok időbeli tulajdonságainak vizsgálati módszerei és az eredmények fizikai értelmezése. A helyzetérzékeny észlelés vizuális és elektronikus eszközei. Részecskeazonosítás elektromágneses mezővel, energiavesztés alapján és elektronikus jelanalízissel. A nagyenergiájú részecskegyorsítóknál alkalmazott elvek, felépítésük és működésük. A neutronfizikai mérések elemei; források, detektorok és módszerek. Kaloriméterek a részecskefizikában. A neutrínófizika alapjai: tulajdonságok, detektálás, asztrofizikai vonatkozások, oszcilláció. A nagyenergiájú részecskegyorsítóknál alkalmazott elvek, felépítésük és működésük. Nukleáris energia felszabadításának elve és lehetőségei. Maghasadás felhasználása, biztonsága. Termonukleáris fúzió égen és Földön: a megvalósítás útjai, nehézségei. Működésük és üzemanyagciklusuk várható környezeti hatásai. Összehasonlítás más energiaforrásokkal.

#### **Kötelező olvasmány:**

- 1) Fényes T. (szerk.): Atommagfizika I. (2. korszerűsített kiadás, Debreceni Egyetem, Kossuth Egyetemi Kiadó, 2009) (megfelelő részek)
- 2) Fényes T.: Részecskék és kölcsönhatásaik. Atommagfizika II. (3. korszerűsített kiadás, Debreceni Egyetem, Kossuth Egyetemi Kiadó, 2013) (megfelelő részek)
- 3) Raics P.: Atommagfizika és nukleáris technika. <http://falcon.phys.klte.hu/KisFiz/Raics>
- 4) Bódizs D.: Atommag-sugárzások mérés technikái. (Typotex, Budapest, 2006.)

#### **Ajánlott szakirodalom:**

- 1) 2016 Review of Particle Physics, Experimental Methods and Colliders fejezetek: [http://pdg.lbl.gov/2016/reviews/contents\\_sports.html](http://pdg.lbl.gov/2016/reviews/contents_sports.html)
- 2) G.F.Knoll: Radiation Detection and Measurement. (4th ed. J.Wiley, 2010. )
- 3) Erostyák J., Litz J. (szerk.): Fizika III. (Nemzeti Tankönyvkiadó, Budapest, 2006) tankönyvben:  
Sükösd Cs.: VII. Rész. Atommagfizika,  
Raics P.: VIII. Rész. Részecskefizika.
- 4) Raics P.: Atommag- és részecskefizika. E-jegyzet: <http://falcon.phys.unideb.hu/~raics/public/11eMagReszFiz/>

**A tantárgy neve:** Nukleáris asztrofizika

**Kódja:** TTFME0163

**Óraszám/hét:** 2+0+0 (előadás+tantermi gyakorlat+laboratóriumi gyakorlat)

**Számonkérés módja:** K (kollokvium/gyakorlati jegy)

**Kredit:** 3

**Tárgyfelelős:** Dr. Fülöp Zsolt

**A kurzus célja,** hogy a hallgatók a meglévő asztrofizikai és magfizikai ismereteiket összekapcsolva megértsék a csillagok energiatermelési mechanizmusát, a csillagok fejlődésének fizikai hátterét és a kémiai elemek szintézisét az univerzumban. Betekintést nyerjenek a nukleáris asztrofizikai kísérletek technikai problémáiba és azok megoldásába.

**Tematika:** Csillagászati alapok, észlelési módszerek, Hertzsprung-Russel diagram. Magfizikai alapok, tömeg, kötési energia, magmodellek, magreakciók. Az elemek előfordulási arányai, izotóp-anomáliák. Nukleosintézis az ősrobbanás során és a korai világegyetemben. A csillagfejlődés korai szakaszai, hidrogénégés, héliumégés. Napmodell, szoláris neutrínók. A csillagfejlődés késői szakaszai, szupernóvák, neutroncsillagok, fekete lyukak. A nehéz elemek szintézise, r-folyamat, s-folyamat, p-folyamat. Reakcióháló, reakció típusok. Reakcióhatáskeresztmetszet meghatározásának kísérleti módszerei. Alacsony háttérű vizsgálatok. Egzotikus magfizika. Kozmikus sugárzás, sötét anyag, sötét energia. Kozmokronológia, galaktikus kémiai evolúció.

#### **Kötelező olvasmány:**

Cserepes-Petrovay: Kozmikus fizika, Eötvös Kiadó 2002

**Ajánlott szakirodalom:**

C.E. Rolfs, W.S. Rodney: Cauldrons in the Cosmos, University of Chicago Press, 1988

[https://astro.uni-bonn.de/~nlanger/siu\\_web/nucscript/Nucleo.pdf](https://astro.uni-bonn.de/~nlanger/siu_web/nucscript/Nucleo.pdf)

**A tantárgy neve:** Magfizikai mérések

**Kódja:** TTFML0164

**Óraszám/hét:** 0+0+4 (előadás+tantermi gyakorlat+laboratóriumi gyakorlat)

**Számonkérés módja:** G (kollokvium/gyakorlati jegy)

**Kredit:** 4

**Tárgyfelelős:** Dr. Zilizi Gyula

**A kurzus célja,** hogy a hallgatók - korábbi magfizikai ismereteiket gyakorlati példákon keresztül mélyítsék el; képesek legyenek alkalmazni különböző magfizikai mérési módszereket; kiértékelési módszereket sajátítsanak el; tapasztalatokat gyűjtsenek nagy mennyiségű adat feldolgozásának, kiértékelésének módszertanában; értelmezni tudják a társadalmilag érzékeny nukleáris technológiával kapcsolatos fogalmakat, reálisan értékeljék annak a hasznát és veszélyeit is; megismerjék a helyi nukleáris fizikai kutatásokat. Mindezek a hallgató további természet- és alkalmazott tudományi ismereteit, illetve azok konkrét ipari alkalmazásait alapozzák meg.

**Tematika:** Koincidencia vizsgálatok béta pozitív sugárzás bomlásának megismeréséhez. Spektroszkópiai ismeretek bővítése, alkalmazása kalibrációhoz. Neutronindukált magreakció hatáskeresztmetszetének meghatározása aktivációs módszerrel. Gyorsító energiahitelesítés  $Al(p,\gamma)Si$  magreakcióval, céltárgy készítése a vákuumpárolgatás módszerével, rezonanciagörbe felvétele, abszolút rezonanciaerősség-mérés, gamma sugárzás detektálása, hatásfok számítása.

**Kötelező olvasmány:**

Muhin K.N.: Kísérleti magfizika, Tankönyvkiadó, Bp. 1985.

Raics P., Sükösd Cs.: Atommag- és részecskefizika. Könyvrészlet "A fizika alapjai" c. tankönyvben, VI. rész, 635-714 o. (Szerk: Erostyák J., Litz J. Nemzeti Tankönyvkiadó, Budapest, 2003)

[http://atomfizika.elte.hu/haladolabor/docs/Gyorsitohitelesites\\_GyurkyGyorgy.pdf](http://atomfizika.elte.hu/haladolabor/docs/Gyorsitohitelesites_GyurkyGyorgy.pdf)

**Ajánlott szakirodalom:**

Fényes Tibor: Atommagfizika, Debreceni Egyetem, Kossuth Egyetemi Kiadó, 2005

Angeli István: Kísérleti magfizika BSc, 2014,

[http://falcon.phys.klte.hu/kisfiz/Angeli/magfizika/BSc\\_0\\_Magfizika\\_2014.pdf](http://falcon.phys.klte.hu/kisfiz/Angeli/magfizika/BSc_0_Magfizika_2014.pdf)

**A tantárgy neve:** Fejezetek napjaink magfizikájából

**Kódja:** TTFME0165

**Óraszám/hét:** 2+1+0 (előadás+tantermi gyakorlat+laboratóriumi gyakorlat)

**Számonkérés módja:** K (kollokvium/gyakorlati jegy)

**Kredit:** 4

**Tárgyfelelős:** Dr. Darai Judit

**A kurzus célja,** hogy a hallgatók számára elősegítse a napjainkban folyó kísérleti és elméleti magkutatásban történő tájékozódást. Egyfelől célja teret adni olyan előadásoknak, amelyeket a Debreceni Egyetem és az ATOMKI kutatói (esetleg az idelátogató külföldi szakemberek) tartanak. Másfelől lehetőséget ad a hallgatóknak olyan áttekintő közlemények feldolgozására és ismertetésére, amelyek ezen előadásokhoz kapcsolódnak.

**Tematika:** A precíziós atomtömeg-mérés eszközei és tudományos alkalmazásai. A radioaktív bomlásállandó állandóságának kísérleti ellenőrzése. Nukleonsugár és kvantum-elektrodinamika. Az energiatermelő fúziós kísérletek jelenlegi állása. A magfizikai „pandemonium”-hatás és szerepe az atomreaktorok hőtermelésében. Radioaktív ionnyalábok. Egzotikus magalakok kísérleti tanulmányozása. Magreakciók hatáskeresztmetszetének mérése egy konkrét reakció példáján keresztül. Nukleáris asztrofizikai kísérletek egy mély földalatti laboratóriumban. Különleges forgásmódok az atommagokban. Nukleáris energetika - tegnap, ma, holnap. Gamma spektrumok kiértékelési módszerei. Gamma-spektroszkópiai vizsgálatok radioaktív nyalábokon.

**Kötelező olvasmány:**

Muhin K.N.: Kísérleti magfizika, Tankönyvkiadó, Bp. 1985.

Raics P., Sükösd Cs.: Atommag- és részecskefizika. Könyvrészlet "A fizika alapjai" c. tankönyvben, VI. rész, 635-714 o. (Szerk: Erostyák J., Litz J. Nemzeti Tankönyvkiadó, Budapest, 2003)

Angeli István: Kísérleti magfizika BSc, 2014,

[http://falcon.phys.klte.hu/kisfiz/Angeli/magfizika/BSc\\_0\\_Magfizika\\_2014.pdf](http://falcon.phys.klte.hu/kisfiz/Angeli/magfizika/BSc_0_Magfizika_2014.pdf)

**Ajánlott szakirodalom:**

A félév során feldolgozott témáktól függően az előadó által ajánlott irodalom.

**A tantárgy neve:** Komplex rendszerek fizikája

**Kódja:** TTFME0131

**Óraszám/hét:** 2+1+0 (előadás+tantermi gyakorlat+laboratóriumi gyakorlat)

**Számonkérés módja:** K (kollokvium/gyakorlati jegy)

**Kredit:** 5

**Tárgyfelelős:** Dr. Kun Ferenc

**A kurzus célja,** hogy a hallgatók megismerjék a komplexitás fogalmát, a komplex rendszerek legfontosabb jellemzőit; elsajátítsák a komplex rendszerek vizsgálatának legfontosabb módszereit; megismerjék, megértsék és leírják azokat a jelenségeket és alkalmazásokat, amelyek a komplex rendszerek fizikájának segítségével vizsgálhatók; jelentős mennyiségű önálló munka révén gyakorlatot szerezzenek komplex rendszerek analitikus és numerikus módszerekkel történő vizsgálatában.

**Tematika:** Komplex rendszerek definíciója, a komplexitás fogalma. Példák komplex rendszerekre. Rend és rendeződés térben és időben, struktúra képződéssel járó jelenségek. Kollektív viselkedés. Komplex rendszerek vizsgálatának módszerei és alapvető kérdései. Térbeli struktúrák jellemzése, a fraktálgeometria alapjai, a fraktáldimenzió. Az önhasonlóság fogalma. Fraktálok osztályozása. A fraktáldimenzió meghatározásának numerikus módszerei. Egyskálás és multiskálás fraktálok. Determinisztikus és sztochasztikus fraktálok. Kompozit fraktálok. Multifraktálok, a fraktál dimenzió spektruma, sűrűség index és az  $f$ -alfa spektrum. A fraktálgeometria alkalmazásai. Porózus közetek fraktál struktúrája, méretfüggő sűrűség. A fraktáldimenzió meghatározása méréssel. Porózus anyagok önhasonló modelljei. Struktúra képződés, skálázás, önhasonlóság és fraktalitás kritikus jelenségekben a perkoláció példáján. A perkolációs probléma analitikus megoldása egy dimenzióban, kritikus exponensek. Numerikus elemzés két dimenzióban. Folytonos fázisátalakulás. A rendszer viselkedése a kritikus pont közelében, a végtelen klaszter fraktál dimenziója. Vékony és vastag farkú valószínűség eloszlások. Hatványfüggvény eloszlások fizikai jelentősége. Hatványfüggvény eloszlásra vezető mechanizmusok, határeloszlás tételek, preferált kapcsolódás algoritmusa. Hatványfüggvény eloszlások numerikus kezelésének módszerei. Fragmentációs jelenségek. Univerzális hatványfüggvény tömegeloszlások. Fragmentáció önhasonló modelljei. Stochasztikus folyamat időSORA, az időSORA statisztikus analízise. Időbeli struktúrák elemzése. Az átlagos fluktuációs függvény. IdőSOROK multifraktál analízise. Önaffin időSOROK. Szinkronizáció. Recsegő jelenségek. Lassan hajtott heterogén rendszerek zajos válasza. Barkhausen zaj kialakulása, a zajjelzők statisztikus elemzése. Repedési zaj szilárdtestek törési folyamataiban. Zajjelenségek modelljei. Önszervezés, marginálisan stabil állapotok, az önszervezett kritikus állapot kialakulása. A homokdomb paradigma. A Bak-Tang-Wiesenfeld modell, numerikus és átlagtér vizsgálat. Elágazási folyamatok. Lavinák időSORA és statisztikus vizsgálata. A lavinákat jellemző eloszlások skálatörvényeinek származtatása. Erdőtűz modellek. A földkéreg, mint komplex rendszer, az önszervezett kritikus állapot kialakulása a földkéregben. Földrengések létrejöttének mechanizmusa, a földrengések skálatörvényei. Földrengések Olami-Feder-Christensen (OFC) modellje. Kritikus jelenségek és komplexitás, hasonlóságok és eltérések. Hajtás-disszipáció-relaxáció szerepe a lavina effektus létrejöttében. Makroszkopikus és mikroszkopikus időskálák szétválása. Dinamikai instabilitás hajtott rendszerekben. Az önszervezett kritikus állapot kialakulásának szükséges feltételei. Kapcsolat komplex rendszerekkel.

**Kötelező olvasmány:**

K. Christensen and N. R. Moloney, Complexity and Criticality (Imperial College Press Advanced Physics Texts, 2005).

**Ajánlott szakirodalom:**

D. L. Turcotte, Fractals and Chaos in Geology and Geophysics (Cambridge University Press, 1996).

H. Jensen, Self-Organized Criticality (Oxford University Press, 1997).

A.-L. Barabasi and H. E. Stanley, Fractal Concepts in Surface Growth (Cambridge University Press, 1998).

H. Takayasu, Fractals in the Physical Sciences (Manchester University Press, 1990).

**A tantárgy neve:** Számítógépes modellezés

**Kódja:** TTFME0132

**Óraszám/hét:** 2+1+0 (előadás+tantermi gyakorlat+laboratóriumi gyakorlat)

**Számonkérés módja:** K (kollokvium/gyakorlati jegy)

**Kredit:** 5

**Tárgyfelelős:** Dr. Kun Ferenc

**A kurzus célja,** hogy a hallgatók megismerjék a véges hőmérsékletű rendszerek számítógépes szimulációjának modern módszereit, megértsék a módszerek elméleti alapjait; elsajátítsák a statisztikus fizikai rendszerek, fázisátalakulások és kritikus jelenségek Monte Carlo szimulációjának legfontosabb algoritmusait; megismerjék, megértsék és leírják azokat a jelenségeket és alkalmazásokat, amelyek Monte Carlo szimuláció segítségével vizsgálhatók; jelentős mennyiségű önálló munka révén gyakorlatot szerezzenek Monte Carlo szimuláció és adatanalízis kivitelezésében.

**Tematika:** Véletlenszámok előállításának haladó módszerei, Gauss eloszlású véletlenszámok előállítása Box-Müller algoritmussal és a centrális határeloszlás tétel alapján. Véletlen pontok gömb felszínén és térfogatában, többdimenziós véletlen vektorok generálása. Neumann féle Hit&Miss módszer, a módszer hibaanalízise és optimalizálása burkolófüggvény használatával. Numerikus integrálás véges differencia módszerrel, téglalap, trapéz, és Simpson módszer. Monte Carlo (MC) integrálás egyszerű mintavétellel. A MC integrálás hibaanalízise, MC integrálási eljárások optimalizálása segédfüggvényekkel. MC integrálás fontossági mintavétellel, a mintavételi függvény optimális megválasztása. Monte Carlo integrálás Markov láncok módszerével: a Markov lánc fogalma, alkalmazásai a statisztikus fizikában. Markov lánc a fázistérben. A Markov lánc MC integrálás algoritmus. Véges hőmérsékletű rendszerek statisztikus mechanikája, állapotösszeg, a makroszkopikusan mért mennyiségek értelmezése a mikro-állapotok fölötti átlagként. Mikro-állapotok sorozatának előállítása Markov láncok módszerével, a Metropolis algoritmus. Metropolis és Glauber dinamika. Az Ising modell egy és két dimenzióban. A Metropolis algoritmus implementációja az Ising modellre. Kezdeti és határfeltételek, a szimulációs program optimalizálása. A rendszer termalizációja, termodinamikai mennyiségek mérése MC szimulációval. MC hibaanalízis. Monte Carlo szimuláció a kritikus pont közelében, a kritikus exponensek numerikus meghatározásának módszerei. Kritikus lelassulás. Klaszter-algoritmusok és hatékony implementációjuk az Ising modellben. A Swendsen-Wang algoritmus. Végesméret skálázás.

A hisztogram módszerek alapjai. A Ferrenberg-féle egyszerű hisztogram módszer. Monte Carlo szimuláció széles hőmérséklet tartományon, széles hisztogram módszerek. A rácsgáz modellek alapjai, az Ising modell, mint állandó rendparaméterű rácsgáz. A modell analitikus elemzése, a fázisdiagram meghatározása. Kawasaki dinamika a rácsgáz modellben, a dinamika hatékony implementációja. Metropolis algoritmus gázok és folyadékok szimulációjára. A szimulációs program optimalizálása. Gázok és folyadékok termodinamikai mennyiségeinek mérése MC szimulációval. Kinetikus Monte Carlo szimuláció, átmenetek Poisson statisztikája, átmeneti valószínűség és várakozási idő. Hatékony algoritmusok kinetikus Monte Carlo szimulációra. Példák: diffúziós folyamatok, kémiai reakciók, polimerek dinamikájának szimulációs vizsgálata. Az ipari folyamatok modellezési lehetőségei.

**Kötelező olvasmány:**

Kun Ferenc, Computer modeling and simulation in physics, (elektronikus egyetemi jegyzet angol nyelven, Debreceni Egyetem, 2012).

**Ajánlott szakirodalom:**

H. Gould and J. Tobochnik, An introduction to computer simulation methods (Addison-Wesley, 2006).

M. E. J. Newman and G. T. Barkema, Monte Carlo Methods in Statistical Physics (Oxford University Press, 1999).

**A tantárgy neve:** Fázisátalakulások és kritikus jelenségek 1.

**Kódja:** TTFME0133

**Óraszám/hét:** 2+1+0 (előadás+tantermi gyakorlat+laboratóriumi gyakorlat)

**Számonkérés módja:** K (kollokvium/gyakorlati jegy)

**Kredit:** 5

**Tárgyfelelős:** Dr. Gulácsi Zsolt

**A kurzus célja,** hogy a hallgatók korábbi tanulmányaik ismereteire alapozva megértsék a fázisátalakulások és kritikus jelenségek sokszínűségét, jellemzőit, típusait, tulajdonságait, leírási lehetőségeit, kísérletekben megjelenő aspektusait; képessé váljanak a fázisátalakulások típusának felismerésére, jellemzőinek kiszámítására; megértsék a modell leírások jellegzetességeit, eredményeit, hiányosságait.

**Tematika:** Fázis fogalma, átalakulás rendje, folytonos fázisátalakulás fogalma, n-ed rendű fázisátalakulás fogalma, Gibbs-féle fázisszabály, dimenzió hatása, fluktuációk szerepe, korrelációk hatása, hosszútávú térbeli rendezettség, kritikus tartomány és kritikus jelenség fogalma, rendparaméter, Ginsburg-Landau termodinamikai potenciál, Kadanoff-féle blokk konstrukció, általánosított homogenitás, kritikus exponensek, skálatörvények, szigorú értelemben vett kritikus exponensek és skálatörvények, Orstein-Zernike viselkedés, Landau elmélet, molekuláris-tér elmélet kritikus exponensei, univerzalitási osztály fogalma, kritikus lelassulás, renormálási csoport transzformáció, kritikus felület, fixpont elmélet alapfogalmai, fázisátalakulások kimutatása renormálási csoport módszerrel, kritikus exponensek levezetése renormálási csoport módszerrel.

**Kötelező olvasmány:**

Gulácsi Zsolt: A fázisátalakulások Elmélete I., Kossuth Egyetemi Kiadó, Debrecen, 1998

**Ajánlott szakirodalom:**

N. Goldenfeld, Lectures on Phase Transitions and the Renormalization Group, Addison-Wesley, 1992.

H. E. Stanley, Phase Transitions and Critical Phenomena, Clarendon Press, Oxford, 1987.

J.J. Binney, N. J. Dowrick, A. J. Fisher, M. E. J. Newman: The theory of critical phenomena and introduction to renormalization group, Oxford Science Publication, Clarendon Press, Oxford, 1995.

**A tantárgy neve:** Komplex hálózatok és alkalmazásai

**Kódja:** TTFME0134

**Óraszám/hét:** 2+1+0 (előadás+tantermi gyakorlat+laboratóriumi gyakorlat)

**Számonkérés módja:** K (kollokvium/gyakorlati jegy)

**Kredit:** 5

**Tárgyfelelős:** Dr. Nagy Sándor

**A kurzus célja,** hogy a hallgatók megismerjék a komplex hálózatok legfontosabb jellemzőit, a vizsgálatokra szolgáló legalapvetőbb módszereket; elsajátítsák és a gyakorlatban alkalmazzák a komplex hálózatok hatékony számítógépes megvalósításának és elemzésének módszereit; megismerjék, megértsék és leírják azokat a jelenségeket és alkalmazásokat, amelyek a komplex hálózatok fizikájának segítségével vizsgálhatók; jelentős mennyiségű önálló munka révén gyakorlatot szerezzenek komplex hálózatok analitikus és numerikus módszerekkel történő vizsgálatában.

**Tematika:** Hálózatok a mindennapi életben. A hálózatok története. A hálózatok kapcsolata a komplex rendszerekkel. A hálózatok, mint gráfok. A gráfelmélet alapjai. A hálózatok osztályozása. Irányított és irányítatlan hálózatok. Fokszám, átlagos fokszám, fokszám eloszlás. A szomszédsági mátrix. Súlyozott hálózatok. A Metcalfe-törvény. Kétosztatú hálózatok. Út és távolság, legrövidebb út, átmérő, átlagos úthossz. Összefüggőség. Klaszterezettségi együttható. Véletlen hálózatok. Az Erdős-Rényi modell. Kisvilág-hálózatok. Hat lépés távolság elmélet. Watts-Strogatz-féle átdrótozási algoritmus. Skálafüggetlen hálózatok. A Barabási-Albert modell. Növekedés és preferált kapcsolódás. A Barabási-Albert modell kiterjesztései. Univerzalitás. Ultra-kisvilág tulajdonság. A fokszám exponens. Tetszőleges fokszám eloszlású hálózatok előállítása. A konfigurációs modell. A rejtett paraméter modell. A preferenciális kapcsolódás mérése. A nem-lineáris preferenciális kapcsolódás. A preferenciális kapcsolódás eredete. Az élválasztó és a másoló modell. Az optimalizációs modell.

Korrelált hálózatok. A korreláció vizsgálata. Korrelált hálózatok előállítása. A hálózatok robusztussága. Perkoláció hálózaton. Átlagos klaszterméret, rendparaméter, korrelációs hossz. Inverz perkolációs átmenet. A Molloy-Reed kritérium. Ellenállóság támadással szemben. Hiba lavinák és modellezésük. A hibaterjedési modell. Az elágazó modell. Lavina exponens. Robusztus hálózatok tervezése. Közösségek. Szociális és biológiai hálózatok. Közösségek jellemzése hálózaton. Hálózatok felosztása közösségekre. Összegyűjtő és megosztó algoritmusok. Terjedési jelenségek. Járványok modellezése. Hálózati járványok. Kapcsolati hálózatok. Immunizáció. Járvány előrejelzés. A hálózatok alkalmazási lehetőségei az ipari folyamatokban.

**Kötelező olvasmány:**

Barabási Albert László, Network Science (Cambridge University Press, 2016).

**Ajánlott szakirodalom:**

M. E. J. Newman, Networks: An Introduction (Oxford University Press, Oxford, 2010).

**A tantárgy neve:** Nanodiffúzió és szegregáció

**Kódja:** TTFME0141

**Óraszám/hét:** 2+0+0 (előadás+tantermi gyakorlat+laboratóriumi gyakorlat)

**Számonkérés módja:** K (kollokvium/gyakorlati jegy)

**Kredit:** 3

**Tárgyfelelős:** Dr. Erdélyi Zoltán

**Előfeltétel:** Kondenzált anyagok 3 (TTFME0105)

**A kurzus célja,** hogy a hallgatók korábbi kondenzált anyagok fizikája területén elsajátított ismeretekre alapozva, a modern nanoanyagokban lejátszódó atommozgási folyamatok megismerése; megismerjék az alapvető folytonos (kontinuum) és atomisztikus (determinisztikus és stochasztikus) leírásokat; megismerjék a folytonos leírások korlátait nanoméretű diffúziós folyamatok esetében; megismerjék az atomisztikus leírások korlátait.

**Tematika:** Bevezetés. Kontinuum modellek: Klasszikus diffúziós elméletek: Fick I. és II. egyenlete; a II. egyenlet analitikus megoldásai egyszerű esetekben, koncentráció független diffúziós együtthatót feltételezve; Boltzmann-transzformáció, parabolikus (négyzetgyökös) (skála)törvény. Drift, külső hajtóerők (Nernst- Einstein egyenlet). Kölcsönös diffúzió. Diffúzió multirétegekben: kezdetek DuMond és Youtz munkássága nyomán; a diffúziós együttható koncentráció függésének hatása a koncentrációprofil fejlődésére (diffúziós aszimmetria, aszimmetrikus koncentráció profil, élesedés); nagy koncentráció gradiensek (Cahn-Hilliard elmélet); feszültség és diffúzió (Stephenson modell). Atomisztikus modellek: Diffúziós mechanizmusok: (vakancia, intersticiális, direkt kicserelődés, ...); A diffúzió determinisztikus kinetikai leírása: a kontinuum és az atomisztikus modellek összehasonlítása (diffúziós együttható – ugrási frekvencia); a diffúziós együttható koncentrációfüggésének atomisztikus jelentése (diffúziós aszimmetria); a kontinuum leírás korlátai nanoskálán, a kontinuum leírás érvényességi körének beszűkülése növekvő diffúziós aszimmetriával; a kémia hatása a kétalkotós ötvözetek viselkedésére (korlátlan keveredés, fázis szeparáció, rendeződés, szilárdtest reakció). Anomális kinetika, nem sztöchiometrikus fáziskeletkezés, rendezett fázis visszaoldódása. Diffúzió modellezése kinetikus Monte Carlo módszerrel: a determinisztikus és a stochasztikus leírás különbözősége, ugrási valószínűség; a determinisztikus és a kinetikus Monte Carlo módszerek összehasonlítása. Szegregáció: A szegregáció jelensége; felületi feszültség, kémia és mérhető hatás, mint a szegregáció motorjai; egyensúlyi és kinetikus szegregációs izotermák (Henry, McLean, Fowler-Guggenheim); felületi szegregáció a determinisztikus kinetikai és a kinetikus Monte Carlo modellekben, vékonyrétegek hordozóba történő beoldódása. Vizsgálati módszerek nanoskálán: röntgen, szinkrotron, neutron technikán alapuló módszerek; felületfizikai, felületkémiai módszerek, pl. Auger elektron-spektroszkópia (AES), röntgen fotoelektron-spektroszkópia (XPS), atomi próba mikroszkópia (APM: AFM, STM)

**Kötelező olvasmány:**

Charles Kittel: Bevezetés a szilárdtest fizikába, Műszaki könyvkiadó, Budapest

**Ajánlott szakirodalom:**

J.Philibert:Atom Movements: Diffusion And Mass Transport In Solids (Monographies De Physique)

Beke DL, Cserhádi Cs, Erdélyi Z, Szabó IA, Segregation in nanostructures (Chapter 7) in Nalwa HS (ed.)

Nanoclusters and Nanocrystals - Stevenson Ranch: American Scientific Publishers pp. 211-252 (2003)

**A tantárgy neve:** Számítógépes modellezés

**Kódja:** TTFME0142

**Óraszám/hét:** 1+0+3 (előadás+tantermi gyakorlat+laboratóriumi gyakorlat)

**Számonkérés módja:** K (kollokvium/gyakorlati jegy)

**Kredit:** 5

**Tárgyfelelős:** Dr. Erdélyi Zoltán

**Előfeltétel:** Nanodiffúzió és szegregáció (TTFME0141)

**A kurzus célja,** hogy a hallgatók korábbi kondenzált anyagok fizikája területén elsajátított ismeretekre és a Nanodiffúzió és szegregáció tárgyra alapozva, a modern nano-anyagtudományban használatos néhány fontosabb számítógépes módszer megismerése, különös tekintettel a nem csak egyensúlyi állapotokat, hanem kinetikát is modellezni képes, atommozgási folyamatokon alapuló technikákra.

**Tematika:** Számítógépes modellezés célja, helye a modern anyagtudományban; a számítógépes modellezés korlátai. A különböző technikákkal elérhető idő-, hosszúságskálák és dimenziók. Kontinuum modellek: véges differencia módszer, Fick egyenletek megoldása; véges térfogat módszer; véges térfogat módszer alkalmazása diffúzió és feszültség számítási problémákra vékonyfilmekben és multirétegekben (Stephenson modell). Diszkrét (atomisztikus) modellek: determinisztikus kinetikai modellek, alkalmazása: vékonyfilmekben és multirétegekben lejátszódó atomi mozgási folyamatok (kölcsönös keveredés, fázisszeparáció - spinodális bomlás, rendeződés, szilárdtest reakciók) felületi szegregáció; kinetikus Monte Carlo, alkalmazás: ua. mint a determinisztikus esetben, plusz nukleációs és növekedési folyamatok; molekula dinamika, alkalmazás: atommozgási mechanizmusok.

**Kötelező olvasmány:**

Moodle elektronikus oktatási környezetben kiadott segédanyagok, példaprogramok.

**Ajánlott szakirodalom:**

Computer Simulation in Materials Science, Editors: Meyer, M., Pontikis, Vassilis

Handbook of Materials Modeling: Editor Sidney Yip

**A tantárgy neve:** Mágnesség és nanomágnesség

**Kódja:** TTFME0143

**Óraszám/hét:** 2+1+1 (előadás+tantermi gyakorlat+laboratóriumi gyakorlat)

**Számonkérés módja:** K (kollokvium/gyakorlati jegy)

**Kredit:** 5

**Tárgyfelelős:** Dr. Daróczy Lajos

**A kurzus célja,** hogy a hallgatók megismerjék a mágneses jelenségek elméleti alapjait, a mágneses anyagokat és azok tulajdonságait különös tekintettel a nanoszerkezetekben megfigyelhető mágneses jelenségekre, a mágneses tulajdonságok mérési módszereit, a mágneses anyagok alkalmazási lehetőségeit

**Tematika:** A mágneses tér és az anyag kölcsönhatásai, a mágneses tulajdonságokat jellemző paraméterek, a mágneses anyagok csoportosítása, az atom mágneses momentuma, diamágnesség, paramágnesség, ferromágnesség, a mágneses tulajdonságok mérési módszerei, a ferromágnesség alapjelenségei, mágnesezési görbék, ferromágneses hiszterézis, a ferromágnesség fenomenológikus modellje (Curie-Weiss törvény), a kicserélődési kölcsönhatás, Ising-modell, kristály, alak stb. anizotrópiák, a ferromágneses domének, a doménszerkezet vizsgálati módszerei, a doménszerkezet változása az átmágnesezés során, a Barkhausen-zaj keletkezése, mérése és alkalmazásai, lágymágneses anyagok (kristályos, fémüveg és nanokristályos anyagok, ferritek) és alkalmazásaik, keménymágneses anyagok és alkalmazásaik, izolált ferromágneses nanorészecskék viselkedése (szuperparamágnesség), spinüvegek, klaszterüvegek, nanokristályos anyagok mágneses tulajdonságai, mágnességgel kapcsolatos jelenségek: magnetosztrikció, mágneses alakmemória, mágneses ellenállás, gigantikus mágneses ellenállás (GMR)

**Kötelező olvasmány:**

Mágnesség és nanomágnesség oktatási anyag (moodle.phys.unideb.hu)

**Ajánlott szakirodalom:**

Charles Kittel: Bevezetés a szilárdtest-fizikába

Konrad Kreher: Szilárdtest-fizika

Budó Ágoston: Kísérleti fizika II.

**A tantárgy neve:** Anyagtulajdonságok mérése

**Kódja:** TTFML0144

**Óraszám/hét:** 0+0+2 (előadás+tantermi gyakorlat+laboratóriumi gyakorlat)

**Számonkérés módja:** G (kollokvium/gyakorlati jegy)

**Kredit:** 2

**Tárgyfelelős:** Dr. Cserhádi Csaba

**Előfeltétel:** Kondenzált anyagok 3. (TTFME0105)

**A kurzus célja** a kondenzált anyagok témaköréből vett 8 db 4 órás mérési gyakorlat segítségével a tárgyra vonatkozó ismeretek bővítése.

**Tematika:** Metallográfiai vizsgálatok fénymikroszkóppal. Felület és összetétel vizsgálata pásztázó elektronmikroszkóppal. Szerkezetvizsgálat transzmissziós elektronmikroszkóppal. Vékonyfilmek előállítása és mélységi analízise szekunder neutrális tömegspektrometriával. Szerkezetvizsgálat röntgendiffrakcióval. Vizsgálatok szupravezető kvantum interferométerrel (RF SQUID). Felületvizsgálat SPM és AFM berendezésekkel. Ferromágneses anyagok vizsgálata Barkhausen-zaj segítségével. Szilárdtestekben zajló átalakulási folyamatok követése differenciális pásztázó kaloriméterrel. Ötvözetek előállítása ívolvasztással. A BIG Data módszerek alkalmazási lehetőségei fizikai folyamatokhoz kapcsolódó mérésekben.

**Kötelező olvasmány:**

A mérésekhez az Intézetben készített, 10-20 oldalas mérési utasítás tartoznak.

**A tantárgy neve:** Transzmissziós és analitikai elektronmikroszkópia

**Kódja:** TTFME0146

**Óraszám/hét:** 2+1+1 (előadás+tantermi gyakorlat+laboratóriumi gyakorlat)

**Számonkérés módja:** K (kollokvium/gyakorlati jegy)

**Kredit:** 5

**Tárgyfelelős:** Dr. Cserhádi Csaba

**A kurzus célja:** korábbi kondenzált anyagok fizikája területén elsajátított ismeretekre és a Mikroszkópia1. tárgyra alapozva, a modern anyagtudományban használatos fontosabb transzmissziós elektronmikroszkópiában használatos módszer megismerése, különös tekintettel a szerkezetvizsgálatra.

**Tematika:** A kurzus anyagát képezi a pásztázó elven működő atomi, vagy ahhoz közeli felbontású berendezések (SPM, AFM stb.) alapelveinek és működési módjainak bemutatása. A hallgatók emellett megismerik a transzmissziós elektronmikroszkópia és az elektrondiffrakciós vizsgálatok elméleti és gyakorlati alapjait. Bevezetjük az elektrondiffrakció tárgyalásához szükséges kristálytani alapfogalmakat. A transzmissziós elektronmikroszkóp felépítése, működése, kezelése mellett a hallgatók megismerkednek a mintaelőkészítés legfontosabb fogásaival is. Tárgyaljuk az analitikai elektronmikroszkóp sajátosságait. (Röntgen mikroanalízis és elektron energia veszteségi spektroszkópia, elektrondiffrakciós vizsgálatok, elektron mikrodiffrakció, konvergens sugaras elektrondiffrakció)

**Kötelező olvasmány:**

Radnóczy György: A transzmissziós elektronmikroszkópia és elektrondiffrakció alapjai

Lábár János: Az analitikai elektronmikroszkópia alapjai (KLTE 1996)

**Ajánlott szakirodalom:**

Williams, David B., Carter, C. Barry: Transmission Electron Microscopy A Textbook for Materials Science

## Környezetfizika (Csige István)

**A tantárgy neve:** Környezetfizika 3.

**Kódja:** TTFME0153

**Óraszám/hét:** 2+1+0 (előadás+tantermi gyakorlat+laboratóriumi gyakorlat)

**Számonkérés módja:** K (kollokvium/gyakorlati jegy)

**Kredit:** 4

**Tárgyfelelős:** Dr. Erdélyiné Dr. Baradács Eszter

**A kurzus célja,** hogy a hallgatók megismerkedjenek napjaink aktuális környezetfizikai témáival és az ezekhez kapcsolódó fogalmakkal. Továbbá a gyakorlatok során megismerkedjenek az előadásokhoz kapcsolódó különböző mérés technikákkal.

**Tematika:** Környezet, kockázat. Kozmikus sugárzási környezetünk. Radon a környezetben. Reaktorbalesetek környezeti hatásai. Klímaváltozás. A környezeti zaj. A Kárpát-medence vulkánjai. A légkör aeroszol szennyezettsége. Extrém aeroszol hatások. Atomerőművek üzemi kibocsátásai. Radioaktív hulladékok elhelyezése. Áramlások a környezetben, vízkészletek és veszélyeztetettségük. Vízeszívárgás, kormeghatározás. Alternatív energiaforrások.

**Kötelező olvasmány:**

Kiss Árpád Zoltán szerk. Fejezetek a környezetfizikából. Egyetemi jegyzet, Kossuth Egyetemi Kiadó, Debreceni Egyetem, Debrecen, 2003.

Moodle elektronikus oktatási környezetben kiadott segédanyagok

**A tantárgy neve:** Környezeti folyamatok modellezése

**Kódja:** TTFME0154

**Óraszám/hét:** 2+1+0 (előadás+tantermi gyakorlat+laboratóriumi gyakorlat)

**Számonkérés módja:** K (kollokvium/gyakorlati jegy)

**Kredit:** 4

**Tárgyfelelős:** Dr. Erdélyiné Dr. Baradács Eszter

**A kurzus célja,** hogy a hallgatók megismerjék a radionuklidok környezeti mozgását (diszperzióját, transzportját), valamint a jelenségek leírását modellek segítségével. A hallgatók megismertetése a környezeti vizsgálatokban alkalmazott elemzési és előrejelzési módszerekkel, modellekkel.

**Tematika:** Számítógépes modellezés célja, helye a környezettudományban; a számítógépes modellezés korlátai. A modellezésről általában. Modellek alkalmazásának előnyei és problémái a környezeti vizsgálatokban. A modellek csoportosítása. Modellek megbízhatósága, nemzetközi modell összehasonlítások. Paraméter-érzékenységi és paraméterbizonytalansági elemzések. Kompartiment modellek. Radionuklidok viselkedése a környezetben. Radioizotópok légköri terjedésének modellezése. Talajbeli transzportfolyamatok modellezése. A tápláléklánc szennyeződése. Vizi környezet és szennyezése. Vízmozgást és transzportot leíró alapegyenletek. Modellezés elméleti háttere. A SciLab szoftver: a szoftver elemei, funkciók használata. Eredmények megjelenítése. Egyéni feladat, melynek keretében a hallgatók egy-egy radionuklid mozgásának modellezését, szimulációját kapják feladatul, néhány irodalommal. Ez alapján kell elkészíteni a koncepcionális és matematikai modellt, majd a számítógépi realizációt és konkrét paraméter stb. értékekkel futtatni, az eredményeket ábrázolni és magyarázni.

**Kötelező olvasmány:**

Moodle elektronikus oktatási környezetben kiadott segédanyagok

**Ajánlott szakirodalom:**

B., Béres Cs., Somlai J., Szabó S. 2000: Radioökológia és környezeti sugárvédelem. Veszprémi Egyetemi Kiadó, Veszprém.

Bede G., Gács I. 1976: Szennyező anyagok terjedése a légkörben. BME Továbbképző Intézete, Budapest.

Kanyár B. 1999: A tápláléklánc szennyeződése radioaktív anyaggal. Fizikai Szemle 49, pp. 241-249

**A tantárgy neve:** Sugárvédelem és dozimetria

**Kódja:** TTFME0151

**Óraszám/hét:** 2+0+1 (előadás+tantermi gyakorlat+laboratóriumi gyakorlat)

**Számonkérés módja:** K (kollokvium/gyakorlati jegy)

**Kredit:** 4

**Tárgyfelelős:** Dr. Erdélyiné Dr. Baradács Eszter

**A kurzus célja,** hogy a hallgatók megismerkedjenek a természetes és mesterséges eredetű ionizáló sugárzások forrásaival és mérési módszereivel, az ionizáló sugárzásoknak az élő anyaggal való fizikai, kémiai, biológiai és élettani kölcsönhatásaival, egészségügyi kockázataival, és az ionizáló sugárzások káros egészségügyi hatásaival szembeni védekezés módszereivel.

**Tematika:** A környezeti radioaktivitás, ionizáló sugárzások, és az általuk okozott sugárdózisok mérésére és becslésére alkalmas mérőeszközök és módszerek áttekintése. Az ionizáló sugárzás és az anyag kölcsönhatása. Az élő anyagban a sugárzás hatására létrejövő kémiai és biológiai folyamatok, azok biológiai hatása. Sztochasztikus és determinisztikus hatások. Dozimetriai fogalmak. A népséget érő természetes és mesterséges forrásoktól eredő sugárterhelés. A sugárvédelem alapelvei, módszerei, eszközei, sugárvédelmi normák és jogi szabályozás. Dozimetriai mérések laboratóriumi gyakorlat keretében (környezeti gamma dózisteljesítmény mérése, radon-dózis becslése, gamma-sugárzás elleni védelem méretezése).

**Kötelező olvasmány:**

Sugárvédelem. Szerkesztette: Fehér István és Deme Sándor, ELTE

**Ajánlott szakirodalom:**

Köteles György: Sugáregészségtan

**A tantárgy neve:** Légkörfizika

**Kódja:** TTFME0155

**Óraszám/hét:** 2+0+0 (előadás+tantermi gyakorlat+laboratóriumi gyakorlat)

**Számonkérés módja:** K (kollokvium/gyakorlati jegy)

**Kredit:** 3

**Tárgyfelelős:** Dr. Csige István

**A kurzus célja,** hogy a hallgatók megismerjék a földi légkör kialakulásának és fejlődésének legfontosabb állomásait megértsék a légkörben lejátszódó folyamatok összefüggéseit megismerjék a légkör anyagi összetevőinek vizsgálatára használható mérési módszereket, eljárásokat.

**Tematika:** A légkör kialakulása és fejlődéstörténete. A Naprendszer bolygóinak légköre. A légkör alkotói (közel állandó és változó komponensek, eredetük, pontszerű és kiterjedt forrásaik; geogázok, biogén és antropogén források). Az atmoszféra vertikális és horizontális mozgásai és hatásuk az atmoszféra összetételére (konvekció, advekción, diffúzió). Egyes kozmogén radioaktív izotópok (Be-7, T) alkalmazása a légkör mozgásának, keveredésének vizsgálatában. Légköri trajektóriák, a koncentráció-változás számításának lehetősége.

**Kötelező olvasmány:**

Péczeli György: Éghajlat. Nemzeti Tankönyvkiadó

**Ajánlott szakirodalom:**

John Houghton: The physics of atmospheres. Cambridge University Press  
The Atmosphere. Ed.: R. F. Keeling, Elsevier, 2006.

**A tantárgy neve:** Környezetfizikai mérések

**Kódja:** TTFML0156

**Óraszám/hét:** 0+0+2 (előadás+tantermi gyakorlat+laboratóriumi gyakorlat)

**Számonkérés módja:** G (kollokvium/gyakorlati jegy)

**Kredit:** 2

**Tárgyfelelős:** Dr. Erdélyiné Dr. Baradács Eszter

**A kurzus célja,** hogy a hallgatók megismerjenek olyan laboratóriumi és terepi kísérleti eszközöket és módszereket, melyek alkalmasak egyes környezeti mennyiségek, jelenségek tanulmányozására; ismerjék meg az alkalmazott eszközök és módszerek működésével kapcsolatos legfontosabb szakmai fogalmakat és mennyiségeket; szerezzenek önálló gyakorlati tapasztalatot az eszközök és módszerek alkalmazásában.

**Tematika:** Fényelektromos jelenség tanulmányozása. Kísérletek mikrohullámokkal. Napelemek.

Kézi GPS-készülék megismerése és használata. Környezeti zaj mérése. Aprószemcsés anyagok sűrűségének mérése. Időjárás változók mérése és analízise. A fenti mérések 4 óra időtartamúak, a laboratóriumi gyakorlat ezért 4 óras tömbökben van megtartva a szorgalmi időszak heteinek egyik felében.

**Kötelező olvasmány:**

Az egyes gyakorlatokra vonatkozó, kéziratos gyakorlati útmutatók, melyek másolata otthoni tanulmányozás céljából az internetről letölthető (<http://moodle.phys.unideb.hu/>).

**A tantárgy neve:** Nukleáris analitikai módszerek a környezetkutatásban

**Kódja:** TTFME0152

**Óraszám/hét:** 2+0+0 (előadás+tantermi gyakorlat+laboratóriumi gyakorlat)

**Számonkérés módja:** K (kollokvium/gyakorlati jegy)

**Kredit:** 3

**Tárgyfelelős:** Dr. Molnár Mihály

**A kurzus célja,** hogy a hallgatók megismerjék a környezeti természetes és mesterséges radioaktivitás forrásait, tipikus előfordulási szintjeit az egyes természetes és antropogén közegekben. Megértsék radioaktív izotópokkal vizsgálható főbb környezeti problémák körét, átfogó képet kapjanak azok alkalmazási területeiről és korlátairól. Megismerjék az alkalmazható analitikai módszereket és azok főbb jellemzőit (vizsgálható anyagtípusok,

szükséges anyagmennyiségek, kimutatási határ). Komplex ismereteket szerezzenek a különböző környezeti izotópos mérések kombinált használatának módszereiről és azok korlátairól.

**Tematika:** Az alfa-, béta- és gamma sugárzó izotópok mennyisége és elterjedése a környezetben. Az alfa-, béta- és gamma sugárzó izotópok környezeti mérésének módszerei. Az alfa-, béta- és gamma sugárzó izotópok valamint nyomelem mérési módszerek környezetanalitikai alkalmazásának főbb területei és laboratóriumi háttere hazai és nemzetközi kitekintésben. Fontosabb nukleáris környezetanalitikai példák a kőzetek, vízbázisok, talajok, élővilág, levegő, és klíma kutatásában, valamint nukleáris létesítmények környezetterhelése kapcsán.

**Kötelező olvasmány:**

Fejezetek a környezetfizikából. Szerk.: Kiss Á. Z. Debrecen, Kossuth Egyetemi Kiadó (Debreceni Egyetem Természettudományi Kar)

**Ajánlott szakirodalom:**

Fehér István, Deme Sándor, Sugárvédelem, ELTE Eötvös Kiadó, ISBN 9789632840802

Kiss Dezső, Horváth Ákos, Kiss Ádám, Kísérleti atomfizika, ELTE Eötvös Kiadó, 1998, ISBN 963-463-166-5.

Atommagfizika. 2. korszerűsített kiadás. Szerk.: Fényes T. Debrecen, Debreceni Egyetemi Kiadó (2009)

## Kvantummechanikai rendszerek (Gulácsi Zsolt)

**A tantárgy neve:** Kondenzált anyagok fizikája 4.

**Kódja:** TTFME0172

**Óraszám/hét:** 2+1+0+1 (előadás+tantermi gyakorlat+laboratóriumi gyakorlat)

**Számonkérés módja:** K (kollokvium/gyakorlati jegy)

**Kredit:** 5

**Tárgyfelelős:** Dr. Gulácsi Zsolt

**A kurzus célja,** hogy a hallgatók korábbi tanulmányaik ismereteire alapozva megértsék a kondenzált anyagok fizikájához tartozó jelenségek sokszínűségét, jellemzőit, típusait, tulajdonságait, elsőkvantált szintig menő leírási lehetőségeit, kísérletekben megjelenő alapvető aspektusait, ezek magyarázatát; képessé váljanak a kondenzált anyagok fizikája témaköréhez tartozó alapjelenségek felismerésére, jellemzőinek elsőkvantált szinten történő kiszámítására; megértsék a modell leírások jellegzetességeit, eredményeit, hiányosságait.

**Tematika:** Drude modell (alapegyenlet, fémcsillogás, elektromos és termikus vezetőképesség, Lorentz féle szám, plazmafrequencia, Hall effektus, Seebeck effektus, kiértékelés a kísérleti eredmények tükrében); Nemkölcönható kvantum elektronrendszer  $T=0$  és nemzéró  $T$  hőmérsékleten, Fermi felület, kompresszibilitás, Sommerfeld modell (Sommerfeld képlet, jellemző fizikai mennyiségek tárgyalása, fajhő elemzése, állapotsűrűség, effektív tömeg, kísérleti adatokkal vett összehasonlítás); Fermi folyadék, nem-Fermi folyadék fogalma, rácsdiffrakciós jelenségek, Bloch elektron. Gyenge periódikus potenciál közelítés (nem degenerált és degenerált eset), Erős kötés közelítés, sávszigetelő, Mott szigetelő, Wigner rács, szemiklasszikus modell, lyuk fogalma. Landau nívók, kvantum Hall effektus, topologikus szigetelő, spin kvantum Hall effektus, anomális kvantum Hall effektus, nehézfermionikus rendszerek, sáv topologia.

**Kötelező olvasmány:**

N. W. Ashcroft, N. D. Mermin: Solid State Physics, Saunders College Publishing, 1976, US

<https://archive.org/details/SolidStatePhysicsAshcroftMermin>

**Ajánlott szakirodalom:**

J. Sólyom: Fundamentals of the Physics of Solids, Vols. 1-3, Springer, Berlin, 2009.

W. Jones, N. H. March: Theoretical Solid State Physics, Vols. 1-2, Dover Publication, 1985.

A. A. Abrikosov: Fundamentals of Theory of Metals, North-Holland, 1988.

P. W. Anderson: Concepts in Solids, Benjamin/Cummings Publishing Company, London 1982.

**A tantárgy neve:** Kvantum Rendszerek Soktestproblémája 1.

**Kódja:** TTFME0174

**Óraszám/hét:** 2+1+0 (előadás+tantermi gyakorlat+laboratóriumi gyakorlat)

**Számonkérés módja:** K (kollokvium/gyakorlati jegy)

**Kredit:** 5

**Tárgyfelelős:** Dr. Gulácsi Zsolt

**A kurzus célja,** hogy a hallgatók korábbi tanulmányaik ismereteire alapozva megértsék a sokrészecskes kvantummechanikai rendszerek tárgyköréhez tartozó jelenségek sokszínűségét, jellemzőit, típusait, tulajdonságait, térelméleti szinten történő leírási lehetőségeit, kísérletekben megjelenő alapvető aspektusait, és ezek magyarázatát; képessé váljanak a sokrészecskes kvantummechanikai rendszerek fizikája témaköréhez tartozó alapjelenségek felismerésére, jellemzőinek másodkvantált szinten történő kiszámítására; megértsék a sokrészecskes kvantum rendszerek leírásának jellegzetességeit, eredményeit, különböző közelítések erényeit és hiányosságait.

**Tematika:** Másodkvantálás, S-mátrix, Gell-Mann Low tétel, P és T szorzatok, időrendezett operátorok várható értéke.  $T=0$  jellemzés: Egyrészecske Green-függvény, Hamilton operátor tagok várható értékének számítása, alapállapot energiája, Gorkov egyenlet, nemkölcönható rendszerek egyrészecske propagátora fermionikus és bozonikus esetben, Lehmann reprezentáció, spektrál függvények, Wick tétel és alkalmazása, Feynmann diagramok, Dyson egyenlet, sajátenergia járulék, polarizációs hurok, kétrészecske Green-függvény, Vertex-függvény, Bethe-Salpeter egyenlet. Nemzéró  $T$  jellemzés: Matsubara formalizmus,  $T > 0$  Green-függvények, Matsubara frekvenciák szerinti összegezés fermionikus és bozonikus esetekben, várható érték számolása a  $T > 0$  Green-függvények segítségével, a termodinamikai potenciál és a  $T > 0$  Green-függvény kapcsolata, Feynmann diagramiztika  $T > 0$  hőmérséklet esetében.

**Kötelező olvasmány:**

A. L. Fetter, J. D. Walecka: Quantum theory of many particle systems, McGraw-Hill Book Company, New York, 1975

**Ajánlott szakirodalom:**

A. A. Abrikosov, L. P. Gorkov, I. Y. Dzyaloshinskii: Quantum Theoretical Methods in statistical Physics, Dover Publication Inc., New York, 1975.

L. D. Landau, E. M. Lifsic, Elméleti Fizika IX (Statisztikus Fizika II.), Tankönyvkiadó, Budapest, 1981.  
A. M. Zagoskin: Quantum Theory of Many-Body Systems, Springer, Berlin, 1998.  
C. Itzykson, J. M. Drouffe: Statistical Field Theory I, II, Cambridge University Press 1989.

**A tantárgy neve:** A funkcionális renormálási csoport módszer alapjai

**Kódja:** TTFME0175

**Óraszám/hét:** 2+1+0 (előadás+tantermi gyakorlat+laboratóriumi gyakorlat)

**Számonkérés módja:** K (kollokvium/gyakorlati jegy)

**Kredit:** 5

**Tárgyfelelős:** Dr. Nándori István

**A kurzus célja,** hogy a hallgatók korábbi kvantumtérelméleti ismereteik alapján megismerjék a renormálás alapjait; megismerjék a funkcionális renormálási csoport módszert alapjait; alkalmazni tudják a funkcionális renormálási csoport módszert a fázisszerkezet meghatározására; megértsék a szimmetriák és a dimenzió alapvető szerepét a fázisszerkezet kialakításában; megismerjék a sine-Gordon modellt, kondenzált anyagok fizikájában és a nagyenergiás fizikában játszott szerepét.

**Tematika:** Klasszikus (relativisztikus de nem kvantált) sine-Gordon (SG) modell bevezetése, mint torziós harmonikus oszcillátorok diszkrét rendszerének folytonos határesetek. Kvantumtérelmélet, renormálás, illetve renormálási csoport módszer lényegi elemeinek ismertetése. Vizsgált SG modellek (tisztá, a tömeges, a réteges továbbá a sinh-Gordon, shine-Gordon és a sn-Gordon skalárelméletek) szimmetriái és ezek alapján feltételezhető fázisaik bemutatása. Két-dimenziós fermionos és mérték elméletek (multi-color QCD<sub>2</sub>, multi-flavour QED<sub>2</sub>) bozonikus modellekre való leképezése, illetve ezek kapcsolata az SG modellekkel. Topológikus fázisátmenetek tárgyalása az SG modellek generáló funkcionáljának, statisztikus modellek partíciós függvényévé történő ekvivalens átírásával. SG modellek alkalmazása részecskefizikában (Higgs és Axion) és kozmológiában (Inflaton). SG modellek konform térelmélethez köthető jellemzőinek bemutatása. A másodrendű fázisátalakulásokat jellemző skálainvarianciára épülő Kadanoff-Wilson blokkosítás ismertetése. A Wegner-Houghton, Polchinski funkcionális renormálási csoport (FRG) egyenletek levezetése Kenneth G. Wilson ötlete alapján általánosított blokkosítás segítségével. Az FRG módszer modern megfogalmazásának, azaz a Wetterich FRG egyenletnek a levezetése. A Wegner-Houghton és Polchinski FRG egyenletekkel való kapcsolatának feltárása, fontos technikai kérdéseket (gradiens sorfejtés, regulátor-függés) érintve. Linearizált funkcionális renormálási csoport egyenletek származtatása SG modellekre a gradiens sorfejtés vezető rendjében (LPA). Egzakt (nem lineáris tagokat is figyelembe vevő) funkcionális renormálási csoport egyenletek származtatása egyetlen Fourier módust tartalmazó SG modellekre a gradiens sorfejtés vezető rendjében (LPA). Több Fourier módust tartalmazó SG modellek funkcionális renormálási csoport a gradiens sorfejtés vezető rendjében (LPA). Az effektív potenciál konvexitása. Linearizált funkcionális renormálási csoport egyenletek származtatása SG modellekre a gradiens sorfejtés vezető rendjére következő rendben (LPA'). Egzakt (nem lineáris tagokat is figyelembe vevő) funkcionális renormálási csoport egyenletek származtatása LPA'-ben. A funkcionális renormálási csoport (FRG) módszerrel kapott eredmények összefoglalása.

**Kötelező olvasmány:**

Nándori István, Lecture Note on the Functional Renormalization Group Study of Sine-Gordon Models, elektronikus jegyzet.

**Ajánlott szakirodalom:**

Nagy Sándor, Lectures on renormalization and asymptotic safety, Annals Phys. 350 (2014) 310-346,

Sailer Kornél, Renormálási csoport a kvantumtérelméletben, KLTE 1997,

Sailer Kornél, Szimmetriák II., KLTE 1994-2013.

**A tantárgy neve:** Kvantum Rendszerek Soktestproblémája 2.

**Kódja:** TTFME0176

**Óraszám/hét:** 2+1+0 (előadás+tantermi gyakorlat+laboratóriumi gyakorlat)

**Számonkérés módja:** K (kollokvium/gyakorlati jegy)

**Kredit:** 5

**Tárgyfelelős:** Dr. Gulácsi Zsolt

**Előfeltétel:** Kvantum Rendszerek Soktestproblémája 1. (TTFME0174)

**A kurzus célja,** hogy a hallgatók korábbi tanulmányaik ismereteire alapozva megértsék a sokrészecskes kvantummechanikai rendszerekben megjelenő rendezett fázisok és kondenzátumok kvantumtérelméleti módszerekkel történő jellemzését, leírását, tanulmányozási lehetőségeit, tulajdonságainak levezetését, kísérletekben megjelenő alapvető aspektusainak értelmezését, magyarázatát és megértését; képessé váljanak a sokrészecskes kvantummechanikai rendszerek fizikája témaköréhez tartozó jelenségek és rendeződési folyamatok kvantumtérelméleti szinten történő jellemzésére, megértésére és leírására úgy T=0 mint nemzérő T hőmérsékleten.

**Tematika:** Sokrészecskes kvantummechanikai rendszereket leíró modellek Green-függvény technikával történő

jellemezése zéró és nemzéró hőmérsékleten, a  $T > 0$  esetek Matsubara technikával jellemezve. Az elemzésre kerülő modellek: Stoner-féle ferromágnes, Frölich típusú elektron-fonon kölcsönhatás, Cooper probléma, BCS szupravezető fázist leíró modell, Anderson modell, Periódikus Anderson modell, Peierls-Hubbard modell, Töltés sűrűség hullámok, Spin sűrűség hullámok, Excitonikus ferromágnes, Nehézfermionos rendszerek, Szennyeződések hatása a rendezett fázis megjelenésére különböző rendszerekben.

**Kötelező olvasmány:**

A. L. Fetter, J. D. Walecka: Quantum theory of many particle systems, McGraw-Hill Book Company, New York, 1975

A. A. Abrikosov, L. P. Gorkov, I. Y. Dzyaloshinskii: Quantum Theoretical Methods in statistical Physics, Dover Publication Inc., New York, 1975.

**Ajánlott szakirodalom:**

L. D. Landau, E. M. Lifsic, Elméleti Fizika IX (Statisztikus Fizika II.), Tankönyvkiadó, Budapest, 1981.

A. M. Zagoskin: Quantum Theory of Many-Body Systems, Springer, Berlin, 1998.

C. Itzykson, J. M. Drouffe: Statistical Field Theory I, II, Cambridge University Press 1989.

P. Fazekas, Lecture Notes on Electron Correlations and Magnetism, World Scientific, London, 1999.

**A tantárgy neve:** A Schwinger-Keldysh formalizmus alkalmazása

**Kódja:** TTFME0177

**Óraszám/hét:** 2+1+0 (előadás+tantermi gyakorlat+laboratóriumi gyakorlat)

**Számonkérés módja:** K (kollokvium/gyakorlati jegy)

**Kredit:** 5

**Tárgyfelelős:** Dr. Nagy Sándor

**A kurzus célja,** hogy a hallgatók megismerkedjenek a Schwinger-Keldysh formalizmussal, amivel bővíthetik az ismereteiket a kantumtérelmélet tárgykörében; megismerjék és használni tudják a pályaintegrált; ismeretett szerezzenek a rendszer-környezet kölcsönhatásának leírásáról; megismerjék a Lindblad-egyenletet.

**Tematika:** A Schwinger-Keldysh (kétidőtengelyes, CTP) formalizmus jelentősége a kvantumelméletben, bevezető. A kvantumtérelmélet alapjai egyidőtengelyes (STP) formalizmusban, pályaintegrál, mint átmeneti amplitúdó. A CTP pályaintegrál, mint várható érték. Az STP és CTP propagátor. A rendszer-környezet kapcsolata, Caldeira-Leggett-modell, Lindblad-egyenlet. A renormálási csoport módszer CTP formalizmusban, keveredési csatolások, a nyílt dinamika megjelenése.

**Kötelező olvasmány:**

L.M. Sieberer, M. Buchhold, S. Diehl, Keldysh Field Theory for Driven Open Quantum Systems, Rept.Prog.Phys. 79 (2016) 9, 096001

Nagy Sándor: Bevezetés a kvantummechanikába (elektronikus jegyzet)

**Ajánlott szakirodalom:**

Yoni BenTov, Schwinger-Keldysh path integral for the quantum harmonic oscillator, e-Print: 2102.05029 [hep-th].

## Részecskefizika és alapvető kölcsönhatások (Kardos Ádám)

**A tantárgy neve:** Relativitáselmélet

**Kódja:** TTFME0114

**Óraszám/hét:** 2+1+0 (előadás+tantermi gyakorlat+laboratóriumi gyakorlat)

**Számonkérés módja:** K (kollokvium/gyakorlati jegy)

**Kredit:** 5

**Tárgyfelelős:** Dr. Nagy Sándor

**A kurzus célja,** hogy a hallgatók megismerkedjenek a modern részecskefizika elméleti felépítésével, a standard modellel és annak korlátaival; megismerkedjenek a nagyenergiás fizika kísérleti technikájával és az alapvető kísérletekkel; megértsék, hogyan származtathatók az alapvető kölcsönhatások valódi és sérülő szimmetriákból.

**Tematika:** Fizika és geometria, koordinátarendszerek. Relativitási elv a klasszikus mechanikában és az elektrodinamikában. A fény terjedése. Koordinátatranszformációk, Minkowski-tér. Tenzorok. A fizikai törvények kovarianciája. Az elektrodinamika kovariáns formában. Relativisztikus mechanika, relativisztikus ütközések és a fázistér. Relativisztikus térelmélet (az extrémális hatás elve, téregyenletek; elektromágneses tér, mértékinvariancia, töltésmegmaradás). Szimmetriák és megmaradási tételek, energia-impulzus tenzor. Gravitáció, súlyos és tehetetlen tömeg. Az ekvivalencia elv. Általános koordinátarendszerek, geometriai fogalmak (párhuzamos eltolás, görbületi tenzor, stb.). Elektrodinamika görbevonalú koordinátarendszerekben. Mechanika, tehetetlenségi erők. Az Einstein-egyenletek, egyszerűbb megoldások (gömbszimmetrikus megoldás, Schwarzschild metrika, fekete lyukak). Robertson-Walker metrika, Friedmann-féle kozmológiai modellek. Az Einstein-egyenletek linearizálása. Hullámmegoldások, gravitációs hullámok és detektálásuk.

**Kötelező olvasmány:**

Dede Miklós-Demény András: Kísérleti fizika 2.kötet, Nemzeti Tankönyvkiadó 1994 (II.Fejezet: Relativisztikus mechanika)

Taylor, E.F., Wheeler, J.A.: Téridő-fizika, Gondolat, Budapest, 1974., Typotex, Budapest, 2006.

Landau, L.D., Lifsic, E.M.: Elméleti fizika II: Klasszikus erőterek, Tankönyvkiadó, Budapest, 1976.

**Ajánlott szakirodalom:**

R.M. Wald, R.M.: General Relativity, The University of Chicago Press, 1984.

Misner, C.W., Thorne, K.S., Wheeler, J.A.: Gravitation, W. H. Freeman, 1973.

Hraskó Péter: Relativitáselmélet, Typotex, Budapest, 2002.

E. Byckling, K. Kajantie: Particle Kinematics, Wiley-Interscience, 1973

**A tantárgy neve:** Kvantumtérelmélet

**Kódja:** TTFME0113

**Óraszám/hét:** 2+1+0 (előadás+tantermi gyakorlat+laboratóriumi gyakorlat)

**Számonkérés módja:** K (kollokvium/gyakorlati jegy)

**Kredit:** 6

**Tárgyfelelős:** Dr. Nándori István

**Előfeltétel:** Relativitáselmélet (TTFME0114)

**A kurzus célja,** hogy a hallgatók megértsék, hogy a kvantummechanika és a relativitás elvének összeegyeztetése miként vezet a kvantált mezők vizsgálatához; megértsék az olyan alapvető fizikai mennyiségek jelentését mint a hatáskeresztmetszet vagy bomlási szélesség; megtanulják, hogy ezek a mennyiségek miként származtathatók a kvantumtérelméleti tárgyalásban; képesek legyenek ezeket a mennyiségeket a perturbációs számítás legalacsonyabb rendjében kiszámítani, vagyis megtanulják, miként lehet egy adott térelméleti modell keretein belül a perturbációs számítás szabályait meghatározni és a kapott szabályok alkalmazásával képesek legyenek adott részecskefizikai folyamatok hatáskeresztmetszetének, illetve adott bomlási szélességek meghatározására; felkészüljenek a kvantumtérelmélet haladóbb témaköreinek tanulmányozására, például a természet leírása szempontjából fontos konkrét térelméleti modellek vizsgálatára.

**Tematika:** Kísérletek a relativisztikus kvantummechanika megfogalmazására, a Klein-Gordon- és a Dirac-egyenlet, a kvantált mezők megjelenése; klasszikus térelmélet, skalármezők kanonikus kvantálása; a hatáskeresztmetszet és bomlási szélesség fizikai jelentése és kiszámítása; a szórási amplitúdó és az LSZ-redukciós formula; pályaintegrál szabad és kölcsönható terekre; perturbációs számítás, Feynman-gráfok, Feynman-szabályok; fermionmezők Lagrange-sűrűsége, a Dirac-mező kanonikus kvantálása; fotonok és kvantum-elektrodinamika; elemi folyamatok hatáskeresztmetszetei, bomlási szélességek kiszámítása.

**Kötelező olvasmány:**

Patkós A., Polónyi J.: Sugárzás és Részecskék, 1.-5. Fejezet, Typotex, Budapest, 2000.

**Ajánlott szakirodalom:**

Peskin, M.E., Schroeder, D.V.: An Introduction to Quantum Field Theory, Westview Press, 1995.  
Srednicki, M.: Quantum Field Theory, Cambridge University Press, 2007.  
Mandl, F., Shaw, G.: Quantum Field Theory, Wiley, 1984.  
Weinberg, S.: The Quantum Theory of Fields, Volume I, Cambridge University Press, 1995.

**A tantárgy neve:** Részecskefizika 2.

**Kódja:** TTFME0112

**Óraszám/hét:** 2+1+0 (előadás+tantermi gyakorlat+laboratóriumi gyakorlat)

**Számonkérés módja:** K (kollokvium/gyakorlati jegy)

**Kredit:** 4

**Tárgyfelelős:** Dr. Kardos Ádám

**Előfeltétel:** Részecskefizika 1. (TTFME0104)

**A kurzus célja,** hogy a hallgatók megismerkedjenek a modern részecskefizika elméleti felépítésével, a standard modellel és annak korlátaival; megismerkedjenek a nagyenergiás fizika kísérleti technikájával és az alapvető kísérletekkel; megértsék, hogyan származtathatók az alapvető kölcsönhatások valódi és sérülő szimmetriákból.

**Tematika:** Az 1. félév anyagának áttekintése. Mértékszimmetriák és kölcsönhatások: QED. Erős kölcsönhatás: QCD. Elektroyenge kölcsönhatás. A standard modell felépítése. Számítógépes adatelemzés - 1 és -2. A standard modell kísérleti ellenőrzése. A Higgs-bozon keresése és felfedezése. LEP - HERA - Tevatron - LHC eredmények. A standard modell problémái és kiterjesztése. Nehézionfizika.

**Kötelező olvasmány:**

Horváth Dezső, Trócsányi Zoltán: Bevezetés az elemi részek fizikájába, 1-15. fejezet, Typotex, Budapest, 2017.

**Ajánlott szakirodalom:**

Leon Lederman: Az isteni a-tom avagy Mi a kérdés, ha a válasz a Világegyetem?, Typotex, Budapest

Donald H. Perkins: Introduction to High Energy Physics, Addison-Wesley, Menlo Park, USA

Francis Halzen and Alan D.~Martin: Quarks and Leptons. An Introductory Course in Modern Particle Physics, John Wiley and Sons, New York.

Weinberg, S.: The Quantum Theory of Fields, Volume I, Cambridge University Press, 1995.

**A tantárgy neve:** Részecskefizikai standard modell

**Kódja:** TTFME0111

**Óraszám/hét:** 2+1+0 (előadás+tantermi gyakorlat+laboratóriumi gyakorlat)

**Számonkérés módja:** K (kollokvium/gyakorlati jegy)

**Kredit:** 5

**Tárgyfelelős:** Dr. Kardos Ádám

**Előfeltétel:** Kvantumtérelmélet (TTFME0113)

**A kurzus célja,** hogy a hallgatók korábbi kvantum-mezőelméleti tanulmányaikban szerzett ismeretekre alapozva megértsék, hogy a részecskefizika standard modellje lokális mértékelmélet, fel tudják sorolni a modell fermionjainak és bozonjainak tulajdonságait, alkalmazni tudják a modell által leírt kölcsönhatásokat; képessé váljanak alapvető fizikai mennyiségek, mint bomlási szélesség és hatáskeresztmetszet önálló kiszámítására a perturbációs számítás legalacsonyabb rendjében a természetben előforduló legfontosabb esetekben; megértse a modell eredményeit és hiányosságait.

**Tematika:** A kvantum-elektrodinamika elmélete; Feynman-szabályok. Elektroyenge kölcsönhatás Weinberg-Salam modellje, Weinberg-keveredés, töltött- és semlegesáram-kölcsönhatások. Brout-Englert-Higgs-mechanizmus az U(1) és az SU(2)xU(1) elméletekben. BEH-mechanizmus a standard modellben, a standard modell és a Fermi-elmélet kapcsolata. A müon bomlási szélességének kiszámítása a Fermi-elméletben és a standard modellben. Glashow-Iliopoulos-Maiani-mechanizmus, Cabibbo-keveredés, a fermionok tömegei. Kvarkézek keveredése, a Cabibbo-Kobayashi-Maskawa-mátrix megjelenése a töltöttáram-kölcsönhatásokban. A standard modell paraméterei és Feynman-szabályai. Neutrínók keveredése, a Pontecorvo-Maki-Nakagawa-Sakata-mátrix szerkezete. Neutrínók ízrengése. Az axiális anomália és kiesése a standard modellből. Faszintű fenomenológia: a vektorbozonok bomlási szélességei, Z-bozon keletkezése és bomlása elektron-pozitron ütközésben. A részecskefizika megválaszolt és megválaszolatlan kérdései.

**Kötelező olvasmány:**

Horváth Dezső, Trócsányi Zoltán: Bevezetés az elemi részek fizikájába, 21. fejezet, Typotex, Budapest, 2017

**Ajánlott szakirodalom:**

A. Pich: The Standard Model of Electroweak Interactions, arXiv: 1201.0537

Carlo M. Becchi, Giovanni Ridolfi: An Introduction to Relativistic Proce