

**BUDAPESTI MŰSZAKI ÉS GAZDASÁGTUDOMÁNYI EGYETEM**

**Fizikai Tudományok Doktori Iskola**

**Képzési Program**

**2023**

## Tartalomjegyzék:

I. A PhD képzés elemei	3
II. Kompetenciák	4
III. Mintatanterv	6
IV. Komplex vizsga	7
Fizika tárgycsoport tételei	9
Nukleáris technika tételek	14
V. Kutatási területek	18
Kutatási témák	
Szilárdtestfizika	20
Nanofizika/nanotechnológia	23
Kvantumrendszerek elméleti fizikája	26
Statisztikus fizika	29
Optika	31
Anyagtudomány	34
Nukleáris technika	37
Orvosi fizika	40
VI. Tárgycsoportok	43
Tematikák	
Szilárdtestfizika	46
Nanofizika/nanotechnológia	51
Kvantumrendszerek fizikája	56
Statisztikus fizika	60
Optika	64
Anyagtudomány	72
Nukleáris technika	78
Orvosi fizika	87

## Preambulum

A Képzési Program a vonatkozó jogszabályok és a BME szabályzatai, különösen [a nemzeti felsőoktatásról szóló 2011. évi CCIV törvény](#) (a továbbiakban: Nftv.), [a doktori iskolákról, a doktori eljárások rendjéről és habilitációról szóló 387/2012. Évi \(XII.19.\) Korm rendelet](#) (a továbbiakban: doktori kormányrendelet), valamint a [BME Doktori és Habilitációs Szabályzat](#) (BME DHSZ) és a [BME Tanulmányi és Vizsgaszabályzat](#) (BME TVSZ) előírásait figyelembe véve készült.

Ahol jelen [Képzési Program](#) a fentiekben nem rögzített, vagy annál szigorúbb követelményt támaszt, ott kivételesen engedélyezhető a követelmény felsőbb szabályzás által megengedett mértékűre módosítása. Az engedélyt (írásban benyújtott, részletesen indokolt kérelem alapján) doktori képzés esetén a DIT, fokozatszerzési eljárás esetén a HBDT adhatja, jegyzőkönyvezett döntéssel.

## I. A PHD KÉPZÉS ELEMEI

A doktori iskola által meghirdetett témákban végzett önálló kutatási tevékenység jelenti a doktori képzés legfontosabb részét. Minden doktoranduszhoz egy és csak egy témavezető tartozik, aki teljes felelősséggel irányítja és segíti a témán dolgozó doktorandusz tanulmányait, kutatási munkáját, az eredmények publikálását és az értekezés elkészítését. Csak nemzetközi együttműködés keretében történő képzés vagy interdiszciplináris téma esetén a Doktori Iskola Tanácsa (DIT) által elfogadott, az Egyetemi Habilitációs Bizottság és Doktori Tanács (EHBBDT) előzetes hozzájárulásával meghirdetett témakiírás alapján engedélyezett a kettős témavezetés egy társ-témavezető bevonásával. Külső témavezetés vagy meghívott témavezető esetén a DIT belső konzulens jelöl ki, aki az Egyetem részéről segíti a témavezető munkáját, és figyelemmel kíséri a hallgató szakmai haladását.

A doktori képzés során a hallgatók az adott félévre meghirdetett doktori tantárgyak mellett választhatnak olyan MSc vagy PhD tárgyakat, akár másik egyetem kínálatából, melyeket a Doktori Iskola Tanácsa befogad és kredittel elismer. A tantárgyak körét tovább bővíti az egyes szemeszterekre meghívott előadók angol nyelven tartott előadásai, valamint az Eötvös Loránd Tudományegyetemmel kötött megállapodás által biztosított kölcsönös áthallgatási lehetőség. A tantárgyak hallgatásáért kapott kreditek a két szakaszos képzés első 4 szemeszterére vannak csoportosítva. Az utolsó 4 félévben a nemzetközi vonatkozású tevékenységek és az ehhez kapcsolódó képességeket erősítő aktivitás van elismerve a nemzetközi intenzív kurzusokon, tematikus „nyári iskolán” (téli iskolán) történő részvételre adható tananyag kredit-pontokkal (feltétel: a részvétel igazolása és a témavezető támogatása).

A képzés része az *irányított oktatás*, mely során a hallgató a tárgyi tudását elmélyíti, valamint tananyagfejlesztési, előadói és kommunikációs képességeit fejleszti egy kijelölt oktató irányítása alatt. A tantárgyat és a hozzárendelt kreditet – a témavezetővel egyeztetve – a témavezető/konzulens tanszékének vezetője jelöli ki, teljesítését a tárgyfelelős javaslata alapján a tanszékvezető fogadja el és értékeli érdemjeggyel. A doktori képzésben előírt mennyiséget meghaladó oktatási tevékenységre a BME TVSZ 179.§-ban leírt módon munkadíjat kell fizetni.

A képzés tutoriális jellegét hangsúlyozza a kreditpontokkal elismert rendszeres konzultáció, valamint a kutatási és publikációs tevékenység támogatása. A hallgató felkészültségét és a konzultációkon mutatott aktivitását a témavezető minden szemeszterben a *konzultációs kredittel* értékeli. A doktori témában való időarányos előrehaladást a *kutatómunkára* javasolt kredit ismeri el. *Publikációs kredit* adható az új eredmények nemzetközi folyóiratokban történő publikálására, vagy nemzetközi konferencián történő bemutatására, beleértve az előkészítő tevékenységet is (azaz nem elvárás a cikk elfogadása/megjelenése).

A témavezető a publikációs tevékenységre javasolt kreditekkel jelzi a DIT felé, hogy a képzés során az összes publikációs kreditpont megszerzésével a negyedik szemeszter végére teljesül a komplex vizsgára bocsátás feltétele, a nyolcadik szemeszter végére pedig a fokozatszerzés minimumkövetelménye teljesül. A DIT minden félév végén értékeli a hallgató szakmai beszámolóját, és a témavezetői értékelésben javasolt kutatási és publikációs krediteket ennek alapján hagyja jóvá. A kreditek megállapításához a DIT kikérheti a doktori témát kezelő tanszék véleményét (a témavezető/konzulens tanszéke).

Az abszolutórium feltétele az egyes kredit típusokból a III. fejezetben található képzési tervben meghatározott határok szerinti kreditek megszerzése.

A képzési program része az elért eredmények bemutatása az évente megrendezett PhD szakmai napon tartott előadás keretében.

## II. ELSAJÁTÍTANDÓ SZAKMAI KOMPETENCIÁK

Célként tűzzük ki, hogy a PhD fokozattal rendelkező fizikus az alábbi kompetenciákkal rendelkezzen

### a) tudása

Rendszerszinten és összefüggéseiben ismeri a fizikai tudományok általános törvényszerűségeit.

Kutatói szinten ismeri tudományterülete tárgyát, általános és specifikus jellemzőit, legfontosabb irányait és határait, megállapodott és vitatott összefüggéseit.

Biztos tudással rendelkezik a tudományterületével rokon természettudományi területek fontosabb összefüggéseit, elméleteit és az ezeket felépítő fogalmi rendszereket, valamint a nevezéktant illetően.

Értő, elemző módon folyamatosan bővíti tudományterülete meghatározó nemzetközi szakirodalmi ismereteit.

Kutatásai során nyert adatok, eredmények kezeléséhez, értékeléséhez és közléséhez szükséges informatikai és matematikai tudás alkotó alkalmazáshoz szükséges szintjével rendelkezik.

Rendelkezik szakterülete önálló kutatásához szükséges kutatás-módszertani ismeretekkel.

Alkotó alkalmazáshoz szükséges szinten ismeri, megérti szakterülete összefüggéseit, elméleteit, és az ezeket felépítő fogalmi rendszereket, szakmai nevezéktant.

### b) képességei

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

Tudományterületén önállóan képes új projektek, munkaszakaszok tervezésére, megvalósítására.

Képes a szakterületén belüli kreatív elemzésre, átfogó és speciális összefüggések szintetikus, új szemléletű megfogalmazására, modellalkotásra, az értékelő és kritikai tevékenységre.

Képes alkalmazni és továbbfejleszteni szakterületének sajátos ismeretszerzési és problémamegoldási módszereit.

Képes kreatívan kidolgozni az elvi kérdések gyakorlati alkalmazásának újszerű, korábban ismeretlen módjait.

Tudományterületén felismeri a szakmai problémákat, képes az azok megoldásához szükséges elvi és gyakorlati háttérrel részletesen, kutatási szinten feltárni és megoldani.

Képes akár szakterületileg egymástól távolabb eső információk alkotó összekapcsolására és a köztük fennálló összefüggések felfedezésére. Eközben a kutatási eredmények alkotó értékelésekor képes a lényeges, döntő, fontos szempontok felismerésére és kiemelésére.

Képes a saját és mások kutatási eredményeit szakmai alapon, reálisan, kritikusan elemezni, értékelni és értékén kezelni.

A fizika tudományát érintő információkat, híreket kritikusan ítéli meg, szakmai vitákban szaktudáson alapuló érvekkel vesz részt.

Képes a szakterületében jártas és abban laikus személyek számára is megfelelő színvonalú ismeretátadásra, valamint részvételre szakszerű vitában, megbeszélésben.

Képes a szakmai kommunikációra szóban és írásban, valamint szakmai együttműködésre mind hazai, mind nemzetközi viszonylatban.

Képes szaktudományi ismereteinek, kutatási eredményeinek összefoglalására, bemutatására, átadására. Ismeri és önállóan is képes gyakorolni a szakterületén szokásos közzési módokat (pl. szócikkek, könyvek, tanulmányok önálló írására).

### **c) attitűdje**

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

Törekszik a még feltáratlan, megoldatlan tudományos kérdések beazonosítására, megfogalmazására.

Szilárd szakmai elköteleződéssel rendelkezik, elfogadja a kitartó munkavégzés szükségességét.

Nyitott új technológiák, újonnan kifejlődő kutatási területek megismerésére, a megszerzett ismeretek terjesztésére, valamint a meghatározó elemek saját kutató-fejlesztő munkájába való beépítésére, továbbfejlesztésére.

Problémamegoldáskor, modellalkotáskor szakmai előítéletektől mentes, nyitott gondolkodást mutat.

Az elért eredmények, a teljesítmény szakmai értékének reális és egyben empatikus megítélése jellemzi, mind a saját, mind az általa irányítottak munkájának tekintetében.

Befogadja a jogos szakmai kritikákat és elfogadja mások szakmai érveit.

Elkötelezett és nyitott a szakmai együttműködésekben való részvételre és azok kezdeményezésére, mind hazai, mind nemzetközi viszonylatban.

Folyamatosan törekszik az egyéni és a csoportmunka eredményes egyensúlyára.

Jellemzője az önálló, elmélyült szakmai munka, egyúttal nyitott a csapatmunkára és mások munkájának támogatására is.

### **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.

Felelősséggel vállalja a szakmája elméleti és gyakorlati kérdései kapcsán felvetődő etikai kérdések megválaszolását.

Kutatásvezetőként önálló döntésekkel irányítja munkatársai tevékenységét, felelősséget vállal szakmai fejlődésük biztosításáért.

Egyenrangú, vitapartneri szerepet vállal tudományterülete szakembereivel.

Minden tevékenységét áthatja a szaktudásán alapuló felelős gondolkodás az élő és élettelen természet megóvásáért, állapotának javításáért.

Alkotó, kreatív önállósággal épít ki új tudásterületeket, illetve kezdeményez új gyakorlati megoldásokat.

### III. MINTATANTERV

Tantárgy /típus	Össz. kredit	1. félév	2. félév	3. félév	4. félév	5. félév	6. félév	7. félév	8. félév
<b>Tananyag</b>	<b>24</b>								
Tantárgy /KV	18	4/v/6	4/v/6	2/v/3	2/v/3				
Nyári iskola /V	6						3		3
<b>Irányított oktatás</b>	<b>18</b>								
Oktatás /K	18	2/f/3	2/f/3	2/f/3	2/f/3	2/f/3	2/f/3		
<b>Kutatás</b>	<b>144</b>								
Konzultáció /K	48	6/f/6	6/f/6	6/f/6	6/f/6	6/f/6	6/f/6	6/f/6	6/f/6
Kutatómunka	96	12	12	12	12	12	12	12	12
<b>Publikáció</b>	<b>54</b>								
Publikáció /K	48	3	3	6	6	6	6	9	9
Konferencia /V	6					3		3	
<b>Összesen:</b>	<b>240</b>	<b>30</b>	<b>30</b>	<b>30</b>	<b>30</b>	<b>30</b>	<b>30</b>	<b>30</b>	<b>30</b>

A képzés során 240 kreditpontot kell megszerezni. Az egyes tevékenységek kredithatárai:

- Tananyag: 18 - 30 kreditpont
- Irányított oktatás: 18 - 24 kreditpont
- Tudományos kutatás: 120 - 150 kreditpont
- Publikációk: 54 - 66 kreditpont, ebből legalább 3 konferencia kredit

Megszűnik a doktorandusz hallgatói jogviszonya, ha az aktív félévében nem szerez legalább 15 kreditet (BME TVSZ 186.§ 2).

Az az állami ösztöndíjas hallgató, aki az aktív félévében nem szerez legalább 20 kreditet, a DIT javaslatára született dékáni döntéssel önköltséges képzésbe sorolható át (BME DHSZ 13.§ 8).

Önköltséges képzésben részt vevő hallgatók kérelem alapján, a DIT támogató véleményezése esetén átsorolhatók állami ösztöndíjas státuszba (részletek: BME DHSZ 13.§ 8)

Amennyiben egy hallgató a képzés második szakaszában bármikor benyújtja doktori értekezését, és azt a Habilitációs Bizottság és Doktori Tanács (HBDT) bírálati eljárásra bocsátja, akkor a félév kutatási és publikációs kreditjei a HBDT döntés napján elismerésre kerülnek. Az a hallgató, aki a tantervben előírt valamennyi tanulmányi és vizsga-követelményt, valamint az előírt 240 kreditet ezzel teljesíti, a HBDT döntés napján megszerzi az abszolutóriumot, míg a hallgatói jogviszonya – és ösztöndíjas hallgató esetén az ösztöndíj-jogosultsága – megmarad a félév utolsó napjáig (Nftv. 59.§ (1) bekezdés d) pont).

## IV. KOMPLEX VIZSGA

A vizsgára bocsátás kredit-feltétele a doktori képzés első négy félévében legalább 90 kredit teljesítése és valamennyi, a doktori iskola mintatantervében előírt **tantárgy kredit** megszerzése (kivéve a doktori fokozatszerzésre egyénileg felkészülő, akinek hallgatói jogviszonya a komplex vizsgára történő jelentkezéssel és annak elfogadásával jön létre).

A vizsgára bocsátás publikációs követelménye legalább **egy** „Web of Science” adatbázisban szereplő folyóiratban megjelent, *vagy* közlésre elfogadott, *vagy* közlésre beküldött, *vagy* az arXiv-ban elektronikusan publikált tudományos közlemény. Egyéni felkészülők esetén a komplex vizsgára történő jelentkezés elfogadásának feltétele a doktori fokozatszerzés publikációs és nyelvi követelményeinek formális teljesítése (a jelentkezéskor még nem kellenek tézispontok, ezért tartalmi értékelés nincs, csak az elvárt számszerű mutatókat kell teljesíteni).

A hallgató a vizsga előtt legalább két héttel elektronikus formában benyújtja az addig elért eredményeinek rövid összefoglalását, valamint a publikálásra beküldött, illetve megjelent cikkeit. A publikációs feltételek formális teljesítése nem garantálja a vizsgára bocsátást. A vizsgabizottság a vizsga megkezdése előtt érdemben megvizsgálja a publikálás színvonalát, kapcsolódását a doktori témához, továbbá a jelölt hozzájárulását a publikált eredményekhez. A bizottság a vizsgára bocsátást vagy annak elutasítását a jegyzőkönyvben rögzíti és indokolja.

A komplex vizsga nyilvános. A vizsgabizottság legalább három tagból áll, a tagok legalább egyharmada nem áll foglalkoztatásra irányuló jogviszonyban a doktori iskolát működtető intézménnyel. A vizsgabizottság elnöke egyetemi tanár *vagy* Professor Emeritus *vagy* MTA doktora címmel rendelkező oktató, kutató. A vizsgabizottság valamennyi tagja tudományos fokozattal rendelkezik. A bizottságnak nem lehet tagja a vizsgázó témavezetője. A témavezető a vizsga előtt legalább egy héttel elektronikus formában eljuttatja a bizottság elnökének a hallgató teljesítményének témavezetői értékelését. A komplex vizsgára a témavezetőt meg kell hívni.

A komplex vizsga két részből áll: az egyik részben a vizsgázó elméleti felkészültségét méri fel („elméleti rész”), a másik részben a vizsgázó tudományos előrehaladásáról ad számot („disszertációs rész”).

A komplex vizsga elméleti részében a doktorandusz két tárgyból tesz vizsgát. Ennek keretében a komplex vizsgabizottság felméri a jelölt tájékozottságát a kutatási terület szakirodalmával és elméleti alapjaival kapcsolatban is. A vizsga tárgyait a témavezetővel történő egyeztetés után a DIT jelöli ki, és vizsga félévének megkezdése előtt közli a hallgatóval. A tárgyak listáját és részletes tematikáját a következő alfejezetek tartalmazzák, és elérhetőek a doktori iskola honlapján is.

A komplex vizsga másik részében a vizsgázó előadás formájában ad számot kutatási témájának szakirodalmi ismereteiről, beszámol kutatási eredményeiről, ismerteti a doktori képzés második szakaszára vonatkozó kutatási tervét, valamint a disszertáció elkészítésének és az eredmények publikálásának ütemezését. Előadásában kitér eredményeinek tudományos jelentőségére és innovációs tartalmára, illetve – amennyiben releváns – a kutatás technológiai motivációira, valamint az eredmények gyakorlati alkalmazhatóságára. A vizsgabizottság tagjai külön-külön értékelik a vizsga elméleti és disszertációs részét. A komplex vizsga sikeres, amennyiben a bizottság tagjainak többsége mindkét vizsgarészt sikeresnek ítélte. A doktorandusz a sikertelen komplex vizsgát egy alkalommal, ugyanazon vizsgaidőszakban ismételteti meg.

A komplex vizsgáról szöveges értékelést is tartalmazó jegyzőkönyv készül. A vizsga eredményét a szóbeli vizsga napján ki kell hirdetni. A komplex vizsga eredménye nem számít bele a doktori fokozat minősítésének kialakításába, de sikeres teljesítése a képzés második szakaszába történő belépés feltétele.

## A komplex vizsga tárgyai

### FIZIKA

#### Szilárdtest-fizika

1. Elektronok szilárd testekben
2. Félvezetők
3. Mágnesség
4. Szupravezetés
5. Anyagvizsgálati módszerek

#### Optika

6. Fénymodellek
7. Optikai és fotonikai eszközök
8. Lézerfizika
9. Optikai mérés technika és spektroszkópia
10. Optikai anyagok

#### Statisztikus fizika és termodinamika

11. Kvantum statisztikus fizika
12. Nemegyensúlyi rendszerek és kaotikus dinamika
13. Komplex hálózatok és játékelmélet
14. Számítógépes módszerek és fázisátalakulások

#### Kvantumelmélet

15. Soktestfizika
16. Kvantumtérelmélet és részecskefizika
17. Elektronrendszerek kvantumfizikája
18. Kvantumoptika és kvantuminformatika
19. Mezoszkopikus és erősen korrelált rendszerek

### NUKLEÁRIS TECHNIKA

#### Fúziós plazmafizika

1. Fúziós energiatermelés koncepciók
2. Mágneses összetartású fúziós technológia
3. Elméleti fúziós plazmafizika

#### Orvosi fizika

4. Teleterápia – foton és elektron terápia
5. HDR és LDR brachyterápia
6. Orvosi képalkotás ionizáló sugárzással
7. Orvosi képalkotás nem-ionizáló sugárzással

#### Nukleáris mérés technika és radioanalitika

8. Sugár- és részecskeforrások
9. Elektromágneses sugárzás és részecskék detektálása
10. Radioanalitikai módszerek

#### Sugárvédelem

11. Sugárvédelem és jogi szabályozása
12. Szennyezés-terjedés és radioaktív hulladékok kezelése

#### Atomreaktorok fizikája

13. Magfizika
14. Reaktorfizika
15. Termohidraulika
16. Monte-Carlo részecske-transzport módszerek
17. Atomreaktorok és üzemanyagciklus
18. Atomreaktorok üzemtana
19. Atomreaktorok biztonsága



# SZILÁRDTESTFIZIKA TEMATIKA

## 1. Elektronok szilárdtestekben

Bloch-tétel, elektronok sávszerkezete, fémek és félvezetők. Hullámsomag, kváziklasszikus dinamika, effektív-tömeg.

Ballisztikus transzport, vezetőképesség kvantálás. Mezoszkopikus transzport, Landauer-formalizmus. Makroszkopikus transzport: Boltzmann-egyenlet, relaxációs idő közelítés.

## 2. Félvezetők

Félvezető kristályok kötés-szerkezete és sávszerkezete. Adalékolás, szennyezési nívók. Transzport tiszta és adalékolt félvezetőkben.

Tiltott sávok, heteroszerkezetek tervezése (band engineering). Kétdimenziós elektrongáz. Kvantum-Hall effektus. Kvantum-dot nívószerkezete, egyelektron-transzisztor.

Modern félvezető eszközök: MOSFET, Flash-memória, félvezető lézer.

## 3. Mágnesség

Landau-nívók, mágneses oszcillációk, Fermi-felület kísérleti meghatározása. Vezetési elektronok mágneses szuszceptibilitása, Stoner-enhancement.

Hund-szabályok, mágneses momentumok kölcsönhatása kristályszerkezetben, a mágnesség rács-modelljei, mágneses rendeződések. Heisenberg-modell, ferromágnesség.

Ferromágnesség értelmezése sáv képben, spin-polarizált elektronállapotok, spintronika. Mágneses rezonancia: NMR, ESR.

## 4. Szupravezetés

Első és másodfajú szupravezetők fenomenológikus leírása. Cooper-párok, BCS-elmélet, makroszkopikus kvantum állapot. Fluxuskvantálás, Josephson-effektus, SQUID.

Szupravezető vortexek, másodfajú szupravezetők Ginzburg-Landau elmélete. Magashőmérsékletű szupravezetők, szupravezető alkalmazások.

## 5. Anyagvizsgálati módszerek

Szerkezetmeghatározás diffrakciós módszerekkel. Elektronmikroszkópia (TEM, SEM, elektronsugár litográfia).

Pásztázó szondás módszerek (AFM, STM).

Elektronszerkezet és rezgési modulusok vizsgálata optikai módszerekkel (Raman- és optikai spektroszkópia, szögfelbontásos fotoemissziós spektroszkópia). Felületanalitikai módszerek (SIMS, XPS, AES).

## OPTIKA TEMATIKA

### 6. Fénymodellek

Elektromágneses fényelmélet. A fény terjedése homogén dielektrikum és vezető közegekben. Diszperzió. Fresnel-Kirchoff diffrakcióelmélet. Fényszórás.

A geometriai optika alapjai. Optikai rendszerek jellemzői, képalkotás minősítésére alkalmazott paraxiális, harmadrendű és diffrakciós közelítések. Monokromatikus és kromatikus képhibák korrigálása. Az optikai tervezés folyamata és eszközei.

### 7. Optikai és fotonikai eszközök

Alapvető leképező eszközök: kondenzor, kollimátor, ragasztott akromát, fényképezőobjektív, képátvetítő, okulár, távcső, optikai mikroszkópok, megvilágítási módszerek. A fény intenzitását, frekvenciáját, fázisát, polarizációját, irányát befolyásoló fotonikai eszközök. Hullámvezetők és periodikus többrétegű struktúrák.

Hőmérsékleti sugárzás, izzólámpák. Gázkisülések. Kisülő lámpák típusai és azok jellemzői. Félvezető fényforrások. Foton emisszió és abszorpció alapuló félvezető eszközök.

### 8. Lézerfizika

A lézerműködés alapjai. Fény-anyag kölcsönhatás fenomenologikus elmélete. Rezonátorok. Folyamatos és impulzusüzemű működés leírása, móduscsatlós. Ultrarövid impulzusok előállítása és alkalmazásai. Lézererősítők.

Félklasszikus lézerműködés, lézerek kvantumelmélete. Lézerek alkalmazása az orvostudományban, optikai távközlésben, iparban, kutatásban.

### 9. Optikai mérés technika és spektroszkópia

Fotodetektorok fajtái, működési elve, jellemzői. Az optikai teljesítménymérés módszerei, korlátai. Interferometria, interferométerek. Holográfia és alkalmazásai. Optikai alak és távolságmérés. Képalkotó rendszerek a mérés technikában.

Fény és anyag kölcsönhatása, atomok, molekulák, szilárd testek esetén. Abszorpció, emisszió, fényszórás. Spektroszkópiai eszközök és tulajdonságaik. Fotometriai és radiometriai mennyiségek.

### 10. Optikai anyagok

Kristályoptika. Speciális effektusok átlátszó szilárd testekben (elektrooptikai effektus, fotoelasztikus jelenség és akusztó-optika, nemlineáris és egyéb jelenségek). Fontosabb optikai anyagok fizikai tulajdonságai.

Optikai rétegszerkezetek tulajdonságai és alapanyagaik. Fontosabb alapanyag-gyártási eljárások (üvegek, kristályok). Tömbi működésű elemek gyártása. Optikai rétegszerkezetek készítése. Strukturálás, integrált optika.

A nemlineáris optika alapjai; Frekvenciakétszerezés, parametrikus erősítés, fáziskonjugáció.  
A frekvencia- és fázisillesztés, valamint a foton-szemlélet jelentősége

## STATISTICAL PHYSICS AND THERMODYNAMICS

### 11. Quantum statistical physics

Density matrices and density operators. (Neumann equation, equilibrium, entanglement, principle of maximal entropy).

Quantum gases, Bose-Einstein condensation and superfluidity.

Correlations and linear response (Kubo formula, fluctuation-dissipation theorem, Kramers-Kronig relation).

Second quantization.

Principles of quantum Monte-Carlo methods (Trotter formula, discussion on some simple system).

### 12. Non-equilibrium systems and chaotic dynamics

Brownian motion and diffusion (Langevin vs. Fokker-Planck equation).

Markov processes and relaxation to equilibrium (H-theorem, maximum entropy principle and basic principles of Monte Carlo simulation).

Pattern formation, and fractal growth, multifractals.

Ergodicity and classical chaos (dynamical systems, attractors, Lyapunov exponents, integrable vs. non-integrable systems, Hamiltonian systems and Liouville's equation).

Classically integrable/chaotic systems at the quantum level (Wigner-surmise, Poisson vs. Wigner-Dyson statistics, Gutzwiller's trace formula).

### 13. Complex systems

Small world networks vs. Erdős-Rényi model, network growth models.

Network motifs. Communities. Directed, weighted and signed networks. Spreading. Temporal networks. Social, economic and ecological networks.

Basic concepts of traditional game theory. Potential games. Evolutionary games.

Disordered systems: Percolation, basic spin glass properties and models. Fractals and multifractals.

### 14. Computational methods and phase transitions

Molecular dynamics. Interactions, solution methods. Event driven MD, instabilities.

The Monte Carlo method (detailed balance, Metropolis algorithm, importance sampling, averaging) and simulated annealing.

Second-order phase transitions and universality (critical exponents, critical correlations, scaling laws).

Wilson's renormalization group concept and its implications (finite size scaling, scaling of free energy).

Finite size scaling, and critical dynamics (critical slowing down, speed-up techniques).

## QUANTUM THEORY

### 15. Many-body physics

Second quantization. Linear response, Green's functions. Kramers-Kronig relation.

Perturbation theory and diagrammatic techniques. (Feynmann diagrams, Dyson equations, self-energy). Fermi liquids and non-Fermi liquids.

Interacting one dimensional fermions (renormalization group and basic properties of Luttinger liquids).

Electron-phonon interactions (polarons, Peierls transition, Cooper instability).

Superconductivity, Cooper instability. Mean field theory.

Interacting bosons, Bogoliubov theory, superfluidity.

### 16. Quantum field theory and particle physics

Relativistic fields. Canonical quantisation, spin-statistics and CPT theorem.

Interacting fields, scattering theory, cross sections. Feynman rules. Functional integral methods. Generating functionals. Path integral for fermions.

Renormalisation. Classification of divergences, counter terms.  $\phi^4$  theory and QED at one loop.

Renormalisation group, Callan-Symanzik equation. Operator product expansion.

Symmetries, Ward identities. Spontaneous symmetry breaking. Gauge invariance, elements of non-Abelian gauge theory.

Weak interactions. Parity and CP violation. Charged current Lagrangian, flavour mixing, neutrino oscillations.  $SU(2)_L \times U(1)_Y$  gauge theory, Higgs mechanism.

Strong interactions.  $SU(3)$  quark model. Fundamentals of quantum chromodynamics, confinement and asymptotic freedom.

### 17. Quantum physics of electron systems

Free electrons in Hartree-Fock approximation. Density functional theory. Extensions of DFT: SDFT, self-interaction correction.

Variational and pseudopotential methods.

Point group symmetry in band structure. Time reversal symmetry and spin-orbit coupling.

Surface states, Bychkov-Rashba effect, symmetry analysis of the effective Hamiltonian.

Green function method in tight-binding approximation. Band structure of alloys, coherent potential approximation.

Ab initio theory of itinerant magnetism, Stoner model. Method of disordered local moments.

## **18. Quantum optics and quantum informatics**

Radiation transitions. Photodetection, photon statistics. Hanbury-Brown and Twiss experiment, photon antibunching. Coherent and squeezed states, Wigner functions.

Resonant atom-light interaction. Atoms in resonators, Purcell effect, strong coupling.

Ultracold atoms, Bose condensation, optical lattices.

Entanglement, Bell inequalities, quantum teleportation, quantum cryptography.

Quantum computing and quantum algorithms.

Realisation of q-bits, one and two q-bit operations. Mechanisms of information loss: relaxation, dephasing, decoherence.

## **19. Quantum theory of mesoscopic systems**

Generic properties of metallic grains (random matrix theory, level repulsion, universality classes).

Conductance through mesoscopic structures (Landauer-Büttiker formula and conductance quantization, random matrix theory of conductance, quantum Hall edge states, universal conductance fluctuations).

Coulomb blockade in quantum dots and molecules (spectroscopy, co-tunneling, signatures of Kondo effect).

Superconducting grains and Josephson junctions. Superconducting Q-bits and their manipulation.

Anderson localization (mobility edge, scaling theory).

## FÚZIÓS PLAZMAFIZIKA

### 1. Fúziós energiatermelés koncepciók

A fúziós energiatermelés magfizikai alapjai: reakciók, hatáskeresztmetszetek, üzemanyagciklus, termonukleáris fúzió koncepciója. A békés célú termonukleáris fúziós energiatermelés koncepcióinak (tehetetlenségi és mágneses összetartás) összehasonlító elemzése.

A plazmadiagnosztikák főbb típusai, kapcsolódó fizikai jelenségek: plazmahullámok, plazma sugárzása, rátaegyenletek. Fontosabb fúziós berendezések.

### 2. Mágneses összetartású fúziós technológia

Mágneses összetartás, töltött részecskék mozgása mágneses térben. A mágneses tér geometriája a különböző koncepciókban: lineáris berendezés, sztellarátor, tokamak, RFP. Fúziós berendezések telepítése és fő komponensei technológiai rendszerek. Plazma előállítás, anyagutánpótlás, fűtés, plazma-fal kapcsolat, áramhajtás, kísérlet menete.

Részecske- és hőtranszport fúziós plazmákban. Üzemeltetés szempontjából fontos instabilitások.

### 3. Elméleti fúziós plazmafizika

A plazma definíciója, legfontosabb fizikai tulajdonságai. A kinetikus elmélet, a többfolyadék-elmélet és a magnetohidrodinamika felépítése, jellemzői, alkalmazhatósági feltételei; alkalmazási példák.

MHD egyensúly, MHD stabilitás, fontosabb plazmahullámok és alkalmazásaik mágneses összetartású fúziós berendezésekben.

## ORVOSI FIZIKA

### 4. Teleterápia – foton és elektron terápia

Besugárzókészülékek működési elve, felépítése, jellemző paraméterei. Foton- és elektronnyaláb kalibráció, kis besugárzómezők dozimetriája. A sugárterápiában alkalmazott mérés technika eszközei és módszerei. Besugárzástervezés, képkalkotók szerepe, besugárzási tervek értékelése, tervminőségi indexek, beteg-dozimetria. Képezérelt sugárterápia eszközei, korrekciós módszerek. Teleterápiás besugárzókészülékek sugárvédelme. Sugárzás indukálta korai és kései mellékhatások sugárbiológiai jellemzői, LQ modell. Sugárbalesetek megelőzése, minőségellenőrzési mérések és kockázatbecslés.

### 5. HDR és LDR brachyterápia

Brachyterápiás besugárzási technikák, alkalmazott sugárforrások jellemzői, afterloading kezelések jellemzői. HDR készülékek felépítése, minőségbiztosítása és sugárvédelme, applikátorok alkalmazása. LDR brachyterápiás kezelések jellemzői, eszköztára, sugárvédelme. Képkalkotó berendezések szerepe a terápiában. HDR és LDR brachyterápia sugárbiológiai jellemzői, korai és kései mellékhatások. Védendő szervek és célterületek meghatározása, besugárzástervezési technikák, dóziselőírások, dózisszámítási módszerek. Sugárbalesetek megelőzése, minőségellenőrzési mérések, kockázatbecslés.

## **6. Orvosi képalkotás ionizáló sugárzással**

Tomográfias és planáris képrekonstrukció matematikája, algoritmusai: Radon- és inverz Radon-transzformált, ML-EM módszer, planáris leképezési eljárások és képminőségi jellemzők. Röntgen-diagnosztika: források, detektorok, CT. Izotópdiagnosztika: sugárforrások, gamma-kamera, PET és SPECT felépítése, detektorai, Anger-elv, kollimátorok. Képminőséget befolyásoló paraméterek. Ionizáló elektromágneses sugárzás terjedése szövetekben, Monte Carlo módszerek orvosi alkalmazásokkal.

## **7. Orvosi képalkotás nem-ionizáló sugárzással**

Mágneses rezonancia képalkotás: alapfogalmi, spinek rendeződése és relaxációja külső mágneses térben, T1, T2 relaxáció, Bloch egyenletek, az MRI készülék felépítése és működése, FID, pulse-echo és IR szekvenciák, 3D MRI képalkotás, kémiai eltolódás hatása és korrekciója. EPI szekvencia, műtermékei és korrekciós lehetőségeik, jel/zaj arány függése a képalkotási paramétereiktől, zajstatisztika valós és k-térben, kontrasztok. Párhuzamos képalkotási technikák. Egyszerre többszeletes képalkotás, controlled aliasing, fázisban megszorított képalkotás, compressed sensing MRI, modern diffúziós MRI. Ultrahangdiagnosztika: források és detektorok, az UH kölcsönhatása anyaggal, szöveti modellek, A-, B- és M-módú képalkotás, Doppler-mód.

# NUKLEÁRIS MÉRÉSTECHNIKA ÉS RADIOANALITIKA

## **8. Sugár- és részecskeforrások**

Mag- és atomfizikai alapjelenségek. Ionforrások, részecskék gyorsítása elektrosztatikus és rezonancia módszerekkel, lineáris és ciklikus gyorsítók felépítése, működési elveik, nyalábkezelés, ionoptika, tároló-gyűrűk, speciális gyorsítók mag- és atomfizikai vizsgálatokhoz, részecskefizikai célokra épített nagyenergiájú gyorsítók, szinkrotronok és szabadelektron lézerforrások atomfizikai és anyagszerkezeti vizsgálatokhoz. Fontosabb részecskefizikai kutatólaboratóriumok gyorsító berendezései.

## **9. Elektromágneses sugárzás (EM) és részecskék detektálása**

Detektálási alapelvek és az azokhoz tartozó alapvető elektromágneses sugárzás-anyag és részecske-anyag kölcsönhatások. Neutrínók és neutronok detektálásának fizikai lehetőségei és technikai megvalósításai. Gáztöltésű, szcintillációs és félvezető detektálási lehetőségek, eszközök és alkalmazásaik. Elektromágneses sugárzás- és részecske-spektrométerek felépítése, fontosabb szerkezeti elemei. Gamma-, röntgen-, béta- és alfa-spektrometria módszerei és lehetséges alkalmazásai, jelformálási elvek (jelalak-diszkrimináció, repülési idő, koincidencia, helyérzékeny detektálás stb.) és elektronikai módszerek. Speciális félvezető, szupravezető és dozimetriai detektorok.

## **10. Radioanalitikai módszerek**

Radioanalitika alapelvei, a legfontosabb műszeres eljárásai, valamint alkalmazásai az anyagok kémiai tulajdonságainak, összetételének, szerkezetének vizsgálatában és radioaktív izotópok elemzésében. Izotópeffektus, kormeghatározási módszerek, izotópok kémiai elválasztása. Természetes és mesterséges eredetű radioaktív izotópok

elemzési lehetőségei és módszerei. Radionalitikai és nukleáris spektroszkópiai eljárások alkalmazása a nukleáris iparban és az atomerőművek üzemeltetésében: hűtőfolyadékok radioanalitikai elemzése, sipping, fűtőelemek inhermetikussága vizsgálatának lehetőségei, radioaktív hulladékok, kibocsátások ellenőrzése.

## SUGÁRVÉDELEM

### 11. Sugárvédelem és jogi szabályozása

A sugárzások biológiai hatásai. A dózis és dózisteljesítmény értelmezése fizikai, mérés-technikai és biológiai szempontok szerint, alap- és származtatott mennyiségek, a dózisokra vonatkozó szabályozás elemei, a dózis- és dózisteljesítmény mérésének eljárásai. Az emberi szervezetbe jutó, belső sugárterhelést okozó radioaktív anyagok típusai, meghatározási módszereik. Természetes és mesterséges sugárzás forrásai. A sugárvédelem hazai és nemzetközi jogi szabályozása. Sugárforrások kezelése. Sugárbaesetek. Sugárzó anyagok szállításának nemzetközi szabályozása.

### 12. Szennyezés-terjedés és radioaktív hulladékok kezelése

A környezeti sugárterhelés összetevői, eredetük, a természetbe kikerülő radioaktív anyagok forrásai. Radioaktív anyagok terjedése homogén és heterogén környezeti rendszerekben. Környezeti minták radioaktivitásának meghatározása laboratóriumi és in situ módszerekkel, sugárvédelmi monitorozás. Radioaktív hulladékok keletkezése, kezelésük, a térfogatcsökkentés, a kondicionálás megoldásai, radioaktív hulladékok átmeneti és végleges elhelyezése, a radioaktív hulladékok minősítésének vizsgálati módszerei. Nukleáris létesítmények leszerelése.

## ATOMREAKTOROK FIZIKÁJA

### 13. Magfizika

Atommagok alaptulajdonságai (magsugár, sűrűség, magspin, kvadrupól- és mágneses dipólmomentum, kötési energia). Atommagok stabilitása, bomlási formák és azok elméleti leírása, bomlási sorok, a radioaktív sugárzás és anyag kölcsönhatásai. Magmodellek leírása: Fermi-gáz modell, cseppmodell, kollektív modell. Magerők Yukawa-modellje, izospin. Magreakciók általános jellemzői, direkt és közbenső mag képződésével járó magreakciók, rezonanciák. Maghasadás és magfúzió.

### 14. Reaktorfizika

Boltzmann-transzportegyenlet és analitikus megoldása (Case-módszer), diffúziós közelítés, reaktorkinetika alapjai, reaktivitás-visszacsatolások, neutronzaj-módszerek, reaktivitás-mérés módszerei, lassuláselmélet.  $S_n$  és  $P_1$  módszerek, végesdifferencia- és végelem-diszkretizáció, reaktorfizikai számítások folyamata (rezonancia-árnyékolás, cellahomogenizálás). Reaktorfizikai kódok.



## **15. Termohidraulika**

Reaktorokban alkalmazott anyagok (szerkezeti anyagok, üzemanyagok, hűtőközegek), fizikai jellemzőik. Hőterjedés a reaktoranyagokban. Hőátvitel különböző hűtőközegek alkalmazása esetén. Hidraulikai egyenletrendszer. Hűtőközeg-csatorna stacionárius viszonyai egy- és kétfázisú áramlás esetén. Forrásos hőátadás, forráskrizisek. Teljesítmény- és hőmérséklet-eloszlás az aktív zónában, üzemi korlátok. Rendszerkódok atomreaktorok termohidraulikai számításaihoz. Háromdimenziós hő- és áramlástan problémák leírásához szükséges egyenletek, azok numerikus megoldási módszerei; CFD kódok.

## **16. Monte-Carlo-részecsketranszportmódszerek**

A Monte-Carlo-módszerek alapjai (pszeudo véletlenszámok, reakció-, irány- és szabadúthossz-sorsolások), elmélete (integrálegyenletek megoldása Monte-Carlo-módszerrel, ütközési és úthossz-becslők, szóráscsökkentési-módszerek, adjungált Monte-Carlo) és gyakorlata (legelterjedtebb kódok, tipikus alkalmazások).

## **17. Atomreaktorok és üzemanyagciklus**

Üzemanyagciklus létesítményei (uránbányászat, dúsítás, üzemanyag-gyártás, kiégett-üzemanyag-kezelés, reprocessálás, végleges elhelyezés). Atomerőmű-típusok és generációik, termikus és gyorsreaktorok. Atomerőművek felépítése (konténment-rendszer, energiatermelés rendszere, hőséma, biztonsági rendszerek, hűtés, szellőzés, irányítás). Üzemanyag viselkedése a kiégtési ciklus során. Gyorsreaktorok fejlett üzemanyagciklusban (tenyésztés, transzmutáció). Kiegészítőszámítások és üzemanyagciklus-szimulációk.

## **18. Atomreaktorok üzemtana**

Moderáltság és reaktivitástényezők. A reaktor önszabályozó képessége. Üzemi paraméterek változása a kampány során. Xe és Sm mérgezettség. Fűtőelemek és a reaktortartály viselkedése és állapotellenőrzése. Fűtőelemsérülés folyamatai és detektálása. Atomreaktor és technológiai környezete mint sugárforrás. Aktívzóna-monitorozás, in-core és ex-core detektorok. Atomreaktorok műszerezése és diagnosztikája, üzemi mérései. Vezénylőterem kialakítása.

## **19. Atomreaktorok biztonsága**

Atomreaktorok biztonságának hazai és nemzetközi szabályozási környezete. Nukleáris biztonsági alapelvek. Tervezési követelmények, engedélyezés. Tervezési alap, annak kiterjesztése. Telephely kiválasztásának szempontjai és követelményei. Külső és belső kezdeti események. Determinisztikus és valószínűségi alapú biztonsági elemzések, módszereik, eszközeik. A kockázat alapú vagy kockázat szempontú tervezés, a biztonság szerinti differenciálás elve a tervezésben. Kiégett üzemanyagok biztonságos tárolásának szempontjai. Atomerőmű-balesetek és tanulságaik, hatásuk az atomenergetika fejlődésére.

## V. KUTATÁSI TERÜLETEK

### **SZILÁRDTESTFIZIKA**

Felelős: Szunyogh László

**Spin-dinamika**

**Kvantumtechnológia mágneses rezonanciával**

**Magnetooptikai spektroszkópia**

**Topológikus szigetelők (elmélet)**

**Ab initio elektronszerkezet számítások**

### **NANOFIZIKA/NANOTECHNOLÓGIA**

Felelős: Halbritter András

**Atomi méretű nanoszerkezetek vizsgálata – rezisztív kapcsoló memóriák és  
molekuláris elektronika (kísérlet)**

**Kvantumelektronika nanoáramkörökben (kísérlet és elmélet)**

**Mágneses skyrmionok (kísérlet és elmélet)**

### **KVANTUMRENDSZEREK FIZIKÁJA**

Felelős: Zaránd Gergely

**Kvantum-térelmélet**

**Multifraktál állapotok rendezetlen rendszerekben**

**Kvantum információelmélet**

**Kvantumelektrodinamika alkalmazásai**

### **STATISZTIKUS FIZIKA**

Felelős: Török János

**Szemcsés anyagok fizikája**

**Komplex rendszerek modellezése**

**Nagy adattömegek elemzése (big data)**

**Kvantum statisztikus rendszerek**

### **OPTIKA**

Felelős: Koppa Pál

**Komplex optikai rendszerek kutatása**

**Lézerfizika**

**Fotonikai eszközök**

**Koherens optikai mérés technika**

### **ANYAGTUDOMÁNY**

Felelős: Kiss Gábor

**Felületfizika és felületanalitika**

**Anyagvizsgálatra alkalmas műszerek fejlesztése**

**Számítógépes anyagtudomány**

## **NUKLEÁRIS TECHNIKA**

Felelős: Czifrus Szabolcs

**Reaktorfizika**

**Termohidraulika és kapcsolódó kutatások**

**Nukleáris mérés technika és radiokémia**

**Fúziós plazmafizika és alkalmazásai**

## **ORVOSI FIZIKA**

Felelős: Légrády Dávid

**Orvosi képalkotás ionizáló sugárzással**

**Orvosi képalkotás nem ionizáló sugárzással**

**Sugárterápia**

**Sugárvédelem és sugárbiológia az orvosi fizikában**

## KUTATÁSI TÉMÁK

### SZILÁRDTESTFIZIKA

- **Spin-dinamika** A spintronika alapötlete az elektronok spinje révén megvalósított információ-továbbítás és feldolgozás. Ha spin-polarizált töltéshordozókat juttatunk be egy vezetőbe, a spin-memória tipikusan 10-1000 nm távolságon belül marad meg. A spin-polarizált áram injektálására és detektálására vonatkozó Andrejev-spektroszkópiai kísérleteink lehetőséget adnak olyan alapvető anyagi paraméterek meghatározására, mint a spin diffúziós hossz vagy a vezetési elektronok spin-polarizációjának mértéke. Egy másik kísérleti eljárással, az elektron spin rezonancia módszerrel (ESR) a spin-relaxációs idő határozható meg, kontaktusok alkalmazása nélkül. A BME ESR laboratóriumában spintronikai alkalmazások szempontjából perspektivikus új anyagok széles körét tanulmányozzuk. Ezen belül különösen fontosak a grafén és a grafén-származékok elektron spin dinamikájának kísérleti kutatása. Elméleti oldalról a spin relaxáció jelenségköre az 50-es évek óta intenzíven kutatott. Attól függően, hogy a szóban forgó anyag rendelkezik-e inverziós szimmetriával vagy sem, az ún. Elliott-Yafet és D'yakonov-Perel' elméletekkel írták le. E két elmélet alapvető feltevései és matematikai formalizmusa is élesen különbözik. Nemrégiben sikeresen egyesítettük e két elméletet és megmutattuk, hogy lehetséges azonos matematikai formalizmusban történő tárgyalásuk. Jelenlegi célkitűzésünk, hogy a spin relaxáció elméletének „nagy egységesítését” elvégezzük, azaz a fenti egyesített modellt kiterjesszük a nagy spin-pálya kölcsönhatás esetére is. Elméleti vizsgálatokat végzünk a spin relaxáció témakörében erősen korrellált anyagokon mint pl. szén nanocsövek is. Az itt megvalósuló ún. Tomonaga-Luttinger folyadék állapotban megmutattuk, hogy a spin-relaxáció viselkedése is egzotikus.

P. Boross, B. Dóra, A. Kiss, and F. Simon, *Scientific Reports* **3**, 3233 (2013)

L. Szolnoki, A. Kiss, B. Dóra, F. Simon, *Scientific Reports* **7**, 9949 (2017).

- **Kvantumtechnológia mágneses rezonanciával**

A kvantumtechnológiai kutatások egy ígéretes iránya az összefonódott qubit-ek megvalósítására és az ilyen állapotok szimulációjára a mágneses rezonanciás módszerek. A mágneses rezonanciában megszokott impulzusokon alapuló Bloch gömbön történő forgatások a qubit műveleteknek foghatóak fel, ill. több, kölcsönható spint tartalmazó molekulákban az összefonódás a kölcsönhatás révén valósítható meg. Két megközelítést alkalmazunk kutatásunkban: magmágneses rezonanciát több magspint tartalmazó molekulákon és optikailag detektált mágneses rezonanciát a nitrogénvakancia centrumon gyémántban.

M. Negyedi et al. *Rev. Sci. Instrum.* **88**, 013902 (2017).

- **Magnetooptikai spektroszkópia** Azon kristályos anyagok, melyekben az elektronok spin, töltés és pálya szabadsági fokai erősen összecsatolódnak, komoly potenciált jelentenek az alap kutatás és a technológiai alkalmazások számára. A kutatások egyik kiemelt területe az úgynevezett multiferroikus, azaz ugyanazon termodinamikai fázisban mágnesesen és ferroelektromosan is rendeződő anyagok vizsgálata. Ezekben az anyagokban a szabadsági fokok összefonódása révén erős magnetoelektromos effektus jelenhet meg, vagyis az elektromos polarizáció külső mágneses térrel, míg a mágneszettség külső elektromos térrel változtatható. Ezen funkciók az adattárolásban új utakat nyithatnak. A magnetoelektromos csatolás radikálisan megváltoztathatja az anyag optikai tulajdonságait is, eddig nem tapasztalt,

új optikai tulajdonságok megjelenéséhez vezethet. Ilyen például a magnetoelektromos kristályok közelmúltban megfigyelt optikai egyenirányító funkciója, mely azt jelenti, hogy a kristály egy irányban átlátszó, míg az ellentétes irányban elnyeli a fényt. Ráadásul a fényáteresztő és fényelnyelő irányok mágneses térrel felcserélhetőek. Ezen új tulajdonságaiknak köszönhetően a magnetoelektromos anyagok az optikai kommunikációban alkalmazhatóak.

A mágneses anyagok egy másik köre, a mágneses nanorészecskék, egyre komolyabb szerephez juthatnak szenzorként és indikátorként az orvosi és biológiai kutatásokban. Használják őket a fehérjék közötti kötések erősségének vizsgálatára és indikátorként képalkotási módszereknél. A közelmúltban megfigyelték, hogy nanoméretű mágneses kristályok az emberi szervezetben is létrejöhetnek egyes betegségek, például a maláriafertőzés melléktermékeként. Ezek az úgynevezett maláriapigment kristályok különleges mágneses és optikai tulajdonságaiknak köszönhetően kiváló lehetőséget biztosítanak a maláriafertőzés korai stádiumban történő diagnosztizálására.

I. Kézsmárki et al.

Nature Communications **5**, 3203 (2014).

Á Orbán et al.

Scientific Reports **6**, 23218 (2016).

V. Kocsis et al.

Physical Review Letters **121**, 057601 (2018).

• **Topológikus szigetelők (elmélet).** A topológikus szigetelők az érdeklődés középpontjában állnak napjainkban. Míg tömbi részük szigetelő, addig felületi állapotaik fémesek, mely tulajdonság topológikusan védett, vagyis gyenge perturbációk nem tudják elrontani. Különleges viselkedésük az erős spin-pálya csatolásból fakad, és fontos szerepük lehet a spintronika, valamint a klasszikus és kvantum számítások területén. Mivel a legtöbb anyag azonban nem topológikus szigetelő, az alkalmazások szempontjából fontos olyan módszerek kidolgozása, melyek a topológia megváltoztatására alkalmasak. Erre egy lehetőség időben periódikus perturbációk alkalmazása, illetve a kölcsönhatás hangolása révén szintén elérhető topológikusan nem triviális állapotok.

A topológikus rendszerek tulajdonságai jelentősek topológikus kvantumszámítás nézőpontjából. Kutatásaink célja az alapvető qubit-vezérlési, qubit-kiolvasási és dekoherencia-mechanizmusok megértése egyszerű modellekben, illetve konkrét kísérletek tervezése, előzetes elméleti vizsgálata, és az eredmények értelmezése.

B. Dóra, J. Cayssol, F. Simon, R. Moessner,

Phys. Rev. Lett. **108**, 056602 (2012)

B. Gulácsi, B. Dóra,

Phys. Rev. Lett. **115**, 160402 (2015)

Z. Scherübl, A. Pályi, Gy. Frank, I. E. Lukács, G. Fülöp, B. Fülöp, J. Nygård, K. Watanabe, T. Taniguchi, G. Zaránd and Sz. Csonka

Communications Physics **2**, 108 (2019)

• ***Ab initio elektronszerkezet számítások*** A modern anyagtudomány – a fizikai jelenségek megértésének, új anyagok és eszközök kifejlesztésének – elengedhetetlen módszerei a kvantumelmélet alapján működő, *ab initio* számítógépes szimulációk. A sűrűség funkcionál elmélet (DFT) az elektronszerkezet meghatározására szolgáló univerzális eljárás, melyet szilárdtestek, atomok és molekulák széleskörű vizsgálatára használnak, számos műszaki és biológiai alkalmazást is beleértve. A BME TTK Elméleti Fizika Tanszékén kifejlesztett Screened Korrington-Kohn-Rostoker Green-függvényes (SKKR-GF) módszerrel főként fémek és fémötvözetek, valamint felületek mechanikai és mágneses tulajdonságait tanulmányozzuk, kiemelt tekintettel a relativisztikus spin-pálya kölcsönhatás következményeire. A DFT elméleten túlmutató módszerekkel, (LSDA+U, self-interaction correction) korrelált elektronrendszereket vizsgálunk. A Bogolyubov- de Gennes egyenlet implementálása az SKKR-GF programcsomagba új távlatokat nyitott hibrid normál fém - szupravezető rendszerek *ab initio* szintű kutatásában.

L. Oroszlány, A. Deák, S. Khmelevskiy, L. Szunyogh  
Phys. Rev. Lett. **115**, 096402 (2015)

Xiaoqing Li, S. Schönecker, E. Simon, L. Bergqvist, H. Zhang, L. Szunyogh, J. Zhao, B. Johansson,  
and L. Vitos  
Scientific Reports **5**, 16654 (2015)

S. Khmelevskiy, E. Simon, L. Szunyogh, and P. Mohn  
J. of Alloys and Compounds **692**, 178 (2017)

G. Csire, A. Deák, B. Nyári, H. Ebert, J. F. Annett, and B. Újfalussy  
Phys. Rev. B **97**, 024514 (2018)

L. Oroszlány, J. Ferrer, A. Deák, L. Udvardi, and L. Szunyogh  
Phys. Rev. B **99**, 224412 (2019)

## NANOFIZIKA/NANOTECHNOLÓGIA

• **Atomi méretű nanoszerkezetek vizsgálata – rezisztív kapcsoló memóriák és molekuláris elektronika (kísérlet)** Az elektronikai, informatikai eszközök elmúlt évtizedekben tapasztalt fejlődése sok szempontból a jelenlegi technológiák határait feszegeti. A félvezető ipar elérte azt a 10nm-es méretskálát, melynél mind fizikai mind technológiai szempontból erősen korlátolt a további méretcsökkentés lehetősége. A hagyományos digitális számítástechnika és a Neumann-féle számítógéparchitektúrák mellett újfajta megoldások kerülnek előtérbe, úgy, mint az idegrendszeri működés elvét követő analóg, neuromorfikus számítástechnika. Mindezen fejlesztések nanofizikai, nanotechnológiai és anyagtudományi kutatásokból indulnak ki. Ezen a területen kifejezetten ígéretes az ún. rezisztív kapcsoló memóriák, vagy más néven memriszorok (azaz memóriával rendelkező ellenállások) vizsgálata. Ezek olyan kétpólusú elektronikai elemek, melyekben két elektróda között feszültség hatására vezető filamentumok építhetők fel vagy bonthatók le, illetve a filamentumok vezetőképessége az eszközre adott feszültséggel folytonosan hangolható. Ehhez a területhez közel állnak az ún. molekuláris elektronikai kutatások és fejlesztések is, melyek egyedi molekulákból építkezve kívánják elektronikai elemeket (memóriákat, tranzisztorokat, ultraérzékeny szenzorokat) létrehozni.

A BME Fizika Tanszék aktív kísérleti tevékenységet folytat a rezisztív kapcsoló memóriák vizsgálata és a molekuláris elektronika terén. A kutatások és fejlesztések fókuszában a lehető legkisebb, akár pár atomból álló memóriák létrehozása, illetve ezen eszközök komplex fizikai működésének a megértése áll.

B. Sánta, Z. Balogh, A. Gubicza, L. Pósa, D. Krisztián, Gy. Mihály, M. Csontos, A. Halbritter, *Universal 1/f type current noise of Ag filaments in redox-based memristive nanojunctions*, NANOSCALE 11, 4719 (2019)

D. Molnár, T.N. Török, B. Sánta, A. Gubicza, A. Magyarkuti, R. Hauert, G. Kiss, A. Halbritter, M. Csontos, *In situ impedance matching in Nb/Nb<sub>2</sub>O<sub>5</sub>/PtIr memristive nanojunctions for ultra-fast neuromorphic operation* NANOSCALE 10, 19290 (2018)

L. Pósa, M. El, Abbassi, P. Makk, B. Sánta, C. Nef, M. Csontos, M. Calame, A. Halbritter, *Multiple Physical Time Scales and Dead Time Rule in Few-Nanometers Sized Graphene–SiO<sub>x</sub>-Graphene Memristors*, NANO LETTERS 17, 6783 (2017)

A. Gubicza, D.Zs. Manrique, L. Pósa, C.J. Lambert, G. Mihály, M. Csontos, A. Halbritter *Asymmetry-induced resistive switching in Ag-Ag<sub>2</sub>S-Ag memristors enabling a simplified atomic-scale memory design*, SCIENTIFIC REPORTS 6, 30775 (2016)

A. Gubicza, M. Csontos, A. Halbritter, G. Mihály, *Non-exponential resistive switching in Ag<sub>2</sub>S memristors: a key to nanometer-scale non-volatile memory devices*, NANOSCALE 7, 4394 (2015)

- **Kvantumelektronika nanoáramkörökben (kísérlet és elmélet)** Alacsony dimenziós nanoszerkezetekben (kvantumvezetékek, kvantumpöttyök, kvantum pont-kontaktusok) a méretből adódó kvantumeffektusok, a töltés kvantáltsága és az elektron-elektron kölcsönhatás számos újszerű jelenséget eredményez (lokalizációs jelenségek, interferencia-jelenségek, Coulomb-blokád, Wigner kristályok kialakulása, anomális zajjelenségek, kvantumkritikus jelenségek, stb.). A nanoáramkörök komplexitását tovább növeli, ha egzotikus elektromos tulajdonsággal bíró (pl. szupravezető, ferromágneses) makroszkopikus elektródákat kombinálunk nemkonvencionális nanoméretű objektumokkal. Ezen, ún. hibrid nanoszerkezetek vizsgálata koncepcionálisan új nanoelektronikai eszközök fejlesztése előtt nyitja meg az utat (kvantumszámítógépek építőelemei, ultraérzékeny nanoszenzorok, stb.). A BME Fizikai Intézet aktív elméleti és kísérleti kutatásokat folytat alacsonydimenziós nanoszerkezetek és hibrid nanoáramkörök vizsgálata terén. Az Elméleti Fizika Tanszéken számos olyan kutatás folyik, mely újszerű jelenségeket vetít előre hibrid nanoáramkörökben (pl. nemkonvencionális zajjelenségek szupravezető- mesterséges atom – normál fém szerkezetekben [1]), vagy akár nemzetközi együttműködés keretében élvonalbeli kísérleti eredményekhez nyújt elméleti háttérrel (pl. kvantumkritikus és Fermi-folyadék állapotok közötti hangolható átmenet leírása kvantum-pötty eszközökben [2], vagy Wigner-kristályok megfigyelése egydimenziós nanovezetékekben [3]). A Fizika Tanszék kísérleti kvantumelektronika csoportja olyan komplex jelenségeket vizsgál, mint Cooper-pár feltörő eszközök kvantuminterferencia-jelenségei [4], vagy spin-pálya kölcsönhatás által indukált Weyl-pontok kialakulása dupla kvantumpöttyökben [5].

[1] C.P. Moca, C. Mora, I. Weymann, G. Zaránd, *Noise of a Chargeless Fermi Liquid*, Phys. Rev. Lett. 120, 016803 (2018)

[2] A.J. Keller, L. Peeters, C.P. Moca; I. Weymann, D. Mahalu, V. Umansky, G. Zaránd, D. Goldhaber-Gordon, *Universal Fermi liquid crossover and quantum criticality in a mesoscopic system*, NATURE 526, 237 (2015)

[3] I. Shapir, A. Hamo, S. Pecker, C.P. Moca, Ö. Legeza, G. Zarand, S. Ilani, *Imaging the electronic Wigner crystal in one dimension*, SCIENCE 364, 870 (2019)

[4] G. Fülöp, F. Domínguez, S. d’Hollosy, A. Baumgartner, P. Makk, M.H. Madsen, V.A. Guzenko, J. Nygård, C. Schönenberger, A. Levy, Yeyati, S. Csonka, *Magnetic Field Tuning and Quantum Interference in a Cooper Pair Splitter*, PHYSICAL REVIEW LETTERS 115, 227003 (2015)

[5] Z. Scherübl, A. Pályi, Gy. Frank, I.E. Lukács, G. Fülöp, B. Fülöp, J. Nygård, K. Watanabe, T. Taniguchi, G. Zaránd, Sz. Csonka, *Observation of spin-orbit coupling induced Weyl points in a two-electron double quantum dot*, Communications Physics 2, 108 (2019)



- **Mágneses skyrmionok (kísérlet és elmélet)** Versengő kölcsönhatások következtében mágneses rendszerekben olyan rendeződési formák alakulhatnak ki, melyben a spinek (rácsállandóhoz képest hosszú hullámhosszú) modulált struktúrákban rendeződnek. Tömbi anyagokban a kristályszimmetria (pl. királis mágnesek) illetve mágneses vékonyrétegekben a struktúra sértheti az inverziós szimmetriát, melynek következtében megengedetté válik a szomszédos spinek keresztszoroszatával arányos Dzyaloshinskii-Moriya kölcsönhatás. Ez a kölcsönhatás a Heisenberg kicserélődéssel versenyezve spirális spin szerkezetet alakít ki, illetve a spinek nem triviális topológiájú örvénylő mintázatát is stabilizálhatja. Ez utóbbi spin mintázatokat részecske fizikai analógiával élve skyrmionoknak neveznek. Ezek a nanoméretű (10-100 nm) részecskeszerű állapotok adattárolási és logikai egységek ígéretes építőkövei, hiszen elektromos árammal mozgathatóak, és ún. topologikus Hall effektuson keresztül transzport mérésekkel detektálhatóak.

A BME Fizika Tanszékén poláris mágnesekben, azaz multiferroikus anyagokban, a spin spirálok illetve skyrmionok képződését vizsgáljuk mágneszettség mérésekkel, kisszögű neutronszórás kísérletekkel, mágneses atomerő mikroszkópiával. Megmutattuk, hogy a vizsgált tömbi anyagokban Néel-típusú skyrmionok jelennek meg, melyek stabilitási tartománya jóval kiterjedtebb, mint a korábban királis helimágnesekben vizsgált Bloch-típusú skyrmionké. A mágneses gerjesztések mikrohullámú spektroszkópiával történő megfigyelésével meghatározzuk a lényeges mágneses kölcsönhatások erősségét. Tanulmányozzuk a kristály szimmetria és mágneses rendeződés által megengedett magnetoelektromos csatolás alakját és erősségét, mely lehetővé teszi a skyrmionok elektromos térrel történő manipulációját alacsony disszipáció mellett.

A BME Elméleti Fizika Tanszékén olyan számítógépes módszereket fejlesztünk, melyek a mágneses kölcsönhatások ab initio módszerekkel történő számolását teszik lehetővé. Relativisztikus módszerünkkel az izotróp kicserélődési kölcsönhatások és a mágneses anizotrópia mellett a Dzyaloshinskii-Moriya kölcsönhatásokat tudjuk kiszámolni, amelyek fontos szerepet játszanak komplex mágneses struktúrák kialakulásában. Ezen kölcsönhatási paramétereket felhasználva spin-dinamikai számolásokkal, illetve Monte-Carlo szimulációkkal kiterjedten tanulmányozzuk az ultravékony mágneses filmekben előforduló komplex nem-kollineáris mágneses szerkezeteket, mint pl. a spin-spirál és skyrmion állapotokat, valamint a mágneses fázisátalakulásokat.

L. Rózsa, A. Deák, E. Simon et al.  
Physical Review Letters **117**, 157205 (2016).

P-J. Hsu, L. Rózsa, A. Finco et al.  
Nature Communications **9**, 1571 (2018).

H. Kim, A. Palacio-Morales, T. Posske, L. Rózsa et al.  
Science Advances **4**, eaar5251 (2018)

I. Kézsmárki et al.  
Nature Materials **14**, 1116 (2015).

S. Bordács et al.  
Scientific Reports **7**, 7584 (2017).

## KVANTUMRENDSZEREK ELMÉLETI FIZIKÁJA

• **Kvantumtérelméleti módszerek alkalmazása korrelált kvantumfázisok és dinamikai tulajdonságaik leírására.** A hagyományos, erősen korrelált szilárdtest-fizikai rendszerek (magas hőmérsékletű szupravezetők, nehéz fermion rendszerek, spin rendszerek) mellett az utóbbi időben igen nagy figyelmet kaptak az tervezhető hideg atomi ill. molekuláris elektronikai rendszerek. Ez utóbbi kvantummechanikai rendszerekben az atomok ill. elektronok közötti kölcsönhatás kontrolláltan változtatható, időben szabályozható, így ezekben a rendszerekben új kvantum-fázisok érhetők el, és ezek nem-egyensúlyi tulajdonságai (termalizáció, relaxáció, dinamika stb.) részletesen tanulmányozhatók.

Az Elméleti Fizika Tanszéken akadémiai kutatócsoport illetve két „Lendület” csoport munkája nagy mértékben ezekhez a területekhez kapcsolódik. Kutatásainkban modern kvantumtérelméleti módszerek, így konform és integrálható kvantumtérelméletek, bozonizáció, Bethe Ansatz, diagrammtechnika, renormálási csoport, Keldysh-technika, funkcionális renormálási csoport stb. segítségével vizsgáljuk ezeket a rendszereket. Erőteljesen használunk numerikus módszereket: a nem ábeli szimmetriákkal kombinált numerikus renormálási csoportot (NRG), a sűrűségmátrix renormálási csoportot (DMRG), mátrix-szorzat állapot (MPS) és mátrix szorzat operátor (MPO) technikákat (pl. time evolving block decimation), vagy csonkolt konform térelméletet (TCSA) alkalmazunk. Kutatásainkban jelentős hangsúlyt kapnak a kvantum-üveg rendszerek, a kvantum-kritikus rendszerek, valamint a termalizáció, a nem egyensúlyi dinamika, és a gerjesztett rendszerek kérdéskörei (pl. Floquet-állapotok, Floquet topológikus szigetelők).

C.P. Moca, R. Chirla, B. Dóra, G. Zaránd, Phys. Rev. Lett. 123: 136803 (2019)

I. Shapir, A. Hamo, A., S. Pecker, C.P. Moca, Ö. Legeza, G. Zaránd and S. Ilani, Science 364: 870-875. (2019)

I. Kukuljan, S. Sotiriadis, G. Takacs, Phys. Rev. Lett. 121: 110402 (2018)

M. Kormos, M. Collura, G. Takacs, P. Calabrese, Nature Physics 13: 246 (2017)

C. P. Moca, M. Kormos, G. Zaránd, Phys. Rev. Lett. 119: 100603 (2017)

• **Kvantumos bolyongás topológikus fázisai.** A topológikus szigetelők és szupravezetők kutatása az elmúlt két évtizedben a szilárdtestfizika egyik központi területévé vált. Ezen sávsgigetelők felületein robusztus alacsony energiás élállapotok vannak, melyek összekapcsolhatók a sávok topológikus invariánsaival. Az ilyen rendszereket modellező hideg atomos, ill. egyéb kísérletekben gyakran használnak perturbatív (magasfrekvenciás, kis energiás) periodikus gerjesztést, hogy a rendszer így előálló Floquet-leírásában megjelenjenek ezek a topológikus tulajdonságok. Amikor a gerjesztés átlép a nemperturbatív tartományba (alacsony frekvencia, nagy energia), új részben még megértésre váró topológikus jelenségek lépnek fel. Ezek elméleti vizsgálatára sokoldalúan használható elméleti modell az ún. kvantumos bolyongás. Az egy- és kétdimenziós esetben új tömbi invariánsokat találtunk[1], feltártuk ezek kapcsolatát a bolyongásokban fellépő Anderson-lokalizációval[2,3], és a Hofstadter-spektrummal[4], és kísérleteket javasoltunk ezek közvetlen mérésére[5]. Ezen vizsgálatok kiterjesztése a magasabb dimenziós esetre folyamatban lévő munka.

J.K. Asbóth and J.M. Edge, Phys. Rev. A91: 022324 (2015)

J.M. Edge and J.K. Asbóth, Phys. Rev. B91: 104202 (2015)

T Rakovszky and J.K. Asbóth, Phys. Rev. A92: 052311 (2015)

J.K. Asbóth and A. Alberti, Phys Rev Lett 118: 216801 (2017)

T. Rakovszky, J.K. Asbóth and A. Alberti, Phys. Rev. B95: 201407 (2017)

M. Sajid, J.K. Asbóth, D. Meschede, R.F. Werner and A. Alberti, Phys. Rev. B 99: 214303 (2019)

- **Rendezetlen rendszerek, nanorendszerek és korrelációk vizsgálata.** A rendezetlen kvantumrendszerek a modern fizika egyik legizgalmasabb irányát képviselik. Elsőként P.W. Anderson mutatta meg, hogy rendezetlenség hatására az elektronállapotok lokalizálódnak. Az utóbbi években a vizsgálatok a kölcsönható rendezetlen rendszerekre, valamint a topológikus rendszerekre (topológikus szigetelők és szupravezetők), illetve ultrahideg rendszerekre fókuszálnak elsősorban. Egyfelől az ún. soktestlokalizáció (many-body localization) vizsgálata került előtérbe, másfelől, másfelől a rendezetlen topológikus rendszerekbeni átalakulások.

Az Elméleti Fizika Tanszéken térelméleti és numerikus módszerek segítségével vizsgálunk ilyen rendszereket. Kölcsönható rendszerek kvantum-üveg állapotait vizsgáljuk replika módszerek és térelméleti módszerek ötvöztetésével, rendezetlen ultrahideg atomi rendszerek multifraktál tulajdonságait elemezzük numerikus szimulációk segítségével, illetve rendezetlen nanorendszerek dinamikáját elemezzük véletlen mátrix modellek segítségével, vagy a kvantum-geometria és a rendezetlenség kapcsolatát kutatjuk.

M.A. Werner, A. Brataas, F. von Oppen and G. Zaránd, Phys. Rev. Lett. 122: 106601 (2019)  
M.A. Werner, E. Demler, A. Aspect and G. Zaránd, Scientific Reports 8: 3641 (2018)  
A. Szilva, P. Balla, O. Eriksson, G. Zaránd and L. Szunyogh, Phys. Rev. B91: 134421 (2015)  
M.A. Werner, A. Brataas, F. von Oppen and G. Zaránd, Phys. Rev. B91: 125418 (2015)  
F. Crépin, G. Zaránd and P. Simon, Phys. Rev. B90: 121407(R) (2014)

- **Kvantum információelmélet és kvantumösszefonódottság.** Ismeretes, hogy egy több részrendszerből álló kvantummechanikai rendszer összetevői nemlokális kapcsolatban állhatnak egymással. Az ilyen rendszereket kvantumosan összefonódott rendszereknek nevezzük. A kvantum informatika előretörésével kiderült, hogy az összefonódottságot, célszerű mint egy új erőforrást tekinteni. Ebből következően a feladat az, hogy a különböző típusú összefonódottsággal rendelkező rendszereket jellemezzük. Az összefonódott kvantumrendszerek klasszifikálására különböző lehetőségek adódnak.

Az egyik lehetőség szerint két állapot akkor rendelkezik ugyanakkora összefonódottsággal ha az állapotok valamilyen valószínűséggel egymásba transzformálhatók klasszikus kommunikációval asszisztált lokális manipulációk hatására. Ezeket a transzformációkat SLOCC transzformációknak nevezik (Stochastic Local Operations and Classical Communications). Az összefonódottság elmélet egyik feladata a SLOCC összefonódottsági osztályok megtalálása és fizikai szempontból értelmes összefonódottsági mértékek segítségével történő jellemzése. Az utóbbi időben felmerült annak lehetősége is, hogy maga a téridő geometriája is felépíthető a kvantum összefonódottság alapján. Ennek kapcsán megmutattuk, hogy a téridő egy véges geometriai modellje előáll mint hibajavító kódok halmaza.

P. Lévy and F. Holweck, Phys. Rev. D99: 086015 (2019)  
P. Lévy and F. Holweck, J. Phys. A49: 085201 (2019)  
P. Lévy, Sz. Nagy, J. Pipek and G. Sárosi, J. Math. Phys. 58: 012203 (2017)  
G. Sárosi and P. Lévy, Phys. Rev. A89 042310 (2014)

- **Ultrahideg atomok.** Az elmúlt évtizedekben atomok optikai kontrolljával lehetővé vált ultrahideg atomokat tervezett módon csapdázni, optikai rácsokba zárni és kölcsönhatásukat szabályozva korrelált állapotokat létrehozni. Ezek a rendszerek egyfelől a kvantumszámításokhoz kínálnak platformot, másfelől kvantumszimulátorként használhatók, többek között erősen korrelált rendszerek (Bose–Hubbard-modell, fermionikus Hubbard-modell, Luttinger-modell stb.), topológikus szigetelők, Dirac-rendszerek, Floquet-rendszerek, kvantum-mágnesek, szupravezetők hozhatók létre segítségükkel. Az Elméleti Fizika Tanszéken folyó kutatások egy része ilyen rendszerek elméleti vizsgálatára irányul. A rendezetlenség ill. a korrelációk szerepét tanulmányozzuk ezekben a rendszerekben, illetve kvantum-

szimulátorként való használatukat vizsgáljuk gyakran kísérleti csoportokkal együttműködve, nemzetközi kollaborációban.

M. Kanász-Nagy, et al, Phys. Rev. B 97: 155156 (2018)

I. Kukuljan, S. Sotiriadis, G. Takacs, Phys. Rev. Lett. 121: 110402 (2018)

M.A. Werner, E. Demler, A. Aspect, G. Zaránd, Scientific Reports 8: 3641 (2018)

I. Lovas, J. Fortágh, E. Demler, and G. Zaránd, Phys. Rev. A 96: 023615 (2017)

I. Lovas, B. Dóra, E. Demler, and G. Zaránd, Phys. Rev. A 95: 053621 (2017)

**Kvantumszámítógépek.** A mai elektronikai eszközök elérték a nanométeres tartományt, és a további miniatürizálás új technológiákat igényel, amelyekben az anyag összetevőinek kvantum viselkedése meghatározó szerepet játszik. Ezen túlmenően a kvantumfizika adta lehetőségek kiaknázásával olyan problémák hatékony megoldására nyílik lehetőség, amelyek klasszikus algoritmusokkal belátható idő alatt nem oldhatók meg. Kutatásaink során a kvantum számítógépek elemi alkotóelemei, a kvantumbitek illetve a belőlük épített eszközök fizikai megvalósítását vizsgáljuk elektronspínnek, magspínnek, kvantum pöttyök és szupravezető Josephson átmenetek és rezonátorok segítségével, különös tekintettel a kvantumbitek kontrolljának és kiolvasásának kérdéseire. A kvantum algoritmusok stabil megvalósításához fontos a kvantum superpozíciók koherenciájának minél hosszabb fenntarása, ezért kiemelt figyelmet szentelünk az e tekintetben különösen ígéretesek topologikus (többek között az ún. Majorana) kvantumbiteknek.

Z. Scherübl, A. Pályi, Gy. Frank, I.E. Lukács, G. Fülöp, B. Fülöp, J. Nygård, K. Watanabe, T. Taniguchi, G. Zaránd and Sz. Csonka, Comms. Phys. 2: 108 (2019)

J.V. Koski, A.J. Landig, A. Pályi, P. Scarlino, C. Reichl, W. Wegscheider, G. Burkard, A. Wallraff, K. Ensslin and T. Ihn, Phys. Rev. Lett. 121: 043603 (2018)

G. Széchenyi, L. Chirilli and A. Pályi, 2D Materials 5: 035004 (2018)

T. Pei, A. Pályi, M. Mergenthaler, N. Ares, A. Mavalankar, J.H. Warner, G.A.D. Briggs and E.A. Laird, Phys. Rev. Lett. 118: 177701 (2017)

## STATISZTIKUS FIZIKA

- **Szemcsés anyagok fizikája.** A makroszkopikus szemcsékből álló rendszerek nagy technológiai jelentőségűek, és komoly tudományos kihívást jelentenek. Sajátos viselkedésük oka a súrlódásból és a disszipációból eredő nemlinearitás, illetve az ebből és a részecskék nagy számából következő instabilitások. Vizsgálatainkat elméleti módszerekkel és számítógépes szimulációs technikák alkalmazásával végezzük szoros kapcsolatban hazai és nemzetközi kísérleti csoportokkal. Vizsgáljuk, hogy nyírás hatására a különböző alakú szemcsék milyen mintázatokat hoznak létre, és ezek milyen hatással vannak a mechanikai jellemzőkre, de az utóbbi időben érdeklődésünk olyan geológiai, mérnöki szempontból is érdekes jelenségek felé fordult, min a mechanikai terhelés hatására létrejövő aprózódás, illetve a szemcsék kollektív dinamikája hatására létrejövő disszipáció, és kopás. Az elméleti leíráshoz használt modellekhez matematikai nemegyensúlyi statisztikus fizikai módszerek nagyon széles spektrumát használjuk.

S. Lévy, D. Fischer, R. Stannarius, B. Szabó, T. Börzsönyi, J. Török, *Soft matter*, **14**(3), 396-404. (2018).

R Moosavi, MR Shaebani, M Maleki, J Török, DE Wolf, W Losert, *Phys. Rev. Lett.* **111** (14), 148301 (2013).

B Szabó, J Török, E Somfai, S Wegner, R Stannarius, A Böse, G Rose, F Angenstein, T Börzsönyi, *Physical Review E* **90** (3), 032205 (2014).

- **Komplex rendszerek modellezése és nagy adatok elemzése (big data).** Azt vizsgáljuk, hogy az egyes alkotóelemek közötti kapcsolat milyen hatással van az alkotóelemek összességének viselkedésére; különösen érdekes, ha az alkotóelemek emberek. Bizonyos szituációkban az emberek viselkedését kevés paraméterrel is le lehet írni, és együttes viselkedésüket jól meg lehet jósolni. Vizsgálataink a kommunikációs hálózatok felhasználóinak viselkedésére, az innováció/információterjedési folyamatokra, vagy Wikipédia szerkesztői konfliktusaira terjedtek ki. Meglepő, hogy bizonyos esetekben egy erősen leegyszerűsített modellel is kifejezetten jó egyezést lehet találni a valóságban tapasztalt emberi viselkedéssel. Az információs társadalom terjedésével mind több adat érhető el, amely *nagy adatok* statisztikus fizika módszereivel történő elemzése már eddig is számos új, jelentős eredményhez vezetett, azonban a modellez kvantitatív tesztelésében is nagy segítséget nyújtanak.

Y Murase, HH Jo, J Török, J Kertész, K Kaski, *Scientific reports* **9** (1), 4310 (2019).

J Török, J Kertész, *Scientific reports* **7** (1), 16743 (2017).

J Török, Y Murase, HH Jo, J Kertész, K Kaski, *Physical Review E* **94** (5), 052319 (2016).

- **Kvantum statisztikus rendszerek.** A kvantumtérelméleti módszerek alkalmazása a statisztikus fizika területén is releváns eredményekre vezet. A zárt kvantum rendszerek egy osztálya az ún. integrálható rendszerek, amelyek fontos szerepet kapnak ultra-hideg atomi jelenségek leírásában. Az integrálható rendszerekben nemegyensúlyi folyamatok eredményeképpen kialakult stacionárius állapotokról kiderült, hogy nem minden esetben írhatók le a statisztikus fizika elvei alapján konstruált ún. általánosított Gibbs sokasággal. Az ezen a területen folyó kutatások egyik célja annak kiderítése, hogy létezik-e olyan kvantum statisztikus sokaság, ami az ilyen rendszerek stacionárius állapotát leírja, illetve hogy egy ilyen sokaság megkonstruálásával a statisztikus fizika érvényességi körének kiterjesszük az integrálható rendszerekre is.

Kutatásainkban fontos szerepet kap a véges kvantumrendszer statisztikus fizikájának elméleti vizsgálata. Fontos kérdés, hogy az energiaközlés statisztikája milyen jellegzetességekkel bír, milyen kapcsolatban van ez az ún. Loschmidt-echoval, hogyan jelenik meg a kaotikus viselkedés az ún. „out of time ordered correlations” (OTOC) formájában, és hogy milyenek egy nem Hermitikus rendszer tulajdonságai. Szintén fontos kutatási irányunk a zárt, korrelált kvantum-rendszerek szemiklasszikus leírása.

M. Heyl, F Pollmann, and B. Dóra, Phys. Rev. Lett. **121**, 016801 (2018)

B. Dóra and R. Moessner, Phys. Rev. Lett. **119**, 026802 (2017)

C.P. Moca, M. Kormos, and G. Zaránd, Phys. Rev. Lett. **119**, 100603 (2017)

Sz. Vajna and B. Dóra, Phys. Rev. B **91**, 155127 (2015)

B. Pozsgay, M. Mestyán, M. A. Werner, M. Kormos, G. Zaránd, and G. Takács, Phys. Rev. Lett. **113**, 117203 (2014)

## OPTIKA

### **Komplex optikai rendszerek**

A szakterületen belül olyan optikai és opto-elektro-mechanikai rendszerek kutatás-fejlesztésével foglalkozunk, amelyek a mindennapi élet és a modern technológia valamely területén nyernek alkalmazást. A jelenleg vizsgált alkalmazási területek: az informatika (optikai adattárolás, adatátvitel, kijelzők), a mérés-technika (spektroszkópia, fluorometria, scatterometria), és az orvostech-nika (optikai vizeletanalízis, mesterséges szemlencse, Multimodális opród). A kutatás módszerei között nagy hangsúlyt kap a modellezés (elektromágneses modelltől a sugárátvezetésig), a kísérleti munka és a berendezések építése (optikai, mechanikai, elektromos tervezés, szoftverfejlesztés, tesztelés).

Hericz, D ; Sarkadi, T ; Lucza, V ; Kovacs, V ; Koppa, P  
OPTICS EXPRESS 22 : 15 pp. 17823-17829. , 7 p. (2014)

Sarkadi, T ; Koppa, P  
PHYSICA SCRIPTA T162 Paper: 014051 , 4 p. (2014)

S, Lenk ; T, Majoros ; S, Beleznai ; F, Ujhelyi ; I, Péczeli ; Z, Karda ; A, Barócsi  
MATERIALS RESEARCH EXPRESS 5 : 3 Paper: 035302 (2018)

Ö C, Boros ; Á C, Horváth ; S, Beleznai ; Ö, Sepsi ; S, Lenk ; Z, Fekete ; P, Koppa  
APPLIED OPTICS 57 : 24 pp. 6952-6957. , 6 p. (2018)

Fülep, Csilla ; Kovács, Illés ; Kránitz, Kinga ; Erdei, Gábor  
SCIENTIFIC REPORTS 9 pp. 1-15. Paper: 7805 , 15 p. (2019)

### **Alkalmazott lézerfizika és ultrarövid lézerimpulzusok**

A BME Atomfizika Tanszék femtoszekundumos (fs) lézerlaborjában rendelkezésre áll egy 5 W Millenia lézerrel pumpált titán-zafír lézer (Spectra-Physics Tsunami), mely >900 mW átlagteljesítménnyel, <60 fs impulzushosszal, 80 MHz ismétlődési frekvenciával rendelkezik és 720-850 nm között hangolható. A jelen és tervezett kutatási témák: Specifikus akusztó- és elektrooptikai eszközök fejlesztése fs lézerekhez. Femtoszekundumos technikán alapuló kétfoton lézermikroszkópok fejlesztése (Femtonics Kft.): a kétfoton mikroszkópiában <100 fs ultrarövid impulzussal kétfoton effektust hozunk létre, amivel gerjesztjük a festékkel töltött mintát mélységi szelektivitást is lehetővé téve a kétfoton effektus nemlineáris jellege miatt. Beültethető műszemlencsék (IOL) vágása, megmunkálása, optikailag aktív struktúrák kialakítása fs lézerrel (Medicontur Kft.) a szürkehályog hatékony gyógyítását elősegítő orvostech-nikai kutatás-fejlesztésekben. Szakértői részvétel a szegedi ELI (extreme light infrastructure, ELI-HU Kft.) szuperlézer-rendszer fejlesztésében. .

A femtoszekundumos (fs) lézerlabor, valamint a különböző, ELI-hez kapcsolódó (pl. Helios – ELI előkészítő, vagy oktatási TÁMOP) projektek keretében kialakított hallgatói laborok, illetve kurzusok és oktatási anyagok lehetővé teszik az ultragyors fényimpulzusok fizikájának tanulmányozását és kutatását, illetve az ehhez a területhez szükséges hallgatók képzését és szakmai továbbképzését. Az ultragyors impulzusok kutatásához rendelkezésre álló műszerek: nyalábdia-gnosztika (infrakamera a nyaláb követésére, 500–1000 nm-es spektrométer, teljesítménymérő 1 W-ig, gyors fotodetektor <1 ns felfutási idővel, kétfotonos kristály, prizmás nyalábkompresszor). További speciális eszközök az ultrarövid impulzusok alakjának vizsgálatára: autokorrelátor, spektrálisan bontott autokorrelátor (frequency-resolved optical gating, FROG) mérőeszköz, valamint spektrális interferometria (interferométer + spektrométer kombinációja).

Chiovini, B ; Turi, GF ; Katona, G ; Kaszas, A ; Palfi, D ; Maak, P ; Szalay, G ; Szabo, MF ; Szabo, G ; Szadai, Z et al.  
NEURON 82 : 4 pp. 908-924. , 17 p. (2014)

Kusnyerik, A ; Rozsa, B ; Veress, M ; Szabo, A ; Nemeth, J ; Maak, P  
OPTICS EXPRESS 23 : 18 pp. 23436-23449. , 14 p. (2015)

Szalay G, Judak L, Katona G, Ocsai K, Juhasz G, Veress M, Szadai Z, Feher A, Tompa T, Chiovini B, Maak P, Rozsa B,  
NEURON 92 : 4 pp. 723-738. , 16 p. (2016)

### **Fotonikai eszközök**

A doktori iskolában széleskörű kutatómunka folyik a fényforrások mind az aktív, mind a passzív fotonikai eszközök területén. Az aktív komponensek közül kiemelendő a fényforrások, az akusztóoptikai eszközök, és a detektorok kutatása. A legfontosabb projektjeink ezeken a területeken:

- **Fényforrások:** Speciális polarizált LED fényforrások és LED-es megvilágító rendszerek, szálba csatolt és külső rezonátoros félvezető lézerek, kvantum-emitterek és egy-foton valamint összefonódott foton-pár források kutatás-fejlesztése.
- **Akusztóoptikai eszközök:** Rezonátoron belüli (Q-kapcsolók, móduscsatolók, impulzusritkítók) és rezonátoron kívüli (spektrális szűrők, eltérítők, modulátorok) alkalmazású AO, amelyek a legkülönbözőbb lézerekben és lézerrendszerekben kerülnek alkalmazásra. Kiemelt alkalmazás a femtoszekundumos lézerimpulzusok alakformálása, ismétlődési frekvenciájának változtatása, valamint a femtoszekundumos spektrális hangolása. Akusztóoptikai (AO) szűrőket lézerspektroszkópiai és fehér fényű spektroszkópiai alkalmazásokra is fejlesztünk. Két- és három dimenzióban eltérítő AO szkennereinknek jelenleg elsősorban lézeres anyagmegmunkálási és mikroszkópiai alkalmazásai vannak. Az optimális fény-hang kölcsönhatás elérése érdekében foglalkozunk egy minél pontosabb, komplex AO modell létrehozásával (anizotróp, optikailag aktív, inhomogén közegben).
- **Detektorok.** Pozitron emissziós tomográf (PET) berendezés detektormoduljainak optikai vizsgálata (szcintillátor-kristályon belüli folyamatok leírása, a fotonok terjedésének modellezése és optimalizálása, a fotoelektron-sokszorozó vagy szilícium egy-foton lavinadióda (SPAD) vizsgálata) Komplex detektorok kutatás-fejlesztése fluoreszcens spektroszkópiai szenzorokhoz.
- **Passzív fotonikai eszközök** Optikai nanostruktúrák modellezése és optimalizálása ipari alkalmazásokra, mikro-optikai eszközök (mikro-gyöngy és lencsemátrix) modellezése, kísérleti vizsgálata és optimalizálása kijelző alkalmazásokra, diffraktív optikai elemek modellezése, tervezése és lézeres beírása.

Ö. Sepsi, T. Gál, and P. Koppa,  
Optics Express, **22**, A1190-6, 2014

G. Mihajlik, A. Barócsi, P. Maák,  
Complex, 3D modeling of the acousto-optical interaction and experimental verification  
OPTICS EXPRESS 22 : 9 pp. 10165-10180. , 16 p. (2014)

Solti Á, Lenk S, Mihailova G, Mayer P, Barócsi A, Georgieva K  
Journal of Photochemistry and Photobiology, **130**, 217-225, 2014



Lohrmann, A ; Iwamoto, N ; Bodrog, Z ; Castelletto, S ; Ohshima, T ; Karle, TJ ; Gali, A ; Praver, S ; McCallum, JC ; Johnson, BC  
NATURE COMMUNICATIONS 6 Paper: 7783 , 10 p. (2015)

Örs, Sepsi ; Szilárd, Pothorszky ; Tuan, Máté Nguyen ; Dániel, Zámbó ; Ferenc, Ujhelyi ; Sándor, Lenk ; Pál, Koppa ; András, Deák  
OPTICS EXPRESS 24 : 2 pp. A424-A429. (2016)

Hericz, D ; Sarkadi, T ; Erdei, G ; Lazuech, T ; Lenk, S ; Koppa, P  
APPLIED OPTICS 56 : 14 pp. 3969-3976. , 8 p. (2017)

B, Játékos ; G., Patay ; E., Lőrincz ; G., Erdei  
JOURNAL OF INSTRUMENTATION 12 : 05 p. P05018 (2017)

### **Koherens optikai mérés technika**

A holografikus interferometriából kifejlődött vizsgálati módszerek korszerű lehetőségeknek bizonyultak tárgyak deformációjának, alakjának, törésmutató- és rezgési amplitúdó eloszlásának nagy pontosságú érintésmentes mérésére. A nagyfelbontású, számítógépes környezethez jól illeszthető CCD és CMOS képfelvévő eszközök rohamos fejlődésének köszönhetően megjelentek az elektronikus feldolgozáson alapuló módszerek, amelyek alapját képezhetik a mérési problémához alkalmazkodni képes aktív interferométereknek.

A kísérleti munkában olyan módszereket fejlesztünk, amelyek vagy a szemcsekép interferometria elektronikus változatára (TV holográfia), vagy a holográfia digitális megvalósítására (digitális holográfia) épülnek. Kutatási területünk része az összehasonlító interferometria, amely lehetővé teszi két tárgy terhelés hatására bekövetkezett változásának összehasonlítását, , illetve két tárgy alakjának közvetlen összehasonlítását is. Az analóg "különbségi holografikus interferometria" valódi holografikus hullámfrontokkal világítja meg a vizsgálandó tárgyakat. A digitális holográfiai változat működhethet hasonlóképpen, illetve közvetlenül is előállíthat különbségi csíkokat. A digitális holográfia felbontás- és látótér-korlátja az analóg holográfiát megközelítő szintre emelhető a detektormátrix optikai lekicsinyítésével és letapogatásos módon történő alkalmazásával.

A digitális holográfia segítségével mód van nagytávolságú összehasonlító mérésekre is, amikor az egyik tárgyról szórt fény komplex amplitúdó eloszlását digitálisan rögzítjük és visszük át egy másik laboratóriumba, ahol térbeli fénymodulátor segítségével rekonstruáljuk és használjuk fel interferometrikus mérésben. A nagyfelbontású térbeli fénymodulátorok lehetővé teszik, hogy számítógéppel generált hullámfrontokat is előállíthassunk (számítógépes holográfia). A hullámfrontok számításához terjedésük vizsgálatához hatékony szimulációs programokat sikerült kimunkálni. A fejlesztőmunkák részét képezi az interferogramok számítógéppel segített kiértékelése is. Ebben a témában sikeresen alkalmaztunk neurális hálózat modelleket interferogramok valós idejű kiértékelésére.

Balázs Gombkötő, Richárd Séfel, János Kornis  
Optics Communications **284**, 12 (2011)

Richárd Séfel, János Kornis  
Applied Optics **50**, 23 (2011)

B, Gombkötő ; R, Séfel ; J, Kornis  
OPTICS COMMUNICATIONS 284 : 12 pp. 2633-2637. , 5 p. (2011)

Kumagai, H ; Iketaki, Y ; Nagai, K ; Bokor, N  
PROC. SPIE ,10070 Paper: UNSP 100701L , 3 p. (2017)

## ANYAGTUDOMÁNY

### Felületfizika és felületanalitika

□ **Fluoreszcens nanokristályok:** A széles tiltott sávú SiC (szilíciumkarbid) kristály növesztés és a SiC technológia az elmúlt 2 évtized egyik izgalmas kutatási területe volt. Mint ismert, ez az anyag az elektronikai alkalmazások szempontjából több vonatkozásban is előnyösebb tulajdonságokkal bír, mint a klasszikusnak tekinthető tiszta Si.

Az utóbbi időben a SiC egy másik területen, a biomarker kutatásban is nagy figyelmet szerzett, ugyanis az in vivo (élő, emberi szervezeten belüli) körülmények között is alkalmazható fluoreszcens biomarkerekkel szemben támasztott követelményeket (biokompatibilitás, megfelelő hidrodinamikai átmérő, vízben való „oldódás”, könnyű gerjeszthetőség, éles és nagy intenzitású spektrum, emissziós hullámhossz a közeli infravörös ablakba essen, kémiai és fotostabilitás) jó eséllyel tudja a jövőben kielégíteni.

A fenti követelmények közül jelenleg egyedül a SiC nanokristályok fluoreszcens spektruma nem felel meg az in vivo alkalmazáshoz, ezért az egyik cél az emittált fény hullámhosszának megnövelése a közeli infravörös tartományban. Erre jelenleg két út mutatkozik: nanokristályok felületének kémiai úton történő módosításával vagy a nanokristályokban színcentrumok létrehozásával. Tömbi szilíciumkarbid esetén ilyen infravörös ablakban emittáló ponthibák pl. Si vakancia, a kettős-vakancia, továbbá bizonyos fémek (Al, V, Mo, W) okozta ponthibák.

A másik cél a nanokristályok felületének funkcionálizálása, amikor a SiC biomarkerekhez különböző kémiai csoportokat kapcsolnak. Az elméleti számítások azt mutatják, hogy a felületen jelen lévő karboxil csoportokat anhidrid csoportokra lenne célszerű lecserélni, ezáltal megteremtve a lehetőségét a SiC nanoszemcsékhez gyógyszermolekulák hozzákapszolódásának.

A SiC politípusok közül a köbös szerkezetű 3C-SiC nanokristályok előállíthatók porózus 3C-SiC felhasználásával. A nanokristály előállításával és a nanokristályok felületének funkcionálizálásával kapcsolatos kutatások Gali Ádám vezette Lendület kutatócsoportban folynak az MTA Wigner Fizikai Kutatóintézetben. A BME AFT Felületfizika Laboratóriumában az ott előállított nanokristályok felületét és tömbi részét tanulmányozzuk XPS, SIMS és AFM módszerrel, amely vizsgálatok elengedhetetlenek az adalékolt és a funkcionálizált SiC nanokristályok előállításának technológiai lépései által okozott hatások és következmények megértésében.

A SiC mellett további más fluoreszcens nanorészecskék vizsgálatát is tervezzük.

Gyula Károlyházy, Dávid Beke, Dóra Zalka, Sándor Lenk, Olga Krafcsik, Katalin Kamarás, Ádám Gali

Novel method for electroless etching of 6H-SiC

NANOMATERIALS Manuscript ID: nanomaterials-621085 (2019, beadva)

Beke, D.; Fučíková, A.; Jánosi, T.Z.; Károlyházy, G.; Somogyi, B.; Lenk, S.; Krafcsik, O.; Czigány, Z.; Erostyák, J.; Kamarás, K. et al.

Direct Observation of Transition from Solid-State to Molecular-Like Optical Properties in Ultrasmall Silicon Carbide Nanoparticles

JOURNAL OF PHYSICAL CHEMISTRY C 122 : 46 pp. 26713-26721. 9 p. (2018)

□ **Transzportparaméterek (diffúziós állandó, permeabilitás és oldhatóság) meghatározása.** A Felületfizikai Laboratóriumban a közelmúltban megtervezett, megépített és kalibrált eszköz segítségével különböző vastagságú membránok esetén tetszőleges (nem korrozív) gázok transzportparaméterei és ezek hőmérsékletfüggése vizsgálható. A membrán hőmérséklete 50 és 250 °C között változtatható. A készüléket 10 µm és 250 µm közötti vastagságú membránok felhasználásával teszteltük, de elméleti akadály a vastagabb membránok használatának sincs. E mérési összeállítás segítségével vizsgálhatóvá válnak a felületi tulajdonságok és a transzportparaméterek összefüggései, valamint egyéb anyagtudományi kérdések (például az üvegesedési átalakulás hatása a transzporttulajdonságokra polimerek esetén).

B. Sebők, M. Schülke, F. Réti, G. Kiss

Diffusivity, permeability and solubility of H<sub>2</sub>, Ar, N<sub>2</sub>, and CO<sub>2</sub> in poly(tetrafluoroethylene) between room temperature and 180 °C

Polymer Testing, 49 66-72 (2016)

B. Sebők, F. Réti, G. Kiss

Calibration of a novel instrument for the investigation of small permeation fluxes of gases through membranes

Measurement, 59 241-247 (2015)

□ **Fogorvosi implantátumok.** Jelen kutatás témája a fogorvosi implantátumok biokompatibilitásának javítása. C/C kompozit és felületi TiO<sub>2</sub> „záróréteggel” ellátott titán implantátumok esetén vizsgáljuk az emberi szervezet és az implantátum közti anyagtranszportot. Az anyagtranszport mértékének csökkentése segít abban, hogy az implantátumok idő előtti műtéti eltávolítására minél kevesebb esetben legyen szükség.

Gy. Szabó, J. Barabás, S. Bogdán, Zs. Németh, B. Sebők, G. Kiss

Long-term clinical and experimental/surface analytical studies of carbon/carbon maxillofacial implants  
Maxillofacial Plastic and Reconstructive Surgery, 37(1), paper 34 (2015)

G. Kiss, B. Sebők, P.J. Szabó, Á.F. Joób, Gy. Szabó

Surface analytical studies of maxillofacial implants: influence of the preoperational treatment and the human body on the surface properties of retrieved implants

Journal of Craniofacial Surgery, 25(3) 1062-1067 (2014)

□ **Mágneses vizsgálatok vegyipari berendezéseken.** A műanyagipar alapanyagait jelentő olefineket a vegyipar kőolajszármazékok magas hőmérsékletű bontásával – pirolízisével – állítja elő. A bontás krómmal és nikkellel erősen ötvözött acélból készült csövekben történik, a csöveket kívülről fűtik, belül áramlik a szénhidrogén. A bontási folyamat során a belső csőfalra kokszt rakódik. Ebből szén diffundál a csőfal anyagába annak kifáradását és elrepedését okozva. A bekövetkező üzemzavar nem tervezett leállást és termelés kiesést eredményez. A cső falában bekövetkező kémiai és szerkezeti változások a fém mágnesezhetőségét is befolyásolják. Az új cső anyaga gyakorlatilag nem mágnesezhető, az elhasználódás előrehaladtával a mágnesezhetőség növekszik.

A Tanszéken épített, erőmérően alapuló műszerrel, roncsolásmentes módszerként mérjük a mágneses vonzóerőt. A kemencék leállásakor elvégzett mérések adatait adatbázisba gyűjtve – az üzemben dolgozó kollégák tapasztalataival egybevetve – több év mérési alapján egyre megbízhatóbb képet tudunk alkotni a csövek pillanatnyi állapotáról és prognózist tudunk adni várható élettartamukról. A csövekből kivágott mintákat laboratóriumban elemezve anyagtudományi oldalról közelítjük a problémát, így egyre mélyebben megérthetők az elhasználódáshoz vezető folyamatok. Előzetes mérések azt mutatják, hogy a mágneses módszer a vasúti sínek diagnosztikájában is felhasználható lesz.

### **Számítógépes anyagtudomány:**

A széles tiltott sávú félvezetőt kedvező fizika-kémiai tulajdonságai alkalmassá teszik arra, hogy magas hőmérsékletű és nagy teljesítményű félvezető eszközök alapanyaga legyen. A magas hőmérsékleten működő félvezető eszközöknek óriási jelentősége van mind a környezettechnológiában, mind az űriparban illetve autóiiparban. A hagyományos széles tiltott sávú félvezetőkből a ponthibák azonosítása nagyon fontos a technológia optimalizálása céljából, amelyet a kísérleti kutatások és az atomi szintű számítógépes szimulációk kombinációja tesznek lehetővé. A legmodernebb számítási módszereket alkalmazzuk, illetve fejlesztjük ki az aktuális kérdések megválaszolására.

Fluoreszcens és egyben paramágneses ponthibák szilárdtestekben alkalmasak lehetnek különleges kvantumállapotok megvalósítására, ún. kvantumbitek lehet létrehozni általuk. A kvantumbitek a kvantuminformációs technikákban és technológiában lehet hasznosítani, amely forradalmasíthatja a számítástechnika komplexitását, a biztonságos kommunikációt és a gyógyászati technikákat is. A kvantumbitek hordozására különlegesen alkalmas gazdaanyagok a gyémánt illetve a szilícium-karbid. A kvantumbitek működésének felfedezése és optimalizálása pontos kvantummechanikai módszereket igényel, hogy az azt megvalósító ponthibák optikai és mágneses tulajdonságait pontosan feltérképezzük.

A hagyományos félvezetők mellett a nanoméretű félvezető szerkezetek szerepe is egyre nő. Amellett, hogy a hagyományos mikroelektronika további miniaturizálásában is fontos szerepet játszhatnak, a nanoszerkezetek felülete alkalmas lehet kémiai/biológiai molekulák detektálására, amelyet összekombinálhatunk a nanoelektronikával. Ezekben a kutatásokban a számítógépes szimulációk szerepe még jelentősebb, mint a hagyományos félvezetők esetén, hiszen a hagyományos mérési eljárások gyakran nem alkalmazhatóak, az újakat pedig csak most kezdik kifejleszteni. A fenti alkalmazások mellett a félvezető nanoklaszterek a napelemek új generációját jelenthetik, amelyben pl. kimutatták az ún. többszörös exciton gerjesztés jelenségét. A jelenség magyarázatában illetve jellemzésében kvantummechanikai számításokat használunk fel.

Adam Gali

Nanophotonics on-line (2019). DOI:10.1515/nanoph-2019-0154

Gergő Thiering and Adam Gali

npj Computational Materials 5, 18 (2019).

Gergő Thiering and Adam Gali

Physical Review X 8, 021063 (2018).

Michel Bockstedte, Felix Stütz, Thomas Garrat, Viktor Ivády, and Adam Gali

npj Quantum Materials 3, 31 (2018)

I. I. Vlasov, A.A. Shiryaev, T. Rendler et al.

Nature Nanotechnology 9, 54-58 (2014)

S. Castelletto, B.C. Johnson, V. Ivády, N. Stavrias, T. Umeda, A. Gali, and T. Ohshima

Nature Materials 13 151-156 (2014)

## NUKLEÁRIS TECHNIKA

• **Reaktorfizika.** A reaktorfizikai kutatások területén, részben a BME Oktatóreaktor lehetőségeire támaszkodva, az atomerőművek aktív zónájában zajló fizikai folyamatok mérésével és szimulációjával foglalkozunk. A kutatások egyik fő csoportja a már meglévő, üzemelő kutatóreaktorok és atomerőművek biztonságos üzemeltetésének támogatását és biztonságának növelését szolgálja felhasználva a mérés- és számítástechnika legújabb vívmányait. Másik kutatási területünk a nemzetközi erőfeszítésekhez csatlakozva a negyedik generációs és más innovatív atomreaktorok vizsgálata, melyek fontos reaktorfizikai paraméterek számításán túl az egész üzemanyagciklus szimulációjára is kiterjednek. Részben a nemzetközileg is alkalmazott korszerű Monte-Carlo- és determinisztikus kódokat, számítási módszereket alkalmazzuk új feladatok megoldására, részben új kódokat és számítási módszereket fejlesztünk különösen tekintettel különböző folyamatok csatolt (multi physics) modellezésére a termohidraulikai kutatási területtel is együttműködve. Példák a kutatási irányokra: GPU-alapú reaktordinamikai Monte-Carlo-kód fejlesztése, új módszerek fejlesztése a szubkritikusság mérésére, ALLEGRO gázhűtésű gyorsreaktor zónatervezése, atomerőművek és kísérleti reaktorok körüli sugárvédő szerkezetek és acél elemek aktiválódásának vizsgálata.

B. Molnár, G. Tolnai, D. Legrády,  
Annals of Nuclear Energy 132 pp. 46-63. , 18 p. (2019)

H. György, Sz. Czifrus,  
Annals of Nuclear Energy 103 pp. 238-250. , 13 p. (2017)

M. Halász, M. Szieberth, S. Fehér,  
Annals of Nuclear Energy 104 pp. 267-281. , 15 p. (2017)

D. P. Kis; Z. Szatmáry  
Journal of Computational and Theoretical Transport 45 : 6 pp. 486-499. , 14 p. (2016)

M. Szieberth, G. Klujber, J. L. Kloosterman, D. de Haas,  
Annals of Nuclear Energy 75 : 0 pp. 146-157. , 12 p. (2015)

□ **Termohidraulika és kapcsolódó kutatások.** A termohidraulika tudományág az atomreaktorokban és az azokhoz kapcsolódó rendszerekben lejátszódó hő- és áramlási folyamatok vizsgálatával foglalkozik. Az említett jelenségeket rendszer- és CFD (Computational Fluid Dynamics) kódokkal, illetve PIV (Particle Image Velocimetry) mérés technikával kutatjuk. Egydimenziós rendszer kódokat alkalmazunk az atomerőművek üzemzavari és baleseti szituációiban lejátszó nagyléptékű folyamatok vizsgálatára. Részletes, háromdimenziós CFD szimulációkkal különböző atomerőművek üzemanyag-kazettájában, reaktortartályában, csővezeték rendszerében és konténmentjében kialakuló turbulens, termikus keveredési folyamatokat tanulmányozunk. A nukleáris biztonsággal kapcsolatos vizsgálatok esetén különösen fontos az alkalmazott szimulációs módszerek és modellek kísérleti eredményekkel történő validálása, amelyhez nagyfelbontású PIV technikával végzünk méréseket. A reaktorfizika kutatócsoporttal együttműködve kapcsolt neutronfizikai-termohidraulikai folyamatokat leíró numerikus modellek fejlesztése is zajlik.

A. Kiss ;B. Mervay,  
Nuclear Engineering and Design 342 pp. 276-307. , 32 p. (2019)

G. I. Orosz, S. Tóth,

Annals of Nuclear Energy 120 pp. 570-580. , 11 p. (2018)

A. Kiss;M. Balaskó,L. Horváth, Z. Kis, A. Aszódi,  
Annals of Nuclear Energy 100 pp. 178-203. , 26 p. (2017)

B. Yamaji ; A. Aszódi,  
Kerntechnik 82. : 4. pp. 480-490. , 11 p. (2017)

A. Kiss ; T. Vágó ; A. Aszódi,  
Nuclear Engineering and Design 295 pp. 415-428. , 14 p. (2015)

□ **Nukleáris mérés technika és radiokémia.** Ezen a kutatási területen a következő témákkal foglalkozunk: Röntgen-emissziós folyamatok és detektálási technikák matematikai modellezése és megoldási algoritmusok kidolgozása a kvantitatív röntgen-fluoreszcens spektroszkópiai célokra. Hordozható röntgen-Raman és gamma-röntgen kombinált spektrométerek kifejlesztése ipari, környezeti és biztosítéki minták in-situ elemzéséhez. MC szimulációs eljárások kidolgozása és alkalmazása atomerőműi és környezeti eredetű radioaktív anyagok, valamint komplex geometriával rendelkező, radioaktív izotópokat tartalmazó objektumok gamma- és röntgen-spektroszkópiai elemzéséhez. Elválasztási és minta-preparációs eljárási technikák és alfa-spektroszkópiai módszerek fejlesztése biztosítéki minták hatósági elemzéséhez, a hasadóanyagokkal kapcsolatos illegális tevékenységek felderítésére. Radioaktív izotópok előállítása az Oktatóreaktor felhasználásával és az azokhoz kapcsolódó kémiai elválasztási technikák kidolgozása környezetvédelmi, orvosi és biokémiai felhasználási célokra. Neutronaktivációs analitika módszereinek fejlesztése és alkalmazása geológiai és archeológiai minták nyomelemeinek kvantitatív analízisére.

G. Radócz ; A. Gerényi ; Sz. Czifrus ; I. Szalóki,  
Annals of Nuclear Energy 130 pp. 512-517. , 6 p. (2019)

Szalóki, I. ; Radócz, G. ; Gerényi, A.,  
Spectrochimica Acta Part B-Atomic Spectroscopy 156 pp. 33-41. , 9 p. (2019)

I. Szalóki, T. Pintér, I. Szalóki jnr.; G. Radócz, A. Gerényi,  
Journal Of Analytical Atomic Spectrometry 34 pp. 1652-1664. , 13 p. (2019)

E. Dian, K. Kanaki, R. J. Hall-Wilton, P. Zagyvai, Sz. Czifrus,  
Applied Radiation and Isotopes 128 pp. 275-286. , 12 p. (2017)

M. Balla,  
Acta Archaeologica Academiae Scientiarum Hungaricae 66 : 1 pp. 161-164. , 4 p. (2015)

□ **Fúziós plazmafizika és alkalmazásai.** A fúziós energiatermeléshez kapcsolódó kutatási témák szorosan kapcsolódnak a nemzetközi fúziós kutatásokba elméleti fizikai, kísérleti fizikai illetve technológiai területen. Elméleti területen a tokamak típusú berendezésekben fellépő elfutó elektron nyaláb viselkedésével foglalkozunk: ezen elektronoknak plazmahullámokkal történő rezonáns kölcsönhatását modellezzük, illetve az európai Integrált Tokamak Modellezés kezdeményezésben mi felelünk az elfutó elektron szimulációért. Kísérleti munkánk leginkább a németországi ASDEX-Upgrade tokamakhoz kötődik, ahol különböző gyors plazmatranziensek tulajdonságait és összefüggéseit vizsgáljuk elsősorban idő-frekvencia analízis és korreláció alapú módszerekkel. A kísérleti eredmények plazmaturbulencia

szimulációkkal való összehasonlítását szintetikus diagnosztikai kódok segítik. A fizikai megértést célzó munkákat a kísérleti berendezések építését segítő alkalmazott nukleáris technikai kutatások egészítik ki. Ezek a jelenleg épülő ITER tokamakhoz és kisebb európai és távol-keleti tokamakokhoz kötődnek.

G. I. Pokol, S. Olasz, B. Erdos, G: Papp, M. Aradi, M. Hoppe, T. J. Johnson, J. Ferreira, D. P. Coster, Y. Peysson, et al.,  
Nuclear Fusion 59 : 7 Paper: 076024 (2019)

A: H. Nielsen, Ö. Asztalos, J. Olsen, V. Naulin, J. J. Rasmussen, A. S. Thrysoe, T. Eich, G. I. Pokol, N. Vianello, R. Coelho, et al.,  
Nuclear Fusion 59 : 8 Paper: 086059 , 10 p. (2019)

S. Zoletnik, G. H. Hu, B. Tál, D. Dunai, G. Anda, Ö. Asztalos, G. I. Pokol, S. Kálvin, J. Németh, T. Krizsanóczy, T  
Review of Scientific Instruments 89 : 6 Paper: 063503 (2018)

L. Horváth, G. Papp, P. Lauber, G. Por, A. Gude, V. Igochine, B. Geiger, M. Maraschek, L.;Guimaraes, V Nikolaeva, et al.,  
Nuclear Fusion 56 : 11 Paper: 112003 , 14 p. (2016)

## ORVOSI FIZIKA

- **Monte-Carlo módszerek az orvosi fizikában:** A sugárterápia és az ionizáló sugárzással történő képalkotás (Pozitron Emissziós Tomográfia –PET, Single Photon Emission Computed Tomography – SPECT, röntgen planáris és tomográfiai leképezések - CT) legpontosabb numerikus számítási eszköze a Monte-Carlo módszer. A nagyteljesítményű számítástechnikai rendszerek (High Performance Computing –HPC platforms) hozzáférhetősége és teljesítménye rohamosan nő, így mind a sugárterápiás tervező szoftverek, mind a képalkotó rekonstrukciós algoritmusok egyre pontosabb szimulációs eredményekre támaszkodhatnak, melyeket most már az egyes páciensek egyedi jellegzetességeit is figyelembe véve lehet a közeljövőben -a rendelkezésre álló információkat teljes mértékben felhasználva- akár a kezelés vagy vizsgálat idejével összemérhető időskálán elvégezni. Ehhez szükséges a Monte-Carlo algoritmusok gyorsítása és a feladathoz továbbá az adott HPC platform igényeihez történő alakítása. Kutatásaink célja olyan HPC rendszerekre szabott Monte-Carlo módszerek fejlesztése, melyek a lehető legjobban kihasználják az architektúra számítási kapacitását.

A gyorsabb algoritmusokon túl szükség van olyan eljárások fejlesztésére is, melyek képesek kihasználni a nagyobb szimulációs pontosság nyújtotta előnyöket. Kutatjuk ezért a Maximum Likelihood Expectation Maximization módszer konvergencia sebességének növelési lehetőségeit, hogy pontosabb szimuláció okozta numerikus zajcsökkentést a mérési zajjal szemben érvényesíteni lehessen.

Molnar, B ; Tolnai, G ; Legrady, D

Variance reduction and optimization strategies in a biased woodcock particle tracking framework

NUCLEAR SCIENCE AND ENGINEERING 190 : 1 pp. 56-72. , 17 p. (2018)

Somai, V ; Legrady, D ; Tolnai, G

Singular value decomposition analysis of back projection operator of maximum likelihood expectation maximization PET image reconstruction

RADIOLOGY AND ONCOLOGY 52 : 2 Paper: 0013 , 9 p. (2018)

D, Legrady ; B, Molnar ; M, Klausz ; T, Major

Woodcock tracking with arbitrary sampling cross section using negative weights

ANNALS OF NUCLEAR ENERGY 102 pp. 116-123. , 8 p. (2017)

László, Szirmay-Kalos ; Iliyan, Georgiev ; Milán, Magdics ; Balázs, Molnár ; Dávid, Légrády

Unbiased Light Transport Estimators for Inhomogeneous Participating Media

COMPUTER GRAPHICS FORUM 36 : 2 pp. 9-19. , 11 p. (2017)

- **Orvosi képalkotás nem ionizáló sugárzással** Napjainkban a kognitív idegtudomány egyik legfontosabb kutatási irányává vált az emberi agy funkcionális konnektivitásának vizsgálata. A funkcionális MRI módszerek lehetőséget teremtenek arra, hogy nem-invazív módon feltérképezzük és jellemezzük ezeket a hálózatokat. A témával kapcsolatos kutatásaink kiterjednek a jobb jel-zaj viszonyt eredményező adatgyűjtési módszerek és új adatfeldolgozási eljárások kidolgozására és azok alkalmazására az agykutatásban, valamint a transzlációs neurobiológiai kutatásokban alkalmazható fMRI biomarkerek fejlesztésére.

A funkcionális MRI a legelterjedtebben használt dinamikus agyi képalkotó eljárás, amely indirekt módon a véroxigenáció-szinthez kötve, a vérkeringési válaszon keresztül következtet az idegrendszeri aktivitásokra. Az utóbbi néhány év fejlesztéseinek eredményeképp a konvencionális idő és térbeli felbontások egyaránt 1-1 nagyságrendekkel csökkenthetőek a hardware újításokkal, mint a többszörös gerjesztés és erősebb gradiens rendszerek



alkalmazásával. A legújabb parallel képfelvételi stratégiák, részleges k-tér felvételével kiegészített multiband-multiplexed EPIvel lehetséges tizedmásodperc nagyságrendű és sub mm voxel méretű funkcionális képalkotás, amivel az idegtudományi kutatások egy eddig nem vizsgált tartománya tárható fel. A kutatás cél a rendelkezésre álló és tesztelés alatt álló gerjesztési módszerek és rekonstrukciós algoritmusok optimalizálásával a minél jobb idő és térbeli felbontás elérése figyelembe véve a funkcionális kép jel-zal arányát, törekedve imaging és mozgás artifaktumok minimalizálására.

Kettinger, AO ; Kannengiesser, SAR ; Breuer, FA ; Vidnyanszky, Z ; Blaimer, M  
Controlling the object phase for g-factor reduction in phase-Constrained parallel MRI using spatially selective RF pulses.  
MAGNETIC RESONANCE IN MEDICINE 79 : 4 pp. 2113-2125. , 13 p. (2018)

Kettinger, Á ; Setsompop, K ; Kannengiesser, SAR ; Breuer, FA ; Vidnyánszky, Z ; Blaimer, M  
Combining Virtual Conjugate Coil reconstruction with partial Fourier imaging for maximized utilization of k-space conjugate symmetry  
MAGNETIC RESONANCE MATERIALS IN PHYSICS BIOLOGY AND MEDICINE 30 : Suppl. 1 Paper: 179 , 2 p. (2017)

Kettinger, A ; Hill, C ; Vidnyanszky, Z ; Windischberger, C ; Nagy, Z  
Investigating the Group-Level Impact of Advanced Dual-Echo fMRI Combinations.  
FRONTIERS IN NEUROSCIENCE 10 p. 571 (2016)

- **Sugárterápia** A daganatos betegek sugárterápiás kezelése különböző technikákkal valósul meg, ilyenek teleterápiás kezelések, brachyterápia, sztereotaxiás sugársebészet, protonterápia. A teleterápiás kezelések közül az intenzitás modulált (IMRT) és képvezérelt (IGRT) besugárzási technikák jelenleg a világon az egyik legpontosabb sugárterápiás eljárások. Folyamatosan kutatni kell a különböző besugárzási készülékek fizikai paramétereit, az általuk létrehozott sugárzás hatását az élő szervezetre. A mérőberendezések és tervezőrendszerek folyamatos fejlesztésével lehetővé válik a tumoros szövetek nagyobb mértékű pusztítása, miközben hatékonyan védeni kell az épp szöveteket. A sugárzások fizikai paramétereit mellett folyamatosan figyelembe kell venni a biológiai és anatómiai környezetet is. Az eredményes kezelés érdekében alkalmazni kell a különböző képi modalitásokat.

Kutatásokat végzünk a következő területeken: képvezérelt brachyterápia optimalizált dóziseloszlásainak kvantitatív vizsgálata különböző anatómiai régiók esetében, kötött és szabad seed-ek (I-125) alkalmazási feltételeinek dozimetriai vizsgálata prosztatata tumorok esetében. Különböző teleterápiás tervezőrendszerek IMRT moduljának összehasonlító elemzése, nyalábirány optimalizálás hatásának vizsgálata, az inverz tervezés paramétereiktől való függésének vizsgálata. A képvezérelt sugárterápiás technikák megvalósíthatóságának vizsgálata az anatómiai régiók függvényében. A besugárzástervező rendszerek számolási algoritmusok vizsgálata az ép szöveti terhelés és különböző besugárzási technikák függvényében.

Stelczer G, Major T, Mészáros N, Polgár C, Pesznyák C: External beam accelerated partial breast irradiation: dosimetric assessment of conformal and three different intensity modulated techniques, Radiology And Oncology 53:1 pp. 123-130, 8 p. (2019) IF=1,846

G Stelczer, D Tatai-Szabó, T Major, N Mészáros, C Polgár, J Pálvölgyi, C Pesznyak, Measurement of dose exposure of image guidance in external beam accelerated partial breast irradiation: Evaluation of different techniques and linear accelerators  
Physica Medica 63, 70-78 (2019), IF=2,532

Akiyama H, Pesznyák C, Béla D, Ferenczi Ö, Major T; Polgár C, Takácsi-Nagy Z: Image guided high-dose-rate brachytherapy versus volumetric modulated arc therapy for head and neck cancer: A comparative analysis of dosimetry for target volume and organs at risk.  
Radiology and Oncology 52:4 pp. 461-467, 7 p. (2018) IF=1,846

Jorgo K, Polgar C, Major T, Stelczer G, Herein A, Pocza T, Gesztesi L, Agoston P: Acute and Late Toxicity after Moderate Hypofractionation with Simultaneous Integrated Boost (SIB) Radiation Therapy for Prostate Cancer. A Single Institution, Prospective Study  
Pathol. Oncol. Res. <https://doi.org/10.1007/s12253-019-00623-2> (2019), IF=2,433

Zourari K, Major T, Herein A, Peppá V, Polgar C, Papagiannis P, A retrospective dosimetric comparison of TG43 and a commercially available MBDCa for an APBI brachytherapy patient cohort. Physica Medica 31 : 7 pp. 669-676. , 8 p. (2015), IF=2,532

• **Sugárvédelem és sugárbiológia az orvosi fizikában:** Az ionizáló sugárzást kibocsátó röntgenberendezések, zárt sugárforrással működő készülékek és lineáris gyorsítók gyógyászati célú alkalmazása igen széles körben elterjedt. Az egyes modalitások biztonságos üzemeltetéséhez nélkülözhetetlenek a megfelelő és rendszeres dozimetriai, sugárvédelmi ellenőrzések. A folyamatos kutatások új technológiai fejlesztéseket eredményeznek, amik új sugárvédelmi mérés technikai módszerek alkalmazását teszik szükségessé. Az egészségügyben a sugárvédelem komplex folyamat, párhuzamosan kell biztosítani a munkavállalók, a betegek és a hozzátartozók sugárvédelmét is. A sugárvédelemmel párhuzamosan mind nagyobb figyelmet kap a sugárbiológia kutatási módszerei is. Nagyon fontos, hogy pontos információkat kapjunk arról, hogy az egyes sugárzások milyen biológiai hatással vannak a sejtekre, szövetekre, és hogy ezek hatását milyen pontossággal tudjuk meghatározni, ennek egyik jelentős kutatási területe a biodozimetria, valamint a dózisbecslés sugárvédelmi és sugárbiológiai terjedési modellek segítségével.

Kutatásokat végzünk a következő területeken: mikronukleusz alapú retrospektív in vivo és in vitro dózismeghatározás automatikus mikroszkópia segítségével, nagy dózisterek térbeli eloszlásának meghatározása aktív és passzív detektorokkal

Szabó ER, Reisz Z, Polanek R, Tőkés T, Czifrus Sz, Pesznyák Cs, Biró B, et al. A novel vertebrate system for the examination and direct comparison of the relative biological effectiveness for different radiation qualities and sources, Int Journal Of Radiation Biology, 94 : 11 pp. 985-995. , 11 p. (2018) IF=2,266

Farkas Gy, Kocsis S Zs, Szekely G, Mihaly D, Pesznyak C, Pocza T, Major T, Polgar C, Juranyi Zs, Quantifying radiobiological effects of high energy LINACs on lymphocytes for biological dosimetry, Journal of Radiation Research, In press (2019), IF=2,014

Persa, E, Szatmári T, Sáfrány G, Lumniczky K, In Vivo Irradiation of Mice Induces Activation of Dendritic Cells, International Journal Of Molecular Sciences 19:8 Paper: doi: 10.3390/ijms19082391. (2018), IF=4,183

## VI. TÁRGYCSOPORTOK

### *Szilárdtestfizika tárgycsoport*

- Modern szilárdtestfizika (3/2/0/v/7)
- Mágnesség elmélete I (2/1/0/v/5)
- Mágnesség elmélete II (2/0/0/v/3)
- Kölcsönható spinrendszerek valós anyagokban (2/0/0/v/3)
- Csoportelmélet a szilárdtest-kutatásban (2/0/0/v/3)
- Szupravezetés (2/0/0/v/3)
- Félvezetők fizikája (2/0/0/3)
- Mágneses rezonancia (2/1/0/v/5)
- Optikai spektroszkópia az anyagtudományban (3/0/0/v/5)
- Szilárdtestek elektronszerkezete (2/1/0/v/5)
- Topológikus szigetelők (2/0/0/v/3)

### *Nanofizika/Nanotechnológia tárgycsoport*

- A nanofizika alapjai (3/0/0/v/5)
- Nanotechnológia és anyagtudomány (3/0/0/v/5)
- Transzport komplex nanoszerkezetekben (2/0/0/v/3)
- Elméleti nanofizika (2/1/0/v/5)
- Korszerű félvezető eszközök (2/0/0/v/3)
- Atomi szintű számítógépes szimuláció szilárdtestekben (1/0/1/f/3)
- Kémiai módszerek a nanotechnológiában (2/0/0/v/3)
- Nanotechnológia laboratórium (0/0/3/f/4)
- Trendek a nanotechnológiában (2/0/0/f/2)
- Kvantumszámítógép-architektúrák (2/0/0/v/3)

### *Kvantumrendszerek fizikája tárgycsoport*

- Soktestprobléma I (3/1/0/v/6)
- Soktestprobléma II (2/1/0/v/4)
- Részecskefizika (2/1/0/v/5)
- Kvantumtérelmélet (3/2/0/v/7)
- Egydimenziós rendszerek fizikája (2/0/0/v/3)
- Haladó kvantumtérelmélet (2/1/0/v/4)
- Kvantumoptika (2/1/0/v/5)
- Kvantumösszefonódás (2/0/0/v/3)
- Kvantumrendszerek koherens kontrollja (2/0/0/v/3)

### *Statisztikus fizika tárgycsoport*

- Statisztikus fizika II (2/1/0/v/5)
- Fázisátalakulások (2/1/0/v/5)
- Rendezetlen rendszerek fizikája (2/1/0/v/4)
- Statisztikus térelmélet (2/1/0/v/4)
- Dinamikai rendszerek (3/1/0/v/5)
- Evolúciós játékelmélet (2/0/0/v/3)
- Komplex hálózatok (2/0/0/v/3)
- Mesterséges intelligencia az adattudományban (1/2/0/v/5)
- Véletlen mátrix elmélet és fizikai alkalmazásai (2/0/0/v/3)

### ***Optika tárgycsoport***

Fizikai optika (2/1/0/v/5)  
Lézerfizika (2/0/0/v/3)  
Optoelektronikai eszközök (2/0/0/v/3)  
Optikai anyagok és technológiák (3/0/0/v/5)  
Optikai jelfeldolgozás és adattárolás (2/0/0/v/3)  
Optikai mérés technika (2/0/0/v/3)  
Optikai tervezés (2/2/0/v/6)  
Fényforrások (2/0/0/v/3)  
ELI előkészítő laboratórium (0/0/4/f/4)  
Lézerek és lézerrendszerek tervezése és építése (2/0/0/f/3)  
Infravörös és Raman spektroszkópia (2/2/0/v/6)  
A fotonika alapjai (2/1/0/v/5)  
Kvantumoptika (2/1/0/v/5)  
Lézerek ipari és biológiai alkalmazásai (2/0/0/v/3)  
Nemlineáris optika alapjai és alkalmazásai (2/0/0/v/3)

### ***Anyagtudomány tárgycsoport***

Elektron- és ionoptikák (2/0/0/v/3)  
Szilárdtestek elektromos és optikai tulajdonságai (2/0/0/v/3)  
Vákuumfizika és -technika (2/0/0/v/3)  
Anyagtudomány Laboratórium (0/0/3/f/4)  
A felületfizika alapjai (2/0/0/f/3)  
Felületfizika és vékonyrétegek (2/0/0/f/3)  
Az anyagtudomány alapjai és alkalmazásai (2/0/0/v/3)  
Fizikai anyagtudomány (2/0/0/f/3)  
Mikro- és nanotechnológiák (2/0/0/f/3)  
Trendek az anyagtudományban (1/0/0/v/2)  
Spektroszkópia és anyagszerkezet (2/0/0/v/3)

### ***Nukleáris technika tárgycsoport***

Atomenergetikai alapismeretek (3/2/0/f/5)  
Atomerőművek (3/1/0/v/5)  
Atomerőművi anyagvizsgálatok (2/0/0/v/3)  
Atomerőművi kémia (2/1/0/f/4)  
Atomreaktorok üzemtana (2/2/0/f/5)  
Radioanalitika (3/0/2/f/6)  
Nukleáris üzemanyagciklus (2/1/0/f/4)  
A nukleáris leszerelés kérdései (2/0/0/v/3)  
Atomenergia és fenntartható fejlődés (2/0/0/f/3)  
Bevezetés a fúziós plazmafizikába (2/0/0/v/2)  
Fúziós nagyberendezések (2/0/0/v/3)  
Ütközéses transzport mágnesezett plazmában (1/2/0/f/4)  
Reaktorszabályozás és műszerezés (2/1/0/v/4)  
Sugárvédelem II (2/0/2/v/5)  
Neutron- és gammatranszport számítási módszerek (2/1/0/f/4)  
Atomerőművi szimulációs gyakorlatok (0/0/2/f/3)  
Radioaktív anyagok terjedése környezeti és biológiai rendszerekben (2/1/0/v/3)  
Radioaktív hulladékok (1/0/1/v/2)  
Reaktorfizika (3/1/0/v/5)

### ***Orvosi fizika tárgycsoport***

- Sugárbiológia (2/1/0/v/4)
- Sugárterápia fizikai alapjai (2/0/2/v/5)
- Sugárterápia II (2/0/0/v/3)
- Brachyterápia (2/0/0/v/3)
- Minőségbiztosítás és jogi szabályozás (2/0/1/v/4)
- Sugárvédelem az orvosi fizikában (3/0/1/v/5)
- Mágneses rezonancia és klinikai alkalmazása (2/0/0/v/3)
- Nukleáris medicina (2/0/1/v/4)
- Orvosi képalkotás (3/1/0/v/4)
- Röntgendiagnosztika fizikai alapjai (2/1/0/v/4)
- Ultrahang diagnosztika (2/0/0/v/2)
- Méréstechnika a sugárterápiában (2/0/0/v/2)

# TEMATIKÁK

## Szilárdtestfizika tárgycsoport

### **Modern szilárdtestfizika / Modern solid state physics (3/2/0/v/7)**

Tárgyfelelős / Responsible lecturer: Virosztek Attila

A tantárgy a Fizika alapképzési (BSC) szakon megszerezhető szilárdtestfizika és statisztikus fizika ismeretekre építve a kölcsönható többrészecske rendszerek (elsősorban elektronrendszerek) leírását mutatja be a következő témakörök tárgyalásával: azonos részecskék, másodkvantálás, kölcsönható elektronrendszer Bloch- és Wannier-bázison, fémek ferromágnessége, lineáris válasz elmélet, fémek szuszceptibilitása, spinsűrűség-hullámok, Bose-folyadék.

This course describes the behavior of interacting many body systems (mainly electron systems) building on solid state physics and statistical physics knowledge gained while earning a BSC degree in Physics. The following topics are discussed: identical particles, second quantization, interacting electron systems in Bloch and Wannier representation, itinerant ferromagnetism, linear response theory, susceptibility of metals, spin density waves, Bose liquid.

*Irodalom / Literature:* L. D. Landau és E. M. Lifsic: Elméleti fizika III., Nemrelativisztikus kvantummechanika (Tankönyvkiadó, Budapest, 1978), A. A. Abrikosov, L. P. Gorkov and I. E. Dzyaloshinski: Methods of quantum field theory in statistical physics (Dover, New York, 1975), Sólyom Jenő: A modern szilárdtestfizika alapjai III., Kölcsönhatás az elektronok között (ELTE Eötvös Kiadó, 2003).

### **Mágnesség elmélete / Theory of magnetism (2/1/0/v/5)**

Tárgyfelelős / Responsible lecturer: Virosztek Attila

A mágneses jelenségek mint elektron korrelációs effektusok kerülnek bemutatásra. A tárgy erősen épít arra a tudásra, melyet a "Modern szilárdtestfizika" tárgy sikeres teljesítésével lehet megszerezni. A következő témakörök kerülnek tárgyalásra: Landau nívók mágneses térben, kiterjedt elektronállapotok mágnessége, atomok és ionok mágnessége, magnetit, direkt kicserélődés, mozgási kicserélődés, Mott átmenet, Mott szigetelők, a mágneses rendeződés átlagtér elmélete, a ferromágneses Heisenberg modell, az antiferromágneses Heisenberg modell.

Magnetic phenomena are considered as electron correlation effects. This course builds heavily on knowledge gained by successful completion of the course "Modern solid state physics". The following topics are discussed: Landau levels in magnetic field, magnetism of extended electron states, magnetism of atoms and ions, magnetite, direct exchange, kinetic exchange, Mott transition, Mott insulators, mean field theory of magnetic ordering, the ferromagnetic Heisenberg model, the antiferromagnetic Heisenberg model.

*Irodalom / Literature:* Patrik Fazekas: Lecture notes on electron correlation and magnetism (World Scientific, Singapore, 1999).

### **Mágnesség elmélete II / Theory of magnetism II (2/0/0/v/3)**

Tárgyfelelős / Responsible lecturer: Virosztek Attila

A tárgy első részének alapfogalmait és eredményeit ismertnek tételezzük fel. A következő témakörök kerülnek tárgyalásra: spontán szimmetriasértés a Heisenberg modellben, kristálytér elmélet, szimmetriák és degenerációk, átmenetifém atomok köbös kristálytérben, további szimmetriák és szimmetriasértések, itineráns ferromágnesség, korrelált fémek, nehézfermionok.

The basic concepts and results from the first part of the course are assumed to be familiar. The following topics are discussed: spontaneous breaking of symmetry in the Heisenberg model, crystal field theory, symmetries and degeneracies, transition metal atoms in cubic crystal field, further symmetry breakings and symmetries, itinerant ferromagnetism, correlated metals, heavy fermions.

*Irodalom / Literature:* Patrik Fazekas: Lecture notes on electron correlation and magnetism (World Scientific, Singapore, 1999).

## **Kölcsönható spin rendszerek valós anyagokban / Interacting spin systems in real materials** (2/0/0/v/3)

Tárgyfelelős / Responsible lecturer: Penc Karl

A tantárgy célja Mott-szigetelők mágneses tulajdonságainak megértése nemcsak elméleti szinten, hanem kísérleti vonatkozásban is, építve a "Mágnesség elmélete II" tantárgyban elhangzottakra (de függetlenül is felvehető). Tematika: Különböző kicserélődések eredete anyagokban. Neutronszórás és optikai spektrumok.  $S=1/2$  és  $S=1$  spin-láncok gerjesztéseinek összehasonlítása, AKLT hullámfüggvény. Spin-létrák mágneses térben. Spin-hullámok  $\text{LaCu}_2\text{O}_4$ -ben és más antiferromágnesekben, az elméleti számolások és kísérleti mérések összehasonlítása. Mágnesszeti platók  $\text{SrCu}_2(\text{BO}_3)_2$ -ban és más frusztrált rendszerekben, a kvantum-fluktuációk és a rácsorzulások szerepe. Az alapállapotú degeneráció tárgyalása spin jégben, mágneses monopolusok. Nematikus és multipoláris rendeződés frusztrált rendszerekben. Magnetoelektromos kölcsönhatás multiferroikus anyagokban. A Kitaev modell megvalósulása irídium oxidokban, az erős spin-pálya csatolás szerepe. Topologikus mágneses gerjesztések.

The lecture aims at the understanding of the magnetic properties of various Mott insulators, comparing theoretical understanding with experimental measurements. It builds on the "Theory of magnetism II" course (but it can also be followed on its own). Topics: The origin of spin exchanges in materials. Neutron and optical spectra. Excitations in  $S=1/2$  and  $S=1$  spin chains, AKLT state. Spin ladders in a magnetic field. Spin waves in  $\text{LaCu}_2\text{O}_4$  and other antiferromagnets, comparing calculated spectra with neutron experiments. Magnetization plateaus in  $\text{SrCu}_2(\text{BO}_3)_2$  and in frustrated systems, the role of quantum fluctuations and lattice distortions. Ground state degeneration and magnetic monopoles in spin ice. Nematic and multipolar ordering in frustrated systems. Magnetoelectric coupling in multiferroic materials. Realization of the Kitaev model in two and three-dimensional iridium oxides, the role of strong spin-orbit coupling. Magnetic excitations with finite Chern number.

*Irodalom / Literature:* válogatott összefoglaló cikkek/selected review articles

## **Csoportelmélet a szilárdtest-kutatásban / Group Theory in Solid State Research** (2/0/0/v/3)

Tárgyfelelős / Responsible lecturer: Kriza György

Alapismeretek: szimmetria pontcsoportok, véges csoportokra vonatkozó fontosabb tételek, reprezentációk, karaktertáblák. Rezgési spektroszkópia: kiválasztási szabályok, direktszorzat-reprezentációk, faktorcsoport. Elektronátmenetek: kristálytér-felhasadás,  $\text{SO}(3)$  és  $\text{SU}(2)$  csoportok, korrelációs diagramok, kristály kettőscsoportok. Kristályrácsok szimmetriája: tércsoportok, krisztallográfiai nomenklatúra, *International Tables of Crystallography*. Elektronállapotok kristályokban: tércsoport ábrázolásai, kompatibilitási szabályok.

Introduction: point groups, fundamental theorems on finite groups, representations, character tables. Optical spectroscopy: selection rules, direct product representations, factor group. Electronic transitions: crystal field theory,  $\text{SO}(3)$  and  $\text{SU}(2)$  groups, correlation diagrams, crystal double groups. Symmetry of crystals: space groups, *International Tables of Crystallography*. Electronic states in solids: representations of space groups, compatibility rules.

*Irodalom / Literature:* G. Burns, Introduction of Group Theory with Applications, (Academic Press, New York, 1977). Wigner Jenő: Csoportelméleti módszer a kvantummechanikában (Akadémia Kiadó, Budapest, 1979).

## **Szupravezetés / Superconductivity** (2/0/0/v/3)

Tárgyfelelős / Responsible lecturer: Kriza György

Szupravezetők fenomenológikus leírása. Meissner-effektus, London-egyenletek, szupravezetők elektrodinamikája. Bardeen-Cooper-Schrieffer-elmélet: alapállapot, termodinamika és transzporttulajdonságok. Ginzburg-Landau-elmélet: szabadenergia, GL-egyenletek és megoldásuk, Abrikosov-örvények, másodfajú szupravezetők mágneses tulajdonságai. Josephson-effektus és alkalmazásai. Magashőmérsékleti szupravezetők. A tárgy követéséhez szükséges előismeretek elsajátíthatók a *Modern szilárdtest-fizika* előadásban.

Phenomenology of superconductors. Meissner effect, London equations, electrodynamics of superconductors. Bardeen-Cooper-Schrieffer theory: ground state, thermodynamic and transport properties. Ginzburg-Landau theory: free energy, GL equations and their solution, Abrikosov vortices, magnetic properties of Type II superconductors. Josephson effect and its applications. High-temperature superconductors. Prerequisites: *Modern Solid State Physics*.

*Irodalom / Literature:* Michael Tinkham, Introduction to Superconductivity: Second Edition (Dover Books on Physics, 2004), L. D. Landau – E. M. Lifshic: Elméleti fizika IX., Statisztikus mechanika II. (Tankönyvkiadó, Budapest, 1981), Sólyom Jenő: A modern szilárdtestfizika alapjai III., Kölesönhatás az elektronok között (ELTE Eötvös Kiadó, 2002-2003).

### **Félvezetők fizikája / Semiconductor physics (2/0/0/v/3)**

Tárgyfelelős / Responsible lecturer: Simon Ferenc

Bevezetés: a félvezető fizika jelentősége, modern alkalmazások, az elektronika határai.

Töltéshordozók félvezetőkben: sáv szerkezet, envelope function, rácshibák, szennyező atomok, lokalizált állapotok, sekély nívók, mély nívók. Félvezetők sáv szerkezete: spin-pálya kölcsönhatás, kp közelítés. Transzportjelenségek hőmérsékleti egyensúlyban: kváziklasszikus dinamika, Boltzmann-egyenlet, vezetőképesség, Hall-effektus, mágneses ellenállás, termoelektromos és termomágneses jelenségek. Diffúziós jelenségek félvezetőkben: inhomogén félvezetők, diffúzió, Einstein-reláció, vezetési jelenségek, Gunn-dióda. p-n átmenet, Zener-dióda, alagútdióda, bipoláris tranzisztorok, JFET. Félvezetők előállítás és minősítése: hagyományos és epitaxiális növesztési eljárások, minősítő technikák, rácshillesztés, band-engineering, heteroszerkezetek, szuperrácsok, nagy mobilitású kétdimenziós elektrongáz és nagyfrekvenciás alkalmazásai, félvezető nanostruktúrák előállítása. A tér-effektus és alkalmazásai: felületi állapotsűrűség, távoli dőpolás, Schottky-gát, Schottky-dióda, Ohmikus kontaktusok, MOS-szerkezetek, High-k dielektrikumok, flash memóriák, napelemek, CCD eszközök, a CMOS technológia alapjai. Félvezetők optikai tulajdonságai: kölcsönhatások fénnel, fotovezetés, szabad töltéshordozók abszorpciója, rekombinációs mechanizmusok, világító dióda (LED) és félvezető lézerek elve, felépítése, működése és alkalmazásai.

Introduction: importance of semiconductor physics, modern applications, the limitations of electronics. Charge carriers in semiconductors: band structure, envelope function, lattice distortions, impurities, localized states, shallow and deep levels. Band structure of semiconductors: spin-orbit interaction, kp model. Transport phenomena: quasiclassical dynamics, Boltzmann equation, conductivity, Hall-effect, magnetoresistance, thermoelectric and thermomagnetic phenomena. Diffusive phenomena in semiconductors: inhomogeneous semiconductors, diffusion, diffúzió, Einstein-relation, conduction, Gunn-diode, p-n junction, Zener-diode, tunnel diode, bipolar transistors, JFET. Characterization and engineering of semiconductors: traditional and epitaxial growth, characterization techniques, lattice matching, band-engineering, heterostructures, superlattices, high electron mobility 2DEG and its high frequency applications, fabrication of semiconductor nanostructures. Field effect and its applications: surface density of states, remote doping, Schottky barrier, Schottky diode, ohmic contacts, MOS-structures, High-k dielectrics, flash memories, solar cells, CCD devices, the fundamentals of CMOS technology. Optical properties of semiconductors: interaction with light, photoconduction, absorption of free charge carriers, recombination mechanisms, the principles and applications of light emitting diodes and semiconductor lasers.

*Irodalom/Literature:*

Yu and Cardona: Fundamentals of Semiconductors, Springer, 2010, Graduate Texts in Physics Series

### **Mágneses rezonancia / Magnetic Resonance (2/1/0/v/5)**

Tárgyfelelős / Responsible lecturer: Fehér Titusz

A BSC szakon megszerezhető elektrodinamika és kvantummechanikai ismeretekre építve a fizika-, kémia-, és orvostudományok egyik legfontosabb vizsgálati módszerét mutatja be, számos példával a modern kondenzált anyagkutatás területéről. Témakörök: elektron és magrezonancia kísérleti alapjai, Bloch egyenletek, dipól-dipól kölcsönhatás, mozgási keskenyedés, kristályterek és finomfelhasadás,



hiperfinom felhasadás, kémiai eltolódás, mágneses rezonancia fémekben, szupravezetőkben, mágnesesen rendezett anyagokban. A mágneses rezonanciás képalkotás (MRI) alapjai.

The course discusses one of the most important investigation methods in physics, chemistry and medical sciences. It is based on the electrodynamics and quantum mechanics studies required for the BSC degree. Topics include experimental methods of electron and nuclear magnetic resonance, Bloch equations, dipole-dipole interaction, motional narrowing, crystal fields and fine structure, hyperfine splitting, chemical shift, magnetic resonance in metals, superconductors and magnetically ordered materials. The fundamentals of magnetic resonance imaging (MRI)

*Irodalom / Literature:* C. P. Slichter Principles of Magnetic Resonance (Springer, Berlin, Heidelberg, New York, 1992).

### **Optikai spektroszkópia az anyagtudományban (3/0/0/v/5)**

Tárgyfelelős / Responsible lecturer: Bordács Sándor

Elektromágneses hullámok vákuumban és izotróp közegekben; komplex dielektromos állandó, határfelületek, reflektivitás és transzmisszió. Optikai vezetőképesség dipólus közelítésben; lineáris válasz elmélet, Kramers-Kronig reláció, összegszabályok. Fémek, szigetelők egyszerű optikai modelljei; Drude modell, Lorentz oszcillátor. Optikai fononok, elektron-fonon kölcsönhatás. Optikai spektrométerek: monokromatikus és Fourier transzformációs spektrométerek. Kölcsönható elektronrendszerek optikai vizsgálata: exciton gerjesztések, fém-szigetelő átalakulás, szupravezetők. Mágneses-optika: módszerek és alkalmazások.

Electromagnetic waves in vacuum and in a medium; complex dielectric function, interfaces, reflection and transmission. Optical conduction in dipole approximation; linear response theory, Kramers-Kronig relation, sum rules. Simple optical models of metals and insulators; Drude model, Lorentz oscillator. Optical phonons, electron-phonon interaction. Optical spectrometers: monochromatic- and Fourier transformation spectrometers. Optical spectroscopy of interacting electron systems: excitons, metal-insulator transition, superconductors. Magneto optics: methods and current applications.

*Irodalom / Literature:* "Solid State Spectroscopy" H. Kuzmany (Springer, 1998)

"Solid State Physics: Problems and Solutions" L. Mihály and M.C. Martin (Wiley, 1996)

"Magneto-optics", S. Sugano and N. Kojima (Springer, 1999).

### **Szilárdtestek elektronszerkezete / Electronic structure of solid matter (2/1/0/v/5)**

Tárgyfelelős / Responsible lecturer: Szunyogh László

A tantárgy a kvantummechanika és szilárdtestfizika ismeretekre építkezve a modern szilárdtestfizikai elektronszerkezeti eljárások elméleti alapjainak és módszertanának megismertetését tűzi ki célul. Kiemelt témakörök: A statikus sűrűségfüggvény elmélet alapjai. Variációs és pszeudopotenciál módszerek. Korrelált elektronrendszerek ab initio leírására alkalmas módszerek (LDA+U, önkölcsönhatás korrekció, dinamikus átlagtér elmélet). Pontcsoport és időtükrözési szimmetriák az elektronszerkezetben. Felületi állapotok, a Bychkov-Rashba effektus. Ötvöztek leírása, a koherens potenciál közelítés. Fémes (itineráns) mágnesség ab initio elmélete, rendezetlen lokális momentumok módszere.

Building on the knowledge in quantum mechanics and solid state physics, this course aims to discuss modern theories and methods for the electronic structure of solid matter. The following topics will be outlined: Foundations of the static density functional theory. Variational and pseudopotential methods. Ab initio methods for correlated systems (LDA+U, self-interaction correction, DMFT). Point-group and time reversal symmetries in the electronic structure. Surface states, the Bychkov-Rashba effect. Alloy theory, the coherent potential approximation. Metallic (itinerant) magnetism, method of the disordered local moments.

*Irodalom / Literature:* Sólyom Jenő: A Modern Szilárdtestfizika alapjai II., Elektronok a szilárd testekben (ELTE Eötvös Kiadó, 2003)

## **Topológikus szigetelők/ Topological insulators (2/0/0/v/3)**

Tárgyfelelős / Responsible lecturer: Pályi András

Az elmúlt évtized egyik meglepetése, hogy az elektromos vezetés kölcsönhatásmentes sávmélete is tud még valami alapvetően újjal szolgálni. A topológikus szigetelők olyan elektronikusan szigetelő, kristályos anyagok, amelyek felszínén vezető – esetenként tökéletesen vezető – felületi állapotok alakulnak ki. A tantárgy keretében egyszerű példákon keresztül bemutatjuk a sávméletben lényeges szerephez jutó topológikus invariánsokat, elméleti módszereket adunk azok kiszámítására, és bemutatjuk, hogy miként védi meg a topológia a felületi állapotokat bizonyos perturbációktól. Betekintést adunk a topológikus szigetelők általános elméletébe és áttekintünk néhány kapcsolódó kísérleti elrendezést és eredményt.

Research in the past decades revealed new features in the electronic band theory of solids. Topological insulators are insulating crystalline materials that support conducting – sometimes perfectly conducting – electronic surface states. In this course, we use simple models to introduce the topological invariants relevant for band theory, provide theoretical tools to calculate them, and demonstrate how topology protects the surface states from perturbations. We also give insight to the general theory of topological insulators, and review experimental setups and results.

*Irodalom/Literature:* J. K. Asbóth, L. Oroszlány, A. Pályi, A Short Course on Topological Insulators, Springer Lecture Notes in Physics, 919 (2016).

## Nanofizika/nanotechnológia tárgycsoport

### A nanofizika alapjai / Fundamentals of Nanophysics (3/0/0/v/5)

Tárgyfelelős / Responsible lecturer: Halbritter András

A mindennapjainkban használt elektronikai eszközök építőkövei már súrolják a nanométeres mérethatárt, és a további miniatürizálás újszerű technológiák bevezetését igényli. Azonban a nanométeres méretskálán az elektronok koherens viselkedése és kölcsönhatása, ill. az anyag atomi kvantáltsága számos újszerű, a makroszkópikus skálán ismeretlen jelenséget eredményez. A kurzus ezen jelenségkörökbe kíván bepillantást nyújtani elsősorban kísérleti eredmények bemutatásán és szemléletes megértésén keresztül, az alábbi témakörökre koncentrálva: Karakterisztikus méretskálák a nanofizikában. A kvantum transzport alapjai, vezetőképesség-kvantálás. Koherens és inkoherens transzport, interferencia-jelenségek nanoszerkezetekben. Mezozskópikus jelenségek atomi és molekuláris nanoszerkezetekben. Kvantált Hall jelenség. Zajjelenségek nanoszerkezetekben. Grafén nanoszerkezetek és kétdimenziós heterostrukturák. Kvantumpöttyök.

The building blocks of nowadays electronic devices have already reached a few tens on nanometers sizes, and further miniaturization requires the introduction of novel technologies. At such small length-scales the coherent behavior and the interaction of electrons, together with the atomic granularity of matter induce several striking phenomena, that are not observed at the macroscopic scale. The course gives an introduction to a broad set of nanoscale phenomena covering the following topics: characteristic length-scales; basic concepts of quantum transport, conductance quantization; coherent and incoherent transport, interference phenomena in nanostructures; mesoscopic phenomena in atomic and molecular nanojunctions; quantized Hall effect; noise phenomena in nanostructures; graphene nanostructures, 2D heterostructures; quantum dots.

#### *Irodalom / Literature:*

S. Datta: Electronic Transport in Mesoscopic Systems, Cambridge University Press, 1997.

T. Ihn: Semiconducting nanostructures, Oxford University Press, 2010.

Y.V. Nazarov, Y.M. Blanter: Quantum Transport: Introduction to Nanoscience, Cambridge University Press, 2009.

### Nanotechnológia és anyagtudomány / Nanotechnology and Materials Science (3/0/0/v/5)

Tárgyfelelős / Responsible Lecturer: Csonka Szabolcs

A tárgy a nanotechnológia és anyagtudomány terén a legfotósabb trendeket, gyártástechnológiákat és anyagvizsgálási módszereket ismerteti korszerű kutatási és fejlesztési eredmények példáin keresztül. Tematika: Újszerű koncepciók és modern anyagsaládok alkalmazása a nanotechnológiában. Az anyag mikroszkópikus feltérképezése nanométeres skálán: pásztázó szondás módszerek, elektronmikroszkópia. Nanoszerkezetek gyártása "top-down" módszerekkel: foto- és elektronsugár-litográfia, rétegleválasztási és speciális megmunkálási módszerek. Nanoszerkezetek gyártása "bottom-up" módszerekkel: önszerveződő nanoszerkezetek. Félvezető technológia, új koncepciók az informatikában. Az anyag elektromos és rezgési tulajdonságainak vizsgálata optikai spektroszkópiai módszerekkel. Felületanalitikai módszerek.

This course gives an introduction to the main trends in nanotechnology and material science. We cover advanced fabrication and measurement techniques by giving examples from state-of-the-art research and development results. The course addresses the following topics: Novel concepts and modern material systems in nanotechnology. Advanced imaging methods from electron microscopy to atomic resolution scanning probe techniques. Top-down nanofabrication techniques: photo and electron beam lithography, deposition and special patterning techniques. Bottom-up approaches and self-organizing nanostructures. Semiconductor technology and novel concepts in information technologies. Investigation of electronic and vibrational properties by optical spectroscopy. Advanced surface analysis techniques.

#### *Irodalom / Literature:*

Douglas Natelson: Nanostructures and Nanotechnology,

Stuart Lindsay: Introduction to Nanoscience,

Springer Handbook of Nanotechnology

## **Transzport komplex nanoszerkezetekben / Transport in complex nanostructures (2/0/0/v/3)**

Tárgyfelelős / Responsible lecturer: Makk Péter

A tárgy különböző hibrid nanoszerkezetekben lezajló komplex fizikai folyamatokat tekint át elsősorban a szupravezető nanoszerkezetek és a spintronika alábbi területeire koncentrálván:

Bevezetés a mezoszkópikus szupravezetésbe. Andrejev-reflexió, BTK elmélet, mezoszkópikus proximity jelenségek. Többszörös Andrejev-visszaverődések. A Josephson effektus alkalmazásai. Andrejev kötött állapotok és az áram-fázis reláció vizsgálata. Andrejev kvantum bitek. Szupravezető szigetek, Andrejev-állapotok szupravezető kvantum pöttyökben. Majorana fermionok.

A spintronika alapjai. Mágneszettség mérések modern módszerei: mágneses erő mikroszkópia, pásztázó NV centrumok, XMCD, stb. Mágnesellenállás-jelenségek (AMR, GMR, TMR). Spininjektálás, nemlokális mérések. Félvezető spintronika, Rashba effektus, spinrelaxáció, gyenge antilokalizáció. Spintronika kvantumpöttyökben. Optikai spininjektálás, elektron spin rezonancia. Spin Hall jelenségek. Exotikus spinstruktúrák, multiferroikus anyagok, skyrmionok. Antiferromágneses spintronika. Spinnyomaték, spinpumpálás.

The course overviews the complex physical phenomena in various hybrid nanostructures with a special emphasis on the following topics of superconducting nanostructures and spintronics:

Introduction to mesoscopic superconductivity. Andreev reflections, BTK theory and mesoscopic proximity effects. Multiple Andreev Reflections. Advanced applications of the Josephson effect. Investigation of Andreev Bound states and the current-phase relation. Andreev Qubits. Superconducting islands, Andreev states in quantum dots. Majorana fermions.

Basic concepts of spintronics. Magnetization measurements: magnetic force microscopy, scanning NV center methods, X-ray magnetic circular dichroism, etc. Magnetoresistance phenomena (AMR, GMR, TMR). Spin injection, non-local measurements. Semiconductor spintronics, Rashba effect, spin relaxation, weak anti-localization. Spintronics in quantum dots. Optical spin injection, electron spin resonance. Spin Hall phenomena. Exotic spin structures, multi ferroic materials, skyrmions. Antiferromagnetic spintronics. Spin transfer torque, spin pumping

*Irodalom / Literature:* válogatott összefoglaló cikkek/selected review articles

## **Elméleti nanofizika / Theoretical Nanophysics (2/1/0/v/5)**

Tárgyfelelős / Responsible lecturer: Zaránd Gergely

A mezoszkópikus és nano-rendszerek a modern szilárdtestfizika egyik legintenzívebben tanulmányozott területét képviselik: A litográfiai eljárások eredményeképp olyan félvezető eszközöket és fémes szemcséket tudnak építeni, melyekben az elektronok koherensen mozognak. Molekulákat és szemcséket tudnak kontaktálni, és mikrorezonátorokba helyezni. A tárgy az ilyen eszközök leírásával és a fellépő új jelenségekkel foglalkozik.

Apró szemcsék leírása (Coulomb kölcsönhatás, koherencia, egyrészcseke szintek). A véletlen mátrix elmélet alapjai (szinttaszítás, univerzalitási osztályok). Coulomb blokádnak és spektroszkópia (mester egyenletek, co-tunneling, Kondo effektus), - Pont kontaktusok vezetőképessége és kvantum-zaja, - Nanocsövek, él-állapotok, - Molekuláris transzport, - Szupravezető szemcsék, Josephson-átmenetek és kvantum-bitek, - Kvantum spin manipuláció. A hallgatók a félév során kiadott problémásorozatokat is megoldanak oktatói segítséggel.

Nanosystems and mesoscopic systems represent the most intensively studied areas of modern solid-state physics: modern lithographic procedures enable us to create semiconducting devices and metallic grains, where electrons move coherently. Today, we can contact individual grains, atoms and molecules, and place them into micro-resonators. The goal of the course is to cover novel phenomena occurring in such devices. The course covers the following subjects: description of small grains (Coulomb interaction, coherence, single particle levels); fundamentals of random matrix theory (university classes, level repulsion); Coulomb blockade and spectroscopy (master equation, co-tunneling and Kondo effect); conductance and noise of point contacts; molecular transport; superconducting grains, Josephson junctions, and quantum bits; Nanowires, edge states, and hybrid structures. The course is accompanied by a series of problem sets, which the students are supposed to prepare and hand in by the end of the semester.

*Irodalom / Literature:* Supriyo Datta, Lessons from Nanoscience: A New Perspective on Transport, World Scientific, 2012;

E. Akkermans, G. Montambaux, J.-L. Pichard, and J. Zinn-Justin: Mesoscopic Quantum Physics, North Holland, 1996

Saját jegyzet, kiadott publikációk / handouts and selected publications

### **Korszerű félvezető eszközök / Advanced Semiconductor Devices (2/0/0/v/3)**

Tárgyfelelős / Responsible lecturer: Volk János

A tárgy a modern információs technológiák hardver építőelemeit mutatja be a hagyományos félvezető eszközöktől a legkorszerűbb technológiáig és készülékekig. Tematika: A félvezető eszközök és a félvezető ipar története. Korszerű szilícium technológiák a kristálynövesztéstől a mikromegmunkálási és nanofabrikálási módszerekig. Szilícium eszközök a hagyományos MOS FET-ektől a trigate tranzisztorokig és CCD szenzorokig. Memóriaeszközök (SRAM, DRAM, Flash). Si napelemek. Vegyület-félvezetők, „band engineering”, kétdimenziós elektrongáz-rendszerek, kvantumvölgyek, fénykibocsátó- és lézerdiodák, nagy elektronmobilitású tranzisztorok, GaN technológia. Organikus félvezetők: polimer napelemek, OLED eszközök, nyomtatható elektronika. Perovszkit napelemek. Szenzorok és mozgatók: mikroelektromechanikai rendszerek, fizikai, kémiai és biológiai szenzorok, mozgatók, robotikus alkalmazások, biointerfészek, mesterséges tapintás és szaglás. Újfajta eszközök és technológiák az informatikában: spintronikai eszközök és rezisztív kapcsoló memóriák. Újfajta számítási architektúrák: neuromorfikus számítástechnika, számítás a memóriában, mesterséges neurális hálózatok hardver szintű megvalósítása.

The course introduces the hardware building blocks of modern information technologies from traditional semiconductor architectures to the the most up-to-date concepts, technologies and devices. Topics: History of semiconductor devices and semiconductor industry. Advanced silicon technologies from crystal growth to micromachining and nanofabrication techniques. Si devices from traditional MOS FETs to trigate transistors or CCD sensors. Memory devices (SRAM, DRAM, flash). Si solar cells. Compound semiconductors, band engineering, two dimensional electron gas systems, quantum wells, light emitting and laser diodes, high electron mobility transistors, GaN technology. Organic semiconductors: polymer solar cells, OLEDs, printed electronics. Perovskite solar cells. Sensors and actuators: MEMS, physical, chemical, biological sensors, actuators, robotic applications, biointerfaces, artificial skin and nose. Novel device platforms: spintronic devices and resistive switching memories. Novel computing architectures: brain inspired computing, in memory computing, hardware implementation of artificial neural networks.

*Irodalom / Literature:*

Simon M. Sze, Kwok K. Ng: Physics of Semiconductor Devices

Rainer Waser: Nanoelectronics and Information Technology: Advanced Electronic Materials and Novel Devices. Saját jegyzetek / handouts.

### **Atomi szintű számítógépes szimuláció szilárdtestekben / Computational Simulation at Atomic Scale in Solids (1/0/1/f/39)**

Tárgyfelelős / Responsible lecturer: Gali Ádám

A tárgy áttekinti a szilárdtestek atomi szintű számítógépes szimulációs módszereit az alábbi témák szerint: Bevezetés a lehetséges alkalmazásokba. Molekulák és tökéletes kristályok geometriája. A szilárdtestek különböző modelljei. Az atommagok és az elektronok szétválasztása: Born-Oppenheimer közelítés, pszeudopotenciálok, projektorok. Tipikus bázisfüggvények és tulajdonságaik: síkhullámok, lokalizált bázistípusok. Hartree-Fock elmélet, azon alapuló módszerek. Félempirikus számítási módszerek. Sűrűségfüggvény-elmélet: Hohenberg-Kohn, Kohn-Sham tételek, az elmélet (fél)lokális közelítései. A DFT-n alapuló szoros-kötés számítási módszer. Hibridfüggvény-elmélet. Időfüggő sűrűségfüggvény-elmélet, sokrészecske perturbációs módszerek. Az elméleti alapok áttekintése mellett a hallgatók számítógépes laborgyakorlat keretében a fenti módszerek gyakorlati alkalmazását is elsajátítják.

The course overviews the atomic-scale simulation methods of solids covering the topics bellow. Introduction, potential applications. Geometry of molecules and perfect solids. Various models of solids. The

separation of nuclei and electrons: Born-Oppenheimer approximation, pseudopotentials, projectors. Typical base functions and their characteristics: plane waves, localized bases. Hartree-Fock theory and related methods. Semiempirical computational methods. Density functional theory: Hohenberg-Kohn, Kohn-Sham theorems and their (semi)local approximations. DFT-based tight binding methods. Hybrid functionals. Time dependent density functional theory, many particle perturbation methods. In addition to the the overview of the theoretical principles the students also apply the above methods along the computational lab occasions.

*Irodalom / Literature:* Gali Ádám: Atomi szintű számítógépes szimuláció szilárdtestekben: elmélet és gyakorlat I.

### **Kémiai módszerek a nanotechnológiában / Chemistry in Nanotechnology (2/0/0/v/3)**

Tárgyfelelős / Responsible lecturer: Lagzi István László

The course presents recent developments in nanotechnology and nanoscience using chemical methods. We will overview measurement techniques for nanoscale building blocks, namely transmission electron microscopy (TEM), scanning electron microscopy (SEM), dynamic light scattering (DLS). Synthesis of nanoparticles: chemical, physical and biological methods and chemical stabilization of nanoparticles. Purification and size and shape-selective purification of nanoparticles. The stability of nanoparticles and interactions existing at nanoscale and using them for the self-assembly of nanoscopic components: nanostructured materials. Usage of nanoparticles in chemistry, medicine and chemical robotics. Targeted drug delivery applications.

A kurzus betekintés nyújt a kémiai módszerek alkalmazásába a nanotechnológiában és a anyagtudományban. Áttekintjük azokat a mérési technikákat, amelyekkel nanorészecskéket lehet vizsgálni: transzmissziós elektronmikroszkópia (TEM), pásztázó elektronmikroszkópia (SEM) és dinamikus fényszórás (DLS). A nanorészecskék szintézise: kémiai, fizikai és biológiai módszerek. A nanorészecskék kémiai stabilizálása. Nanorészecskék tisztítása és alak szerinti szétválasztása. Nanorészecskék stabilizálása. Részecskék közötti kölcsönhatások áttekintése. Nanostrukturált anyagok tulajdonságai és csoportosításuk. Nanorészecskék felhasználása a kémiában és az orvostudományban (szabályozott és célzott hatóanyag leadás, tumorelles szerek, nanorészecskék felhasználása az orvosi diagnosztikában és képalkotásban).

*Irodalom / Literature:*

Nanoseparations: strategies for size and/or shape-selective purification of nanoparticles, B Kowalczyk, I Lagzi, BA Grzybowski, Current Opinion in Colloid & Interface Science 16 (2), 135-148

A DNA-based method for rationally assembling nanoparticles into macroscopic materials, CA Mirkin, RL Letsinger, RC Mucic, JJ Storhoff, Nature 382 (6592), 607

Scanometric DNA array detection with nanoparticle probes, TA Taton, CA Mirkin, RL Letsinger, Science 289 (5485), 1757-1760

### **Nanotechnológia laboratórium / Nanotechnology Laboratory (0/0/3/f/4)**

Tárgyfelelős / Responsible lecturer: Krafcsik Olga

A tárgy célja a nanotechnológia területén használt előállítási technológiák és vizsgálati módszerek elvi és gyakorlati szintű, az alkalmazási lehetőségekre is kiterjedő megismerése. A hallgatók egy egy miniprojekt keretében csatlakoznak egy technológiai laboratóriumi gyakorlathoz. A projektek nanoszerkezetek előállításából (pl. nanoáramkör gyártása elektronsugár-litográfiával), illetve az előállított nanoszerkezet mikroszkópiai vizsgálatából (pl. pásztázó elektronmikroszkópia, atomerőmikroszkópia, Raman mikroszkópia, stb) tevődnek össze. A hallgatók a témavezetővel konzultálva előzetes projekttervet készítenek, a félév során önállóan dolgoznak a projekten, és az eredményekről egy félévközi előrehaladási jelentés, majd egy projektjelentés keretében számolnak be.

This laboratory course provides a practical insight to state-of-the-art nanofabrication, and nanoscale characterization techniques. The students accomplish a technological laboratory process in the framework of miniprojects. All miniprojects consist of two fundamental ingredients: (i) the fabrication of nanostructures (e.g. the production of nanocircuits by electron beam lithography), (ii) the microscopic

characterization of the produced nanostructures by advanced methods (e.g. scanning electron microscopy, atomic force microscopy, Raman microscopy, etc.). Relying on the guidance of a chosen tutor, the students prepare an initial project plan, they work independently on the project, and they account on their work in a midterm progress report and in a final project report.

### **Trendek a nanotechnológiában / Trends in Nanotechnology (2/0/0/f/2)**

Tárgyfelelős / Responsible lecturer: Csonka Szabolcs

A tárgy a nanotechnológia legújabb eredményeibe, és a nanotechnológiában használt legmodernebb mérés- és gyártástechnikákba nyújt betekintést meghívott szakértők előadásai alapján. Tervezett témakörök: mikro- és nanomechanikai rendszerek; pásztázó szondás méréstechnikák; félvezető nanoszerkezetek; nanobioszenzorika; nanoinformatika, stb.

The courses provides insight to the most up-to-date results and the state of the art measurement and fabrication techniques in the field of nanotechnology. The selected topic (like micro-and nanomechanical systems, scanning probe techniques, nanobiosensors, semiconductor nanostructures, nanoinformatics, etc.) are presented by invited experts of the field.

### **Kvantumszámítógép-architektúrák / Quantum Computing Architectures (2/0/0/v/3)**

Tárgyfelelős / Responsible lecturer: Pályi András

Kvantumbitek alapjai: dinamika, mérés, műveletek, áramkörök, algoritmusok. Kvantumrendszerek vezérlése: modell-Hamilton-operátoroktól a logikai műveletekig. Elektronspin-alapú kvantumbitek. Elektronspin koherens vezérlése és kiolvasása. Elektronspin információvesztési mechanizmusai. Bevezetés a szupravezetésbe, Josephson-effektus. Szupravezető kvantumbitek vezérlése és kiolvasása.

Szupravezető kvantumbitek információvesztési mechanizmusai. Áramkörök kvantum-elektrodinamikája. Összefonódás szupravezető kvantumbitekben. Többkvantumbites eszközök. Aktuális kutatási irányok áttekintése.

## Kvantumrendszerek fizikája tárgycsoport

### **Statisztikus fizika 2 / Statistical Physics 2 (2/1/0/v/5)**

Tárgyfelelős / Responsible lecturer: Zaránd Gergely

Critical phenomena: scaling and critical exponents, fundamentals of renormalization group, correlation functions and Ginzburg criterion. Time-dependent correlations: equilibrium correlations, classical fluctuations, Onsager relation. The density operator, Neumann equation, entropy. Kubo formula, fluctuation dissipation theorem. Non-equilibrium dynamics: Brown motion, diffusion, Langevin equation, Fokker Planck equation. Master equation, H theorem, principle of maximal entropy. Detailed balance and Monte Carlo simulations. Simulated annealing. Interacting quantum systems: Superfluidity, Gross-Pitaevskii equation, quantum gases.

Optional subject: High temperature expansion, Fermi liquid theory.

Literature:

Kertész János, Zaránd Gergely, Deák András: Statisztikus Fizika jegyzet; David Chandler: Introduction to Modern Statistical Physics

### **Soktestprobléma / Many-Body Physics (3/1/0/v/6)**

Tárgyfelelős / Responsible lecturer: Dóra Balázs

Second quantization, definition of Green's functions and their relations to physical quantities. Heisenberg, Schrödinger and interaction pictures. Perturbation theory, diagrammatics (Wick's theorem, Feynman diagrams), resummations (self energy, vertex function, skeleton diagrams), equation of motion method. The ground state energy of dense, interacting electron gas. Friedel oscillations around a charged impurity. Anderson's orthogonality catastrophe and Fermi edge singularity. RKKY interaction between localized magnetic moments. Mean-field theory of two dimensional antiferromagnets.

Literature:

G.D. Mahan: Many-Particle Physics (Plenum Press, New York and London, 1981); A.A. Abrikosov, L.P. Gorkov and I. Dzialoshinskii: Methods of Quantum Field Theory in Statistical Mechanics (1963)

### **Soktestprobléma 2 / Many-Body Physics 2 (2/1/0/v/4)**

Tárgyfelelős / Responsible lecturer: Dóra Balázs

Imaginary time formalism, Matsubara frequencies. Finite temperature Green's functions. Diagrammatic rules, self-energy, Dyson equation. Expressing physical quantities in terms of Green's functions. Lehmann representation, linear response theory. Discussion of the finite temperature interacting electron gas, screening, ring diagrams, interaction correction to the equation of state of an electron gas. Superconductivity at finite temperatures within mean-field theory, normal and anomalous Green's functions. Gap equation and its solution at  $T=0$  and around the transition temperature, density of states, spectral function.

Literature: G.D. Mahan: Many-Particle Physics (Plenum Press, New York and London, 1981); A.A. Abrikosov, L.P. Gorkov and I. Dzialoshinskii: Methods of Quantum Field Theory in Statistical Mechanics (1963)

### **Részecskefizika (2/1/0/v/5)**

Tárgyfelelős / Responsible lecturer: Takács Gábor

Overview of scales in Nature. Special relativity. Classification of particles. Klein-Gordon and Dirac equations. Introduction to weak interactions. Beta decay, neutrino. Parity and CP violation. CPT symmetry. Introduction to strong interactions. Isospin, strangeness. SU(3) quark model. Relativistic field theory, canonical formalism, Noether theorem. Basic principles of quantum field theory. Feynman rules. Weak interactions: charged currents, FCNC and GIM mechanism. Flavour mixing. Neutrino oscillations. Non-Abelian gauge theories. Fundamentals of quantum chromodynamics. Spontaneous



symmetry breaking, Goldstone theorem. Higgs mechanism. Electroweak unification. The Standard Model. The Higgs boson. Overview of latest developments and open problems in particle physics.

Literature: David Griffiths: Introduction to Elementary Particles (Wiley-VCH); electronic lecture notes.

### **Kvantumtérelmélet / Quantum Field Theory (3/2/0/v/7)**

Tárgyfelelős / Responsible lecturer: Takács Gábor

Canonical quantisation. Quantised Klein-Gordon and Dirac fields. Spin-statistics theorem. Interacting fields. CPT theorem. Scattering theory and the S-matrix. Unitarity and microcausality. Perturbation theory, Feynman rules for correlation functions. Asymptotic states. Feynman rules for the S matrix. Cross sections and decay rates. Quantisation of the electromagnetic field. Gauge invariance. Kallen-Lehmann representation, sum rules. LSZ reduction formulae. Feynman path integral in Hamiltonian and Lagrangian formalism. Functional formalism. Grassmann variables and path integrals for fermions. Renormalisation theory. Classification of divergences, counter term formalism. Symmetries and Ward identities. Spontaneous symmetry breaking. Renormalisation group, Callan-Symanzik equation. Connection with theory of critical phenomena.

Literature: M.E. Peskin and D.V. Schroeder: An Introduction to Quantum Field Theory (Addison-Wesley); C. Itzykson and J-B. Zuber: Quantum Field Theory (Dover Publications); S. Weinberg: The Quantum Theory of Fields I-III (Cambridge University Press)

### **Egydimenziós rendszerek fizikája / The Physics of One-Dimensional Systems (2/0/0/v/3)**

Tárgyfelelős / Responsible lecturer: Zaránd Gergely

A kurzus az egydimenziós kölcsönható elektron és spin rendszerek fizikájába vezeti be a hallgatókat. Ezek a rendszerek, amelyekben olyan alapvető jelenségek, mint pl. a spin- és töltéssűrűség hullámok, antiferromágneses korrelációk, egzotikus szupravezető állapotok stb. fordulnak elő, kiváló gyakorlóterepet biztosítanak a szilárdtest fizikusoknak, mivel egy dimenzióban rendkívül hatékony kvantum térelméleti módszerek állnak rendelkezésre. Ugyanakkor ilyen egydimenziós rendszerek gyakran megfigyelhetők a valóságban is például szén nanocsövekben, kvázi- egydimenziós rendszerekben, élőállapotok formájában. A kurzus feltételezi a Green függvény technika alapvető ismeretét (Soktestprobléma I), és a következő témakörök köré szerveződik: a természetbeli egydimenziós rendszerek és a Hubbard modell (instabilitások, spin- és töltéssűrűség hullámok, leképezés a Heisenberg modellre), spinláncok alapvető tulajdonságai (a Haldane sejtés, spin koherens állapotok, spin folyadékok, a Bethe Ansatz alapjai), a folytonos leírás (renormálási csoport és a Tomonaga-Luttinger modell), bozonizáció (spin-töltés szeparáció, a Luttinger folyadék fázis, spin rendszerek bozonizációja), a rendezetlenség szerepe.

Irodalom: G.D. Mahan: Many-Particle Physics (Plenum Press, New York and London 1981); John Cardy: Scaling and Renormalization in Statistical Physics (Cambridge University Press 1997); Jan von Delft, Herbert Schoeller: Bosonization for Beginners-Refermionization for Experts, Annalen Phys. 7, 225-305

### **Statisztikus térelmélet / Statistical Field Theory (2/1/0/v/4)**

Tárgyfelelős / Responsible lecturer: Takács Gábor

Second order phase transitions. Field theoretic description of the Ising model in d dimensions. Renormalisation group, fixed points, classification of couplings. Landau-Ginsburg description. Wilson's RG in field theory, beta function. Idea of epsilon expansion. Conformal field theory in d dimensions. Conformal symmetry, energy-momentum tensor, scaling fields. Conformal Ward identities. 2 and 3 point functions. Conformal symmetry in 2 dimensions. Primary and quasi-primary fields, Ward identity. Energy-momentum tensor, Ward identity and its relation to the free energy. Virasoro algebra. Operator-state correspondence. Correlators of descendent fields from Ward identities. Highest weight representations. Verma modules. Singular vectors. Minimal models. Operator product expansion in minimal models. Modular invariance and partition functions. Operator product coefficients and conformal bootstrap. Vicinity of critical point. C-theorem. Perturbative RG flows.

Literature: G. Mussardo: Statistical Field Theory (Oxford University Press); C. Itzykson and J-M. Drouffe: Statistical Field Theory (Cambridge University Press); P. Ginsparg: Applied Conformal Field Theory (arXiv:hep-th/9108028)

**Haladó kvantumtérelmélet / Advanced Quantum Field Theory (2/1/0/v/4)**  
Tárgyfelelős / Responsible lecturer: Takács Gábor

This course builds upon the course Quantum Field Theory and discusses advanced topics such as (i) renormalization group and scaling; (ii) role of symmetries and their breaking, (iii) advanced functional techniques, non-perturbative methods and their applications, (iv) effective action, effective potential and (v) instantons and quantum tunneling.

Literature: M.E. Peskin and D.V. Schroeder: An Introduction to Quantum Field Theory (1995, Addison-Wesley); C. Itzykson and J-B. Zuber: Quantum Field Theory (2006, Dover Publications); S. Weinberg: The Quantum Theory of Fields I-III (1995, 1996, 2000, Cambridge University Press)

**Véletlen mátrix elmélet és fizikai alkalmazásai / Random matrix theory and physical applications (2/0/0/v/3)**

Tárgyfelelős / Responsible lecturer: Varga Imre

Random matrix theory provides an insight of how one can achieve information relatively simply about systems having very complex behavior. The subject based on the knowledge acquired in quantum mechanics and statistical physics together with some knowledge of probability theory provides an overview of random matrix theory. The Dyson ensembles are defined with their numerous characteristics, e.g. the spacing distribution, the two-level correlation function and other quantities derived thereof. Then the thermodynamic model of levels is obtained together with several models of transition problems using level dynamics. Among the physical applications the universality classes are identified in relation to classically integrable and chaotic systems. The problem of decoherence is studied as well. Then the universal conductance fluctuations in quasi-one-dimensional disordered conductors are investigated. Other models are investigated: the disorder driven Anderson transition and the random interaction model of quantum dot conductance in the Coulomb-blockade regime. We use random matrix models to investigate chirality in two-dimensional and Dirac systems and the normal-superconductor interface. The remaining time we cover problems that do not belong to strictly physical systems: EEG signal analysis, covariance in the stock share price fluctuations, mass transport fluctuations, etc.

Literature: M.L. Mehta: Random matrices (Elsevier, 2004); válogatott review cikkek: Th. Guhr, A. Müller-Groeling, H.A. Weidenmüller, Phys. Rep. 299 (1998) 198; C.W.J. Beenakker, Rev. Mod. Phys. 69 (1997) 731; Y. Alhassid, Rev. Mod. Phys. 72 (2000) 895; G. Montambaux, in *Les Houches, LXIII 1995 Quantum Fluctuations*, etc.

**Kvantumoptika / Quantum Optics (2/1/0/v/3)**

Tárgyfelelős / Responsible lecturer: Takács Gábor

The course is an introduction to quantum optics. The topics covered are:

Coherence in classical optics. Radiative transitions in quantum matter, atoms and semiconductors. Photodetection, photon statistics, super- and sub-Poissonian light. Hanbury-Brown and Twiss interferometry, photon antibunching. Coherent and squeezed states, Wigner functions. Resonant light-atom interaction, density states, Rabi oscillation. Atoms in cavities, Purcell effect, strong coupling. Cold atoms, Bose condensation, optical lattices. Quantum cryptography and quantum information. Entanglement, quantum teleportation, Bell inequalities.

Literature: Quantum Optics: an Introduction, Mark Fox, OXFORD MASTER SERIES IN PHYSICS, Oxford University Press 2006, ISBN-13: 978-0-19-856673-1 OP

### **Kvantumösszefonódás / Quantum entanglement (2/0/0/v/3)**

Tárgyfelelős / Responsible lecturer: Lévay Péter

A tárgy célja a kvantumösszefonódás bemutatása véges dimenziós Hilbert tereken, ahol geometriai megközelítéssel az elvont fogalmak szemléletessé tehetőek. Témakörök: a felhasznált információelméleti, konvex-geometriai fogalmak bevezetése, diszkrét valószínűségeloszlások jellemzése (entrópiák) és rajtuk végzett műveletek (sztochasztikus leképezések), állapotok tere (projektív Hilbert tér és sűrűségmátrixok konvex tere), kvantumállapotok jellemzése (entrópiák) és rajtuk végzett műveletek (teljesen pozitív leképezések), kvantummérés (Schrödinger macskája), összetett rendszerek és összefonódás, műveletek (kvantum-teleportálás), összefonódott állapotok osztályozásai (általános megfontolások, LOCC, SLOCC, 2 és 3 qubit eredmények), összefonódási kritériumok (witness-operátorok, CHSH-Bell-egyenlőtlenségek) és mértékek (általános megfontolások, 2 és 3 qubit eredmények).

The aim of this course is the presentation of quantum entanglement on finite dimensional Hilbert spaces that help the understanding of abstract notions. Topics: introduction of the applied information theoretic and convex-geometrical concepts, characteristics of discrete probability distributions, (entropies) and the operations on them (stochastic mapping), the space of states (projective Hilbert space and the space of convex density matrices), characterizing quantum states (entropies) and the operations on them (totally positive mapping), quantum measurements (Schrödinger's cat), compound systems and entanglement, operations (quantum teleportation) classification of entangled states (general arguments, LOCC, SLOCC, 2 and 3 qubit results), entanglement criteria (witness-operators, CHSH-Bell inequalities), entanglement measures (general arguments, 2 and 3 qubit results).

*Irodalom / Literature:*

I. Bengtsson, K Zyczkowski, Geometry of Quantum States, Cambridge University Press, Cambridge, 2006

M. Nielsen, I Chuang, Quantum Information and Quantum Computation, Cambridge University Press, Cambridge, 2000

### **Kvantumrendszerek koherens kontrollja / Coherent control in quantum systems (2/0/0/v/3)**

Tárgyfelelős / Responsible lecturer: Kis Zsolt (Varga Imre)

Atomi átmenetek csatolása elektromágneses térrel. Kétszintes rendszerek: Rabi oszcilláció, analitikusan megoldható modellek. Sokszintes, degenerált energianívójú atomok koherens kontrollja. Robusztus kontroll mechanizmusok: adiabatikus populációtranszfer. A kvantumkontroll alkalmazása a kvantuminformatikában. Maxwell-Bloch egyenletek. Lineáris szuszceptibilitás. T1 és T2 idő mérése. Rezonáns nemlineáris optika: elektromágnesesen indukált transzparencia, koherens foton-memória. Molekulák rezgési állapotának koherens kontrollja.

Atomic transitions coupled to electromagnetic field. Two-level systems: Rabi oscillation, analytically solvable models. Coherent control of atoms with many nondegenerate levels. Robust control mechanisms: adiabatic population transfer. Application of quantum control in quantum information theory. Maxwell-Bloch equations. Linear susceptibility. Measurement of T1 and T2 times. Resonant nonlinear optics: electromagnetically induced transparency, coherent photon-memory. Coherent control of molecular vibrational states.

*Irodalom / Literature:*

Bruce W. Shore: The Theory of Coherent Atomic Excitation;

Marlan O. Scully and M. Suhail Zubary: Quantum Optics;

William H. Louisell: Quantum Statistical Properties of Radiation;

Claude Cohen-Tannoudji, Jacques Dupont-Roc, Gilbert Grynberg: Atom-Photon Interactions

## Statisztikus fizika tárgycsoport

### **Statisztikus fizika 2 / Statistical physics 2 (2/1/0/v/5)**

**Tárgyfelelős / Responsible lecturer: Zaránd Gergely**

A kurzus az alábbi témákból ad áttekintést: Kritikus jelenségek: skálázás és kritikus exponensek, a renormalizációs csoport alapjai, korrelációs függvények, Ginzburg-kritérium. Idő függő korrelációk: egyensúlyi korrelációk, klasszikus fluktuációk, Onsager-relációk. A sűrűség operátor, Neumann-egyenlet, entrópia. Kubo-formula, fluktuáció disszipáció tétel. Nemegyensúlyi dinamika: Véletlen bolyongás, diffúzió, Langevin-egyenlet, Fokker-Planck-egyenlet. Master egyenlet, H-tétel, maximális entrópia elve. Részletes egyensúly és Monte Carlo szimulációk. Szimulált hűtés. Kolcsosható kvantum rendszerek: Szuperfolyékonyság, Gross-Pitaevskij-egyenlet, kvantum gázok

The course gives an overview of the following subjects: Critical phenomena: scaling and critical exponents, fundamentals of renormalization group, correlation functions and Ginzburg criterion. Time-dependent correlations: equilibrium correlations, classical fluctuations, Onsager relation. The density operator, Neumann equation, entropy. Kubo formula, fluctuation dissipation theorem. Non-equilibrium dynamics: Brown motion, diffusion, Langevin equation, Fokker-Planck equation. Master equation, H theorem, principle of maximal entropy. Detailed balance and Monte Carlo simulations. Simulated annealing. Interacting quantum systems: Superfluidity, Gross-Pitaevskii equation, quantum gases.

### **Fázisátalakulások és kritikus jelenségek / Phase Transitions and Criticality (2/1/0/v/5)**

**Tárgyfelelős / Responsible lecturer: Zaránd Gergely**

A kurzus egy áttekintést nyújt a statisztikus fizika, kvantummechanika, nemegyensúlyi statisztikus fizika fázisátalakulási és kritikus problémáiból. Az érintett témák a következők: Átlagtér elmélet, kritikus exponensek, Ginzburg-kritérium, alsó kritikus dimenzió, Goldstone-módus, Hubbard-Stratonovics-transzformáció, kontínuum elmélet, Goldstone-módus nagy N határeset, A renormalizáció alapjai: az egy dimenziós Ising-model decimációja, magasabb dimenziók, kritikus pont, két dimenziós Ising-model, az általánosított transzformáció, fix pontok, kritikus felületek, releváns és irreleváns operátorok, a szabadenergia kritikus skálázása, univerzális exponensek a skálafüggvény korrelációs függvénye, véges méret skálázás, kvantum kritikus rendszerek, az egy dimenziós Ising-lánc esete, kvantum-klasszikus megfeleltetés, magasabb dimenziós fázis diagrammok, Szuperfolyékonyság és az XY modell, vortexek és a Kosterlitz-Thouless fázisátalakulás, Felület durvulás, Family-Vicsek skálázás

The course gives a small overview of major phase transition problems and critical systems in equilibrium statistical physics, in quantum mechanics and non-equilibrium statistical physics. Subests include: Mean field theory, critical exponents, Ginzburg criterion, Lower critical dimension, Goldstone modes. Hubbard-Stratonovic transformation, continuum theory, Goldstone modes large N limit, The Basics of renormalization: decimation the one dimensional Ising model, higher dimensions and critical point. The two-dimensional Ising case: the generalized transformation, fixed points, critical surface, relevant and irrelevant operators. Critical scaling all the free energy, universal exponents, correlation functions of scaling operators. Finite size scaling Quantum critical systems: discussion of the one-dimensional Ising chain. Quantum classical mapping, higher dimensional phase diagrams. Super fluidity and the XY model. Vortices and Kosterlitz-Thouless phase transition. Surface roughening Family-Vicsek scaling

Irodalom / Literature:

John Cardy: Scaling and Renormalization in Statistical Physics (Cambridge University Press, 1996).  
Subir Sachdev, Quantum Phase Transitions, Cambridge University Press (2011).

### **Rendezetlen rendszerek / Disordered systems (2/1/0/v/5)**

**Tárgyfelelős / Responsible lecturer: Zaránd Gergely**

A rendezetlenség mindenhol jelen van és csodálatos jelenségek okozója. A kurzus a következő témákat érinti: Strukturális rendezetlenség: fraktálok, folyadékok, üvegek, kvázikristályok, amorf fémek, szemcsés anyagok, Edwards sokaság, perkoláció. Rendezetlen mágneses rendszerek: hiszterézis, memória effektusok, Preisach-model. Mozgó doménfal: átlagtér elmélet, Barkhausen-zaj, rendezetlen ferromágnesek Griffith-fázis, Frusztrált spin rendszerek és spinüvegek: fenomenológia, Sherrington-

Kirkpatrick-model, TAP egyenlet, replika és replika szimmetria sértés, droplet elmélet. Lokalizáció elmélet: endezetlen félvezetőkészennyezett sávok, lokalizációs átmenet és Anderson-elmélet, a lokalizáció skálaelmélete. Coulomb-üveg: A Bose-üveg, Fisher-skálázás és erős rendezetlen fix point.

Disorder is present everywhere around us, and it leads to fascinating phenomena. This course covers the following topics: Structural disorder: Fractals, liquids, glasses, quasicrystals, amorphous metals, granular materials, Edwards ensemble. Percolation. Disordered magnetic systems: Hysteresis, memory effects, and Preisach model. Domain wall motion: mean field theory, Barkhausen noise. Disordered ferromagnets and Griffith phase. Frustrated spin systems and spin glasses: phynomenology, Sherrington-Kirpatrick model, TAP equations. Replicas, and replica symmetry breaking. Droplet theory. Localization theory: Disordered semiconductors and impurity bands. Localization transition and Anderson's theory. The scaling theory of localization. The Coulomb glass. Critical wave function and multifractal properties. Quantum Hall effect. Quantum glasses: The Bose glass. Fisher scaling and the strong disorder fixed point.

*B. Kramer, A. MacKinnon review Rep. Prog. Phys. 56, 1469 (1993).*

### **Statisztikus térelmélet / Statistical field theory (2/0/0/v/3)**

Tárgyfelelős / Responsible lecturer: Takács Gábor

A tantárgy bevezetést nyújt a relativisztikus kvantumtérelmélet statisztikus rendszerekre történő alkalmazásaiba. A fő témakörök a következők:

Kritikus jelenségek, skálázás, skálainvariancia. Térelméleti leírás alapjai. Skálainvariancia, konform szimmetria tetszőleges dimenzióban. Két-dimenziós konform térelméletek. Virasoro algebra. Operátorok osztályozása, operátor-állapot megfeleltetés. Állapottér és partíciós függvény. Operátoralgebra. Korrelációs függvények konform térelméletekben. A kritikus pont környezetének leírása. Renormálási csoport folyamok. Releváns és irreleváns perturbációk. Megmaradó mennyiségek. Integrálható kvantumtérelméletek. Analitikus S-mátrix elmélet, bootstrap. Form faktorok és korrelációs függvények integrálható kvantumtérelméletekben. Véges méret effektusok leírása. Termodinamikai Bethe Ansatz és csonkolt állapottér módszer. Nemintegrálható modellek.

The course is an introduction to applications of relativistic quantumfield theory in statistical systems. Main topics are: Critical phenomena, scaling, scale invariance. Fundamentals of field theoretic description. Scale invariance and conformal symmetry in arbitrary dimensions. Two-dimensional conformal field theories. Virasoro algebra. Operator classification, state-operator correspondence. State space and partition function. Operator algebra. Correlation functions in conformal field theories. Vicinity of critical points. Renormalization group flows. Relevant and irrelevant perturbations. Conserved quantities. Integrable quantum field theories. Analytic S-matrix theory, bootstrap. Form factors and correlation functions in integrable quantum field theories. Finite size effects. Thermodynamic Bethe Ansatz and truncated statespace method. Non-integrable models.

*Irodalom / Literature* Mussardo: Statistical Field Theory, Itzykson-Drouffe: Statistical Field Theory

### **Dinamikai rendszerek / Dynamical systems (3/1/0/v/5)**

Tárgyfelelős / Responsible lecturer: Gergely Barnabás

Folytonos és diszkrét idejű dinamikai rendszerek, folytonos versus diszkrét: követőfüggvény, diszkretizáció.

Egyensúlyi helyzetek lokális elmélete: Grobman–Hartman lemma, stabil-instabil-centrális sokaság, Poincaré normálforma. Attraktorok, Ljapunov-függvények, LaSalle-elv, fázisportré.

Strukturális stabilitás, egyensúlyi helyzetek/fixpontok és periodikus megoldások elemi bifurkációi, bifurkációs görbék biológiai modellekben. Sátor és logaritmikus függvények, Smale-patkó, szolenoid: topológiai, kombinatorikus, mértékelméleti tulajdonságok. Káosz a Lorenz-modellben.

This course deal with the following topics: dynamical systems with continuous and discrete time, Grobman-Hartman lemma, stable-instable-central ensemble, Poincaré normal formulae, attractors, Ljapunov functions, LaSalle principle, phase portrait, Structural stability, bifurcations of equilibrium

and fix points, bifurcation curves in biological models, Tent and logarithmic functions, Smale horseshoe, solenoid: topological, combinatorial, measure theoretical properties, Chaos in the Lorentz model

*Irodalom / Literature:* P. Glendinning: Stability, Instability and Chaos, Cambridge University Press, Cambridge, 1994; C. Robinson: Dynamical Systems, CRC Press, Boca Raton, 1995; S. Wiggins: Introduction to Applied Nonlinear Analysis and Chaos, Springer, Berlin, 1988

### **Evolúciós játékelmélet / Evolutionary game theory (2/0/0/v/3)**

Tárgyfelelős / Responsible lecturer: Szabó György (Szunyogh László)

A tantárgy a Fizika alapképzési (BSC) szakon megszerezhető statisztikus fizika ismeretekre építve ad egy általános bevezetést a sokszereplős evolúciós játékelméletbe. Az előadássorozat a következő témakörök tárgyalására épül: Klasszikus játékelméleti fogalmak (stratégia, nyereség, mátrix játék, Nash-egyensúly, stb.); Populációs játékelmélet; Evolúciós játékok rácsokon és gráfokon, Dinamikus párközelítés kiterjesztése. Érdekes jelenségek sokaságát elemezzük az evolúciós Fogolydilemma és Kő-Papír-Olló játékok példáján különböző kapcsolatrendszerek feltételezése mellett.

This course gives an introduction to the multi-agent evolutionary games building on statistical physics knowledge gained while earning a BSC degree in Physics. The following topics are discussed: Concepts of traditional game theory (strategy, payoff, matrix game, Nash equilibrium, etc.); Evolutionary games with population dynamics; Evolutionary games on lattices and graphs; Generalization of dynamical pair approximation. Many interesting phenomena are described by considering the repeated multiagent Prisoner's Dilemma and Rock-Scissors-Paper games for different connectivity structures.

*Irodalom / Literature:* Karl Sigmund: Az élet játéka (Akadémiai Kiadó, Budapest, 2003); J. Hofbauer and K. Sigmund: Evolutionary Games and Population Dynamics (Cambridge University Press, 1998); G. Szabó and G. Fáth: Evolutionary games on graphs, cond-mat/0607344.

### **Komplex hálózatok / Complex networks (2/0/0/v/3)**

Tárgyfelelős / Responsible lecturer: Török János

A kurzus célja, hogy betekintést nyújtson a komplex hálózatok gyorsan fejlődő interdiszciplináris területébe. Tárgyalt témakörök: Komplex rendszerek. Perkoláció elmélet. Erdős-Rényi és kis-világ gráfok. Skálafüggetlen hálózatok. A konfigurációs modell. Hálózatnövekedési modellek. Lokális és hierarchikus struktúrák. Közösségek. Terjedés. Időbeli hálózatok. Szociális hálózatok. Gazdasági hálózatok. Projekt bemutatás.

The aim of the course is to give an introduction to the rapidly developing interdisciplinary field of complex networks. Topics to be discussed: Complex systems and their scaffold. Percolation theory. Erdős-Rényi and small world graphs. Scale free networks. The configuration model. Networks growth models. Local and hierarchical structures. Communities. Spreading. Temporal networks. Social networks. Economic networks. Ecological networks. Project presentation.

*Irodalom / Literature:* A.-L. Barabási: Linked (2002), M. E. J. Newman: Networks: An introduction (2010)

### **Mesterséges intelligencia az adattudományban / Artificial intelligence in data science (1/2/0/v/5)**

Tárgyfelelős / Responsible lecturer: Török János

A kurzus célja, hogy egy gyakorlat orientált bevezetést adjon a neurális hálózatok és más adattudományban használt klasszifikációs eljárásokba. A cél a módszerek matematikai és statisztikai problémáinak megértése. A következő témaköröket érintjük: képszekvenciálás, döntési fák, véletlen erdők, mély tanulás, backpropagation, magasabb szintű implementációk (tensorflow, sklearn, keras), konvolúciós neurális hálózatok, előtanított modellek, szöveges adatok, idősorok, játékmódell.

The aim of the course is to give a practice oriented introduction to neural network and other classification methods used in data science with the aim to understand the underlying mathematical and statistical problems. The covered subjects are: Image segmentation, Decision tree, Random forest, Deep learning, backpropagation, Higher level implementations (tensorflow, sklearn, keras), Convolutional neural networks, Pre trained models, Textual data, Sequential data, Game models

## Optika tárgycsoport

### **Fizikai optika / Physical Optics (2/1/0/v/5)**

Tárgyfelelős / Responsible lecturer: Koppa Pál

A kurzus célja a fényterjedés különböző modelljeinek bevezetése és azok használatának elsajátítása az alapvető optika jelenségek leírására. A tárgy a klasszikus elektromágneses hullámelmélet alapján bemutatja a homogén izotróp és anizotróp közegben történő terjedést, az optikai vékonyrétegeket, a dielektrikum hullámvezetőket, a fotonikai kristályokat, a geometriai optikai közelítést és a Fresnel-Kirchhoff féle diffrakcióelméletet.

The main goal of the course is to introduce modern light propagation models and to practice their use for the description of basic optical phenomena. Based on the classical electromagnetic wave theory the following topics are discussed: propagation in homogenous isotropic and anisotropic media, optical thin films, dielectric waveguides, geometrical optics and Fresnel-Kirchhoff diffraction theory.

*Irodalom / Literature:* Richter Péter: Bevezetés a Modern Optikába, I. kötet (Műegyetemi Kiadó), Solymár László: Elektromágneses térelmélet és alkalmazásai (Műszaki Könyvkiadó), Born–Wolf: Principles of Optics (Pergamon Press), Saleh–Teich: Fundamentals of Photonics (John Wiley & Sons).

### **Lézerfizika / Laser physics (2/0/0/v/3)**

Tárgyfelelős / Responsible lecturer: Maák Pál

A tantárgy a Lézertechnika tárgy folytatása. Félklasszikus és kvantumos lézerméletek. Másod harmonikus keltés. Nemlineáris polarizáció, fázisillesztés, parametrikus oszcilláció. Ultrarövid impulzusok. Módusszinkronizálás, impulzusösszenyomás, csörpölt tükrök. Szállérezek, optikai szolitonok. Hangolható ultrarövid impulzusok. Impulzusformálás. TW-os ultrarövid és attosec impulzusok. Ultrarövid impulzusok mérése.

This course is the continuation of the Laser technique course. Semi-classical and quantum theory of the laser. Frequency and bandwidth of the laser modes. Second harmonic generation, non-linear polarization, phase matching, parametric oscillation. Ultra short pulses. Mode synchronization, pulse compression, chirped mirrors. Fiber lasers and solitons. Tunable ultra short pulses. Pulse shaping. Generation and measurement of TW ultra short and attosec pulses.

*Irodalom / Literature:*

Bevezetés a modern optikába, III. kötet, 050393 számú jegyzet;

O. Svelto, Principles of lasers, Springer 1998 (4. kiadás);

W. Demtröder: Laser Spectroscopy, Vol 2: Experimental Techniques, Springer 2008 (4. kiadás)

### **Optoelektronikai eszközök / Optoelectronic devices (2/0/0/v/3)**

Tárgyfelelős / Responsible lecturer: Barócsi Attila

A tantárgy a Fizika alapképzési (BSc) szakon megszerezhető szilárdtestfizika és optika ismeretekre építve a modern optoelektronikai eszközök felépítését és működését mutatja be a következő témakörök tárgyalásával: radiometriai és fotometriai alapok, fény-anyag kölcsönhatás és félvezető fényforrások, külső fotoeffektuson alapuló detektorok, félvezető fotodetektorok, mátrix detektorok, térbeli fénymodulátorok, speciális felépítésű (elektro-, akusztó-, nemlineáris optikai) eszközök.

This course describes the principles and operation of modern optoelectronic devices built on knowledge in solid state physics and optics gained during a BSc study in Physics. The following topics are discussed: foundations of radiometry and photometry, light-matter interaction and semiconductor light sources, external photoeffect based detectors, semiconductor photon detectors, matrix detectors, spatial light modulators, special architecture (electro-, acousto- and nonlinear optical) devices.

*Irodalom / Literature:* Saleh-Teich: Fundamentals of Photonics 2nd Edition (ISBN 978-0-471-35832-9, John Wiley, 2007), Safa Kasap: Optoelectronics & Photonics: Principles & Practices: International Edition 2nd Edition (ISBN 9780273774174, Pearson, 2013).



## **Optikai anyagok és technológiák / Optical materials and technologies (3/0/0/v/5)**

Tárgyfelelős / Responsible lecturer: dr. Kocsányi László

E tárgy a mesterszakon (MSc) vehető fel és egy két féléves tárgy első részét képezi. Ebben, az első félévben az elektromágneses fényelmélet és a szilárdtestfizika eredményeire alapozva megismertetjük a hallgatóságot a fény és anyag közötti kölcsönhatás gyakorlati hasznosításaival. Tárgyaljuk a tömbi optikai elemek (lencsék, prizmák, tükrök stb.) előállítására, a különböző hullámhossztartományokban (ultraibolya, látható, infravörös) alkalmazható izotrop alap- és segédanyagok (üvegek, műanyagok, fémek stb.) legfontosabb tulajdonságait. Ismertetjük előállítási technológiáikat, így a legfontosabb felületkialakító eljárásokat (csiszolás, polírozás, tisztítás stb.) és azok eszköz rendszerét végül megadjuk az egyes elemek gyártásához szükséges technológiai lépéssorokat. Összefoglaljuk a legfontosabb minősítési módszereket. Konkrét esettanulmányokat mutatunk be és üzemet látogatunk azzal a céllal, hogy hallgatóink az alapos elvi ismeretek mellett gyakorlati tapasztalatot is szerezzenek az elterjedtebb tömbi optikai eszközök kivitelezéséről és gyártásáról.

This is the first part of a two-semester MSc course. Based on electromagnetic light theory and solid state physics we make students acquainted with the practical application of the light-matter interaction. The characteristics of most important isotropic optical materials (glasses, plastics, metals, etc.) of bulk optical elements applicable in the UV, visible and infrared wavelength region will be discussed. We introduce students to the production technologies and tools, including the manufacturing of surfaces (cutting polishing grinding etc.) and to complete series of technological steps of the fabrication of different bulk devices. We summarize the most important quality measuring methods and devices. We discuss special case studies and visit an optical workshop with the purpose to make candidates qualified for the speculative production of simple bulk optical elements.

*Irodalom / Literature:* Kocsányi László-Várkonyi Sándor: Optikai anyagok és technológiák, A „Bevezetés a modern optikába II”. kötetének (Megyetemi Kiadó, 1988, szerk. Richter Péter) 5. fejezete, Born M., Wolf E.: Principles of Optics, Pergamon Press 1959; Pohl, R.W.: Optik und Atomphysik, Springer Verlag, Berlin-Göttingen-Heidelberg, 1963; Joseph H. Simmons, Kelly S. Potter: Optical Materials, Academic Press, 2000, Horne, D.F.: Optical Production Technology, Adam Hilger 1983, ISBN 0-85274-350-5.

## **Optikai jelfeldolgozás és adattárolás / Optical information processing and data storage (2/0/0/v/3)**

Tárgyfelelős / Responsible lecturer: Maák Pál

A tantárgy a BSc Fizika I-II. és az Optika tárgy keretében megszerezhető ismeretekre építve a betekintést nyújt a klasszikus és a modern optikai kép és adatfeldolgozási technikák és rendszerek világába. Bemutatja a koherens és nemkoherens optikai képfeldolgozás, kiértékelés és összehasonlítás lehetőségeit, valamint a feladatra kidolgozott számos rendszer elvét, előnyeit, hátrányait és paramétereit. A klasszikus jelfeldolgozás továbbfejlődésének eredményeként részletesen bemutatja az optikai adattárolás, optikai számítógépek, és optikai radar-rendszerek elvét, a működő rendszereket és az ezekhez felhasznált általános célú eszközöket: akusztó-optikai, magneto-optikai és elektrooptikai eszközöket, valamint a különböző térbeli fénymodulátorokat és optikai kapcsolókat. A tárgy része a modern ultrarövid impulzusú lézerek technológiájának és szerteágazó felhasználhatóságának bemutatása is.

This course is based on the knowledge gained in the BSc physics courses and in the Optics course. Students get a detailed overview of the classical and modern optical image and information processing methods and systems. The course starts from the classical coherent and incoherent image processing, correlating and comparison techniques, giving a detailed description of the many different systems developed for this purpose, including their physical basis, parameters, advantages and limitations. As a result of further development started from the classical information processing, new applications of the former techniques are presented in detail: optical data storage, optical computing and optical radar systems. Basic building blocks, like acousto-optic, magneto-optic, electro-optic devices, whereas different SLM-s, optical switches and scanners are treated in detail. The technology and broad application area of ultrashort pulsed lasers is also part of this course.

*Irodalom / Literature:* S. H. Lee, et al. Optical Information Processing, S. H. Lee, editor, Springer-Verlag, New York, 1981, J. W. Goodman, Introduction to Fourier Optics, J. (2. nd. Edition), McGraw-Hill, 1996, N. J. Berg, editor, Acousto-Optic Signal Processing, Marcel Dekker Inc., New York, 1983, Saleh, Bahaa E. A. / Teich, Malvin Carl Fundamentals of Photonics Wiley Series in Pure and Applied Optics. 2. Edition – 2007, International Trends in Applied Optics Editor(s): Arthur H. Guenther ISBN: 9780819445100 2002.

### **Optikai mérés technika / Optical Metrology (2/0/0/v/3)**

Tárgyfelelős / Responsible lecturer: Kornis János

A tantárgy célja áttekintést adni az optikai mérés technika módszereiről és ismertetni a legújabb eljárásokat és eredményeket. Témakörök: Optikai mérőrendszerek elemei. Fényforrások, detektorok, rögzítőanyagok. Optikai elemek sajátosságainak mérés technikája. Szög-, hosszúság-, párhuzamosság mérése klasszikus optikai és koherens optikai módszerekkel. Heterodin és fázistolásos interferometria. Holografikus és szemcsekép interferometria. Digitális holográfia. Optikai adatfeldolgozási módszerek a szemcsekép mérés technikában. Fotoelaszticitás. Fényvezetőszál érzékelők. Szín mérés, színes detektáláson alapuló mérés technika.

The goal is to present an overview of the methods of optical metrology and present the most recent techniques and results. Topics: Elements of the optical measuring systems. Light sources, detectors, recording materials. Measurement of optical properties of the optical elements. Measurement of angle, length, and flatness by classical methods and using coherent optics. Heterodyne and phase stepping interferometry. Holography and speckle metrology. Digital holography. Application of optical signal processing in speckle metrology. Photo elasticity. Optical fiber sensors. Color measurement, optical metrology based on detection in different colors.

*Irodalom / Literature:* K. J. Gastvik: Optical Metrology, John Wiley&Sons, New York 1995, R.J. Keyes: Optical and infrared detectors, Springer Verlag 1980, R. S. Sirohi: Optical Components, Techniques, and Systems in Engineering, John Wiley&Sons, New York 1992.

### **Optikai tervezés / Fundamentals of optical design (2/2/0/v/6)**

Tárgyfelelős / Responsible lecturer: Erdei Gábor

A tárgy az Alkalmazott fizika BSc képzésben megszerzett optikai alapismeretekre építve mutatja be az optikai elven működő leképező rendszerek tervezésének fogalom- és modellrendszerét, a szokásos minősítési módszereiket és a fontosabb leképező eszközök működési elvét. A tárgy keretén belül a hallgatók megismerik az optikai tervezőprogramok lehetőségeit és elsajátítják alapszintű használatukat, valamint gyakorolják a tervezési folyamat egyes lépéseit. A teljesség igénye nélkül foglalkozunk továbbá a gyártási hibák hatásának figyelembevételével és megismerkedünk a lencserendszerek foglалástechnikájának alapfogalmaival.

Based on the fundamental knowledge in optics obtained while earning the Applied physics BSc degree, this course describes the concepts and models used for designing optical imaging systems, presents their usual evaluation methods and the theory of operation of the most significant imaging devices. In the frame of this course students discover the possibilities of optical design software and learn their usage on a basic level, as well as practice the steps of the design process. Though incompletely, we also deal with taking into account the effects of fabrication errors, and learn the basic concepts of lens mounting techniques.

*Irodalom / Literature:* Erdei G., „Az optikai tervezés alapjai – órai jegyzet” – kötelező / obligatory, W. J. Smith, „Modern Optical Engineering”, McGraw-Hill – ajánlott / optional, J. W. Goodman, „Introduction to Fourier Optics”, McGraw-Hill – ajánlott / optional, Richter P., „Bevezetés a Modern Optikába I.-II.”, Műegyetemi kiadó – ajánlott / optional.

### **Fényforrások / Light sources (2/0/0/v/3)**

Tárgyfelelős / Responsible lecturer: dr. Kocsányi László

A fizikus mesterszakon (MSc) előadásra kerülő tárgy célja, hogy megismertesse a különböző szakirányok hallgatóit a fényforrások különböző típusaival, azok működési elvével, sajátosságaival és alkalmazási területeivel. A félév során áttekintjük az ismert fotometriai és világítástechnikai mennyiségeket és azok mérési módszereit, valamint a fénykeltő eszközök fejlődését az izzólámpáktól a kisülő lámpákon keresztül egészen a LED-ekig. A tárgy célja az alapvető fizikai folyamatok bemutatása mellett az is, hogy megismertesse a hallgatókat az egyes lámpatípusok előnyeivel, hátrányaival és lehetséges alkalmazási területeivel.

The goal of the course is to introduce physicist-, electrical engineer- and chemical engineer students to the science and technology of light sources. The thematic includes the overview of the usual photometric parameters, the survey of the development of lamps from incandescent light sources, through discharge lamps to LEDs, the basic physical processes, and the comparison of the advantages, disadvantages and possible fields of application of different lamp types.

*Irodalom / Literature:* Debreczeni G., Kardos F., Sinka J.: Fényforrások, Műszaki Könyvkiadó, Budapest, 1985, Elenbaas, W.: Light sources, Macmillan, 1972, Cayless, M.A., Marsden, A. M.: Lamps and Lighting, Arnold, 1997.

### **ELI előkészítő laboratórium / ELI Preparatory Laboratory (0/0/4/f/4)**

Tárgyfelelős / Responsible lecturer: dr. Maák Pál

A tárgy célja a hallgatók felkészítése a modern optikai mérésekből, korszerű mérés technológiák és mérőeszközök megismerése, illetve kezelésének elsajátítása. Emellett a legújabb optikai és lézertechnológiai jellegű kutatási témákkal is megismerkednek a hallgatók, amelyek műveléséhez a legmodernebb optikai eszközökre van szükség: femtoszekundumos lézerekre, erősítőkre, Terahertz forrásokra, nemlineáris optikai elemekre, adaptív optikai eszközökre; és az ezekhez kapcsolódó diagnosztikára: interferométerek, spektrométerek, autokorrelátor. A tárgy megalapozza többek között az ELI szuperlézer-kutatóközpontban folyó kutatás-fejlesztési feladatokban való sikeres, aktív részvétel lehetőségét, mind az intézet fejlesztési, mind üzemelési fázisában.

The task of this laboratory course is to give preparation for the students in modern optical metrology by learning the handling of modern measuring instruments and building optical setups. These laboratory exercises are related to the newest research topics in the field of laser technology and photonics. The practices are performed on modern and expensive instruments and tools: femtosecond lasers, amplifiers, Terahertz sources, nonlinear optical materials, adaptive optical system, and the characterization tools needed for high power or ultrashort pulsed laser radiation: interferometers, spectrometers, autocorrelators, frequency resolved optical gating instrument. The course provides the basic skills needed for a successive participation in the research and development topics at Hungarian laser institute, the ELI-ALPS facility.

*Irodalom / Literature:* Wolfgang Demtröder: Laser Spectroscopy Vol. 2., Springer, 2008, B.E.A. Saleh et al: Fundamentals of Photonics 2-nd ed., Wiley, 2007.

### **Lézerek és lézerrendszerek tervezése és építése / Design and Construction of Laser Systems (2/0/0/f/3)**

Tárgyfelelős / Responsible lecturer: dr. Maák Pál

1. Lézerfizikai ismételtes: koherens erősítés indukált emisszióval, lézerek felépítése, jellemzők. 2. Az erősítő közeg tervezésének alapjai általánosan, szilárdtest, folyadék és gázhalmazállapotú erősítő közegek. 3. Szilárdtest erősítő részletes elemzése, összetételek, kristálytani orientáció, geometriák - termikus viszonyok elemzése a különböző geometriai viszonyok esetén. 4. Az erősítő kristályok befoglalásának és termikus kezelésének gyakorlati megvalósításai, vékonylemez és vékony rúd lézerek, tervezőprogramok alkalmazása a termikus és mechanikai stabilitás elérésére. 5. Az erősítő közegben fellépő nemlineáris effektusok befoglalása a tervezésbe, a termikus, optikai és nemlineáris effektusok együttes hatása szerint az erősített sugárzás számítása. 6. Rezonátorok felépítése, geometriai tervezés a stabilitás számítására három dimenzióban, alapvető rezonátor-konfigurációk kiépítése, tervezése

specifikus tervezőprogrammal. 7. Ultrarövid impulzusok létrehozásának feltételei, passzív móduscsatolás gyakorlati megvalósítása, konfigurációk. Tipikus impulzusparaméterek. 8. Gyakorlati rezonátor, erősítő és pumpálási konfigurációk elemzése az impulzusparaméterek szempontjából, tipikus Z-konfiguráció tervezése Ti:zafir lézerben. SESAM és csörpölt tükrök, elérhető impulzusparaméterek. 9. Ultrarövid impulzusok erősítése, regeneratív illetve multipassz erősítők tervezési szempontjai, tipikus gyakorlati konfigurációk. Az erősítőkben fellépő nemlineáris hatások, csörp és zajok becsülésének módszerei. 10. CPA erősítés elve és gyakorlati megvalósításai, stretcher és kompresszor konfigurációk, tervezési szempontok. Dazzler elve, alkalmazása. 11. Parametrikus erősítés elve, anyagok, elérhető paraméterek, tervezési szempontok. NOPCPA konfigurációk. 12. Fázis-vivó stabilizált impulzusok létrehozása, az oszcillátor és erősítő tervezése, kontraszt, tisztítás. 13. Lézerdiódák fajtái, diódapumparendszerek tervezése. 14. Szállérezek tervezési szempontjai, szálerősítők alkalmazása nagy impulzusenergiákra.

This course deals with the design and construction of laser oscillators and amplifiers, mainly based on solid state (crystal) amplifier material, bad gas amplifiers, fiber lasers and semiconductor laser diodes are also overviewed. Detailed design description is given for cw, Q-switched and mode-locked solid state laser design, including amplification optimization, thermal analysis, cooling techniques and pumping geometries. We also treat amplifiers: regenerative and multipass arrangements including advanced configurations like innoslab and thin disk amplifier techniques. Special section is devoted to amplification of ultrashort pulses, chirped pulse amplification, stretching and compressing of these pulses, design of the dispersion management and pulse shaping techniques. Here we introduce methods for carrier envelope phase stabilization and generation of special waveforms, frequency combs. An other discussed topic is parametric amplification where obtainable parameters, techniques, design conditions are treated. The course gives advanced preparation for laser specialists at both engineering and research level.

*Irodalom / Literature:*

W. Köchner: Solid State Laser Engineering, Springer London, Limited, 2006

R. Paschotta: Encyclopedia of Laser Physics and Technology, John Wiley & Sons, 2008

S. Watanabe: Ultrafast Optics V, Springer, 2007

### **Infravörös és Raman spektroszkópia / Infrared and Raman Spectroscopy (2/0/2/v/6)**

Tárgyfelelős / Responsible lecturer: Dr. Richter Péter

Elektromágneses sugárzás és anyag kölcsönhatása: abszorpció, emisszió, szórás. Infravörös abszorpció és Raman-szórás molekulákban, rezgési átmenetek. A kiválasztási szabályok kapcsolata a molekulaszimmetriával. Infravörös és Raman-gerjesztések szilárd testekben. Rácsrezgések és alacsony energiás elektronátmenetek tárgyalása a dielektromos formalizmus segítségével. Csatolt elektron-fonon gerjesztések. Lgy: Az FTIR módszer alapjai, instrumentális jelalak, apodizáció, fáziskorrekción, zero-filling. mFényforrások, monokromátorok, detektorok jellemzői. Abszorpciós és reflexiós alpmérések, a dielektromos függvény meghatározása. Fázisátalakulások spektroszkópiai követése. Kvalitatív és kvantitatív analízis. Infravörös mikroszkópia

Interaction of electromagnetic radiation and matter: absorption, emission, scattering. Infrared absorption and Raman-scattering in molecules, vibrational transitions. Connection between selection rules and molecular symmetry. Infrared and Raman excitations in solids. Discussion of lattice vibrations and low energy electronic transitions using the dielectric formalism. coupled electron-phonon excitations. Foundations of the FTIR method instrumental lines-shape, apodization, phase correction, zero filling. Properties of light sources, monochromators, detectors. Absorption and reflection measurements, determination of the dielectric function. Following phase transitions by spectroscopy. Qualitative and quantitative analysis. Infrared microscopy.

*Irodalom / Literature:* P.R. Griffiths, J.A. De Haseth: Fourier Transform Infrared Spectrometry, Wiley-Interscience, 2007, D.A. Long: Raman spectroscopy, McGraw-Hill, 1977

### **A fotonika alapjai / Fundamentals of Photonics (2/1/0/v/5)**

Tárgyfelelős / Responsible lecturer: dr. Barócsi Attila

A kurzus célja, hogy általános optikai ismeretekre támaszkodva megismertesse a hallgatót a modern fotonika rohamosan bővülő területével. A fotonika mindinkább előtérbe kerül olyan alkalmazásokban, ahol az elektronikai eszközök elérik sebesség és sávszélesség korlátaikat. A kurzus szemléletesen, a legszükségesebb matematikai, fizikai és optikai alapokkal igyekszik áttekinteni a fotonikai eszközöket, bemutatva azok működését és alkalmazását.

Based on general knowledge in optics, the course aims at getting students familiarized with the rapidly expanding field of modern photonics. Photonics is advancing into the forefront of applications where electronic devices approach their speed and bandwidth limits. The course expressively, recalling only the necessary mathematic, physical and optical tools, reviews the photonic devices describing their operation and illustrating their application.).

*Irodalom / Literature:*

S.O. Kasap: Optoelectronics and Photonics: Principles and Practices, 2nd Edition (2013) Pearson, ISBN: 0-13-215149-9

B.E.A. Saleh, M.C. Teich: Fundamentals of Photonics, 2nd Edition (2007) John Wiley & Sons, ISBN: 978-0-471-35832-9

### **Kvantumoptika / Quantum Optics (2/1/0/v/5)**

Tárgyfelelős / Responsible lecturer: dr. Takács Gábor

A tantárgy bevezetést nyújt a kvantumoptikába. A fő témakörök a következők: Koherencia a klasszikus optikában. Sugárzási átmenetek kvantumos anyagban, atomokban és félvezetőkben. Fotodetektálás, fotonstatisztikák, szuper- és szub-Poisson-statisztikájú fény. A Hanbury-Brown és Twiss-kísérlet, foton antibunching. Koherens és összenyomott állapotok, Wigner-függvények. Rezonáns atom-fény kölcsönhatás, sűrűségoperátor, Rabi-oszcilláció. Atomok rezonátorban, Purcell-effektus, erős csatolás. Hideg atomok, Bose-kondenzáció, optikai rácsok. Kvantumkriptográfia és kvantuminformatika. Összefonódás, kvantumteleportáció, Bell-egyenlőtlenségek.

The course is an introduction to quantum optics. The topics covered are: 1. Coherence in classical optics 2. Radiative transitions in quantum matter, atoms and semiconductors 3. Photodetection, photon statistics, super- and sub-Poissonian light 4. Hanbury-Brown and Twiss interferometry, photon antibunching 5. Coherent and squeezed states, Wigner functions 6. Resonant light-atom interaction, density states, Rabi oscillation 7. Atoms in cavities, Purcell effect, strong coupling 8. Cold atoms, Bose condensation, optical lattices 9. Quantum cryptography and quantum information 10. Entanglement, quantum teleportation, Bell inequalities

*Irodalom / Literature:*

Quantum Optics: an Introduction, Mark Fox, OXFORD MASTER SERIES IN PHYSICS, Oxford University Press 2006, ISBN-13: 978-0-

### **Lézerek ipari és biológiai alkalmazásai/ Industrial and Biological Applications of Lasers (2/0/0/v/3)**

Tárgyfelelős / Responsible lecturer: dr. Maák Pál

A tantárgy átfogó képet nyújt a lézerek alkalmazási területeiről, a lézertechnikán alapuló változatos műszerek és berendezések sokaságáról. A tárgy tematikája: Ipari lézeralkalmazások, bevezetés és jellemzés: anyagmegmunkálással és nem anyagmegmunkálással járó alkalmazások. Lézer-anyag kölcsönhatások, anyagok és lézerek jellemzői. Anyagfelületek lézeres megváltoztatása: hőkezelés, felületátolvasztás, felületedzés, felületek bevonása, felületötvöztetés, felületiszilárdítás és tisztítása. Lézeres térfogati megmunkálások. Anyageltávolítás: fúrás, vágás, karcolás, jelölés, hegesztés, trimmelés. Anyagmegmunkálással nem járó alkalmazások: vonal- és szintkitűzés, hossz- és távolságmérés, vonalkód leolvasás, gyors prototípusgyártás. Lézerek alkalmazása felületek minőségének és alakjának mérésére, reflexión és szóráson alapuló felületminőség mérés, letapogatásos interferometrikus kiolvasású felületmérés (Talysurf), atomerő-mikroszkópia. Interferometria alkalmazása felületek minőségének és alakjának mérésére, alacsony koherenciájú interferometria,

tipikus alkalmazások és műszerek. Lézeralapú technikák a félvezetőiparban. Lézeres mikroszkópia az iparban és orvostudományban, fluoreszcens és reflexiós konfokális mikroszkópia, optikai koherencia tomográfia, fajtái és alkalmazásai. Kétfoton mikroszkópia elve, technikai alapjai. Lézerek alkalmazása diagnózis és terápia készítésében. Lézerfény szöveti kölcsönhatásai. Lézeres diagnózis módszerei. Lézeres sebészet előnyei és hátrányai. Daganatok lézeres kezelése. Speciális lézer-alkalmazások: orvosi holográfia, lézercsipesz, lézere részecskegyorsítás és alkalmazása hadronterápiára, lézeres gyümölcsválogató berendezések, lézerek alkalmazása a műszemlencse-technológiában és fejlesztésben.

The course provides a comprehensive overview of the applications of lasers and a wide variety of instruments and equipment based on laser technology. The topics of the course include: Industrial laser applications, introduction and characterization: material and non-material applications. Laser-material interactions, characteristics of materials and lasers. Laser processing of material surfaces: heat treatment, surface melting, surface hardening, surface coating, alloying, surface hardening and cleaning. Laser volume machining. Material removal: drilling, cutting, engraving, marking, welding, trimming. Non-machining applications: line and level alignment, length and distance measurement, barcode reading, rapid prototyping. Application of lasers to measure surface quality and shape, surface quality measurement based on reflection and scattering, scanning interferometric surface measurement (Talysurf), atomic force microscopy. Application of interferometry to measure surface quality and shape, low coherence interferometry, typical applications and instruments. Laser based techniques in the semiconductor industry. Laser microscopy in industry and medicine, fluorescence and reflection confocal microscopy, optical coherence tomography, types and applications. Principle and technical basis of two-photon microscopy. Use of lasers in diagnosis and therapy. Interaction of laser light and biological tissues. Laser diagnosis methods. Advantages and disadvantages of laser surgery. Laser treatment of tumors. Special laser applications: medical holography, laser tweezers, laser particle acceleration and application for hadron therapy, laser fruit sorting equipment, lasers in artificial intraocular lens technology and development.

*Irodalom / Literature:*

R. Paschotta: Encyclopedia of Laser Physics and Technology, John Wiley & Sons, 2008

Demtröder: Laser Spectroscopy Vol. 1-2, 4. th edition, Springer, 2008;

saját jegyzet Bevezetés a modern

## **Nemlineáris optika alapjai és alkalmazásai / Fundamentals and Applications of Nonlinear Optics (2/0/0/v/3)**

Tárgyfelelős / Responsible lecturer: dr. Papp Zsolt József

Optikai adatátvitel: eikonál-egyenlet, szendvics szerkezet, egy és többmódusú optikai szálak, módusok, diszperzió, energia-viszonyok, száloptikai csatolók, meta-anyagok, csatolt módusok perturbációs elmélete, DFB lézer, szál-lézer, szálerősítők, száloptikai hálózatok, polarizáció-kontroll, egyéb alkalmazások (száloptikai mérések, optikai giroszkóp, stb.) Nemlineáris optika: kristályoptika, nemlineáris (klasszikus) optika, optikai aktivitás elmélete, Jones féle számítás, lineáris- és másodrendű elektrooptikai jelenség (Kerr, Faraday, Zeeman, Cotton-Mouton effektus, stb.), nemlineáris kristályok, másodharmonikus keltés, Maxwell-Bloch egyenletek, forgóhullámú közelítés, inhomogén kiszélesedés, területi elv, önindukált átlátszóság, fázis moduláció, telítődési jelenségek, nemlineáris spektroszkópia, haladó hullámú erősítés, parametrikus folyamatok, önfokuszálás, a nemlineáris impulzusterjedés alapjai, szolitonok, csillapodás, diszperzió, foton-párkeltés. Alkalmazások: kvantumradár, kvantum teleportáció, QKD, CQKD, a foton állapotának mérése, stb.

Optical data transfer: eikonal equation, sandwich structure, single and multimode optical fibers, modes, dispersion, energy relationships, fiber optic couplers, meta-materials, coupled modes, perturbation theory, DFB laser, fiber laser, fiber amplifiers, fiber optics control, other applications (fiber optic measurements, optical gyroscope, etc.) Nonlinear optics: crystal optics, nonlinear (classical) optics, theory of optical activity, Jones calculus, linear and quadratic electro-optical phenomena (Kerr, Faraday, Zeeman, Cotton-Mouton effect), etc.), nonlinear crystals, second harmonic excitation, Maxwell-Bloch equations, rotary wave approximation, inhomogeneous line broadening, self-induced transparency, phase modulation, saturation phenomena, nonlinear spectroscopy, progressing wave amplification, parametric processes, self-focusing, fundamentals of nonlinear pulse propagation, solitons, attenuation,

dispersion, twin photon generation. Applications: quantum eraser, quantum teleportation, QKD, CQKD, photon state measurement, etc.

*Irodalom / Literature:*

Nussbaum & Phillips: Modern optika, Allen & Eberly: Optical resonance and two-level atoms

Mandel & Wolf: Optical coherence and quantum optics

Nussenzweig: Introduction to quantum optics

## Anyagtudományi tárgycsoport

### **Elektron- és ionoptikák / Electron- and ionoptics (2/0/0/v/3)**

Tárgyfelelős / Responsible lecturer: Hárs György

A tárgy anyaga az elektromosan töltött részecskék előállítás, analízis és detektálás folyamatának tárgyalása, az alkalmazási lehetőségek ismertetése. A következő témák kerülnek megtárgyalásra: elektron- és ionforrások; energiaanalizátorok; tömeganalizátorok; általános pályagörbe megfontolások elektromos és mágneses tér jelenlétében; részecskegyorsítók; a tértöltés hatásainak tárgyalása; töltött részecskék detektálási lehetőségei.

The course deals with the discussion of generating, analyzing and detecting charged particles, as well as the overview of the applications is provided. In the course the following subjects are discussed: electron and ion sources, energy analyzers, mass analyzers, general considerations of the trajectories in case of electric and magnetic fields, particle accelerators, space charge effects, detection modes of charged particles.

*Irodalom / Literature:* Hárs György, Fizikai elektronika, (elektron és ionoptikák) Műegy. kiadó 1992, J 05007, Csurgai Árpád, Simonyi Károly, Az információtechnika fizikai alapjai (elektronfizika) Mérnök-továbbképző Intézet 1997, Simonyi Károly, Elméleti villamosságtan Tankönyvkiadó 1973.

### **Szilárdtestek elektromos és optikai tulajdonsága / Electrical and optical properties of solids**

(2/0/0/v/3)

Tárgyfelelős / Responsible lecturer: Gali Ádám

A tantárgy a Fizika alapképzési (BSC) szakon megszerezhető szilárdtestfizika és kvantummechanikai alapismereteket feltételezi. Szemléletesen elmagyarázzuk a szilárdtesteket összetartó különböző erőket, és abból következtetünk a szerkezetükre. Ismertetjük néhány tipikus fém és félvezető elektronszerkezetét, valamint elmondjuk, hogy milyen módszerekkel lehet azt kimérni, illetve kiszámítani. Ismertetjük a félvezetők technológiai definícióját, a vezetési elektron és lyuk fogalmát, valamint azt hogyan lehet kimérni vagy kiszámítani. Evvel kapcsolatban ismertetjük a Bloch-elektronok dinamikájának félklasszikus tárgyalását, és a félvezető eszközök működéséhez szükséges alapismereteket (Fermi-szint, n,p-típusú vezetés, exciton-állapotok). Megtárgyaljuk, hogy a ponthibák hogyan befolyásolják a félvezetőkristályok elektronszerkezetét: adalékolás fogalma, termikus (pont)hibák. Megvizsgáljuk, hogy az alacsonydimenziós rendszerekben hogyan változik meg a sáv szerkezet illetve az állapotsűrűség, valamint összehasonlítjuk a kristályos és amorf anyagok elektronszerkezetét. Végül ismertetjük, hogy az elektromágneses sugárzás hogyan hat kölcsön az anyaggal a fémek, félvezetők, és szigetelők esetén.

This course prescribes the knowledge of fundamental solid state physics and quantum mechanics from BSC education in Physics. In this course it is schematically explained how the structure is formed in different type of solids due to the different type of forces that bind them. The electronic structure of typical metals and semiconductors is reviewed and explained how that can be measured or calculated. The semiconductors are defined from technological point of view. Typical carriers in semiconductors are defined and explained how they can be measured or calculated. The dynamics of Bloch-electrons is reviewed within semi-classical treatment, and the basic definitions needed for understanding the function of semiconductor devices are explained (Fermi-level, n and p-type conduction, excitonic states). It is shown how the point defects influence the electronic band structure of the semiconductors: definition of doping, thermal point defects. The electronic structure and the density of states of low-dimensional systems as well as the amorphous solids are examined. Finally, the interaction of the electromagnetic radiation with the matter is explained for metals, semiconductors and insulators.

*Irodalom / Literature:* Kittel: Bevezetés a szilárdtestfizikába, Sólyom Jenő: A modern szilárdtestfizika alapjai I-II (ELTE Eötvös Kiadó), Deák Péter-Kocsányi László-Giber János: Műszaki Fizika III (BME jegyzet).



### **Vákuumfizika és –technika / Vacuum physics and technology (2/0/0/v/3)**

Tárgyfelelős / Responsible lecturer: Hárs György

Számos mérési technika valamint termelési technológia vákuum környezetet igényel. A berendezések üzemeltetéséhez szükséges a vákuum fizikájának, valamint vákuum létesítésének, fenntartásának és mérésének, azaz a vákuumtechnikának az ismerete. A tárgy keretében ismertetésre kerülnek a gázfázis törvényei, a vákuum fogalma, transzportjelenségek vákuumban, gáznemű és kondenzált anyagok kölcsönhatása, szivattyúk, vákuummérés, lyukkeresés, vákuumtechnikai anyagok.

Vacuum environment is necessary at some of the experimental techniques and manufacturing process. Physics of vacuum as well as the related technological skills (pumping, maintaining and measuring) are needed to operate and to construct vacuum systems. In the course the following subjects are discussed: laws of the gas phase, concept of vacuum, transport phenomena in vacuum, interaction between gaseous and condensed phase, pumps, vacuum measurements, leak testing, materials used in vacuum technology.

*Irodalom / Literature:* Roth, Vacuum technology, Elsevier 1982, Carpenter, Vacuum technology, Hilger Bristol, 1983, Kenczler Ödön, Vákuumtechnika Tankönyvkiadó 1975, J 5-1175.

### **Anyagtudomány Laboratórium / Material Science Laboratory (0/0/3/f/4)**

Tárgyfelelős/Responsible lecturer: Homokiné Dr. Krafcsik Olga

A tárgy célja az anyagtudomány területén az anyagok jellemzésére használt mérési módszerek illetve technológiák elvi és gyakorlati szintű, az alkalmazási lehetőségekre is kiterjedő megismertetése.

Az egyes laboratóriumi gyakorlatok során ismertetésre kerül egy-egy mérési módszer elve, a mintaelőkészítés és -mérés technikai feltételei, valamint a mérésből nyerhető információk és azok kiértékelése. Bemutatásra kerülnek gyakorlati mérési példák és az azokból nyerhető technológiai információk. A laboratóriumi gyakorlat során a hallgatók az egyes részfeladatokat a lehetőségekhez mérten önállóan végzik.

A mérések esetenként egy miniprojekt keretében csatlakozhatnak egy technológiai laboratóriumi gyakorlathoz, így a hallgató a mintakészítéstől a mérés kiértékelésig átfogó képet kaphat az anyagtudomány egy-egy szakterületéről.

A kiválasztott módszerek mindegyikéről az adott témával foglalkozó elismert szakember tart laborgyakorlatot Budapesten, az elérhető legújabb berendezések mellett.

Tervezett témakörök: Rezgési spektroszkópiák, Infravörös spektroszkópia, Raman spektroszkópia, Elektron diffrakció, Röntgen diffrakció, Mag mágneses rezonancia (NMR), Elektron spin rezonancia (ESR), Félvezető szerkezetekkel kapcsolatos mérések.

Az egyes laboratóriumi gyakorlatok időtartama 6 óra, minden második héten.

The goal of the course is an introduction - in the field of materials science - to material characterization measurement methods and technologies on theoretical level and in practice also. On each laboratories a measurement method, technical conditions of sample preparation and measurement, evaluation and informations obtained from measurements will be introduced. Practical measurement examples and technological informations obtained from the measurement will be demonstrated. In the lab, as far as possible, the students perform the sub-tasks independently. In some cases the measurements will be connected to a technological lab by a „miniproject”, in this way students can get an overview from sample preparation to measurement evaluation in a specialization field of materials science.

The chosen methods will be demonstrated by experts in Budapest, on the latest available equipments.

Planned measurements: vibrational spectroscopies, infrared spectroscopy, Raman spectroscopy, Electron diffraction, X-ray diffraction, NMR, ESR, Measurements on Semiconductor structures.

*Irodalom / Literature:* Az egyes laboratóriumi gyakorlatvezetők által mellékelt aktuális segédletek / Actualized Measurement guides and lecture notes according to the laboratory measurement projects

### **A felületfizika alapjai / Fundamentals of Surface Physics (2/0/0/f/3)**

Tárgyfelelős/Responsible lecturer: Homokiné Dr. Krafcsik Olga

A tantárgy célja, hogy az előző félévekben elsajátított fizikai ismeretekre alapozva a hallgatók megismerkedjenek a felületfizikában használatos alapfogalmakkal, alapvető mérés technikákkal és leggyakoribb alkalmazásokkal.

Témakörök: Felületfizika: definíció és jelentőség, Jól definiált felületek, határfelületek és vékonyrétegek előkészítése Vékonyréteg előállítási technológiák, Felületek, határfelületek és vékonyrétegek morfológiája és szerkezete, nukleáció, felületi szerkezet vizsgálati lehetőségei, Adszorpció a szilárdtest felületén: fiziszorpció, kemiszorpció, Tömbi és felületi diffúzió, Felületanalitikai mérési módszerek és összehasonlításuk

The aim of this course is to help BsC students to learn the basic concepts and measurement techniques of surface physics by presenting application examples.

Main topics discussed include: Surface and interface physics: Its definition and importance, Preparation of well-defined surfaces, interfaces and thin films, Morphology and structure of surfaces, interfaces and thin films, nucleation, surface structure measurement techniques, Adsorption on Solid Surfaces, Physisorption, Chemisorption, Work-function and its measurement techniques, Bulk and Surface Diffusion, Surface analytical measurement techniques and their comparison.

*Irodalom / Literature:*

H. Ibach: Physics of Surfaces and Interfaces 2006

H. Lüth: Solid Surfaces, Interfaces and Thin Films

### **Felületfizika és Vékonyrétegek / Surface Physics and Thin Films (2/0/0/f/3)**

Tárgyfelelős / Responsible lecturer: Homokiné Dr. Krafcsik Olga

A tárgy szilárdtestfizikai alapismeretekre és A felületfizika alapjai c. tárgyra építve tárgyalja a felületfizika és vékonyréteg fizika főbb területeit. Részletes tárgyalásra kerül a felületek szerkezetének, elektronszerkezetének leírása. A tárgy foglalkozik a felületi töltésrétegekkel és a kilépési munkával, félvezető/félvezető, félvezető/fém és félvezető/szigetelő határfelületekkel, adhézióval, továbbá a felületi reakciók és transzportjelenségek leírásával.

This course covers the main field of physics of surfaces and thin layers, based on solid state physics fundamentals. A detailed description is given on the structure and electronic structure of surfaces. Space charge region, work function, semiconductor/semiconductor, semiconductor/metal and semiconductor/insulator interfaces, lattice vibrations of surfaces, adhesion, surface reactions and transport phenomena are also discussed.

*Irodalom / Literature:*

F. Bechstedt: Principles of Surface Physics, Springer, 2003

Ibach: Physics of Surfaces and interfaces, Springer, 2006

### **Az anyagtudomány alapjai és alkalmazásai / Basic materials science and its applications (2/0/0/v/3)**

Tárgyfelelős / Responsible lecturer: Dr. Réti Ferenc

A tantárgy célja a modern anyagtudományi alapismeretek elsajátítása és alkalmazása fizika és a mérnöki tudomány különböző területein.

Tárgyalt tématerületek: Anyagtudomány és mérnöki tevékenység. Modern anyagok, a velük szemben támasztott követelmények. Az első és másodrendű kötőerők szerepe az anyagok tulajdonságaiban. A termikus folyamatok jelentősége, termodinamika, termokémia, Hess tétel, Born-Haber ciklus. Kémiai potenciál, egyensúlyi állandó. Reakciósebességi egyenletek. Arrhenius és Eyring egyenlet. A kristályhibák jelentősége a gyakorlatban, pl. az elektromos és mechanikai tulajdonságokban. A kristály hibahelyeinek egyensúlyi koncentrációja. Érzékelők a mérnöki tudományban. Alapelvek, fizikai és kémiai szenzorok. Nyomásérzékelők, hőmérők, nyúlásmérő bélyegek, mágneses érzékelők. Roncsolásmentes anyagvizsgálat. Ultrahangos repedésvizsgálat, röntgenvizsgálat, mágneses elveket

használó vizsgálatok. Konkrét alkalmazási példák. Alternatív energiaforrások és energiahordozók; a kérdéskör ellentmondásai. Hidrogéngazdaság, bioetanol. Tüzelőanyag cellák, mint folyamatos áramforrások.

The scope of this course is to give basic knowledge in modern materials science and its application in selected fields of physics and engineering. Topics treated: Materials science and engineering. Modern materials, requirements during their use. Role of primary and secondary bonds in the properties of materials. Importance of thermal properties, thermodynamics, thermochemistry, Hess law, Born-Haber cycle. Chemical potential, equilibrium constant. Equations of reaction kinetics. Arrhenius and Eyring equations. Importance of crystal defects, e.g. in electrical and mechanical properties. Equilibrium concentration of crystal defects. Sensors in engineering. Principles, physical and chemical sensors. Pressure gauges, thermometers, load cells, magnetic sensors. Non-destructive testing. Ultrasonic crack testing, X-ray testing, magnetic tests. Examples. Alternative energy sources and energy carriers; contradictions. Hydrogen economy, bio-ethanol. Fuel cells as continuous batteries.

*Irodalom / Literature:* Tisza M.: Az anyagtudomány alapjai, Miskolci Egyetemi Kiadó, 2008, P.W. Atkins, Fizikai-kémia, Tankönyvkiadó, 2002, W.D. Callister, Jr.: Materials Science and Engineering, An Introduction, John Wiley and Sons Inc., 6th edition, 2003

### **Fizikai anyagtudomány / Physical materials science (2/0/0/f/3)**

Tárgyfelelős / Responsible lecturer: Dr. Réti Ferenc

A tantárgy az alapképzési (B.Sc.) szakon elsajátított fizika ismeretekre alapozva konkrét példákon keresztül célozza a hallgatók modern anyagtudományi tudásának megszerzését.

A tárgyalt tématerületek: A kémiai kötések szerepe az anyagok tulajdonságaiban. Másodrendű kötőerők. Kristályszerkezet, elemi cella, krisztallográfiai irányok és síkok. Egykristályok, polikristályos anyagok, anizotrópia, nemkristályos anyagok. Polimorfizmus és allotrópia. A szén és szilícium az anyagtudományban. Szén- és szilícium módosulatok, ezek sajátságai. Monomerek, oligomerek, polimerek. A polimerek kémiája, molekulásúly, a molekulák alakja és szerkezete. Kopolimerek. Kristályos polimerek. Polimerek és műanyagok, a műanyagok adalékai. Kompozitok. Diffúziós mechanizmusok. Felületmenti és szemcsehatár diffúzió. Diffúzió ionos anyagokban és polimerekben. Fémek, kerámiák, polimerek mechanikai tulajdonságai, feszültség és rugalmas alakváltozás. Csúszás, plasztikus deformáció. A törés elméleti alapjai, törési mechanizmusok, fáradás, kúszás. Tervezés, kockázatok, biztonsági faktorok. Fázisdiagramok: oldhatósági határ, fázisok, mikroszerkezet, fázisegyensúlyok. A vas-szén rendszer. Fázisátalakulások. Szilárd fázisú reakciók kinetikája fémötvözetekben. Olvadás, kristályosodás és üvegesedés polimerekben. Elektron- és ionvezetés, szilárdtestek sáv szerkezete, elektronmozgékonyosság, fémek ellenállása. Félvezetők. Ionvezető kerámiák és vezető polimerek, dielektrikumok. A korrózió jelensége. Az anyagok mágneses tulajdonságai.

The course – basing on the knowledge of physics obtained during B.Sc. - through examples gives knowledge in modern materials science. Topics treated: Role of chemical bonds in materials properties. Secondary bonds. Crystal structure, unit cell, crystallographic directions and planes. Single crystals, polycrystalline materials, anisotropy, non-crystalline materials. Polymorphism and allotropy. Carbon and silicon in materials science. Carbon and silicon allotropes, their properties. Monomers, oligomers, polymers. Chemistry of polymers, molecular weight, shape and structure of molecules. Copolymers. Crystalline polymers. Polymers and plastics, additives. Composites. Diffusion mechanisms. Surface and grain boundary diffusion. Diffusion in ionic materials and polymers. Mechanical properties of metals, ceramics and polymers, stress and elastic strain. Slip, plastic deformation. Theoretical base of cracking, mechanisms, fatigue, creep. Planning, risks, security coefficients. Phase diagrams: solubility limit, phases, microstructure, phase equilibria. C – Fe system. Phase transformations. Mechanism of solid phase reactions in metal alloys. Melting, crystallisation and glass transition in polymers. Electronic and ionic conduction, band structure of solids, electron mobility, resistance of metals. Semiconductors. Ion-conducting ceramics and conducting polymers, dielectrics. The phenomenon of corrosion. Magnetic properties of materials

*Irodalom / Literature:* W.F. Smith, J. Hashemi: Foundations of Materials Science and Engineering, McGraw-Hill, Third edition 2004., W.D. Callister, Jr.: Materials Science and Engineering, An Introduction, John Wiley and Sons Inc., Sixth edition, 2003.

## **Mikro- és nanotechnológiák (2/0/0/f/3)**

Tárgyfelelős: Dr. Kiss Gábor

Mikrotechnológia, nanotechnológia és molekuláris nanotechnológia definíciója, összehasonlítása, egymáshoz való viszonya. A technológia feltételei. Mikro- és nanofizika. Vékonyrétegek leválasztására alkalmas módszerek: fizikai rétegleválasztási módszerek (vákuumpárolgatás, lézerablációs párolgatás, molekulásugaras epitaxiás rétegnövesztés, porlasztás), kémiai rétegleválasztási módszerek (kémiai gőzfázisú leválasztás, kémiai folyadékfázisú leválasztás). Adalékolás (diffúzió, ionimplantáció). Litográfia (foto, röntgensugaras, elektronsugaras, ionsugaras). Rétegtávolítási technológiák: nedves "kémiai" marás, száraz marás (plazma, ionsugaras). Réteginősítési eljárások: röntgendiffrakció, transzmissziós elektronmikroszkópia, pásztázó elektronmikroszkópia, szekunder ion tömegspektrometria, röntgen fotoelektron-spektroszkópia, Auger elektronspektroszkópia, pásztázó alagútmikroszkópia, atomerő mikroszkópia. Vastagréteg technológia: szitanyomtatás, beégetés, vastagréteg paszták. Nanométeres eszközök, mikro-elektromechanikai rendszerek, molekuláris nanotechnológia.

Definition, comparison of microtechnology, nanotechnology and molecular nanotechnology. Conditions of the technology. Micro- and nanophysics. Methods of thin film deposition: physical methods (vacuum evaporation, laser ablation evaporation, molecular beam epitaxy, sputtering), chemical methods (chemical vapour deposition, chemical solution deposition). Doping (diffusion, ion implantation). Lithography (photo-, X-ray, electron / ion beam lithography). Layer removing technologies: wet „chemical” etching, dry etching (plasma, ion beam). Layer examination methods: XRD, TEM, SEM, SIMS, XPS, STM, AFM. Thick layer technologies: screen printing, burning, pastes. Nanoscale devices, micro-electromechanical systems, molecular nanotechnology.

*Irodalom / Literature:* Mojzes I.: Mikroelektronika és elektronikai technológia. Műszaki Könyvkiadó, 1995., C.Y.Chang and S.M.Sze (Ed.): VLSI Technology, McGraw Hill, 1996., R. Waser (Ed.): Nanoelectronics and information technology, Wiley-VCH, 2003.

## **Trendek az anyagtudományban / Trends in materials science (1/0/0/v/2)**

Tárgyfelelős / Responsible lecturer: Dr. Kiss Gábor

A tárgy célkitűzése az anyagtudományi eljárások, az anyagtudomány előtt álló feladatok és lehetőségek, a nemzetközi és a hazai piac elvárásainak megismertetése meghívott szakértők előadásai alapján, amelyeket a tárgy koordinátorainak előadásai fognak egybe. Alapvetően az anyagtudomány és a modern élet kapcsolatának, az anyagtudomány fontosságának megismertetése a fő szempont. Kiemelten szerepelnek az anyag- és energiatakarékos eljárások tömbi anyagokban, ötvözés, fémes, nem fémes és kompozit szerkezetű anyagok, korrózió, speciális követelmények félvezető anyagokkal szemben, műanyagok, szerves- és biológiai anyagok stb. A tárgy tematikája rugalmasan tartandó. Előadások felsorolása: A nanotudomány gondjai, Fémes nanokompozitok, Nanotechnológia mikrorendszerekben, Vékonyrétegek, Mechanikai ötvözés és alkalmazásai különös tekintettel a nanoszerkezetű anyagok előállítására, Félvezetők, Emissziós anyagok, A fényforrás technológia és anyagtudományi vonatkozásai, Szilárd elektrolit kondenzátorok, Integrált optika és alkalmazásai, Oxid félvezető alapú gázszenzorok.

The goal of this course is to give knowledge on the materials science processes, the tasks and possibilities of the materials science, the requirements of the national and international market on the basis of the lectures given by invited lecturers, coordinated by the lectures of the coordinator. The main point of view is to demonstrate the connection of modern life to the materials science, to present its importance. Topics of special interest: material- and energy-economic processes in bulk, alloying, metallic, non metallic and composite structural materials, corrosion, special requirements towards semiconductors, plastics, organic and biomaterials etc. The thematic is flexible. The lectures: Problems of the nanoscience, Metallic nanocomposites, Nanotechnology in microsystems, Thin layers, Mechanical alloying and its application with special regard on the preparation of nanostructured materials, Semiconductors, Emission materials, Technological and materials science aspects of light sources, Solid electrolyte capacitors, Integrated optics and its applications, Oxide semiconductor based chemical gas sensors.

## **Spektroszkópia és anyagszerkezet / Spectroscopy and structure of matter (2/0/0/v/3)**

Tárgyfelelős / Responsible lecturer: Richter Péter

A tantárgy a B.Sc. képzés során szerzett alapismereteket (közegek elektrodinamikája, kvantummechanika, csoportelmélet, statisztikus fizika, optika, optikai mérés technika) a spektroszkópia anyagvizsgálatra és szerkezetkutatásra való felhasználása szempontjából rendszerezi. A tárgyalt módszerek elsősorban optikai szerkezetvizsgálati eljárások (infravörös és látható/UV abszorpciós és reflexiós spektroszkópia, Raman-szórás, ellipszometria, optikai rotációs diszperzió, cirkuláris dikroizmus), de szó lesz a belső héjak, valamint az atommag gerjesztéseinek néhány esetéről is (röntgen-, fotoelektron-spektroszkópia, Mössbauer-spektroszkópia). A cél, hogy a hallgató a szerzett ismeretanyag felhasználásával adott feladatokra ki tudja választani az optimális spektroszkópai eljárást, és értelmezni tudja a kapott eredményeket.

This course organizes the knowledge obtained during the BSc training (electrodynamics of media, quantum mechanics, group theory, statistical physics, optics, optical measurement techniques) regarding the use of spectroscopy in materials characterization and structure elucidation. The methods covered are mainly optical techniques (infrared and visible/UV absorption and reflectance spectroscopy, Raman scattering, ellipsometry, optical rotation dispersion, circular dichroism) but other topics, as excitations of inner shells (X-ray and photoelectron spectroscopy, Mössbauer spectroscopy) will also be mentioned. The purpose of the course is to prepare the students to decide which spectroscopic methods to use for a given specific problem, and to be able to basically interpret the results.

*Irodalom / Literature:* Kamarás Katalin: *Spektroszkópia és anyagszerkezet*. Bevezetés a modern optikába V. kötet, 11. fejezet, szerkesztő: Richter Péter, Műegyetemi Kiadó, 2000, G. R. Fowles: *Introduction to Modern Optics*. Dover, 1989, F. Wooten: *Optical Properties of Solids*. Academic Press, 1972, H. Kuzmany, *Solid State Spectroscopy, an Introduction* Springer, Berlin, Heidelberg, 1998.

## Nukleáris technika tárgycsoport

### **Atomenergetikai alapismeretek / Basics of atomic energetics (BMETE80BE02 3/2/0/f/5)**

Tárgyfelelős / Responsible lecturer: Szieberth Máté

Előadás: az atomenergetika története. Reaktorfizikai, reaktorteknikai alapok. A reaktor hőtechnikájának alapjai. Sugárvédelmi alapok. Az atomerőmű felépítése és berendezése, atomerőművek nukleáris biztonsága, nagy atomerőmű-balesetek. Az atomerőművek környezeti hatásai. Az atomerőművi villamosenergia-termelés gazdaságossága. Az atomerőmű helye az együttműködő villamosenergia-rendszerben, atomenergia-rendszerek.

Gyakorlat: reaktorfizikai számítások: sokszorozási tényező, reaktivitás, neutronfluxus, kétszerezési idő, konverziós tényező, xenonmérgezettség számítása. Hőtechnikai számítások: teljesítménysűrűség (térfogati, felületi, lineáris), hőmérséklet-eloszlás, remanens hő számítása. Sugárvédelmi számítások: felezési vastagság, felezési felületi sűrűség meghatározása, dozimetria számítások. Villamosenergia-egységköltség számítása.

Lecture: history of nuclear energy. Bases of reactor physics and reactor techniques. Bases of reactor heat techniques. Bases of radiation protection. Construction and equipment of NPPs, safety, accidents. Environmental effects. Economy of nuclear electricity production. Position of nuclear energy in the cooperative electricity system, nuclear systems.

Practice: reactor physical calculations: multiplication factor, reactivity, neutron flux, doubling time, conversion factor, xenon poisoning. Heat technical calculations: power density, temperature distribution, remanent heat calculation. Radiation protection calculations: half-thickness, dosimetry calculations. Calculation of production costs.

*Irodalom / Literature:* Dr. Csom Gyula: Atomerőművek üzemtana I. kötet: A reaktorfizika és –technika alapjai, Műegyetemi Kiadó, 1997, Dr. Csom Gyula: Atomerőművek üzemtana II. kötet: Energetikai reaktorok üzemtana I. és II. rész, Műegyetemi Kiadó, 2005.

### **Atomerőművek / Nuclear Power Plants (BMETE80MF14 3/1/0/v/5)**

Tárgyfelelős / Responsible lecturer: Aszódi Attila

II., III. és IV. generációs atomerőművek bemutatása. Különböző típusú atomerőművek elvi hőkapcsolási sémáinak összehasonlítása, primer és szekunder körű főberendezések és rendszerek részletes bemutatása. A primer és szekunder körben jelentkező korróziós és eróziós folyamatok, primer és szekunder körű vízüzem alapelvei, gyakorlati megvalósítása. Levegőtisztító- és szellőző rendszerek. Technológiai berendezéseket befogadó épületek és helyiség-rendszerek. Vezénylőterem kialakítása, az ergonómiai és a balesetkezelési szempontok érvényesítése. A villamos berendezésének kiépítésének speciális szempontjai. Különböző típusú üzemi és üzemzavari hűtőrendszerek. Az atomerőmű-telepítés szempontjai.

Introduction of Gen. II, III and IV reactors. Comparison of thermal circuit schemes of different NPP types, introduction of primary and secondary side systems and components. Corrosive and erosive processes in the primary and secondary circuits, theory and implementation of primary and secondary side water chemistry. Air filtering and venting systems. Buildings and rooms receiving technology equipment. Build-up of the control room, implementation of ergonomic and accident management aspects. Special aspects of electric systems' construction. Different types of operational and emergency cooling systems. Aspects of NPP siting.

*Irodalom / Literature:* Büki Gergely: Erőművek, Műegyetemi Kiadó, Budapest, 2004, T.H. Margulova: Atomerőművek, Műszaki Könyvkiadó, Budapest, 1977.

## **Atomerőművi anyagvizsgálatok / Material Testing in Nuclear Power Plants (BMETE80MFA3**

2/0/0/v/3)

Tárgyfelelős / Responsible lecturer: Aszódi Attila

Nyomottvízes atomerőművek primer és szekunder köri főberendezéseinek ellenőrzési módszerei, vizsgálati eljárások, hibadetektálási technikák. Reaktortartály vizsgálatok. Gőzfejlesztő vizsgálati módszerek. Vizuális vizsgálati módszerek, manipulációs technikák, telemechanika alkalmazása atomerőművi környezetben. Speciális módszerek az alak- és mérethelyesség ellenőrzésére. Friss és kiégett fűtőelem kötegek vizsgálata (tömörség vizsgálatok, termohidraulikai ellenőrzések, tomográfias eljárások). Radioaktív hulladékot tartalmazó konténerek vizsgálati módszerei. Nukleáris anyagvizsgálati módszerek (pl. radiográfia, tomográfia).

Inspection methods of primary and secondary side main equipments of PWR power plants. Testing methods, fault detecting techniques. Testing methods of reactor pressure vessel and steam generator. Visual inspection methods, manipulation techniques, application of telemechanics. Special methods for checking the shape- and size adequacy. Inspection of fresh and irradiated fuel bundles (tightness testing, thermal hydraulic investigation, tomography methods). Inspection methods for radwaste containers. Nuclear material testing methods (radiography, tomography etc.).

## **Atomerőművi kémia / Chemistry in Nuclear Power Plants (BMETE80MFAH 2/1/0/f/4)**

Tárgyfelelős / Responsible lecturer: Szalóki Imre

A tantárgy az atomerőművek főbb kémiai és radiokémiai folyamatait mutatja be az alábbi tematika szerint: atomerőművek vízüzeme, radioizotópok a fűtőelemekben és a hűtővízben, fűtőelem állapot értékelés, korróziós folyamatok, víztisztító rendszerek, dekontaminálás, radioaktív hulladékkezelés, környezetellenőrzés, radioanalitika az erőművekben. Látogatást szervezünk a Paksi Atomerőmű Zrt-be.

The major types of chemical and radiochemical processes of the nuclear power plants (NPP) are discussed according to the following topics: water chemistry of NPPs, radioisotopes in the fuel and the coolant, fuel performance evaluation, corrosion processes, water purification systems, decontamination, radioactive waste treatment, environmental monitoring, radioanalytics in NPPs. Visit to Paks NPP will be organized.

*Irodalom / Literature:* K.H. Neeb: The Radiochemistry of Nuclear Power Plants with Light Water Reactors (Walter de Gruyter, Berlin, 1997), V.V. Geraszimov, A.J. Kaszperovics, O.J. Martinova: Atomerőművek vízüzeme (Műszaki Könyvkiadó, Budapest, 1981).

## **Atomreaktorok üzemtana / Nuclear power plant operation (BMETE80MFA4 2/2/0/f/5)**

Tárgyfelelős/ Responsible lecturer: Czifrus Szabolcs

A tárgy keretében részletesen ismertetjük az atomreaktor üzemvitel szempontjából fontos paramétereit: elemezzük a reaktivitás-visszacsatolásokat és azok hatását az atomreaktor üzemeltetésére és nukleáris biztonságára, a xenon- és szamárium-mérgezettség üzemviteli folyamatokat befolyásoló hatását, az atomreaktorban kialakuló teljesítmény-eloszlást, azzal összefüggő hőtechnikai, illetve üzemi korlátokat, egyenlőtlenlégek kialakulását a kiegészi ciklus alatt, ciklusvégi speciális üzemviteli vonatkozásokat (pl. manőverező képesség romlása). Ezen túlmenően foglalkozunk az atomreaktor aktív zónájának üzem közbeni monitorozásával, az in-core és ex-core detektorok speciális kérdéseivel. Bemutatjuk a töltettervező és kiterjesztő kódok alapvető tulajdonságait, az adatgyűjtés módjait, adatfeldolgozó rendszerek üzemét, a fűtőelemek üzemi sajátosságai és üzem közbeni állapotellenőrzésük lehetőségeit. A reaktortartály üzemvitellel összefüggő tulajdonságainak és állapotellenőrzésének ismertetése, valamint a reaktorszabályozás beavatkozó szervei és eszközei üzemének bemutatása zárja az előadást.

The course focuses on the parameters of an NPP important for the operation. Students study the reactivity feed-back effects and their influence on the operation and safety of NPPs, the operational aspects of xenon and samarium poisoning, the spatial power density distribution and related thermal and operational limits, parameter changes during a cycle, special operational aspects at the end-of-cycle. We present the on-line core monitoring methods and the in-core and ex-core detectors applied. Furthermore, the core analysis codes, the methods of data acquisition, the basics of data processing and on-line fuel

condition monitoring are discussed in detail. The course is closed with the introduction to reactor pressure vessel problems and monitoring, and the operation of reactor control instrumentation.

*Irodalom / Literature:* Csom Gyula: Atomerőművek üzemtana I-II.

### **Radioanalitika / Radioanalytics** (BMETE80MFA7 3/0/2/f/6)

Tárgyfelelős/ Responsible lecturer: Szalóki Imre

A tantárgy a Fizika alapképzési (BSC) szakon megszerezhető radiokémiai ismeretekre építve a radioanalitika alapjait tárgyalja az alábbi témakörökben: radioaktív izotópok elemzése radiokémiai elválasztási eljárások és nukleáris méréstechnikai módszerek segítségével, nukleáris módszerek alkalmazása az elemanalitikában és az anyagszerkezet-vizsgálatokban. A laboratóriumi gyakorlaton a hallgatók „nehezen mérhető” radioizotópok (urán és transzurán izotópok, stroncium-90 stb.) elemzési módszerét sajátítják el.

The course describes the fundamentals of radioanalytics based on the knowledge about radiochemistry gained while earning a BSC degree in Physics. The major topics to be discussed are the following: analysis of radionuclides by means of radiochemical procedures and nuclear measuring techniques, application of nuclear methods for the analysis of the elemental composition and material structure. During the laboratory exercises „difficult-to-determine” nuclides e.g. uranium and transuranium isotopes, strontium-90 will be analyzed.

*Irodalom / Literature:* G. Choppin, J.O. Liljezin, J. Rydberg: Radiochemistry and Nuclear Chemistry (Reed Educational and Professional Publishing Ltd., Oxford, 1996), K.H. Lieser: Nuclear and Radiochemistry (Wiley-VCH, Berlin, 2000).

### **Nukleáris üzemanyagciklus / Nuclear fuel cycle** (BMETE80MFA2 2/1/0/f/4)

Tárgyfelelős/ Responsible lecturer: Szieberth Máté

A tantárgy a Fizika alapképzési (BSc) szakon megszerezhető fizikai és magfizikai ismeretekre építve a nukleáris üzemanyagciklus egészéről kíván egységes áttekintést nyújtani az alábbi témakörökön keresztül: a nukleáris üzemanyagciklus felépítése; uránforrások és készletek; az uránércék bányászata és feldolgozása; izotópdúsítás, fűtőelemgyártás; az atomerőművek általános műszaki jellemzői; termikus reaktorral szerelt atomerőművek; gyorsreaktorral szerelt atomerőművek; a kiegészített üzemanyag kezelése, újrafeldolgozása; reprocesszási technológiák; a radioaktív hulladékok kezelése és elhelyezése; transzmutáció; biztonsági kérdések; lehetséges nukleáris üzemanyagciklusok; nyílt üzemanyagciklus; zárt üzemanyagciklus; az atomerőművek üzemanyag-gazdálkodási jellemzői; összetett atomenergia-rendszerek; szimbiotikus atomerőmű-rendszerek üzemanyag-gazdálkodási jellemzői; atomerőművek fejlesztési irányai.

The course intends to provide an overview on the whole nuclear fuel cycle based on the nuclear physics knowledge gained during the physics BSc course. The major topics to be discussed are the following: structure of the nuclear fuel cycle; uranium sources and supply; uranium mining and ore conversion; isotope enrichment; fuel fabrication; general technical characteristics of nuclear power plants; thermal reactor based power plants; fast reactors based power plants; managing and reprocessing of spent fuel; reprocessing methods; managing and final disposal of radioactive waste; partitioning and transmutation; safety related issues; feasible nuclear fuel cycles; once-through cycle, closed fuel cycle; fuel management characteristics of nuclear power plants; symbiotic nuclear energy systems, fuel management characteristics of symbiotic systems; development trends in nuclear energy systems.

*Irodalom / Literature:* Dr. Csom Gyula: Atomerőművek üzemtana, II/1. kötet, Műegyetemi Kiadó, Budapest, 2004, Dr. Csom Gyula: Atomenergia rendszerek nukleáris üzemanyagciklusának továbbfejlesztési lehetőségei, Akadémiai Kiadó, 1988.



## **A nukleáris leszerelés kérdései / Nuclear non-proliferation (BMETE80MFA1 2/0/0/v/3)**

Tárgyfelelős/ Responsible lecturer: Csige András

Atommagfizikai alapok. Atommagok kötési energiája. Atommagreakciók. A maghasadás és magfúzió. A láncreakció létrejötte és feltételei. Urándúsítás, plutóniumkinyerési technológiák. Maghasadáson alapuló atomfegyverek. Fúziós atomfegyverek. Légköri és földalatti robbantásokból nyerhető információk. Miniaturizálás és szimuláció. Nukleáris technológiák és nukleáris anyagok forgalmának ellenőrzésével (safeguards) kapcsolatos műszaki és fizikai alapismeretek. A nukleáris fegyverek jelentősége; nukleáris doktrínák; nukleáris kérdések a NATO-ban. A nukleáris non-proliferációs rendszer elemei, jelentősége, működése. A nukleáris fegyverzetkorlátozás története: előzmények, Hiroshima és Nagaszaki, az atomkorszak és a hidegháború. Az Atomsorompó szerződés pontjai, a felülvizsgálati konferenciák és a kibővítési konferencia, az 1997-es PrepCom. Küszöbországok: a *de facto* atomhatalmak, a jó útra tértek, a potenciális küszöbországok és a szovjet utódállamok. Atomfegyvermentes övezetek lakatlan és lakott területeken. A nukleáris robbantások története és a korlátozásukra tett kísérletek: PTBT, küszöbszerződések, a CTBT. Biztonsági garanciák (pozitív és negatív), a "no first use" elve. Verifikáció, a szerződéses kötelezettségek betartásának ellenőrzése és annak problémái. Exportellenőrzés és a nemzetközi exportellenőrzési rendszerek. A nukleáris non-proliferáció magyar vonatkozásai; a rendszer jövője.

Basic knowledge in nuclear physics. Binding energy of nuclei. Nuclear reactions. Fission and fusion. The nuclear chain reaction. Uranium enrichment and its technologies. Nuclear weapons based on nuclear fission. Nuclear weapons based on nuclear fusion. Information from atmospheric and underground test. Miniaturization and simulations. Technological and physical basic information for the safeguards. Importance of nuclear weapons, nuclear doctrines, nuclear strategies of NATO. The elements of the non-proliferation system. History of the nuclear non-proliferation. Hiroshima, Nagasaki, the atomic age and the cold war. The main statements of the NPT, the supervision conferences, the enlargement and the PrepCom /1997/. The „threshold” states, the „de facto” nuclear states, the potential threshold states and the former Soviet states. The nuclear-free zones on habited and inhabited areas. The history of nuclear tests, the efforts for limiting them. PTBT, CTBT. Positive and negative security guaranties. The „no first use” principle. Verification systems, and their problems. International export controlling systems. The future of nuclear non-proliferation and safeguards, and its relevance to Hungary.

*Irodalom / Literature:* Kenneth S. Krane: Introductory Nuclear Physics (1988), Jozef Goldblatt: Arms Control. A Guide to Negotiations and Agreements (1994), N. Rózsa Erzsébet: Az atomsorompó szerződés és az 1995-ös felülvizsgálati és kibővítési konferencia (1995) The NPT and the supervision conference in 1995, (In Hungarian), N. Rózsa Erzsébet: A nukleáris csend világa felé. (1996) Towards the nuclear silence (in Hungarian).

## **Atomenergia és fenntartható fejlődés / Nuclear Energetics and Sustainable Development**

(BMETE809008 2/0/0/f/3)

Tárgyfelelős/ Responsible lecturer: Aszódi Attila

A fenntartható fejlődés definíciója, értelmezése, nemzetközi törekvések, egyezmények, az energiatermelési módok fejlődése és szerepe a fenntartható fejlődésben, energiahordozó készletek; fosszilis energiahordozók és bányászatuk; energiaellátás biztonsága; az energiaellátás és a gazdasági függetlenség kapcsolata, globális felmelegedés, kiotói megállapodás, klímavédelem, a megújuló energiaforrások és a nukleáris energiatermelés szerepe az egészséges energiaköztélben, atomreaktorok műszaki felépítése és típusai, különböző energiatermelési módok összehasonlítása, atomenergia-rendszerek, az atomenergia-hasznosítás rad.aktív hull. és melléktermékei, atomerőművek biztonsága és környezeti hatásai; Csernobyl.

Definition of sustainable development, international agreements, development of electricity production methods, their role in the sustainable development, energy source supply, fossil energy sources and their mining, security of energy supply, relation of energy supply and economic independence, global warming, Kyoto protocol, climate protection, role of renewable sources and nuclear energy in a healthy energy-mix, structure and types of nuclear reactors, comparison of different energy production methods, nuclear energy systems, radioactive wastes, safety of nuclear power plants and environmental effects, Tsernobyl.

*Irodalom / Literature:* Szatmáry Z., Aszódi A.: Csernobil. Tények, okok, hiedelmek, Typotex, 2005.

### **Bevezetés a fúziós plazmafizikába / Introduction to fusion plasma physics (2/0/0/v/2)**

Tárgyfelelős/ Responsible lecturer: Gergő Pokol

Általános plazmafizikai bevezető. Energiatermelés, fúziós reaktor felépítése, Lawson-kritérium, fúziós plazmák paraméterei. Tehetetlenségi fúzió. Töltött részecskék ütközésmentes mozgása mágneses térben. Termodinamikai egyensúly, ionizációs és sugárzási folyamatok plazmában. Mágneses összetartás: konfigurációk. Részecskék ütközése plazmában, transzport folyamatok. Plazmák elméleti leírása: kinetikus elmélet, folyadék elmélet, MHD. Mágnesesen összetartott plazma egyensúlya, instabilitások, plazmahullámok. Laboratóriumi kísérletek: plazma előállítás, fűtés, plazma-fal kapcsolat. Plazmadiagnosztika, méréstechnika. Aktuális eredmények fúziós plazma összetartás témában.

General introduction to plasma physics. Energy generation with fusion reactors, Lawson criterion, parameters of fusion plasmas. Inertial fusion. Collisionless motion of charged particles in magnetic field. Thermodynamic equilibrium, ionization and radiative processes in the plasma. Magnetic confinement: configurations. Particle collisions in plasma, transport processes. Plasma theory: kinetic description, fluid description, MHD. Equilibrium and instabilities in magnetically confined plasma, plasma waves. Laboratory plasmas: breakdown, plasma heating, plasma-wall interaction. Plasma diagnostics, measurement methods. Recent results, achievements in fusion plasma confinement.

*Irodalom / Literature:* Pokol Gergő, Zoletnik Sándor, Papp Gergely, Horváth László: Bevezetés a fúziós plazmafizikába / Introduction to fusion plasma physics (elektronikus egyetemi jegyzet)

### **Fúziós nagyberendezések / Fusion devices (2/0/0/v/3)**

Tárgyfelelős/ Responsible lecturer: Gergő Pokol

A tantárgy röviden ismerteti a mágneses összetartásra alapozott fúziós energiatermelés elvét és bemutatja a fúziós energiatermelés megvalósításához szükséges technológiai rendszereket. Ezután történelmi bevezető, és a mai - már üzemelő, és még épülő – legjelentősebb tokamakok és sztellarátorok részletes bemutatása következik. Tárgyaljuk az ASDEXUpgrade, JET, ITER tokamakok, a Wendelstein 7-X sztellarátor és az aktuális eredmények tükrében kiválasztott egyéb berendezések működési elvét, tervezési szempontjait, főbb komponenseit, fontosabb kiegészítő berendezéseit és az üzemelő berendezések néhány kísérleti eredményét. Az előadásokhoz kötődően sor kerül aktuális magyar fejlesztések bemutatására is. A tárgy röviden foglalkozik a fúziós kutatások további irányával, és útmutatást ad az önálló tájékozódáshoz.

The course briefly introduces the theory of magnetic confinement fusion, and the technology needed for the practical realization. It continues with a historical overview and the detailed description of today's most important – already operating or still under construction – tokamaks and stellarators. We discuss the basic principles of design and operation, main components and auxiliary systems of the ASDEX-Upgrade, the JET and the ITER tokamaks, the Wendelstein 7-X stellarator and other devices selected in view of their most recent results. The course accommodates the presentation of the main Hungarian developments, briefly covers the further way towards fusion energy production and provides guidance in autonomous research in the topic.

*Irodalom / Literature:* Pokol Gergő, Lazányi Nóra: Fúziós nagyberendezések / Fusion devices (elektronikus egyetemi jegyzet)

### **Ütközéses transzport mágnesezett plazmában / Fusion devices (1/2/0/f/4)**

Tárgyfelelős/ Responsible lecturer: Gergő Pokol

A plazma kinetikus és folyadék leírása. Az ütközési operátor. Plazma folyadék egyenletek. Transzport hengeres plazmában. Részecskepályák. Toroidális plazmák. Transzport toroidális plazmákban. Transzport a Pfirsch-Schlüter tartományban. Transzport a plató tartományban. Transzport a banán tartományban.

Kinetic and fluid descriptions of a plasma. The collision operator. Plasma fluid equations. Transport in cylindrical plasma. Particle motion. Toroidal plasmas. Transport in toroidal plasmas. Transport in the Pfirsch-Schlüter regime. Transport in the plateau regime. Transport in the banana regime.

*Irodalom / Literature:* Per Helander and Dieter Sigmar: Collisional transport in magnetized plasmas (Cambridge University Press, 2002)

### **Reaktorszabályozás és műszerezés / Instrumentation and control of nuclear reactors**

(BMETE80MFAA 2/1/0/v/4)

Tárgyfelelős/ Responsible lecturer: Pór Gábor

Elsősorban atomerőművi műszerezettséget ismertetjük, a hőmérséklet, nyomás, rezgés és nukleáris érzékelőktől a mérőláncokon keresztül a teljes mérés megvalósításig, majd a jelek feldolgozását, a biztonsági filozófiákat, a szabályozás alapelemeit beleértve a kettő a háromból elvet, valamint a függetlenség elvét, majd a nemzetközileg elfogadott osztályozásokat és a Nemzetközi Atomenergia Ügynökség ajánlásait, a hatósági előírásokat, az ember gép kapcsolatot, az atomerőművi vezénylő kialakításának kérdéseit. Részletesen tárgyaljuk az atomerőművi korszerű mérőrendszereket (VERONA, C-PORCA, PDA, zónadiagnosztika, idegentest detektálás, szivárgásellenőrző rendszerek, akusztikus emissziós rendszerek, akusztikus detektáló rendszerek, öregedésvizsgáló rendszerek), és a várható fejlődési trendeket (vezeték nélküli mérőrendszerek, mérőszoftver megbízhatóság-ellenőrzése, kiértékelő és mesterséges intelligenciát használó operátorsegítő rendszerek).

From details of temperature, pressure, vibration sensors and nuclear detectors applied in contemporary nuclear power plants via problems of building and maintaining measuring chains to data collection and data processing, to data evaluation. Safety consideration including principles of two from three, and independence of signals, international standards including recommendations of IAEA and nuclear authorities, man-machine interface including nuclear power plants control room and operator support systems. Detailed studies in high-tech nuclear measuring methods and systems like VERONA, C-PORCA, PDA, core diagnostics, loose parts monitoring, vibration monitoring, leakage monitoring, acoustic monitoring ageing monitoring systems built in NPP. Short survey of future trends like wireless measuring systems, testing of digital software for I&C, artificial intelligence for operator support systems.

*Irodalom / Literature:* Atomerőművi műszerezés (összeáll. Pór G. a MÜSZ alapján), IAEA TECDOC 3789, és 4568.

### **Sugárvédelem II / Health physics II (BMETE80MFA8 2/0/2/v/5)**

Tárgyfelelős/ Responsible lecturer: Zagyvai Péter

A tantárgy a Fizika alapképzési (BSC) szakon megszerezhető sugárvédelmi és nukleáris fizikai ismeretekre építve a környezetben előforduló természetes és – adott esetben – mesterséges eredetű, általában kis mennyiségű radioaktív anyagoktól származó külső és belső sugárterhelés méréssel és számítással történő meghatározásait mutatja be. Témakörök: dóziszfogalmak részletes elemzése, az egyes fogalmak speciális problémái (KERMA és elnyelt dózis, egyenértékűdózis és effektív dózis sztochasztikus hatások értékelésére), dózis/kockázat-alapú sugárvédelmi szabályozási rendszer, dózis- és dózisteljesítmény mérési elve és kivitelezése, belső sugárterhelés számítása, nukleáris analízis alkalmazása a belső sugárterhelés meghatározásában, összetett sugárvédelmi mérések: radonanalízis, környezeti monitorozás.

This course describes the determination of external and internal dose due to natural and – occasionally – artificial sources of generally low radioactivity based on nuclear physics and radiation protection knowledge gained while attending a BSC course in Physics. Topics discussed: detailed analysis of dose concepts, special problems (KERMA versus absorbed dose, equivalent and effective dose for assessing stochastic radiation effects), health physics control and regulation based on dose/risk dependence, principles and practice of dose and dose rate measurement, calculation of internal exposure, nuclear analysis for determining internal dose, compound radiation measurements: radon analysis, nuclear environmental monitoring.

*Irodalom / Literature:* Köteles Gy.: Sugáregészségtan (Medicina, Budapest, 2002.), Kanyár B.: Radioökológia és környezeti sugárvédelem (Veszprém, 2000.), Letölthető jegyzetek a Nukleáris Technikai Intézet interenetes oldaláról. / Downloadable lecture outlines from the web site of the Institute of Nuclear Techniques.

### **Neutron- és gammatranszport számítási módszerek / Neutron and gamma transport calculation techniques** (BMETE80MFA6 2/1/0/f/4)

Tárgyfelelős/ Responsible lecturer: Czifrus Szabolcs

A tantárgy a elsősorban a Fizika alapképzési (BSc) szakon hallgatott „Reaktorfizika” tárgy keretében megszerzett ismeretek gyakorlati alkalmazását segíti. A tárgy előadásain és gyakorlatain először egyszerű, gyorsan megoldható problémákon keresztül mutatunk be olyan közelítő számítási eljárásokat, melyek alkalmasak fizikai sugárvédelmi (shielding) problémák becslő jellegű megoldására. A hallgatók megismerkedhetnek a MicroShield nevű programmal. A bonyolultabb problémák megoldása érdekében a hallgatók elsajátítják az MCNP nevű, világviszonylatban elismert, Monte-Carlo alapú, csatolt neutron-gamma-elektron részecsketranszport-kód használatának főbb lépéseit. A program segítségével a hallgatóknak sugárvédelmi-tervezési és reaktorfizikai problémákat kell megoldaniuk.

The course helps students practically apply their knowledge gained during the „Reactor physics” course in Physics BSc. In the lectures and exercises of the course we first present simple radiation shielding problems the solution of which can be performed using approximate methods. Here students familiarize themselves with the MicroShield program. As proceeding to more advanced and complicated problems, students learn to use some of the features of the internationally acknowledged, Monte Carlo based, coupled neutron-photon-electron transport code MCNP. Students have to solve radiation shielding design problems, as well as reactor physics problems using the code.

*Irodalom / Literature:* A.B. Chilton, J.K. Shultis, R.E. Faw: Principles of radiation shielding. Prentice Hall, 1984, J.F. Briesmeister (ed.): MCNP4C - A general Monte Carlo N-particle transport code. LA-12625-M, Los Alamos, November, 1993.

### **Atomerőművi szimulációs gyakorlatok / Nuclear power plant simulation exercises**

(BMETE80MF17 0/0/2/f/3)

Tárgyfelelős/ Responsible lecturer: Csige András

A tantárgy célja az atomerőművekkel kapcsolatos reaktorfizikai, termohidraulikai és egyéb műszaki ismeretek elmélyítése a BME NTI-nél, továbbá a KFKI Atomenergia Kutatóintézeténél rendelkezésre álló szimulátorok segítségével. A hallgatók a következő szimulátorokon folytatnak gyakorlatokat: PC<sup>2</sup> primerköri szimulátor; SSIM szekunderköri szimulátor; STEGENA gőzfejlesztő analizátor; APROS egydimenziós termohidraulikai rendszerkód, CFX háromdimenziós termohidraulikai kód; a paksi atomerőmű full-scope szimulátora (KFKI AEKI-ben).

The aim of the course is to deepen the knowledge about the reactor physical and thermohydraulic processes taking place in nuclear power plants, using the simulators available at the Institute of Nuclear Techniques and the KFKI Atomic Energy Research Institute. During the course the following simulators are used: PC<sup>2</sup> primary circuit simulator; SSIM secondary circuit simulator; STEGENA steam generator analyzer; APROS one-dimensional thermohydraulics advanced process simulator; CFX three-dimensional thermohydraulics code; full-scope simulator of the Paks NPP.

*Irodalom / Literature:* Dr. Csom Gyula: Atomerőművek üzemtana, II/1. kötet, Műegyetemi Kiadó, Budapest, 2004, Fehér S., Aszódi A., Csom Gy.: A PC<sup>2</sup> v4.0 primerköri szimulátor fizikai és matematikai modelljének leírása; BME-NTI-241/1999; BME Nukleáris Technikai Intézet, Budapest, 1999, Csige A., Aszódi A.: APROS rendszerkód alkalmazása atomerőművi üzemzavari eseményekre; MNT Szimpózium 2003. december; Magyar Nukleáris Társaság, Budapest, 2004.

### **Radioaktív anyagok terjedése környezeti és biológiai rendszerekben / Migration of radioactive species in environmental and biological matter (BMETE80MF57 2/1/0/v/3)**

Tárgyfelelős/ Responsible lecturer: Zagyvai Péter

A tantárgy a Fizika alapképzési (BSC) szakon megszereshető környezetfizikai és nukleáris fizikai alapismeretekre épít. Ismerteti a radioaktív anyagoknak a környezeti közegekben, valamint a növényi, állati és emberi szervezetben lezajló átviteli folyamatait. Témakörök: radioaktivitás megjelenése a környezetben – forrástagok jellemzői. Sztatikus és dinamikus transzportszámítások, modellek. Radioaktivitás terjedése a levegőben, felszíni vizekben, talajban, geológiai rendszerekben. Biológiai transzportfolyamatok.

This course describes the transport processes of radionuclides taking place in environmental and biological media based on nuclear physics and environmental physics knowledge gained while attending a BSC course in Physics. Topics discussed: appearance of radioactivity in the environment – features of source terms. Static and dynamic transport equations, modeling. Dispersion of radioactive species in atmosphere, surface waters, soil, geological structures. Biological transport processes.

*Irodalom / Literature:* D. Petruzzelli: Migration and fate of pollutants in soils and sub-soils, (NATO ASI Series G. Ecological Sciences Vol. 32.), Kanyár B.: Radioökológia és környezeti sugárvédelem (Veszprém, 2000.), Letölthető jegyzetek a Nukleáris Technikai Intézet internetes oldaláról. / Downloadable lecture outlines from the web site of the Institute of Nuclear Techniques.

### **Radioaktív hulladékok biztonsága / Safety of radioactive wastes (BMETE80MF58 1/0/1/v/2)**

Tárgyfelelős/ Responsible lecturer: Zagyvai Péter

A tantárgy a Fizika alapképzési (BSC) szakon megszereshető sugárvédelmi alapismeretekre épít. Ismerteti a radioaktív hulladékokra vonatkozó szabályzást, bemutatja a radioaktív hulladék biztonságos kezelésének hangsúlyos kérdéseit. Témakörök: a radioaktív hulladékokra vonatkozó nemzetközi és magyarországi szabályzás elvei és gyakorlata, a radioaktív hulladék feldolgozásának, immobilizálásának és biztonságos elhelyezésének a biztonság szempontjából különösen fontos részletei, egyes hulladékfajták újrahasznosítása, hulladék-analízis.

This course describes regulation and control pertaining to radioactive wastes and key issues of safe waste management based on radiation protection knowledge gained while attending a BSC course in Physics. Topics discussed: international and national regulations – theory and practice, detailed studies on safe processing, immobilization and disposal of radioactive wastes, reprocessing of certain waste types, waste analysis.

*Irodalom / Literature:* Ormai P.: A radioaktív hulladékok elhelyezésének lehetőségei Magyarországon (RHK kht.) 2002, Choppin, G. R. and Rydberg, J.. Nuclear Chemistry.(New York: Pergamon Press 1996), Letölthető jegyzetek a Nukleáris Technikai Intézet internetes oldaláról. / Downloadable outlines from the web site of the Institute of Nuclear Techniques.

### **Reaktorfizika / Physics of Nuclear Reactors (BMETE80AF33 3/1/0/v/5)**

Tárgyfelelős/ Responsible lecturer: Kis Dániel Péter

Atommag és neutron kölcsönhatása, a reakciók jellemzése. A neutrongáz leírása. Hatáskeresztmetszetek. Boltzmann-egyenlet. Időfüggés, kritikusság. Diffúzióelmélet. Reaktorkinetika. Reaktivitás mérése. Numerikus módszerek. Neutronspektrum. Lassuláselmélet. Rezonanciák, termalizáció. Termikus reaktorok. Reaktivitástényezők. Adjungált függvény és alkalmazásai. Perturbációk. Kiegészítés.

Interaction of nuclei with neutrons, descriptions of the reaction. Characteristics of the neutron gas. Nuclear cross-sections. Boltzmann equation. Time dependence, criticality. Diffusion theory. Reactor kinetics. Measurement of reactivity. Numerical methods. Neutron spectrum. Slowing down of neutrons. Resonance, thermalization. Thermal reactors. Reactivity coefficients. Adjoint function and its applications. Perturbations. Burn-up.

*Irodalom/Literature:* Szatmáry Z.: Bevezetés a reaktorfizikába, Akadémiai Kiadó, Budapest, 2000, A. M. Weinberg and E. P. Wigner: The Physical Theory of Neutron Chain Reactors, The University of Chicago Press, 1958.

## Orvosi fizika tárgycsoport

### **Sugárbiológia/Radiobiology (2/1/0/v/4)**

*Tárgyfelelős/ Responsible lecturer:* Pesznyák Csilla

A kurzus célja, hogy megismertesse az ionizáló sugárzás szervezeti és sejtszintű hatásait, elemezze azokat a folyamatokat, amelyek az egészséges és daganatos sejtek túlélését, halálát befolyásolják. Ez elősegíti annak megértését, hogy egy adott sugárdózis az egyik esetben miért indukál daganatot, míg más esetben miért pusztítja el a daganatos sejteket. A sugárbiológiai ismeretanyag segítségével olyan új terápiás modalitások dolgozhatók ki, amelyekkel növelhető a daganatos betegek túlélési esélye. A sugárbiológia segítségével érthetjük meg, hogy hogyan és miért használhatjuk az ionizáló sugárzást az egészséges és kóros sejtsztruktúra és funkció vizsgálatára, a különböző betegségek diagnózisára.

The course will focus on the understanding of radiation effects on the whole organisms, tissues and cells, as well as on the cellular causes leading to the death of normal and malignant cells. This helps to understand why a given dose of radiation induces tumors in one case while destroys tumor cells in another case. On the basis of radiobiological knowledge one can develop new therapeutic modalities to improve the survival of cancer patients. Radiation biology helps us to understand how and why ionizing radiation can be used to examine healthy and pathological cell structures and to diagnose and treat various diseases.

*Irodalom / Literature:* Pesznyák C, Safrány G: Sugárbiológia (Typotex, 2016), Köteles Gy.: Sugáregészségtan (Medicina, Budapest, 2002.); Hall EJ, Giaccia AJ: Radiobiology for the Radiologist, Lippincott, Williams & Wilkins, Philadelphia, USA, 6th edition, 2006; Joiner M, van der Kogel A (eds): Basic Clinical Radiobiology, Hodder Arnold, London, UK, 4th edition 2009; Steel GG. (ed.) Basic Clinical Radiobiology, Arnold, London, England, 3d edition, 2002.

### **Sugárterápia fizikai alapjai/ Physics of Radiotherapy (2/0/2/v/5)**

*Tárgyfelelős/ Responsible lecturer:* Pesznyák Csilla

A tantárgy célkitűzése és részletes tematikája: a sugárterápiához kapcsolódó orvosi fizikai fogalmakat, méréstechnikai problémákat és a besugárzás-tervezéshez kapcsolódó kérdéseket megismertesse a hallgatókkal. Az anatómiai adatok meghatározásának módjai (CT, MRI, PET), fontosabb besugárzási technikák (teleterápia, brachyterápia), a sugárterápiában használt sugárforrások (klasszikus röntgen berendezések, kobalt ágyúk, lineáris gyorsítók, radioaktív izotóp sugárforrások, afterloading készülékek). A teleterápiában használt eszközök sugárzási terének leírása, fontosabb mérési eljárások (ionizációs kamrák, szilárdtest detektorok (film és termolumineszcens dozimetria)), mezőmódosító eszközök hatásának mérése (külső ék, dinamikus ék, blokk, MLC). A brachyterápia célja, a sugárforrások fajtái és alkalmazásuk módszerei. Terápiás tervek ellenőrzése, a besugárzás tervezés követelményei az ICRU ajánlása szerint. Minőségbiztosítás, minőségellenőrzés, a tele- és brachyterápiás eszközök biztonságtechnikája, sugárvédelem és sugárbiológia a sugárterápiában.

Scope of the subject: to foreshow the terminology of medical physics and measurement problems connected with the radiation therapy and matters connected to the radiation treatment planning. Syllabus of the subject: the methods of determination of anatomical data (CT, MRI, PET), major irradiation techniques (teletherapy, brachytherapy), radiation sources used in the radiation therapy (classical X-ray equipments, cobalt units, linear accelerators, radioactive sources, afterloading equipments). Description of the radiation field of the equipments used in teletherapy, major methods of measurement (ionization chambers, solid state detectors (film and thermoluminescent dosimetry)), measurements of the effect of beam modifying devices (hard wedge, dynamic wedge, block, MLC). Object of brachytherapy, kinds of radiation sources and their ways of application. Checking of therapy plans, the requirements of the radiation treatment planning according to the ICRU protocol. Quality assurance, quality control, safety requirements of teletherapy and brachytherapy devices, radiation protection and radiobiology in the radiation therapy.

*Irodalom / Literature:* Review of Radiation Oncology Physics: A Handbook for Teachers and Students (Ed.: E. B. Podgorsak) Educational Report Ser. IAEA Vienna, Austria, 2003. pp. 530; Khan F.: The Physics of Radiation Therapy 2nd ed. Williams & Wilkins, 1994; Williams J.R., Thwaites D.I.: Radiotherapy Physics in Practice. Oxford Univ. Press, 1993; Johns, H. E. Cunningham, J. R.: The Physics of Radiology (Fourth Edition) Charles C. Thomas Publisher, Springfield, Illinois, USA 1983. pp. 796.

### ***Sugárterápia II/Radiation therapyII (2/0/0/v/3)***

*Tárgyfelelős/ Responsible lecturer: Pesznyák Csilla*

A tantárgy célkitűzése és részletes tematikája: a sugárterápia speciális készülékeinek és kezelési módszereinek megismertetése a hallgatókkal. Három témakör kerülne bemutatásra. (I) Sztereotaxiás agyi sugársebészet és extracraniális sztereotaxia fizikai alapjai, a kezelési módszerek, metszetképképző eljárásokon alapuló 3D-s besugárzástervezés, dozimetriája és minőségbiztosítása. (II) A képvezérelt (IGRT) és biológiailag vezérelt intenzitásmodulált sugárterápia (IMRT) besugárzástervezése és ellenőrzése független számolási algoritmussal, dozimetriai és minőségbiztosítási kérdések megvitatása. Kis mezők dozimetriája. Képvezérelt sugárterápia megvalósításának lehetőségei, a cone beam CT alkalmazásának feltételei. (III) Teljes bőr elektronsugárzás bemutatása dozimetriai és sugárbiológiai szempontok alapján.

The lecture has been organized into three major parts: (I) Stereotaxic and extracranial radiosurgery, review of most important equipment, treatment planning systems and special dosimetry. (II) Advanced Image-Guided and Biological Guided Intensity Modulated Radiation Therapy (IMRT), physical optimization, imaging for IMRT, dose calculation, delivery techniques, dosimetry and QA/QC. (III) Total skin irradiation with electron beams, their special dosimetry and treatment delivery techniques.

*Irodalom / Literature:* T. Bortfeld, R. Schmidt-Ullrich, W. De Neve, D. E. Wazer (Editors). Image-Guided IMRT, Springer 2006.

### ***Brachyterápia/Brachytherapy (2/0/0/v3)***

*Tárgyfelelős/ Responsible lecturer: Pesznyák Csilla*

A tantárgy célkitűzése és részletes tematikája: a közelbesugárzás (brachyterápia) dozimetriai alapfogalmainak, készülékeinek és kezelési módszereinek az ismertetése. Sugárfizikai ismeretek: az alkalmazott sugárforrások fizikai tulajdonságai, dozimetriai alapfogalmak, forrásérintés, bomlási törvény, a dózisszámolás alapjai, TG 43 formalizmus. Dozimetriai rendszerek: intersticiális (Manchester, Quimby, Paris) és intrakavitális (Manchester, Fletcher, Stockholm) rendszerek szabályainak és tulajdonságainak ismertetése. Számítógépes dozimetria: forráslokalizációs módszerek, metszetképképző eljárásokon alapuló 3D-s besugárzástervezés, dózis-térfogat hisztogramok, tervkiértékelések. Kezelési technikák: manuális módszerek és utántöltéses (afterloading) eljárások. Brachyterápiás dóziszjelentések: dóziselőírás, kezelési paraméterek rögzítése és jelentése, GTV, CTV, PTV, ICRU Report 38 és 58. Minőségbiztosítás: forráskalibrálás, elfogadási tesztek, forráspozíció ellenőrzés, rendszeres ellenőrzések.

Scope of the subject: to foreshow the dosimetric terminology, equipments and treatment modalities of brachytherapy. Syllabus of the subject: Radiation physics learning: physical properties of the applied radiation sources, fundamental dosimetric concepts, strength of source, decay law, base of dose calculations, TG 43 formalism. Dosimetric systems: the rules and properties of interstitial (Manchester, Quimby, Paris) and intracavitary (Manchester, Fletcher, Stockholm) systems. Computational dosimetry: methods of source localization, image based 3D radiation treatment planning, dose-volume histograms, plan evaluation.

Treatment modalities: manual and afterloading methods. Brachytherapy dose reports: dose prescription, setting and meaning of treatment parameters, GTV, CTV, PTV, ICRU Report 38 and 58. Quality assurance, source calibration, acceptance tests, control of source position, regular controls.

*Irodalom / Literature:* A. Gerbaulet, R. Pötter, J.J. Mazon, H. Meertens, E. van Limbergen (Editors). The GEC ESTRO Handbook of Brachytherapy, ESTRO Physics Booklet No. 8. A practical guide to quality control of brachytherapy equipment.



***Minőségbiztosítás és jogi szabályozás/ Quality Assurance and Legislation Issues (2/0/1/v/4)***  
*Tárgyfelelős/ Responsible lecturer: Pesznyák Csilla*

A tantárgy célkitűzése és részletes tematikája: a sugárterápiában, a röntgen diagnosztikában és a nukleáris medicinában alkalmazott minőségbiztosítási vizsgálatok (átvételi, állapot- és állandósági vizsgálatok) és eszközök megismertetése a hallgatókkal.

A minőség fogalma. A minőségbiztosítással kapcsolatos szabványok és jogszabályok. Röntgenterápiás, teleterápiás és brachyterápiás berendezések valamint a hagyományos és CT szimulátorok és PET/CT készülékek minőségbiztosítása, napi, heti, havi és éves minőség-ellenőrzése. A tervezőrendszerek minőségbiztosítása /minőségellenőrzése. A mérendő paraméterek és tűréshatárai. A nem-invazív mérések elvei és eszközei. Az egyes vizsgálatfajták eszközsükséglete. Az eredmények értékelése. Különböző röntgenmunkahelyek minőségellenőrzése (felvételi, átvilágító, CT, mammoográfias, angiográfias és intervenciós). Páciensdózis-mérések. A sugárterápia, röntgendiagnosztika és nukleáris medicina nemzetközi és hazai jogi szabályozása.

Review the international and Hungarian regulations and rules of quality assurance and quality control (QA/QC) in medical physics. Description of the QA/QC measurements for X-ray therapy, external beam radiotherapy and brachytherapy. Quality control protocols for conventional and CT simulators, MRI, SPECT and PET imaging systems. Independent calculations for controlling the TPS monitor unit dose calculation. Patient dosimetry. QA/QC and safety requirements of ultrasound, angiography and mammography. International and Hungarian Standards for medical equipments.

*Irodalom / Literature:*

IAEA, Commissioning and Quality Assurance of Computerized Planning Systems for Radiation Treatment of Cancer, TRS-430,

IAEA, Comprehensive Audits Of Radiotherapy Practices: A Tool For Quality Improvement (2007),

IAEA, Specification and Acceptance Testing of Radiotherapy Treatment Planning Systems, TECDOC-1540, IAEA Quality Assurance for Radioactivity Measurement in Nuclear Medicine, TRS-454

***Sugárvédelem az orvosi fizikában/ Radiation Protection in Medical Physics (3/0/1/v/5)***  
*Tárgyfelelős/ Responsible lecturer: Pesznyák Csilla*

A fizikai és biológiai dóziszfogalmak áttekintése (KERMA és elnyelt dózis, relatív biológiai hatásosság a determinisztikus hatás jellemzésére, egyenértékdózis és effektív dózis a sztochasztikus hatások értékelésére). LNT – pro és kontra. Dózis/kockázat-alapú sugárvédelmi szabályzási rendszer. Dóziskorlát, dózismegszorítás. Kibocsátási korlát. Mentességi szint. A külső dózis- és dózisteljesítmény mérési elve és kivitelezése, eszközei, a mérések kiértékelése. A belső sugárterhelés számítása. A belső sugárterhelés meghatározásához szükséges mérési eljárások – egésztest- és résztestszámlálás, környezeti analízis. Környezeti és biológiai minták instrumentális analízise. A mesterséges eredetű radioizotópok alkalmazásai, kikerülésük a környezetbe. Sugárveszélyes munkahelyek az egészségügyben, munkahelyek tervezése. Személyi sugárvédelem. Radioaktív források szállítása és hulladék-kezelés. Sugárbalesetek az orvosi fizika különböző területein. Páciens védelem és beteg dózis. Sugáregészségtan alapjai. Sugárbalesetek megelőzése és baleseti helyzetek kezelése. Sugárterápiás intézet részegységeinek sugárvédelmi tervezése. Zárt és nyitott radioaktív készítmények használata.

This course describes the determination of external and internal dose due to natural and – occasionally – artificial sources of generally low radioactivity based on nuclear physics and radiation protection knowledge gained while attending a BSC course in Physics. Topics discussed: detailed analysis of dose concepts, special problems (KERMA versus absorbed dose, equivalent and effective dose for assessing stochastic radiation effects), health physics control and regulation based on dose/risk dependence, principles and practice of dose and dose rate measurement, calculation of internal exposure, nuclear analysis for determining internal dose, compound radiation measurements: radon analysis, nuclear environmental monitoring. Patient dosimetry, radiation protection of radiotherapy and nuclear medicine.

*Irodalom / Literature:* IAEA STS No 47. Radiation Protection in the Design of Radiotherapy Facilities. Sugárvédelem, szerk.: Fehér István és Deme Sándor, ELTE, Eötvös Kiadó, 2010

### **Mágneses rezonancia és klinikai alkalmazásai (2/0/0/v/3)**

*Tárgyfelelős/ Responsible lecturer:* Jánossy András

A tárgy célkitűzése és részletes tematikája: a mágneses rezonancia és klinikai alkalmazásaihoz kapcsolódó orvofizikai fogalmakat, mérés technikai problémákat és gyakorlati alkalmazásához kapcsolódó kérdéseket megismertesse a hallgatókkal. Történelem, a mágneses rezonancia képalkotás (MRI) helye az orvosi képalkotó eljárások között, alapvető sajátságai; a mágneses rezonancia (MR) alapjai: relaxációk, koordináta rendszerek, Bloch egyenletek; impulzus MR, spin ekhó; Fourier-transzformáció (FT) és diszkrét FT; NMR-spektroszkópia; az MRI alapelve, egydimenziós leképezés; a háromdimenziós leképezés, frekvencia és fáziskódolás; az MRI-kép megjelenítése, felbontás és látómező; a képalkotás alapvető módszerei, egyszerűbb szekvenciák; a kontraszt; képalkotási hibák; különleges képalkotási módszerek, impulzus szekvenciák; a különböző szekvenciák klinikai alkalmazása; az MRI hardverelemei; biztonságtechnika és környezeti kérdések.

Objective of the course is to give an introduction to concepts of magnetic resonance and its clinical use and to discuss measurement issues and practical applications. Detailed subjects: history, the place of magnetic resonance imaging (MRI) among medical imaging techniques, basic properties; basics of magnetic resonance (MR): relaxation, coordinate systems, Bloch equations; impulse MR, spin echo; Fourier transformation (FT) and discrete FT; NMR spectroscopy; basic idea of MRI, one dimensional imaging; three dimensional imaging, frequency and phase coding; displaying the MRI image, resolution and field of view; basic imaging techniques and sequences; the contrast; imaging artifacts; special imaging techniques, advanced sequences; clinical applications of various sequences; the MRI hardware; safety and environmental issues.

*Irodalom / Literature:* C Westbrook, CK Roth, J Talbot: MRI in Practice (3rd edition) Wiley-Blackwell, ISBN-13: 978-1405127875

### **Nukleáris medicina (2/0/1/v/4)**

*Tárgyfelelős/ Responsible lecturer:* Czifrus Szabolcs

A tantárgy célkitűzése és részletes tematikája: a nukleáris medicinához kapcsolódó orvofizikai fogalmak, mérés technikai kérdések, valamint a nukleáris medicinában alkalmazott berendezések (PET, SPECT) működési alapjainak megismertetése a hallgatókkal. A nukleáris medicina módszereinek rövid, összefoglaló, történeti elemeket is tartalmazó áttekintése. A sugárzások detektálása szempontjából lényeges fizikai folyamatok, kölcsönhatási mechanizmusok összefoglalása. A gamma-kamera (Anger-kamera) működési elve: szcintillációs anyagok, fotomultiplierek, a gamma-kamera megvalósítási módjai, kollimációs technikák. Izotópdiagnosztika gamma-kamerás síkleképezéssel: alkalmazott forrástípusok, határfok, elérhető képparaméterek, zajforrások, vizsgálati célok. A SPECT elve, kivitelezésének módjai, képminőséget befolyásoló tényezők, alkalmazási irányok. A PET elve, kivitelezésének módjai, képminőséget befolyásoló tényezők, alkalmazási irányok. A PET alkalmazásához szükséges izotópok előállítása gyorsítóknál, az izotópok bemérése, használatra történő előkészítése. A SPECT és PET CT-vel való kombinálhatósága, ennek előnyei, elérhető képjellemzők. Képrekonstrukciós módszerek, alkalmazhatóságuk, előnyök, hátrányok. PET/SPECT berendezések modellezése Monte Carlo módszerrel. Páciensdózis és dózisellenőrzés. Sugárvédelem az izotópdiagnosztikában, baleseti eljárások.

Objective: to teach students the physical concepts related to nuclear medicine, the nuclear measurement technology issues and the basic ideas related to PET/SPECT technology and operation. Detailed curriculum of the subject: A brief summary of the methods of nuclear medicine, comprising the most important historical aspects. Summary of related nuclear phenomena and interaction types. Operating principle of the Anger camera, scintillating materials, photomultipliers, collimation techniques, implementations of the Anger camera, collimation techniques. Isotope diagnostics of plain image type: types of sources, efficiency, achievable image parameters, sources of noise, goals of examination. Principles of SPECT, methods of implementation, factors influencing the image quality and directions of application. Principles of PET, methods of implementation, factors influencing the image quality and

directions of application. Production of isotopes needed for PET applications in accelerators, measurement and preparation of the isotopes for use. Possibilities to combine SPECT or PET with CT, advantages, achievable image parameters. Image reconstruction methods, their applicability, advantages and disadvantages. Modelling of PET/SPECT devices using the Monte Carlo method. Monitoring patient dose. Radiation protection in nuclear medicine, emergency procedures.

*Irodalom / Literature:* MN Wernick and JN Aarsvold, Emission Tomography: The Fundamentals of PET and SPECT. Elsevier 2004; DL Bailey et al. Positron Emission Tomography. Springer-Verlag London Limited 2005.

### **Orvosi képalkotás (3/1/0/v/4)**

*Tárgyfelelős / Responsible lecturer: Légrády Dávid*

A tantárgy célkitűzése és részletes tematikája: az orvosi képalkotás matematikai és informatikai eszköztárának megismertetése a hallgatókkal. A kép fogalma, matematikai leírása, a képminőség jellemzése (Kontraszt, geometriai felbontás, zaj, detektálási kvantumhatásfok, jel-zaj viszony, MTF), képalkotási módszerek: transzmissziós, emissziós, gerjesztett technikák, a modalitások vázlatos bemutatása (CT, ultrahang, MRI, PET, SPECT), Sugárterek szimulációja, fizikai és matematikai modellezés, matematikai és fizikai fantomok, lineáris rendszerek. Fourier transzformált és képfeldolgozás, a 2D vetítés, tomográfia, radon-transzformáció, szűrt visszavetítés. Iteratív rekonstrukciós módszerek (ML-EM, OSEM) Korrekciós tényezők, a tomográfias rekonstrukció gyakorlata. Multimodalitású rendszerek, regisztráció, szegmentáció, fúzió. Képtömörítés és kommunikációs rendszerek, képtömörítés, DICOM szabvány.

Objective: to teach the mathematical basis for medical image reconstruction.

Detailed curriculum of the subject: the concept of image, mathematical description of images, image quality concepts (contrast, geometrical resolution, noise, quantum efficiency, signal/noise ratio, MTF), medical imaging techniques with transmission, emission and induced emission, brief description of modalities (CT, Ultrasound, MRI, PET, SPECT), simulation of radiation, physical and mathematical modelling, mathematical and physical phantoms, linear systems. Fourier transform in image processing, the Radon transform, 2D filtered backprojection, 3D tomography. Iterative reconstruction methods (ML-EM, OSEM), Correction factors, practice of tomographical applications. Multimodal systems, segmentation, registration. Medical informatics, DICOM format

*Irodalom / Literature:* Frank Natterer, Frank Wübbeling, Mathematical Methods in Image Reconstruction (Monographs on Mathematical Modeling and Computation), SIAM, 2001, B Bendriem, DW Townsend: The Theory and practice of 3d pet, Springer 1998.

### **Röntgendiagnosztika fizikai alapjai (2/1/0/v/4)**

*Tárgyfelelős / Responsible lecturer: Szalóki Imre*

A tantárgy célkitűzése és részletes tematikája: Röntgensugárzás és anyag kölcsönhatási jelenségei: fényelektromos jelenség, rugalmas szórás, Compton-jelenség, röntgensugarak reflexiója, polarizáció, fékezési sugárzás keletkezése és tulajdonságai, párkeltés folyamata, abszorpciós jelenségek. Röntgenforrások: röntgenső, röntgengenerátor, radioaktív izotópok, szinkrotron. Röntgendetektorok: film, fluoreszcens ernyők, gáztöltésű, szcintillációs és félvezető detektorok, mátrixdetektorok, kriogén detektorok. Röntgendetektorok mérés technikai tulajdonságai: hatásfok- és válaszfüggvény, holtidő, koincidencia. Röntgennyaláb abszorpciója, szűrők, röntgenoptikai elemek. Radiológiai képalkotás elemei: nagyítás, szórás szerepe a zaj keletkezésében, kontraszt, felbontás, műtermékek. Kétenergiás röntgen abszorpciometria. Komputer tomográfia mérési geometriái: parallel és cone beam geometria. A CT mechanikai elemei, detektorai, kollimálás, szűrés. Rekonstrukciós eljárások: matematikai alapok, Fourier-féle vetítési tétel, szűrt vetítés, szűrt vissza-vetítési eljárás, algebrai rekonstrukció, térbeli és kontraszt feloldás, a leképezés és rekonstrukció hibái. Reflexiós tomográfia, párhuzamos és legyező vetítési technika rekonstrukciós algoritmusai. A CT orvosi alkalmazásai: angiográfia, teljes test CT, mammográfia, fogászati alkalmazás. Dozimetriai alapfogalmak, eszközök és alkalmazásuk a röntgendiagnosztikában. A röntgensugárzás biológiai hatásai, sugárvédelem, biztonsági kérdések, minőségbiztosítás.

Basic interactions of X-rays with matter: photoelectric effect, coherent scattering, Compton-effect, reflection of X-rays, polarization, Bremsstrahlung, pair production, absorption. X-ray sources: X-ray tube, X-ray generator, radioactive isotopes, and synchrotron. X-ray detectors: film, fluorescent screen, gaseous detectors, scintillation and semiconductor detectors, pixelated detectors, cryogenic detectors. Technical parameters of X-ray detectors: efficiency, response function, dead time, coincidence. Absorption of X-rays, filters, elements of X-ray optics. Imaging in radiology: magnification, noise and scattering, contrast, lateral resolution, artefacts. Dual energy X-ray absorptiometry. Basic measuring geometries for computer tomography: parallel and cone-beam geometry. Mechanics of CT, detectors, collimation, filtering. Reconstruction methods: mathematical basis, projection slice-theorem, filtering projection, filtering back projection, algebraic reconstructions, spatial and contrast resolution, errors of projection and reconstruction. Reflection tomography, reconstruction methods of parallel and fan beam techniques. Medical applications of CT: computer tomography angiography, whole body CT, mammography, dental applications. Basic elements of dosimetry, application of dosimetry in X-ray diagnostic. Biological effects of X-rays, radiation protection, quality assurance.

*Irodalom / Literature:* A.C. Kak, M. Slaney, Principles of Computerized Tomographic Imaging, Electronic Copy (c) 1999, New York;