

**BUDAPESTI MŰSZAKI ÉS GAZDASÁGTUDOMÁNYI EGYETEM**

**Fizikai Tudományok Doktori Iskola**

**Képzési terv  
2014.**

**Tartalom:**

A PhD képzés elemei	2
Mintatanterv	3
Kutatási területek	4
Kutatási témák	6
Tárgycsoportok	32
Tematikák	35

## A PHD KÉPZÉS ELEMEI

A doktori iskola által meghirdetett témákban végzett **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, illetve a doktorjelölt fokozatszerzésre való felkészülését. Témavezető a BME főállású dolgozója vagy Professor Emeritusa, vagy az egyetemmel doktori képzésre együttműködési megállapodást kötött intézmény főállású dolgozója lehet. Külső témavezető mellé a Fizikai Tudományok Doktori Iskola Tanácsa (DIT) konzulens jelöl ki, aki segíti a témavezető munkáját és figyelemmel kíséri a hallgató szakmai haladását.

A doktori képzés során a hallgatók elsősorban az MSC szak tárgyainak kínálatából választhatnak olyan **tantárgyat**, melyet korábban nem hallgattak. A tantárgyak körét tovább bővíti az egyes szemeszterekre meghívott külföldi előadók angol nyelven tartott előadásai, valamint az Eötvös Loránd Tudományegyetemmel kötött megállapodás által biztosított kölcsönös áthallgatási lehetőség.

A képzés része az **irányított oktatás** kötelezően választható tantárgy, mely során a hallgató az előadói és kommunikációs képességeit egy kijelölt oktató irányítása alatt, előre kidolgozott és jól dokumentált oktatási anyag alapján, egyetemi kontakt-óra tartásával fejleszti. A tantárgyat és a hozzárendelt kreditet – a témavezetővel egyeztetve – a témavezető/konzulens tanszékének vezetője jelöli ki, teljesítését a kijelölt oktató javaslata alapján a tanszékvezető igazolja. A képzés idejére összesítve 20 pontot meg nem haladó kredit adható.

A doktori képzésben 180 kreditpontot kell megszerezni. Ebből 110-134 kreditpont a tudományos kutatómunka 30-50 kreditpont az előírt tananyag elsajátítása, 16-20 kreditpont pedig az irányított oktatási tevékenység.

## MINTATANTERV

Képzések és tantárgyak megnevezése	tárgy típus	Szemeszterek						Összes kredit
		1	2	3	4	5	6	
<b>Differenciált szakmai ismeretek (lásd részletes tárgyleírások)</b>								
Specializációs előadás	KV	8/v/8	6/v/6	6/v/6	6/v/6	6/v/6	2/v/2	<b>34</b>
<b>Oktatási tevékenységek</b>								
Irányított oktatás	K		4/f/4	4/f/4	4/f/4	4/f/4		<b>16</b>
<b>Összesen</b>								
<b>Kutatási tevékenységek</b>								
Kutatás	K	22/f/22	20/f/20	20/f/20	20/f/20	20/f/20	28/f/28	
<b>Összesítve</b>		<b>30</b>	<b>30</b>	<b>30</b>	<b>30</b>	<b>30</b>	<b>30</b>	<b>180</b>
<b>KRITÉRIUMTÁRGY</b>								
Idegen nyelv	KR	0/4/a/0	0/4/a/0	0/4/a/0	0/4/a/0	0/4/a/0	0/4/a/0	0
<b>Jelmagyarázat:</b>	Tárgytípus: K: Kötelező tantárgy, KV: kötelezően választható tantárgy 6/v/6 - előadás/vizsga vagy félévközi jegy/kredit							

## KUTATÁSI TERÜLETEK

### **SZILÁRDTESTFIZIKA**

Felelős: Szunyogh László

- Spin-dinamika**
- Magnetooptikai spektroszkópia**
- Nemkonvencionális sűrűség hullámok**
- Topológikus szigetelők és grafén**
- Nemegyensúlyi dinamika**
- Törtszámú kvantált Hall effektus**
- Ab initio elektronszerkezet számítások**

### **NANOFIZIKA**

Felelős: Halbritter András

- Nanomágnesség**
- Atom méretű nanoszerkezetek vizsgálata**
- Kvantumelektronika**
- Molekuláris kvantumrendszerek**

### **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 jelenségek 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 korrelált anyagokon mint pl. szén nanocsövek is. Az itt megvalósuló ún. Tomonaga-Luttinger folyadék állapotban megmutattuk, hogy a spin-relaxáció viselkedése is egzotikus.

F. Simon, B. Dóra, F. Muranyi *et al.*  
Phys. Rev. Lett. **101**, 177003 (2008)

B. Dóra and F. Simon  
Phys. Rev. Lett. **102**, 137001 (2009)

A. Geresdi, A. Halbritter, F. Tanczikó, G. Mihály  
Applied Physics Letters **98**, 212507 (2011)

P. Szirmai, G. Fabian, J. Koltai *et al.*  
Phys. Rev. B **87**, 195132 (2013)

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

- **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 mágneselesen és ferroelektromosan is rendeződő anyagok vizsgálata. Ezekben az anyagokban a szabadsági fokok összefonódása révén erős magnetoelektromos effektus jelenhet meg, vagyis az elektromos polarizáció külső mágnesező térrel, míg a mágnesezettség 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 fehérvérjék 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. Butykai et al.

Scientific Reports **3**, 1431 (2013).

S. Bordács et al.

Nature Physics **8**, 734 (2012).

• **Nemkonvencionális sűrűség hullámok (elmélet).** A nemkonvencionális sűrűség hullámok kutatása mintegy másfél évtizedre tekint vissza. Olyan sűrűség hullámokról van szó, melyekben a rendparaméter (vagy gap függvény) hullámszámfüggő, csakúgy mint a nemkonvencionális szupravezetőkben. A rendparaméternek tipikusan zérushelyei vannak, és átlaga eltűnik a Fermi felületen. Ennek következtében léteznek alacsony energiás gerjesztések, és nem a töltés-, vagy spinsűrűség modulált, hanem például az áramsűrűség. A nemkonvencionális sűrűség hullám alapállapot magyarázhatja az úgynevezett rejtett rend megjelenését egyes töltésátviteli sókban, nehézfermionos anyagokban, de a magashőmérsékletű szupravezetők pszeudogap fázisában is.

Kutatócsoportunk a kvázi-egydimenziós kölcsönható elektronrendszerekben megvalósuló nemkonvencionális sűrűség hullámok elméleti leírását tűzte ki célul. Kidolgoztuk az alacsony hőmérsékletű fázis termodinamikáját, és meghatároztuk a gerjesztési spektrumot. Erre épülnek a további kutatások az optikai és transzport tulajdonságok feltérképezése érdekében. Különösen érdekes következményei lehetnek annak, hogy a nemkonvencionális sűrűség hullámok alacsony energiás gerjesztési spektruma a gap zérushelyei miatt ekvivalens a tömeg nélküli Dirac-fermionokéval, így effektíve relativisztikus elektronokkal állunk szemben szilárdtestekben.

K. Maki, B. Dóra, M. V. Kartsovnik, *et al.*

Phys. Rev. Lett. **90**, 256402 (2003).

K. Maki, B. Dóra and A. Virosztek

In: A. G. Lebed (ed.) The physics of organic superconductors and conductors (Berlin, Springer) p. 569 (2008).

A. Ványolos, B. Dóra and A. Virosztek

Eur. Phys. J. B **77**, 65 (2010).

• **Topológikus szigetelők és grafén (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.

Külföldi kollégák közreműködésével azt vizsgáljuk, hogy egy időben periódikus perturbáció alkalmas lehet-e egy rendszer topológiájának megváltoztatására, egy Floquet topológikus szigetelőt létrehozva. Megmutattuk, hogy egy cirkulárisan polarizált elektromágneses térrel topológiai fázisátalakulást lehet indukálni és javaslatot tettünk eredményeik kísérleti megvalósítására csapdázott hideg atomi rendszerekben. Izgalmas kérdés a jövőre nézve, hogy léteznek-e frakcionális Floquet topológikus szigetelők, kvantált elektromágneses térrel is el lehet-e érni hasonló állapotokat, illetve hogy az esetlegesen jelenlévő rendezetlenségnek milyen hatása van a kialakuló állapotokra. Ezzel párhuzamosan a részecskék közti elektron-elektron kölcsönhatás hatásának vizsgálata a topológikus tulajdonságokra is az izgalmas témák közé tartozik.

B. Dóra, J. Cayssol, F. Simon, R. Moessner,  
Phys. Rev. Lett. **108**, 056602 (2012)

J. Cayssol, B. Dóra, F. Simon, R. Moessner,  
Phys. Stat. Sol. RRL **7**, 101 (2013)

B. Dóra, I. F. Herbut, R. Moessner,  
Phys. Rev. B **90**, 045310 (2014)

• **Nemegyensúlyi dinamika (elmélet).** A csapdázott hideg atomi rendszerek kutatásában végbemenő technológiai fejlődésnek köszönhetően napjainkban egyre nagyobb figyelem fókuszálódik a nemegyensúlyi dinamika témakörére. Míg a (közel) egyensúlyi rendszerek leírására számos megbízható analitikus és numerikus módszer áll rendelkezésre, beleértve a fluktuáció-disszipáció tételeket is, addig ezek nagy része csődöt mond erősen nemegyensúlyi feltételek között. Alacsony dimenziós rendszerekben a redukált térbeli dimenzionalitás, a nem adiabatikus időfüggés és az esetleges korrelációs effektusok miatt számos érdekes jelenség figyelhető meg. Megvizsgáltuk a grafénben és topológikus szigetelőkön élő Dirac elektronok nemlineáris vezetőképességét erős elektromos térben, melyet a Schwinger féle párkeltés dominál. Vizsgáltuk továbbá egy véges idejű kvantum quench (a kölcsönhatás hirtelen megváltoztatása) hatását a kölcsönható egydimenziós részecskéket leíró Luttinger folyadékban: a korrelációs függvényekben egyszerre vannak jelen adiabatikus, illetve hirtelen quench-re jellemző korrelációk és meghatároztuk a quench közben végzett munka statisztikáját. Az egyensúlyi jelenségek nagy részéhez hasonló nemegyensúlyi folyamatok, pl. nemegyensúlyi fázisátalakulások vizsgálata szintén érdekes feladat.

B. Dóra, M. Haque, G. Zaránd,  
Phys. Rev. Lett. **106**, 156406 (2011)

F. Pollmann, M. Haque, B. Dóra,  
Phys. Rev. B **87**, 041109(R) (2013)

B. Dóra, F. Pollmann, J. Fortágh, G. Zaránd,  
Phys. Rev. Lett. **111**, 046402 (2013)



• **Törtszámú kvantált Hall effektus (elmélet).** A törtszámú kvantált Hall effektusban az elektronok közötti Coulomb taszítás hoz létre erősen korrelált kvantumfolyadék állapotokat, amelyek számos szokatlan tulajdonságot mutatnak. Ilyenek pl. az elemi töltés törtrészeinek megfelelő töltésű gerjesztések, a törstatisztikájú gerjesztések, topológikus rendeződés, és egyes állapotokban nemábeli statisztikájú gerjesztések. A jelenségkör egyaránt tartalmaz évtizedek óta fennálló megoldatlan problémákat, mint például a magasabb Landau szinteken megfigyelt tört kvantum Hall állapotok eredete, és az utóbbi években a nem-szokványos kétdimenziós rendszereken végzett kísérletek által felvetett kérdéseket. Foglalkozunk többek között az  $5/2$  betöltésnél fellépő tört kvantum Hall állapot elméleteinek ellenőrzésével, az egy- és kétrétegű grafénben megfigyelt állapotok tulajdonságaival, a különféle konkurens erősen korrelált állapotok közötti fázisátalakulásokkal.

Csaba Tőke and Jainendra K. Jain  
Phys. Rev. Lett. **96**, 246805 (2006)

Ganesh Jaya Sreejith, Csaba Tőke, Arkadiusz Wójs, and Jainendra K. Jain  
Phys. Rev. Lett. **107**, 086806 (2011)

Csaba Tőke and Jainendra K. Jain  
J. Phys.: Condens. Matter **24**, 235601 (2012)

• **Ab initio elektronszerkezet számítások (elmélet)** 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 Korringa-Kohn-Rostoker Green-függvényes módszerrel főként fémek és fémötvözetek, valamint felületek mechanikai és mágneses tulajdonságait tanulmányozzuk, kiemelt tekintettel a relativisztikus spin-pálya kölcsönhatás következményeire. Kutatásaink fókuszpontjában a mágneses anizotrópia, a Bychkov-Rashba effektus, a magnetokalorikus effektus, valamint a véges hőmérsékletű itineráns mágnesség vizsgálata áll. A DFT elméleten túlmutató fejlesztésekkel (LDA+U, self-interaction correction) korrelált elektronrendszerek tulajdonságait tanulmányozzuk.

S. Bhandary, O. Grånäs, L. Szunyogh, *et al.*  
Phys. Rev. B **84**, 092401 (2011)

Sz. Vajna, E. Simon, A. Szilva, *et al.*  
Phys. Rev. B **85**, 075404 (2012)

A Deák, E. Simon, L. Balogh, *et al.*  
Phys. Rev. B **89**, 224401 (2014)

## NANOFIZIKA

- **Nanomágnesség (elmélet)** A különféle mágneses anyagok (tömbi fémek, fémötvözetek, fém-oxidok, mikro- és nanokristályos anyagok, vékonyrétegek és nanorészecskék) rengeteg műszaki és tudományos eszköz alapvető jelentőségű alkotórészei. Az alkalmazások sokrétősége megkívánja ezen anyagok fizikai tulajdonságainak (Curie- ill. Néel hőmérséklet, hiszterézis görbe, mágneses szuszceptibilitás, elektromos vezetés stb.) finomhangolását. Különösen a nanotechnológia nyitott meg új távlatokat, mivel az atomi vagy ahhoz közeli méretskálán új és meglepő, számos esetben igen nagy gyakorlati hasznú jelenségeket fedeztek fel. A kísérleti módszerek mellett az elméleti, főként számítógépes szimulációkon alapuló vizsgálatok mindig is a kutatás szerves részét képezték, hiszen sok esetben ezek segítenek a jelenségek megértésében, részletes analizisében, sőt az új fejlesztésekben is. Az atomi mágneses momentumok (spinek) időfejlődését követő atomi szintű spin-dinamika és a nagyobb méretskálán folytonos modellel dolgozó mikromágneses szimulációk már több évtizede a mágneses alap kutatások megkerülhetetlen vizsgálati eszközei. A nanostruktúrák nagyfokú térbeli és kémia komplexitása szükségessé teszi, hogy a spin-modellek paramétereit az atomi szerkezetnek megfelelő szelektivitással vegyük figyelembe. Ez csak a kvantummechanika alapján működő, modern szilárdtestfizikai számításokkal lehetséges.

A BME Elméleti Fizika Tanszékén több számítógépes módszert fejlesztettünk ki, melyek megnyitották a lehetőséget, hogy az atomi spin-dinamika szimulációkat ki lehessen terjeszteni a *mágneses anizotrópia és a Dzyaloshinskii-Moriya (DM) kölcsönhatás* figyelembevételével. Többek között megmutattuk, hogy az Fe/W(110) monoréteg *spin-hullám spektrumának királis aszimmetriája*, valamint az IrMn<sub>3</sub>/Co antiferromágnes-ferromágnes határfelületen az *exchange bias* jelenség oka a DM kölcsönhatás. Kutatásaink fókuszában a nagysűrűségű mágneses adattárolás technológiájának alapjául szolgáló mágneses jelenségek számítógépes vizsgálata áll. Kiterjedten tanulmányozzuk az ultravékony mágneses filmekben előforduló komplex mágneses szerkezeteket, mint pl. a *spin-spirál és skyrmion állapotokat*, és a *mágneses fázisátalakulásokat*. Új fejlesztésünk a mágneses nanorészecskékre alkalmazható *ab initio spin-dinamika* eljárás. Ebben a módszerben nincs szükség a spin-modellre, melyek a mágneses rendszer energiáját csak közelítő jelleggel írják le és származtatásuk sok esetben nehézkes. Ehelyett a Landau-Lifshitz-Gilbert egyenletben megjelenő effektív teret közvetlenül az elektronszerkezetből számoljuk, és lehetővé válik a rendszer spin-konfigurációnak önkonzisztens meghatározása, valamint a nanorészecskék *szuperparamágneses viselkedésének* tanulmányozása.

L Udvardi and L. Szunyogh

Phys. Rev. Lett. **102**, 207204 (2009)

R. Yanes, J. Jackson, L. Udvardi, L. Szunyogh and U. Nowak

Phys. Rev. Lett. **111**, 217202 (2013)

A Szilva, M. Costa, A. Bergman *et al.*

Phys. Rev. Lett. **111**, 127204 (2013)

• **Atomi méretű nanoszerkezetek vizsgálata – molekuláris elektronika és memrisztor kontaktusok (kísérlet)** A nanofizikai kutatások kiemelt területét jelentik az olyan elektronikai eszközök, melyekben az aktív zónát csupán egy, vagy néhány molekula alkotja. Egyedi molekulákra épülő elektronikai rendszerek fejlesztésében komoly kihívás a molekulák reprodukálható kontaktálása és a molekuláris nanoszerkezetek viselkedésének mikroszkópikus megértése. Ilyen kísérletek végzésére alkalmas a laboratóriumunkban kidolgozott MCBJ (Mechanically Controllable Break Junction) technika, amellyel két fém elektróda távolsága a szub-atomi méretskálán néhány pm-es stabilitással szabályozható. A folyékony hélium hőmérsékleten végzett mérések a rendszer kiemelkedő stabilitásának biztosítása mellett lehetővé teszik reaktív, szobahőmérsékleten gyorsan elszennyeződő elektródák használatát, illetve nagyfelbontású spektroszkópiai módszerek (szupravezető subgap mérések, rezgési spektroszkópia) alkalmazását. Kísérleteink célja a molekulák alacsony hőmérsékleti kontaktálási technikáinak kifejlesztése; a molekula és az elektróda anyagának megfelelő kiválasztásával reprodukálható, jól definiált molekuláris kontaktusok létrehozása, és azok tanulmányozása vezetőképesség görbék és feszültség-áram karakterisztikák segítségével.

A molekuláris elektronika mellett számos további kutatási irány keresi a jelenlegi félvezető technológiák alternatíváit. Kifejezetten érdekes terület a memrisztorok fizikája, melyek olyan passzív áramköri elemek, amiknek az ellenállása függ az előéletüktől. Egy ionosan vezető nanokontaktusban megfelelően nagy feszültség hatására kialakítható egy jól vezető, fémes nanovezeték a két elektróda között, míg ellentétes polaritású feszültséggel ez a nanovezeték lebontható, azaz megfelelően nagy feszültség segítségével információt írhatunk egy parányi nanokontaktusba, míg alacsony feszültségnél a memória állapotának megváltoztatása nélkül kiolvashatjuk az információt. Közel atomi méretű memrisztorok kontaktusok kapcsolási dinamikáját saját fejlesztésű pásztázó alagútmikroszkóp mérőrendszerrel vizsgáljuk laboratóriumunkban.

A Geresdi, M. Csontos, Á. Gubicza, A. Halbritter, G. Mihály  
Nanoscale **6** 2613 (2014)

P. Makk, D. Tomaszewski, J. Martinek *et al.*  
ACS NANO **6**, 3411 (2012)

A Geresdi, A. Halbritter, A. Gyenis, P. Makk, G. Mihály,  
Nanoscale **3**, 1504 (2011)

P. Makk, D. Visontai, L. Oroszlány *et al.*  
Phys. Rev. Lett. **107**, 276801 (2011)

A Halbritter, P. Makk, S. Mackowiak *et al.*  
Phys. Rev. Lett. **105**, 266805 (2010)

- **Kvantumelektronika (kísérlet)** Hibrid nanostruktúrák vizsgálata napjaink nanofizikai kutatásainak egyik élenjáró területe. Egzotikus elektromos tulajdonsággal bíró (szupravezető, ferromágneses) makroszkopikus elektródák kombinálása nemkonvencionális nanoméretű objektumokkal (szén nanoszerkezetek, félvezető nanovezetékek) új fizikai jelenségek széles skáláját eredményezi a szupravezető/ferromágneses elektronkorrelációk valamint a Coulomb-kölcsönhatásból és méretből adódó kvantumeffektusoknak köszönhetően. Az elkövetkezendő időben ezen jelenségek körök komoly érdeklődésre tartanak számot, hiszen a hibrid nanoszerkezetek vizsgálata koncepcionálisan új nanoelektronikai eszközök fejlesztése előtt nyitja meg az utat. Laboratóriumunkban elektronsugár-litográfiával létrehozott hibrid nanoáramkörök transzporttulajdonságait vizsgáljuk ultra-alacsony hőmérsékleti mérőrendszerben, méréseinkben külön hangsúlyt fektetünk a mágneses és szupravezető korrelációk vizsgálatára.

Z. Scherübl, A. Pályi, S. Csonka  
Phys. Rev. B **89**, 205439 (2014)

L. Hofstetter, S. Csonka, A. Baumgartner *et al.*  
Phys. Rev. Lett. **107**, 136801 (2011)

L. Hofstetter, A. Geresdi, M. Aagesen *et al.*  
Phys. Rev. Lett. **104**, 246804 (2010)

L. Hofstetter, S. Csonka, J. Nygard, C. Schonenberger  
Nature **461**, 960 (2009)

- **Molekuláris kvantumrendszerek vizsgálata (elmélet)** Kvantum-térelméleti módszerekkel tanulmányozzuk molekulák, és néhány nanométeres mesterséges molekulák egzotikus korrelált állapotait és nem egyensúlyi transzport tulajdonságait. Különös hangsúlyt fektetünk a szupravezető ill. ferromágneses komponensekből épített hibrid molekuláris áramkörökre és struktúrákra. Vizsgálatainkhoz elsősorban numerikus renormálási csoport módszert valamint nem egyensúlyi kvantum-térelméleti módszereket használunk, a számítások eredményeit pedig gyakran közvetlenül kísérleti eredményekkel vetjük össze.

A. J. Keller, S. Amasha, I. Weymann *et al.*  
Nature Physics **10**, 145 (2014)

Sz. Csonka, I. Weymann and G. Zarand  
Nanoscale **4**, 3635-3639 (2012)

J. Basset, A. Yu. Kasumov, C. P. Moca *et al.*  
Phys. Rev. Lett. **108**, 046802 (2012)

## KVANTUMRENDSZEREK FIZIKÁJA

• **Kvantum-térelméleti módszerek alkalmazása korrelált kvantum-fázisok és dinamikai tulajdonságaik leírására.** Az erősen korrelált rendszerek a modern fizika egyik legizgalmasabb területét képezik. 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 működő két 'Lendület' kutatócsoport munkája 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. Az analitikus módszerek eredményeit gyakran numerikus számítások eredményeivel vetjük össze: az ún. kvantum-szennyezés problémák esetében numerikus renormálási csoport módszert (NRG) vagy kvantum Monte-Carlo módszert használunk, míg pl. egy dimenziós kvantum rendszerek leírásánál sűrűségmátrix renormálási csoportot (DMRG) illetve más mátrix-szorzat állapot technikákat (TEBD=time evolving block decimation), vagy csonkolt konform térelméletet (TCSA) alkalmazunk. Kutatásainkban különösen 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).

B. Pozsgay, M. Mestyán, M.A. Werner, M. Kormos, G. Zaránd, and G. Takács  
Phys. Rev. Lett. in print, arXiv:1405.2843 (2014)

S. Sotiriadis, G. Takacs, and G. Mussardo  
Physics Letters B **734**, 52-57 (2014)

Balázs Dóra, Frank Pollmann, József Fortágh, and Gergely Zaránd  
Phys. Rev. Lett. **111**, 046402 (2013)

G. Fehér and G. Takács  
Nucl. Phys. **B852** 441 (2011)

François Crépin, Gergely Zaránd, and Pascal Simon,  
Phys. Rev. Lett. **105**, 115301 (2010)

• **Multifraktál állapotok rendezetlen rendszerekben.** A numerikus szimulációk alapján már több évtizede tudjuk, hogy a rendezetlenség hatására létrejövő fém-szigetelő átalakulás kritikus pontja körül multifraktál fluktuációkat mutatnak a sajátállapotok. Legújabban sikerült az Anderson-féle lokalizációt sőt már az átalakulásnál tapasztalható multifraktál viselkedést is hideg atomokon illetve mágneses félvezetőkön végzett kísérletekben kimutatni. Ennek megfelelően ismét igen nagy figyelem öszpontosult a jelenség vizsgálatára. Nagy tapasztalatra tettünk szert az Anderson-átmenet leírása kapcsán bevezetett ún. hatvány-függvény véletlen sávmátrixok (PBRM: power-law band random matrix) alkalmazásában. Segítségével az Anderson-átmenet és más fizikai körülmények egymásra hatását vizsgáltuk.

Az utóbbi időben annak próbálunk utánajárni, hogy milyen módon jelentkezik a multifraktál sajátállapotok hatása a különböző fizikai mennyiségekben, miként módosítja más fizikai jelenségeket. Vizsgáljuk továbbá, hogy az átalakulást más körülmények hogyan befolyásolják: globális szimmetriák, lokális perturbációk, külvilággal történt kapcsolódás, szóródás, a

rendszer topológiája, stb. A jövőben vizsgálni szeretnénk a multifraktalitást impulzus-térben, a dekoherencia hatását, illetve a véges rendszerekben újabban kutatott thermalizáció és kvantum-kvencs jelenségét, aminek numerikus szimulációjához kiváló terepet nyújtanak a legújabb véletlen mátrix modellek.

S. Kettemann, E.R. Mucciolo, I. Varga, and K. Slevin  
Phys. Rev. B **85**, 115112 (2012)

J.A. Méndez-Bermúdez, V.A. Gopar, and I. Varga  
Phys. Rev. B **82**, 125106 (2010)

L. Újfalusi and I. Varga  
Phys. Rev. B **86**, 125143 (2012), Phys. Rev. B *ibid*, arXiv:1405.1985

J.A. Méndez-Bermúdez, A. Alcazar-López, and I. Varga  
EPL **74**, 125114 (2012), *ibid* arXiv:1303.5665

• **Kvantum információelmélet és kvantumoz összefonódottság.** 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 a SLOCC osztályok szerkezetének megértéséhez a geometriai és algebrai módszerek alapvető fontosságúnak bizonyultak. Ezen módszerek segítségével, nemcsak gyakorlati szempontból fontos és hatékony összefonódottsági mértékek megkonstruálására nyílt lehetőség, hanem arra is, hogy a kvantálás és a geometria mindenkit izgató alapkérdéseit egy új szempontból vizsgálhassuk. Több részrendszerre azonban (pl. már négy qubitnál nagyobb rendszerek esetén) a SLOCC osztályok szerkezete igen elbonyolódik. Ezért célszerű fizikai szempontból jól motivált, durvább klasszifikációs sémákat keresni.

Egy az utóbbi időben általunk kifejlesztett módszer azon alapul, hogy fenti részrendszereket egy nagyobb, megkülönböztethetetlen részrendszerekkel rendelkező fermionikus rendszer részeként képzeljük el. Ez a matematikai szempontból igen hasznos beágyazás lehetővé teszi, hogy a megkülönböztethető rendszerekkel kapcsolatos összefonódottság bizonyos típusait mint a fermionikus összefonódottság speciális eseteit vizsgálhassuk. Ez a technikai trükk utat mutat a bonyolultabb rendszerek SLOCC osztályainak általánosítása felé. Sajnos a fermionikus összefonódottság kvantum informatikai szempontból érdekes fizikai jelentése csak részben tisztázott. Ezért a fenti módszer fizikai jelentésének megértése alapvető fontosságú.

P. Lévy, Sz. Nagy and J. Pipek  
Phys. Rev. A **72** 022302 (2005)

Sz. Szalay, P. Lévy, Sz. Nagy and J. Pipek  
J. Phys. A **41** 505304 (2008)

P. Lévy, and P. Vrana  
Phys. Rev. A **78** 022329 (2008)

P. Vrana and P. Lévay  
J. Phys. **A42** 285303 (2009)

G. Sárosi and P. Lévay  
J. Phys. A Math. Theor. **47** 115304 (2014)

G. Sárosi and P. Lévay  
Phys. Rev. **A89** 042310 (2014)

- ***Kvantumelektrodinamika alkalmazásai.*** A kvantumoptikai kutatások az elmúlt évben kezdődtek el a Fizika Tanszéken. Kiindulási célunk az volt, hogy a kvantált elektromágneses tér valamint a fény-anyag kölcsönhatás sajátos tulajdonságait felhasználva – a gyakorlatban is jól használható – elrendezéseket valósítsunk meg. Ezen kísérleti összeállítások megteremtik a lehetőségét annak, hogy alap kutatási feladatokra is koncentrálhassunk (pl. a foton kvantumállapotának mérése). Első lépésben egy – ”nem egyfotonos” – kvantum kulcs-küldő rendszer összeállításán dolgozunk. Az adót és a vevőt optikai szál köti össze. Távlabbi céljaink között szerepel a szabad téri kvantumbit küldés kutatása, amely megteremtheti a Föld-műhold, valamint a műhold-műhold kapcsolat felállításának lehetőségét, azaz kvantumcsatorna létrehozását. Ezen kísérletek ”hozományaként” megjelenő tapasztalat, valamint eszközháttér lehetőséget ad arra, hogy fizikus- és mérnök hallgatók számára kvantumoptikai hallgatói méréseket hozzunk létre, amelyek közül az első, egy kísérleti kvantum radír elrendezés már elkészült. Alap kutatási tevékenységünket 2015-től egy OTKA pályázat is támogatja.

## STATISZTIKUS FIZIKA

- **Szemcsés anyagok fizikája.** A makroszkopikus szemcsékből álló rendszerek nagy technológiai jelentőségűek, és komoly tudományos kihívást jelentenek. Sajátos viselkedésük oka a sűrűdésből és a disszipációból eredő nemlinearitás, illetve az ebből 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. A modellalkotás célja ezen jelenségek minél általánosabb, lehetőleg kvantitatív leírása.

J Török, T Unger, J Kertész, DE Wolf  
Phys. Rev. E **75** (1), 011305 (2007)

T Börzsönyi, B Szabó, G Törös, S Wegner, J Török, E Somfai, T Bien, R. Stannarius  
Phys. Rev. Lett. **108** (22), 228302 (2012)

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

- **Komplex rendszerek modellezése.** 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. A modellezést nagyban segíti, hogy az információs társadalom terjedésével mind több adat érhető el, amivel a modelleket tesztelni lehet.

J.M. Kumpula, J.-P. Onnela, J. Saramäki, K. Kaski, J. Kertész  
Phys. Rev. Lett. **99**, 228701(2007)

J Török, G Iñiguez, T Yasseri, MS Miguel, K Kaski, J Kertész  
Phys. Rev. Lett. **110** (8), 088701 (2013)

D.X. Horváth and J. Kertész  
New J. Phys. **16**, 073037 (2014).

- **Nagy adattömegek elemzése (big data).** Az információ-kommunikációs technológia fejlődése oda vezetett, hogy tevékenységeink jelentős részéről digitális nyomot hagyunk, óriási mennyiségű adatot hozva létre. Ezeknek a feldolgozása korábban elképzelhetetlen vizsgálatokat tesz lehetővé. A statisztikus fizika módszerei és megközelítési módja az adatelemzésnél már eddig is számos, jelentős eredményhez vezetett. Kiderült, hogy nagyon különböző rendszerek (pl. a sejtben lejátszódó reakciók, az internet, vagy társadalmi kapcsolatok) komplex hálózatai univerzális sajátosságokkal jellemezhetők: pl. széles fókuszeloszlásuk, kis átmérőjük van. A cél valójában mindig a komplex rendszer megértése. Ehhez fel kell tárni a hálózatok topológiáját, a hálózatokon zajló folyamatoknak, illetve maguknak a hálózatoknak a dinamikáját. Olyan adattömegeket vizsgálunk (pl. telefonhívások, online szociális hálózat, Wikipedia) amelyek segítségével igen nagy hálózatok szerkezetét és dinamikáját tudjuk feltárni.



J.-P. Onnela, J. Saramäki, J. Hyvonen, G. Szabó, D. Lazer, K. Kaski, J. Kertész, A.-L. Barabási  
PNAS **104**, 7332-7336 (2007)

Taha Yasseri, Robert Sumi, András Rung, András Kornai and J. Kertész  
PLoS ONE **7**(6), e38869 (2012)

L. Kovanen, K. Kaski, J. Kertész, J.Saramäki  
PNAS, 2013, doi:10.1073/pnas.1307941110

• ***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.

B. Pozsgay, M. Mestyán, M.A. Werner, M. Kormos, G. Zaránd, and G. Takács,  
Phys. Rev. Lett. in print (2014), arXiv:1405.2843.

## 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, PET detektormodul, mesterséges szemlencse). 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).

Z. Göröcs, G. Erdei, T. Sarkadi, F. Ujhelyi, J. Reményi, P. Koppa and E. Lőrincz, *Optics Letters*, **32** (16), 2336-2338, 2007.

E. Jeszenszky, L. Kocsányi, A. Barócsi and P. Richter, *Applied Spectrosc.* **60**, 162-167 (2006).

Dalma Héricsz, Tamás Sarkadi, Viktor Lucza, Viktor Kovács, and Pál Koppa *Opt. Express* **22**, 17823-17829 (2014)

Örs Sepsi, Tibor Gál, and Pál Koppa, *Opt. Express* **22**, A1190-A1196 (2014)

Tamás Sarkadi and Pál Koppa, *Appl. Opt.* **51**, 8068-8073 (2012)

### **Lézerfizika**

• **Lézerrendszerek.** A BME Atomfizika Tanszék femtoszekundumos (fs) lézerlaborjában rendelkezésre áll egy 5 W Millennia 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 rendszer folyamatos fejlesztés alatt áll és segítségével számos projekthez kapcsolódó kutatás– elvégezhető. 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. Femtoszekundumos lézer kombinálása lézer-indukált letörési spektroszkópiával (kétipulzusos LIBS): az impulzus rövidege nagy lokális és pillanatnyi energiasűrűséget jelent, így a fs impulzussal generált plazma jóval magasabb hőmérsékletű, mint a ns pulzussal generált, de nem károsítja termikusan a mintát és így nem befolyásolja az összetételt. Femtoszekundumos optikai kommunikáció (Geodesy Kft.). Nanostruktúrák létrehozása különböző felületeken (pl. reflexiócsökkentésre) napelemek hatásfokának növelésére: pl. ns lézerrel 10  $\mu\text{m}$  a struktúra hegye, míg fs lézerrel 10-100 nm. Szakértői részvétel a szegedi ELI (extreme light infrastructure, ELI-HU Kft.) szuperlézer-rendszer fejlesztésében.

Barócsi A., Jakab L., Maák P., Richter P., „Eljárás és berendezés femtoszekundumos lézerek szabadtéri optikai adatátviteli alkalmazására”, lajstromszám: 227.792, ügyszám: P 06 00041, közzététel éve: 2012, benyújtás helye: Magyarország

G Katona, G Szalay, P Maák *et al.*  
Nature Methods **9**, 201-208, 2012

- **Ultragyors fényimpulzusok fizikája.** A BME Atomfizika Tanszéken rendelkezésre álló femtoszekundumos (fs) lézertábor, 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: nyalábdiaosztika (infrakamera a nyaláb követésére, 500–1000 nm-es spektrométer, teljesítménymérő 1 W-ig, gyors fotodetektor <1 ns felvételi idővel, kétfotonos kristály, prizmás nyalábkompresszor). További speciális eszközök az ultragyors impulzusok alakjának vizsgálatára: autokorrelátor, spektrálisan bontott autokorrelátor (frequency-resolved optical gating, FROG) mérőeszköz, valamint spektrális interferometria (interferométer + spektrométer kombinációja).

Maák P., Veress M., Rózsa B., Szipőcs R., Richter P.  
Physica Status Solidi C – Current Topics in Solid State Physics, **8**, 2885-2889, 2011

### Fotonikai eszközök

- **Fényforrások.** Napjainkban a LED-es fényforrások és megvilágító rendszerek a mindennapi élet nélkülözhetetlen elemeivé váltak, így elengedhetetlen a kutatás–fejlesztésük. Többek között a General Electric Lighting Hungary és a BME Atomfizika Tanszék közös kutatás-fejlesztési projektjében olyan korszerű LED-es megvilágító rendszereket fejleszt, amelyek megfelelnek napjaink legszigorúbb elvárásainak: nagy hatásfok és fényintenzitás, hosszú élettartam, egyenletes fénysűrűség eloszlás és a természetes fényhez közeli meleg színhőmérséklet.

Nagy felületű LED mátrix fejlesztése hivatott a hagyományosan beltéri megvilágítást szolgáló kompaktfénycső-rendszereket kiváltani. Cél, hogy rugalmas alak formálható, akár nagy falfületeket is beborító, egyenletes fénysűrűség-eloszlást biztosító fényforrást hozzunk létre úgy, hogy az esztétikai szempontból zavaró diszkrét LED fényfoltokat diffúzorok segítségével összeolvasszuk, miközben a rendszer hatásfokát is magasan tartjuk.

A LED-es fényforrások emissziós spektrumát (színét) a különböző reflektor és térfogati diffúzor elemek módosíthatják. Optikai modellezés segítségével figyelembe vehető a különböző optikai elemek hullámhosszfüggő reflexiója és transzmissziója, ezáltal a kimenet fényeloszlás spektruma is megjósolható.

Kültéri, utcai megvilágítás esetén egymástól akár 24 méteres távolságra is elhelyezkedő LED-es lámpatesteket használunk. A fényforrások széles térszögben világítanak, ezáltal az útfelület egyenletes megvilágítást kap, emellett nem szabad, hogy a lapos szögben kibocsátott fénysugarak elvakítsák a távolból érkező megfigyelőt. A legfontosabb szempont a nagy intenzitású, homogén megvilágítást nyújtó fényeloszlás, erre a célra speciális lencsoptikákat tervezünk, amelyek egyben biztosítják a rendszer magas hatásfokát is.

Számos LED-es alkalmazásban (pl. optikai kommunikáció, folyadékkristályos kijelzők) előny, ha a fényforrás polarizált. Sajnos a jelen LED technológiáknak csak kis része eredményez polarizált LED-et, így az alkalmazások többsége külső polarizátorokkal dolgozik,

amivel gyakorlatilag a fény fele elveszik. A reflektált fény megfelelő kicsatolása, vagy beágyazott nanorészecskék alkalmazása növelheti a polarizált kicsatolás hatásfokát.

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

- **Akusztóoptikai eszközök.** Az akusztóoptikai (AO) fejlesztőlaborban rendelkezésre áll a technológiai műveletsor és kísérleti bázis optoelektronikai eszközök készítésére és tesztelésére. Elsősorban rezonátoron belüli (Q-kapcsolók, móduscsatolók, impulzusritkítók) és rezonátoron kívüli (spektrális szűrők, eltérítők, modulátorok) alkalmazású AO és elektrooptikai eszközöket fejlesztünk, amelyek a legkülönbözőbb lézerekben és lézerrendszerekben kerülnek alkalmazásra.

Kiemelt alkalmazás femtoszekundumos lézerimpulzusok alakformálása, ismétlődési frekvenciájának változtatása, valamint a femtoszekundumos lézerek Q-kapcsolása, móduscsatolása, 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, de AO és elektrooptikai modulátorokat alkalmaztunk radarimpulzust-késleltető művonal, mikrohullámú szűrő, vagy szabadtéri optikai kommunikációs vonal építésére.

Az AO kölcsönhatás elméleti vizsgálatával számos tudományos publikáció és könyv foglalkozik, azonban nincs köztük olyan, amelyik megkísérelné a jelenség pontos numerikus megoldását. A mérésekkel leginkább összehasonlítható eredményt az ún. csatolt-hullám egyenletek módszere ad, ami lényegében egy-dimenziós analitikus modell, mely a fényt is és a hangot is tökéletes síkhullámnak kezeli. A valóságban azonban sem a hang, sem a fény nem az. Ezért foglalkozunk egy minél pontosabb, komplex AO modell létrehozásával (pl. anizotróp, optikailag aktív, inhomogén közegben).

Maak P, Takacs T, Barocsi A, Kollar E, Richter P,  
Ultrasonics, **51**, 441-451, 2011

G. Mihajlik, P. Maák, A. Barócsi,  
Optics Communications, **285**, 2255-65, 2012

G. Mihajlik, A. Barócsi, P. Maák,  
Optics Communications, **310**, 31-34, 2014

- **Detektorok.** Megbízható szimulációs modellek szükségesek ahhoz, hogy olyan komplex rendszereket, berendezéseket tervezzünk és építsünk, mint pl. a pozitron emissziós tomográf (PET). Ezen rendszerek kulcselemei a detektoregységek, melyek maguk is komplex eszközök. A PET-detektorok szcintillátor mátrixot, vagy monolit kristályt tartalmaznak a gamma-fotonok detektálására. Megfelelő szimulációs eszközök szükségesek a szcintillátor-kristályon belüli folyamatok leírására, illetve a beeső fotonok útjának követésére a detektorig. A szimuláció akkor lehet eredményes, ha az adott komponensek optikai paramétereit pontos kísérleti adatok biztosítják.

A kereskedelmi PET berendezések detektorként tipikusan fotoelektron-sokszorozó csövet (PMT) használnak, míg a kísérleti berendezések újabban szilícium alapú fotoelektron-sokszorozót (SiPM). Ezen és más fotodetektorok gyártói eszközeik karakterisztikus adatait adják meg (pl. kvantumhatásfok a hullámhossz függvényében). Bár ezen adatok a mérésekhez

megfelelőek, a pontos szimulációkhoz ezekből megfelelő (elméleti) modell kell építeni. A modell paraméterei pl. a detektorfelület spektrális reflektanciájának mérésével nyerhetőek.

A komplex detektorok kutatás-fejlesztése nagy jelentőségű különböző spektroszkópiai módszereken alapuló (esetenként interdiszciplináris területen alkalmazott) optikai mérőrendszerekben is. Egy példa a terméshozam előrejelzése fluoreszcens spektroszkópián alapuló méréssel. A fenntartható és versenyképes mezőgazdaság érdekében a növénytermesztés minden szintjén szükség van intelligens technológiák alkalmazására. A terménynövények molekuláris nemesítését segítő eszközök az egyes genotípusok komplex jelleget mutató fenotípusos válaszát (külső jegyeit, illetve viselkedését) jelzik előre különböző környezeti körülmények között – a teljes növekedési ciklus kivárása nélkül. Ehhez természetesen megfelelő – statisztikailag megbízható – adatbázis szükséges, amelynek bemenő adatait intelligens szenzoron alapuló rendszerek nagy-mintaszámú, előfeldolgozott adatai szolgáltatják. Az adatbázis kimenete pedig predikciós algoritmusokon keresztül különböző fajta- produktivitási modelleket vezérel.

Az intelligens fluoreszenzor koncepció lehetővé teszi a szenzorok alkalmazását nagyméretű üvegházi monitoring rendszerben és képesek nagy mintaszám előállítására. Alapja, hogy az egyes szenzorok – egymással párhuzamosan – adott (konfigurálható) protokoll szerint autonóm mérésre képesek minimum egy komplett mérési ciklus tárolásával. A szenzorok vezetékes vagy vezeték-nélküli kommunikációval rendelkeznek a vezérlés, adattovábbítás, illetve hibaelhárítás céljából. A szenzor a növényt (leveleket, terméseket) adott időbeli lefutású és intenzitású fénnel megvilágítja, aminek következtében az kis energiájú, karakterisztikus időbeli válaszu fluoreszcens fényt bocsát ki. A fluoreszcens fény időbeli és spektrális tulajdonságaiból következtetni tudunk a fotoszintézisre – azon keresztül pedig a növények egyedyszintű működésére (adott környezeti paraméterek mellett), illetve örökletes (fajtához rendelhető) tulajdonságaira. A predikciós módszerek pedig segítenek az örökletes tulajdonságok azonosításában a környezeti tényezők okozta válaszok redukálásával.

C. O. Steinbach, F. Ujhelyi and Emőke Lőrincz, „Enhanced Model of Quantum Efficiency for the Optical Simulation of Photodetectors”, IEEE Nuclear Science Symposium and Medical Imaging Conference Record, M10-6, 2555-58, ISBN: 978-1-4673-2029-0, 2012

C. O. Steinbach, F. Ujhelyi and Emőke Lőrincz, Transactions on Nuclear Science, in press, 2014

A Barócsi, Measurement Science and Technology, **24**, 1-14, 2013

Solti Á, Lenk S, Mihailova G, Mayer P, Barócsi A, Georgieva K, „Effects of habitat light conditions on the excitation quenching pathways in desiccating *Haberlea rhodopensis* leaves: An Intelligent FluoroSensor study”, Journal of Photochemistry and Photobiology, **130**, 217-225, 2014

### **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 képfelvevő 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 működhet hasonlóképpen, illetve közvetlenül is előállíthat különbségi csíkokat. A digitális holográfia felbontás- és látótérkorlátja az analóg holográfiát megközelítő szintre emelhető a detektormátrix optikai lekicsinyítésével és letapogatásos módon történő alkalmazásával.

A digitális holográfia segítségével mód van nagy távolságú 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 Sétel, János Kornis  
Optics Communications **284**, 12 (2011)

F.Gyimesi - V.Borbély - B.Ráczkevi -Z.Füzessy  
J. Holography Speckle **1**, 39 (2004).

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

Z.Füzessy, F.Gyimesi , J.Kornis , B.Ráczkevi , V.Borbély and B.Gombkötő  
Technisches Messen **73**, 132 (2006).

## ANYAGTUDOMÁNY

### Felületfizika és felületanalitika

- **Szilíciumkarbid (SiC).** A SiC egy ígéretes félvezető anyag, ami extrém körülmények közötti (magas hőmérséklet, korrozív és radioaktív környezet) működést is lehetővé tesz és nagyfrekvencián is kis veszteségeket mutat. A 3C-SiC politípus kiemelkedik az elektron mozgékonyság tekintetében, de eddig csak heteroepitaxiális réteggént Si felületen tudták előállítani. A jelenleg rendelkezésre álló 3C-SiC rétegek nem alkalmasak eszközök előállítására.

A BME Atomfizika Tanszékén 1997 óta folynak SiC kutatások. Elsőként észleltük, hogy termikus oxidációval létrehozott SiO<sub>2</sub>/Si struktúrát CO-ban, atmoszférikus nyomáson, magas hőmérsékleten hőkezelve a SiO<sub>2</sub>/Si határfelületen a Si-ba ágyazva epitaxiális 3C-SiC kristályok nőnek és a határfelület üregmentes. Az eljárásra a BME AFT-nak és az MTA MFA-nak közös szabadalma van. Célunk 1-7 nm méretű 3C-SiC nanokristályok előállítása és a folyamatok felületanalitikai módszerekkel történő vizsgálata.

O. H. Krafcsik, K. V. Josepovits, P. Deák, L. Tóth and B. Pécz,  
J. Electrochem. Soc. **149(4)** 297-299 (2002).

Zs. Makkai, B. Pécz, I. Bársony, Gy. Vida, A. Pongrácz, K.V. Josepovits, P. Deák  
Applied Physics Letters **86** 253109 (2005)

T. Lohner, A. Pongrácz, N. Q. Khánh, O. H. Krafcsik, K. V. Josepovits and P. Deák  
Physica Status Solidi C – Current Topics in Solid State Physics 5, **(5)** 1337-1340 (2008)

- **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 °C és 250 °C között változtatható. A készüléket 10 μm és 250 μm közötti vastagságú membránok felhasználásával teszteltük, de elméleti akadályok miatt 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, G. Kiss, G. Dobos, F. Réti, T. Majoros, O.H. Krafcsik  
Measurement **46** (2013) 3516-3524

B. Sebők, F. Réti, G. Kiss  
Measurement (2014) – Bírálattal

Sebők B., Kiss G,  
Fizikai Szemle (2014) – Elfogadva

- **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.

B. Sebők, G. Kiss, P.J. Szabó *et al.*

Journal of Materials Science: Materials in Medicine **24** (3) 821-828 (2013)

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

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

- **Gázszenzorok.** A szenzorok a környezet jeleit alakítják át elektromos jelekké. Velük szembeni három alapkövetelmény az érzékenység, szelektivitás és stabilitás. Alkalmazási területük az orvostudománytól kezdve az égési folyamatok kontrollján át az ürtechnikáig terjed. Szinte valamennyi fizikai és kémiai folyamat felhasználható valamely paraméter érzékelésére – mérésére. A félvezető oxid alapú kémiai gázszenzorok a termodinamikai aktivitást konvertálják elektromos jelekké. Ha felületük valamely gázzal kölcsönhat, megváltozik az oxid elektromos ellenállása és kilépési munkája. Kutatásaink célja elsősorban égési folyamatok optimalizálására szolgáló szenzorokkal kapcsolatos. A égéstermék gázok összetételének ismeretében szabályozható vissza maga az égés, főként a légszerűleg megfelelő beállításával. Tanulmányozzuk a gáz-szilárd kölcsönhatás folyamatait, melyek az elektromos jellemzők megváltozásához vezetnek, a kemisorpciót és töltéstranszportot, mind a felületen, mind a tömbi fázisban. Célzott módosításokat végzünk a szenzoranyag érzékenységének növelésére, a szelektivitást rontó keresztteffektusok visszaszorítására és a szenzoranyag stabilitásának növelésére.

U.Lampe, E.Simon, R.Pohle, M.Fleischer, H.Meixner, H.-P.Frerichs, M.Lehmann, G.Kiss,  
Sensors and Actuators B **111-112**, 106-110 (2005)

R. Lampe, E. Simon, R. Pohle, W. Kerstin, M. Fleischer, H. Meixner, R. Schneider, G. Kiss,  
US Patent Application No. 11/587,070 (20. October 2006)

### **Anyagvizsgálatra alkalmas műszerek fejlesztése**

- **Tömegspektrometria.** A repülési idő tömegspektrométer működési elve igen egyszerű. Az ionokat egy adott potenciállal felgyorsítva egy erőmentes térbe vezetjük, ahol az ionok szabadon végigfutnak. Lévéen azonos mozgási energiájuk, minél kisebb az ion annál gyorsabban mozog. Végző soron a legkönnyebb ion éri el előként a detektort, és a beérkezés sorrendje a tömegszám monoton függvénye lesz. A hagyományos TOF berendezésekben tíz nanoszekundum nagyságrendű indító impulzus szükséges, amelyet egy száz mikroszekundum nagyságrendű várakozási időszak követ, amely idő alatt mindegyik elvárt ion beérkezik. A gerjesztés kitöltési tényezője tehát csupán 10<sup>-4</sup> rész, amely korlátozza a mérés érzékenységét. Jelen kutatási téma célja a korábbi projekt során kifejlesztett folytonos ionkibocsátású (CTOF) berendezés továbbfejlesztése úgynevezett Lissajous típusú TOF (LTOF) berendezéssé. A fejlesztés alatt álló LTOF módszer szerint, az ionnyalábot a futási tér elején és végén azonos szinusz függvény szerint egymásra merőleges irányban eltérítjük (tehát nem moduláljuk). Az eltérítő frekvenciát kis azonos méretű lépésekben növeljük, a speciális négysegymenses Faraday serleggel mért jelet számítógéppel regisztráljuk. A regisztrált függvény Fourier transzformációjának útján a repülési idő spektrumot előállítjuk. A mérési elv kísérleti igazolására szolgáló berendezés elkészült. Ennek felhasználásával folytatjuk a fejlesztést, amelynek célja az említett magas kitöltési tényező mellett a több ezres



tömegtartomány és az atomi tömeg egység felbontás elérése. Az LTOF módszer előnye a CTOF módszerrel szemben az, hogy az ionnyaláb közös módusú zavarait eliminálja, valamint jóval nagyobb nyalábbintenzitást biztosít, mivel csupán a nyaláb irányát módosítjuk, de nem akarunk ki hasznos ionokat a jelből.

224 767 magyar szabadalom, 2006

Hars G, Maros I

International Journal of Mass Spectrometry **225(2)** 101-114 (2003)

Hars G

Vacuum **80(4)** 356-365 (2005)

Hars G, Dobos G

Review of Scientific Instruments **81(3)** 033101 (2010)

• **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.

T.Gál, F.Réti, G Kiss, G.Dobos

MOL Scientific Magazine-Szakmai Tudományos Közlemények **2011(2)** 88-96 (2011)

V.Mertinger, M.Benke, G.Kiss, F.Réti

Engineering Failure Analysis **29** 38-44 (2013)

### **Számítógépes anyagtudomány:**

A széles tiltott sávú félvezetőt kedvező fizikiai-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 paramágneses ponthibák szilárdtestekben alkalmasak lehetnek különleges kvantumállapotok megvalósítására, ún. kvantumbitek lehet létrehozni általuk. Erre

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 miniatürizálásában 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 alkalmazhatók, 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.

A.L. Falk, P.V. Klimov, B.B. Buckley *et al.*  
Phys. Rev. Lett. **112** 187601 (2014)

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)

S. Wippermann, M. Vörös, D. Rocca, A. Gali, G. Zimanyi, and G. Galli  
Phy. Rev. Lett. **110**, 046804 (2013).

## NUKLEÁRIS TECHNIKA

- **Reaktorfizika.** A reaktorfizikai kutatások egyik fő csoportját a már meglévő, üzemelő kísérleti reaktorok és atomerőművek biztonságának növelését célzó elemzések, számítások, illetve ezekhez kapcsolódó kódfejlesztés képezi. Ezekben részben a nemzetközileg alkalmazott state-of-the-art Monte Carlo és determinisztikus kódokat, számítási módszereket alkalmazzuk új feladatok megoldására, részben magukat a kódokat is fejlesztjük. Példák a kutatási irányokra: háromdimenziós, nagy pontosságú gyors számításokra alkalmas, végeselemes diffúziós kód fejlesztése atomerőművi töltetelemzésekhez; atomerőművek és kísérleti reaktorok körüli sugárvédő szerkezetek és acél elemek aktiválódásának vizsgálata. Másik kutatási területünk a negyedik generációs atomreaktorok vizsgálata, melynek sorás a biztonság szempontjából fontos reaktorfizikai paraméterek számításán túl rendszerszintű elemzéseket is végzünk a hosszú távú viselkedés kutatása érdekében.

Reiss T., Fehér S., Czifrus Sz.,  
Progress In Nuclear Energy 53:(5) pp. 457-462. (2011)

T Reiss, Gy Csom, S Fehér, Sz Czifrus  
Annals Of Nuclear Energy 41 pp. 67-78. (2011)

M. Szieberth  
Transport Theory and Statistical Physics, vol. 36, no. 1-3, pp. 199–210, 2007.

- **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 lezajló 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.

S. Tóth, A. Aszódi,  
Nuclear Engineering and Design, 264, 126-134, 2013.

S. Tóth, A. Aszódi,  
Kerntechnik, 78 (4), 347-353, 2013.

- **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 spektroszkópiái 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 izotópot tartalmazó objektumok gamma- és röntgen-spektroszkópiái elemzéséhez. Elválasztási és

minta-preparációs eljárási technikák és alfa-spektroszkópiai módszerek fejlesztése biztosítéki minták hatósági elemzéséhez, a hasadóanyagokkal kapcsolatos illegális tevékenységek felderítésére. Radioaktív arzén 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 analizésére.

Szaloki I *et. al.*

X-ray spectrometry Anal. Chem. **78**, 12, 4069, 2006.

B. De Samber, I. Szalóki *et. al.*

J. Anal. Atom. Spect. **23**, 829, 2008.

G. Silversmit, I. Szaloki, L. Vincze

J. Synch. Rad. **16**, 237, 2009.

Evens, R, Szaloki, I *et. al.*

Environ. Sci. Tech. **46**, 2, 1178, 2012.

Balla, M., Gunneweg

J. Archaeometry **49**, 2, 373, 2007.

• **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 fizikai megértést célzó munkákat a kísérleti berendezések építését segítő alkalmazott nukleáris technikai kutatások egészítik ki. Ezek a jelenleg épülő ITER tokamakhoz és kisebb távol-keleti szupravezető tokamakokhoz kötődnek.

Stahl A, Landreman M, Papp G, Hollmann E, Fulop T

PHYS PLASMAS 20: (9) (2013)

A Kómár, GI Pokol, T Fülöp

PHYS PLASMAS 20: 012117 (2013)

Papp G, Fulop T, Feher T *et al.*

NUCL FUSION 53: (12) (2013)

M Sertoli, L Horváth, GI Pokol, V Igochine, L Barrera

NUCL FUSION 53: (5)053015 (2013)

## ORVOSI FIZIKA

- **Orvosi képalkotás ionizáló sugárzással** Az izotópdiagnosztikai vizsgálatok (nukleáris medicina) közül a pozitron emissziós tomográf (PET) és SPECT fejlesztés céljából készített Monte Carlo szimulációs kódok fejlesztésével és demonstrációs eszközök megalkotásával foglalkozunk, új izotópok gyakorlati vizsgálata mellett.

A nukleáris medicina képalkotás területén a minimálisan detektálható halmozás karakterizálása összefügg azzal, hogy ezek az eszközök a leképezendő méretekhez viszonyítva gyakran „gyenge” felbontással rendelkeznek. A képeken általában egy megnövekedett vagy lecsökkent halmozással rendelkező területet tekinthetünk kóros elváltozásnak. Ezek a területek különböző méretűek és alakúak lehetnek, továbbá a halmozás, tehát a kontraszt-viszonyok is eltérőek a kérdéses terület és környezete között. A detektálhatóságot mindenképpen befolyásolja a képet elemző személy is, mert az egyedi percepciók között is határozott különbségek lehetnek. A vizuális detektálhatóság, mint általános probléma vizsgálatára, már számos matematikai megközelítés létezik, amelyek az emberi döntési folyamatot is bevonva próbálják modellezni a kérdést. Kutatásaink célja hogy olyan mérés technikai eljárásokat fejlesszünk ki, amelyek segítségével a nukleáris medicina képeken a detektálhatóságot számszerűen lehet jellemezni.

Kutatásaink másik irányvonala a nyers adatokból a térbeli izotópeloszlás becslésére (képrekonstrukció) szolgáló eljárások készítése. A GPU alapú Monte Carlo modellezés sebessége lehetőséget ad Maximum-likelihood Expectation Maximization módszerrel belül direkt fizikai modellezéssel a fizikai folyamatok mindegyikének explicit figyelembe vételére a rekonstrukció során. Ezzel a módszerrel valós PET adatokat rekonstruálni képes GPU alapú szoftvert hoztunk létre.

A gyakorlati izotópkutatás terén, a  $\beta^+$  bomló radioarzénnel jelzett radiofarmakonok előállítása nagy nyereség lehet a PET-ben. Az arzénizotópok közül különösképpen a hosszú felezési idejű  $^{71}\text{As}$  ( $T_{1/2}=62\text{h}$ ),  $^{72}\text{As}$  ( $T_{1/2}=26\text{h}$ ) és  $^{74}\text{As}$  ( $T_{1/2}=17.8\text{d}$ ) alkalmas lassú fiziológiai vagy anyagszállítási folyamatok vizsgálatára. Kutatásaink fő célja az arzén radiokémiai elválasztása a besugárzott germánium-oxid targettől. A  $^{77}\text{As}$  egyike azoknak a ritka izotópoknak, amelyek a target reaktorban történő besugárzása után hordozómentesen előállíthatók.

L Szirmay-Kalos, B Tóth, M Magdics, D Légrády, A Penzov  
LECTURE NOTES IN COMPUTER SCIENCE 5910: pp. 435-442. (2010)

Lajtos I., Emri M., Kis S.A., *et al.*  
Nucl Instrum Meth A, 2013. 707:26-34

Lajtos I., Czernin J., Dahlbom M. *et al.*  
Phys Med Biol. 2014 Jun 7; 59 (11):2727-46

- **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 véroxigén-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.

Kozák LR, Dávid S, Rudas G, Vidnyánszky Z, Leemans A, Nagy Z  
NEUROIMAGE 69: pp. 198-205. (2013)

Kovács G, Kaiser D, Kaliukhovich D, Vidnyánszky Z, Vogels R,  
JOURNAL OF NEUROSCIENCE 33:(23) pp. 9805-9812. (2013)

- **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 (kobaltágyú, lineáris gyorsítók, tomoterápiás 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 prosztata 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 sugárbiológiai tulajdonságainak vizsgálata, az ép szöveti terhelés vizsgálata a különböző besugárzási technikák és számolási algoritmusok függvényében.

Gershkevitch E, Pesznyak Cs, Petrovic B *et al.*  
Acta Oncologica 53 (5), 628-636, (2014)

Pesznyák Cs, Polgár I, Weisz C, Király R, Zaránd P  
Radiology and oncology 45 (1), 68-74 (2011)

Pesznyák Cs, Fekete G, Mózes Á *et al.*  
Onkol, 185: 56-60. (2009)

• **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 dózis-meghatározás automatikus mikroszkópia segítségével, nagy dózisterek térbeli eloszlásának meghatározása géll dozimetriával, személyi dozimetria szilárdtest-nyomdetektorral, lakossági radonszint-mérés PADC detektorokkal.

Pesznyák Cs, Zaránd P, Mayer Á. Strahlenther  
Onkol, 183: 117-20. (2007),

E. Kis, T. Szatmári, M. Keszei, R. Farkas, O. Ésik, K. Lumniczky, A. Falus, G. Sáfrány.  
Int. J. Radiat. Oncol. Biol. Phys. 66. 1506-14. (2006)

K. Lumniczky, G. Sáfrány,  
Pathol. Oncol. Res. 12. 118-124. (2006)

E. Hulber, D. Selmeczi,  
Radiation Measurements, (2005)

## TÁRGYCSOPORTOK

### ***Szilárdtestfizika tárgycsoport***

Modern szilárdtestfizika (2/2/0/v/5)  
Mágnesség elmélete I (2/0/0/v/3)  
Mágnesség elmélete II (2/0/0/v/3)  
Kölcsönható spinrendszerek valós anyagokban (2/0/0/3)  
Soktestprobléma I (2/0/0/v/3)  
Soktestprobléma II (2/0/0/v/3)  
Csoportelmélet a szilárdtest-kutatásban (2/0/0/v/3)  
Bevezetés a szupravezetés elméletébe (2/0/0/v/3)  
Lokalizációelmélet (2/0/0/v/3)  
Félvezetők fizikája (2/0/0/3)  
Mágneses rezonancia (2/0/0/v/3)  
Mágneses rezonancia 2 (2/0/0/v/3)  
Optikai spektroszkópia (2/0/0/v/3)  
Szilárdtestek elektronszerkezete I (2/0/0/v/3)  
Szilárdtestek elektronszerkezete II (2/0/0/v/3)

### ***Nanofizika tárgycsoport***

Új kísérletek a nanofizikában (2/0/0/v/3)  
Mezoszkópikus rendszerek fizikája (2/0/0/v/3)  
Transzport komplex nanoszerkezetekben (2/0/0/3)  
Egydimenziós rendszerek fizikája (2/0/0/v/3)  
Nanomágnesség (2/0/0/v/3)

### ***Kvantumrendszerek fizikája tárgycsoport***

Véletlen mátrix elmélet és fizikai alkalmazásai (2/0/0/v/3)  
Waveletek, koherens állapotok és változó felbontású analízis (2/0/0/v/3)  
A sűrűségfüggvény elmélet alapjai (2/0/0/v/3)  
Variációs elvek a fizikában (2/0/0/v/3)  
A pályaintegrál módszer a fizikában (2/0/0/v/3)  
Válogatott fejezetek a kvantummechanikából (2/0/0/v/3)  
Kvantumösszefonódás (2/0/0/v/3)  
Kvantumrendszerek koherens kontrollja (2/0/0/v/3)  
Véges hőmérsékletű és nemegyensúlyi térelméletek (2/0/0/v/3)  
Bevezetés az elméleti plazmafizikába (2/0/0/v/3)  
Magnetohidrodinamika alacsony dimenziós rendszerekben (2/0/0/v/3)

### ***Statisztikus fizika tárgycsoport***

Skálázás és kritikus jelenségek (2/0/0/v/3)  
Fázisátalakulások (2/0/0/v/3)  
Nemegyensúlyi statisztikus fizika (2/0/0/v/3)  
Statisztikus térelmélet (2/0/0/v/3)  
Dinamikai rendszerek (2/0/0/v/2)  
Transzportfolyamatok (2/0/0/v/2)  
Evolúciós játékelmélet (2/0/0/v/3)  
Komplex hálózatok (2/0/0/v/3)



### ***Optika tárgycsoport***

Fizikai optika (4/0/0/v/5)  
Lézerfizika (2/0/0/v/3)  
Optoelektronikai eszközök (2/0/0/v/3)  
Holográfia és alkalmazások (2/0/0/v/3)  
Optikai anyagok és technológiák 1 (2/0/0/v/3)  
Optikai anyagok és technológiák 2 (2/0/0/v/3)  
Optikai jelfeldolgozás és adattárolás (2/0/0/v/3)  
Optikai mérés technika (2/0/0/v/3)  
Optikai tervezés (2/2/0/v/4)  
Kvantumelektronika (3/0/0/v/4)  
Optikai adatátvitel fizikai alapjai  
Fényforrások (2/0/0/v/3)  
Bevezetés az ultragyors impulzusok fizikájába (2/0/0/f/2)  
A femtoszekundumos lézerektől az attofizikáig (2/0/0/v/2)  
ELI előkészítő laboratórium (0/0/4/f/2)  
Lézerek és lézerrendszerek tervezése és építése (2/0/0/f/2)  
Infravörös és Raman spektroszkópia (2/2/0/v/3) (2/0/2/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)  
Vizsgálati módszerek az anyagtudományban I (3/0/2/f/5)  
Vizsgálati módszerek az anyagtudományban II (3/0/2/f/5)  
A felületfizika alapjai (2/0/0/f/2)  
Felületfizika és vékonyrétegek I (4/0/0/v/3) (2/0/0/v/3)  
Felületfizika és vékonyrétegek II (4/0/0/v/3) (2/0/0/v/3)  
Az anyagtudomány alapjai és alkalmazásai (2/0/0/v/2)  
Fizikai anyagtudomány (2/0/0/f/3)  
Mikro- és nanotechnológiák (2/0/0/f/2)  
Trendek az anyagtudományban (1/0/0/v/2)  
Kristályos és amorf anyagok (2/0/0/v/3)  
Spektroszkópia és anyagszerkezet (2/0/0/v/3)

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

A nukleáris leszerelés kérdései (2/0/0/v/2)  
Alacsony hőmérsékletű plazmafizika (2/0/0/v/2)  
Atomerőművek (3/1/0/v/5)  
Atomerőművi anyagvizsgálatok (2/0/0/v/2)  
Atomerőművi kémia (2/1/0/v/3)  
Atomerőművi üzemzavar elemzések (3/2/0/v/6)  
Atomreaktorok üzemtana (3/1/0/v/3)  
Bevezetés a fúziós plazmafizikába (2/0/0/v/2)  
CFD módszerek és alkalmazások (2/1/0/f/3)  
Fejlesztések a magashőmérsékletű plazmafizikából (2/0/0/v/3)  
Fenntartható fejlődés és energetika (2/0/0/f/3)  
Fúziós nagyberendezések (2/0/0/v/3)  
Fúziós plazmafizikai laboratórium (0/0/4/f/4)  
Magfizika (3/0/0/v/4)

Monte Carlo részecsketranszport módszerek (2/0/0/v/2)  
Neutron és gammatranszport számítási módszerek (2/2/0/v/5)  
Nukleáris elektrodinamika (2/0/0/v/2)  
Nukleáris üzemanyagciklus (3/0/0/v/3)  
Radioaktív anyagok terjedése környezeti és biológiai rendszerekben (2/2/0/v/4)  
Radioaktív hulladékok biztonsága (3/0/1/v/4)  
Radioanalitika (3/0/2/v/5)  
Reaktorfizikai számítások (3/1/0/v/4)  
Reaktorszabályozás és műszerezés (2/1/0/v/3)  
Röntgen és gamma spektrometriai módszerek (2/0/0/v/2)  
Sugárvédelem 2 (2/0/2/v/4)  
Szimulációs technika (2/0/1/f/4)  
Ütközéses transzport mágnesezett plazmákban (1/2/0/f/4)  
Válogatott fejezetek a magfizikából (2/0/0/v/2)

***Orvosi fizika tárgycsoport***

Sugárbiológia (2/1/0/v/3)  
Sugárterápia fizikai alapjai (2/0/2/v/4)  
Sugárterápia II (2/0/0/v/2)  
Brachyterápia (2/0/0/v/2)  
Minőségbiztosítás és jogi szabályozás (2/0/1/v/3)  
Sugárvédelem az orvosi fizikában (3/0/1/v/4)  
Mágneses rezonancia és klinikai alkalmazása (2/1/0/v/3)  
Monte Carlo módszerek (2/0/2/v/4)  
Neutron és gammatranszport számítási módszerek (2/2/0/v/4)  
Nukleáris medicina (2/0/1/v/3)  
Orvosi képzés (3/1/0/v/4)  
Röntgendiagnosztika fizikai alapjai (2/0/0/v/3)  
Ultrahang diagnosztika (2/0/0/v/2)  
Méréstechnika a sugárterápiában (2/0/0/v/2)

# TEMATIKÁK

## Szilárdtestfizika tárgycsoport

### **Modern szilárdtestfizika / Modern solid state physics (2/2/0/v/5)**

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 I / Theory of magnetism I (2/0/0/v/3)**

Tárgyfelelős / Responsible lecturer: Virosztek Attila

A mágneses jelenségek mint elektron korrelációs effektusok kerülnek bemutatásra. A Mott-féle fém-szigetelő átmenetet a Hubbard modell alapján értelmezzük, a nehézfermionos viselkedést pedig egy variációs elmélettel magyarázzuk. Bevezetjük az antiferromágneses Heisenberg modellt, mint a félig töltött nagy-U Hubbard modell effektív Hamilton operátorát. Tárgyalunk egyéb kinetikus kicserélődési folyamatokat, beleértve a szilárd He3 mágnességére is alkalmazható gyűrű-kicserélődést. A direkt kicserélődést a két-rácshely Coulomb folyamatok részletes leírása során vezetjük be. A mágneses rendeződés különböző átlagtér elméleteinek áttekintését a Stoner elmélettel kezdjük. Tárgyalunk gyenge itineráns ferromágneseket, mint pl. a ZrZn2 és a MnSi.

Magnetic phenomena are considered as electron correlation effects. The Hubbard model is used to interpret the Mott metal-insulator transition. A variational theory is given which allows the understanding of heavy fermion behavior. The antiferromagnetic Heisenberg model is introduced as the effective hamiltonian of the large-U Hubbard model at half filling. Other kinetic exchange processes, including ring exchange with application to the magnetism of solid He3, are discussed. A detailed treatment of the two-site Coulomb processes allows the introduction of direct exchange. The survey of various mean field theories of magnetic order begins with the Stoner theory. Weak itinerant ferromagnets like ZrZn2 and MnSi are discussed in some detail.

*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. Változatos mágneses rendeződési jelenségeket tekintünk át, különféle elméleti keretek között tárgyaljuk a rendeződés feltételeit és a rendezett alapállapotra épülő gerjesztések jellegét. A ritkaföldfém rendszerek nem fermi-folyadék viselkedését a kvantum kritikus pont fogalmával magyarázzuk. Leírjuk a lokalizált spinek ferromágneses és antiferromágneses rendjét, valamint a hozzájuk tartozó spinhullám elméletet. Részletesen tárgyaljuk az alapállapot kvantum fluktuációit, beleértve a spinfolyadék alapállapotok lehetőségére vonatkozó újabb eredményeket. Megmutatjuk, hogy hogyan vezet egy különleges mágneses kooperatív viselkedés az egész, és a tört kvantum Hall effektushoz.

The basic concepts and results from the first part of the course are assumed to be familiar. The variety of magnetic ordering phenomena is surveyed, the conditions of ordering, and the nature of the excited states over ordered ground states are discussed in various theoretical frameworks. The concept of the quantum critical point is used for rare earth systems with non-fermi-liquid behavior. Localized-spin order and spin wave theory is described both for ferromagnets and antiferromagnets. A detailed discussion of quantum fluctuations in the ground state is given, including recent results on the possibility of spin liquid ground states. A particular kind of magnetic cooperative behavior is shown to give rise to the integer and the fractional quantum Hall effect.

*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 Karlo

A tantárgy célja különböző Mott-szigetelők mágneses tulajdonságainak megértése nemcsak elméleti szinten, hanem kísérleti vonatkozásban is. Tematika: Spin-hullámok LaCu<sub>2</sub>O<sub>4</sub>-ben és más antiferromágnesekben. S=1/2 spin-láncok gerjesztései. Gerjesztések tiszta és dópolt S=1 spin-láncokban. Spin-létrák mágneses térben. Mágneszettségi platók SrCu<sub>2</sub>(BO<sub>3</sub>)<sub>2</sub>-ban. BaCuSi<sub>2</sub>O<sub>6</sub> mágneses térben. Mágneszettségi platók frusztrált rendszerekben: a kvantum fluktuációk és a rácsorzulások szerepe. Spin jég (pl. Dy<sub>2</sub>Ti<sub>2</sub>O<sub>7</sub>): alapállapotú degeneráció, mágneses monopólusok. Nematikus és multipoláris rendeződés frusztrált rendszerekben. Multiferroikus anyagok. Két- (Na<sub>2</sub>IrO<sub>3</sub>) és háromdimenziós (Na<sub>4</sub>Ir<sub>3</sub>O<sub>8</sub>) irídium oxidok : az erős spin-pálya csatolás szerepe.

The lecture aims at the understanding of the magnetic properties of various Mott insulators. Topics: Spin waves in LaCu<sub>2</sub>O<sub>4</sub> and other ferromagnets. Excitations of S=1/2 spin chains. Excitations of pure and doped S=1 spin chains. Spin ladders in magnetic field. Magnetization plateaus in SrCu<sub>2</sub>(BO<sub>3</sub>)<sub>2</sub>. BaCuSi<sub>2</sub>O<sub>6</sub> in magnetic field. Magnetization plateaus in frustrated systems: the role of quantum fluctuations and lattice distortions. Ground state degeneration and magnetic monopoles in spin ice (e.g. Dy<sub>2</sub>Ti<sub>2</sub>O<sub>7</sub>). Nematic and multipolar ordering in frustrated systems. Multiferroic materials. Two and three dimensional iridium oxides (Na<sub>2</sub>IrO<sub>3</sub> / Na<sub>4</sub>Ir<sub>3</sub>O<sub>8</sub>): the role of strong spin-orbit coupling.

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

### **Soktestprobléma I / Many-body physics I (2/0/0/v/3)**

Tárgyfelelős / Responsible Lecturer: Zaránd Gergely

Ez a tárgy egy két féléves kurzusból álló előadássorozat első, függetlenül is hallgatható része, mely a részecskefizikában használatos, a kölcsönható rendszerek leírására szolgáló Green függvény módszer szilárdtest fizikai alkalmazásához szükséges eszköztárat építi fel, és alkalmazza néhány egyszerű esetben  $T=0$  hőmérsékleten. A kurzus BSC szintem megszerzett kvantummechanikai és statisztikus fizikai ismereteket tételez fel, ugyanakkor lapozó jellegű, ismerete szükséges számos elméleti fizikai tárgy felvételéhez (pl. Egydimenziós rendszerek fizikája, Soktestprobléma II, Lokalizációelmélet). A tárgy a következő témaköröket tárgyalja: a másodkvantált formalizmus, a Green függvények definíciói és kapcsolatuk mérhető mennyiségekkel, Heisenberg-, Schrödinger-, és kölcsönhatási kép, perturbációszámítás, diagrammtechnika (Wick tétel, Feynman gráfok), újrafelösszegzések (sajátenergia, vertex függvény, csontváz diagrammok), mozgásegyenletek.

This course is the first and independent part of a two-semester many-body course. It gives an introduction to the basic machinery of field theoretical Green's function methods applied for interacting solid state physics systems at  $T=0$  temperature, and demonstrates its power through applications for some simple cases. Although this is a basic course required for several advanced theoretical courses (The physics of one-dimensional systems, Many-body physics II, Localization theory, etc.), students taking this course must have a BSC level knowledge of quantum mechanics and statistical physics. The course focuses on the following topics: second quantized formalism, Green's functions and their connection to measurable quantities, Heisenberg-, Schrödinger-, and interaction picture, perturbation theory, diagram technique (Wick theorem, Feynman diagrams), resummation techniques (self-energy, Dyson equation, vertex function, skeleton diagrams), equation of motion methods.

*Irodalom / 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 (Prentice-Hall, Englewood Cliffs, 1963).

### **Soktestprobléma II / Many-body physics II (2/0/0/v/3)**

Tárgyfelelős / Responsible Lecturer: Zaránd Gergely

Ez a tárgy egy két féléves kurzusból álló előadássorozat második része, mely a véges hőmérsékletű Green függvény módszer szilárdtest fizikai kölcsönható rendszerekre való alkalmazását tárgyalja. Ez a technológia a modern szilárdtest fizika szerves részét képezi. A tárgy a következő témakörök köré épül fel: a Matsubara Green függvények (analitikus tulajdonságok, spektrál függvények stb.), az imaginárius időbeli perturbáció számítás, Matsubara technika, diagrammtechnika (Wick tétel, sajátenergia, vertex függvény, csontváz diagrammok), alkalmazások (kvantum transzport, polaronok, Peierls instabilitás, Hartree-Fock módszer, RPA).

This course is the second part of a two-semester many-body course. It gives an introduction to the finite temperature Green's function method applied for interacting solid state physics systems. This technology is one of the standard tools used in modern solid state physics. The course focuses on the following topics: Matsubara Green's functions (analytical properties, spectral functions, etc.), imaginary time perturbation theory, diagram technique (Wick theorem, self-energy, vertex function, skeleton diagrams), applications (quantum transport, polarons, Peierls instability, Hartree-Fock method, RPA).

*Irodalom / 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 (Prentice-Hall, Englewood Cliffs, 1963).

### **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,  $SO(3)$  és  $SU(2)$  csoportok, korrelációs diagramok, kristály kettőscsoportok. Kristályrácsok szimmetriája: tércsoportok, krisztallográfiai nomenklatura, *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,  $SO(3)$  and  $SU(2)$  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).

### **Bevezetés a szupravezetés elméletébe / Introduction to 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. Lifsic: 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).

### **Lokalizációelmélet / Localization theory (2/0/0/v/3)**

Tárgyfelelős / Responsible lecturer: Zaránd Gergely Attila

A fém-szigetelő átmenet fajtái és mechanizmusai, Mott átmenet, Peierls átalakulás, Anderson lokalizáció. Anderson lokalizációs elmélete. A lokalizált fázis tulajdonságai: a Coulomb üveg, az Efros-Shklovskii gap, a Mott-féle variable range hopping. A lokalizáció skálaelmélete: egy ill. két dimenzióban minden állapot lokalizált! Ismétlés: a Green-fv. formalizmus és a Kubo formula áttekintés, gráfszabályok. A klasszikus vezetőképesség a diagrammtechnika nyelvén. A gyenge lokalizációs korrekciók: Cooperonok, lokalizáció mágneses térben, véges hőmérsékleten. Összevetés a kísérleti eredményekkel. Kitekintés, nyitott problémák.

Diferent types of metal-insulator transitions and their mechanisms: Mott-transition, Peierls transition and Anderson localization. The theory of Anderson localization. The properties of the localized phase: Coulomb-glass, Efros-Shklovskii gap, Mott's variable range hopping. The scaling theory of localization: in one and two dimensions all states are localized. Revision: Green functions formalism and the Kubo formula, graph-rules. The classical conductivity using diagram techniques. Weak localization corrections: Cooperons, localization in magnetic fields, finite temperatures. Comparison with experimental results. Outlook and open questions...

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

Tárgyfelelős / Responsible lecturer: Csontos Miklós

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 tranzistorok, JFET. Félvezetők előállítás és minősítése: hagyományos és epitaxiális növesztési eljárások, minősítő technikák, rácscsillapítás, band-engineering, heteroszerkezetek, szuperrácsok, nagy mobilitású kétdimenziós elektrongáz és nagyfrekvenciás alkalmazásai, félvezető nanostruktúrák előállítása. A tér-effektus és alkalmazásai: felületi állapotok sűrűsége, 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.

### **Mágneses rezonancia / Magnetic Resonance (2/0/0/v/3)**

Tárgyfelelős / Responsible lecturer: Jánosy András

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 mágneses rezonancia kísérleti alapjai, Bloch egyenletek, dipól-dipól kölcsönhatás, mozgási keskenyedés, kristályterek és finomfelhasadás, hiperfinom felhasadás, kémiai eltolódás, mágneses rezonancia fémekben, szupravezetőkben, mágnesesen rendezett anyagokban.

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.

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

### **Mágneses rezonancia 2 / Magnetic resonance 2 (2/0/0/v/3)**

Tárgyfelelős / Responsible lecturer: Fehér Titusz

Relaxációs jelenségek; kristályterek, kvadrupólusfelhasadás, finomfelhasadás; elektronspin-rezonancia fémekben, szupravezetőkben, mágnesesen rendezett anyagokban; elektronspin- és magrezonancia modern kísérleti módszerei és az ezekhez szükséges elméletek (dupla rezonancia, képkötés magmágneses rezonanciával (MRI)).

Relaxation phenomena, crystal fields, quadrupole splitting, fine splitting, electron spin resonance in metals, superconductors and magnetically ordered materials, experimental methods of electron spin and nuclear magnetic resonance and the related theories (double resonance, imaging with nuclear magnetic resonance (MRI)).

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

### **Optikai spektroszkópia / Optical spectroscopy (2/0/0/v/3)**

Tárgyfelelős / Responsible lecturer: Kézsmárki István

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 I. / Electronic structure of solid matter I. (2/0/0/v/3)**

Tárgyfelelős / Responsible lecturer: Szunyogh László

A tantárgy a Fizika alapképzési (BSC) szakon oktatót 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. A többszörös szórás elmélete (Green függvényes technika). Korrelált elektronrendszerek ab initio leírására alkalmas módszerek (LDA+U, önkölcsönhatás korrekció, dinamikus átlagtér elmélet). Ötvözetek leírása, a koherens potenciál közelítés. Fémek (itineráns) mágnesség ab initio elmélete, rendezetlen lokális momentumok módszere. Időfüggő sűrűségfüggvény számítások.

Building on the quantum mechanics and solid state physics studies of the Physics BSC education, 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. The multiple scattering theory (Green function method). Ab initio methods for correlated systems (LDA+U, self-interaction correction, DMFT). Alloy theory, the coherent potential approximation. Metallic (itinerant) magnetism, method of the disordered local moments. Time-dependent density functional calculations.

*Irodalom / Literature:* Sólyom Jenő: A Modern Szilárdtestfizika alapjai II., Elektronok a szilárd testekben (ELTE Eötvös Kiadó, 2003); J. Zabloudil, R. Hammerling, L. Szunyogh, P. Weinberger: Electron Scattering in Solid Matter, Solid-State Sciences Vol. 147, Springer, 2005); válogatott review cikkek

## **Szilárdtestek elektronszerkezete II. / Electronic structure of solid matter II. (2/0/0/v/3)**

Tárgyfelelős / Responsible lecturer: Szunyogh László

A Szilárdtestek elektronszerkezete I. tárgy folytatása speciális módszerek és jelenségek tárgyalásával. Témakörök: Relativisztikus elektronszerkezet számítások, mágneses anizotrópia számítása szilárdtestekben. Redukált dimenziójú rendszerek: felületek, határfelületek, egydimenziós láncok, véges atomcsoportok. Kölcsönhatások szilárdtestekben: aszimptotikus analízis, RKKY kölcsönhatás, Dzyaloshinskii-Moriya kölcsönhatás, pár- és klaszterkölcsönhatások ötvözetekben, fázisdiagramok. Elektromos és optikai transzporttulajdonságok ab initio számítása a Caroli-, Landauer- és a Kubo-Greenwood formalizmus alapján.

Continuation of the Electronic structure of solid matter I. course by discussing specific methods and phenomena. Topics: Relativistic electronic structure calculations, magnetic anisotropy in solid matter. Systems in reduced dimension: surfaces, interfaces, one-dimensional chains, finite clusters. Interactions in solid matter: asymptotic analysis, RKKY interaction, Dzyaloshinskii-Moriya interaction, pair- and cluster interactions in alloys, phase diagrams. Ab initio calculations of electronic and optical transport properties: Caroli-, Landauer, and Kubo-Greenwood formalism.

*Irodalom / Literature:* Sólyom Jenő: A Modern Szilárdtestfizika alapjai II., Elektronok a szilárd testekben (ELTE Eötvös Kiadó, 2003); J. Zabloudil, R. Hammerling, L. Szunyogh, P. Weinberger: Electron Scattering in Solid Matter, Solid-State Sciences Vol. 147, Springer, 2005); válogatott review cikkek.

## Nanofizika tárgycsoport

### Új kísérletek a nanofizikában / New experiments in nanophysics (2/0/0/v/3)

Tárgyfelelős / Responsible lecturer: Halbritter András

A nanométeres méretskálán az elektronok koherens viselkedése és kölcsönhatása, ill. az anyag atomi kvantáltsága számos új jelenséget eredményez. A kurzus ezen jelenségek köré kíván bepillantást nyújtani (elsősorban új kísérleti eredmények bemutatásán és szemléletes megértésén keresztül) a következő témakörök ismertetésével: félvezető nanoszerkezetek készítése; nanovezetékek; interferencia-jelenségek nanoszerkezetekben; a zaj mint jel; kvantált Hall effektus; kvantum dotok; szupravezető nanoszerkezetek, proximity effektus

On the nano-scale the coherent behavior and interaction of the electrons, and the atomic granularity of the matter cause various striking phenomena, which are widely investigated in the research field of nanophysics. The course gives an overview of recent fundamental achievements in nanophysics focusing on the demonstration and understanding of recent experimental results. The following topics are discussed: fabrication of semiconductor nanostructures; nanowires; Interference-phenomena in nanostructures; Shot noise; Quantized Hall effect; Quantum dots; Superconducting nanostructures, proximity effect.

*Irodalom / Literature:* S. Datta, Electronic Transport in Mesoscopic Systems, Cambridge, University Press, 1997; Thomas Ihn: Halbleiter Nanostrukturen <http://www.nanophys.ethz.ch/vorlesung/hlnano/>  
Beenakker, van Houten, Quantum Transport in Semiconductor Nanostructures, <http://xxx.lanl.gov/abs/cond-mat/0412664>.

### Mezozkópikus rendszerek fizikája / Mesoscopic systems (2/0/0/v/3)

Tárgyfelelős / Responsible Lecturer: Zaránd Gergely

A mezozkópikus 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. A tárgy az ilyen eszközök leírásával és a fellépő új jelenségekkel foglalkozik. A kurzus a BSC képzés részét képező kvantummechanika, szilárdtest fizika és statisztikus fizika tárgyak ismeretét tételezi fel, és a következő témakörökkel foglalkozik: apró szemcsék leírása (Coulomb kölcsönhatás, koherencia, egyrészescke szintek), a véletlen mátrix elmélet alapjai (szinttaszítás, univerzalitási osztályok), Coulomb blokádnak és spektroszkópia (mester egyenletek, co-tunneling, Kondo effektus), nyitott üregek / biliárdok transzporttulajdonságainak leírása (univerzális fluktuációk, spin transzport, pumpálás), kvantum drótok transzporttulajdonságai, és töltés lokalizáció.

The field of mesoscopic and nanoscale structures is one of the most intensely studied fields in modern solid state physics: Due to the development of lithographic procedures, one can build semiconducting and metallic structures in which electrons move coherently throughout the sample. This course gives an introduction to the theory of some of the novel phenomena that can be observed in such systems. The course builds upon the BSC courses Quantum mechanics, Solid state physics, and Statistical Physics, and focuses on the following subjects: description of small grains (Coulomb interaction, coherence, single particle levels), fundamentals of random matrix theory (level repulsion, universality classes), Coulomb blockade and spectroscopy (master equations, co-tunneling, Kondo effect), transport through open cavities and billiards (universal fluctuations, noise, spin transport, pumping), transport properties of quantum wires and localization.

*Irodalom / Literature:* G. D. Mahan: Many-Particle Physics, (Plenum Press, New York and London, 1981), S. Datta: Electronic Transport in Mesoscopic Systems (Cambridge Studies in Semiconductor Physics and Microelectronic Engineering, Cambridge University Press, 1997).

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

Tárgyfelelős / Responsible lecturer: Csonka Szabolcs

Szén nanoszerkezetek: grafén és szén nanocsövek alapvető tulajdonságai, alkalmazási területek, elektromos transzporttulajdonságok, szén alapú kvantumpöttyök.

Törtszámú Kvantált Hall-effektus: a legalsó Landau szint szerkezete, elektron-elektron kölcsönhatás, Chern-Simon transzformáció, kompozit fermionok, 1/2 betöltés.

Spintronika: óriás mágneses ellenállás (GMR), spinszelep, spinnyomaték, spindekoherencia, spininjektálás, nemlokális mérések.

Szupravezető nanoszerkezetek: Andreev-visszaverődés, mezoszkopikus proximity effektusok, szupravezető QuBit-ek

Carbon nanostructures: fundamental properties of graphene and carbon nanotubes, applications, electronic transport properties, carbon-based quantum dots.

Fractional Quantized Hall Effect: the structure of the lowest Landau level, electron-electron interaction, Chern-Simon transformation, composite fermions, half filling.

Spintronics: giant magnetoresistance (GMR), spin valve, spin torque, spin decoherence, spin injection, nonlocal measurements

Superconducting nanostructures: Andreev reflection, mesoscopic proximity effects, superconducting QuBits

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

### **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, él-állapotok formájában. A kurzus feltételezi a Green függvény technika alapvető ismeretét (Soktestprobléma I), és a következő témakörök köré szerveződik: a természetbeli egy dimenziós 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.

This course gives a basic introduction to the physics and theoretical description of interacting one-dimensional electron and spin systems. One-dimensional systems display basic phenomena such as charge- and spin density wave formation, antiferromagnetism and exotic superconductivity, and are fundamental test-grounds for solid state physicists, since powerful field theoretical approaches can be used for them. Moreover, they are often realized in physical systems such as carbon nanotubes, quasi one-dimensional systems, or edge states. The course assumes the knowledge of basic Green's function methods (Many body physics I), and is organized along the following topics: one-dimensional systems in nature (the Hubbard model, instabilities within the random phase approximation, spin and charge density waves, mapping to the Heisenberg model), basic properties of spin chains (Haldane's conjecture, spin coherent states, spin liquids, the basics of

Bethe Ansatz), the continuum limit (renormalization group and the Tomonaga-Luttinger model), bosonization (spin-charge separation, the Luttinger liquid phase), effects of disorder.

*Irodalom / Literature:* 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 (1998), A. Auerbach, Interacting Electrons and Quantum Magnetism, (Springer-Verlag, N.Y.).

**Nanomágnesség / Nanomagnetism (2/0/0/v/3)**

Tárgyfelelős / Responsible lecturer: Szunyogh László

A tárgy célja az utóbbi egy-két évtizedben kiemelt alapkutatási és technológiai jelentőségű mágneses nanoszerkezetek több jelenségkörének bemutatása, kiemelt tekintettel az elméleti és számítógépes vizsgálatokra. Témakörök: Felületek, határrétegek, vékonyrétegek és véges atomcsoportok mágneses jelenségei. Mágneses anizotrópia, reorientációs fázisátmenetek, mágneses mintázatok, spin-dinamika. Az oszcilláló kicserélődési réteg-réteg kölcsönhatás. Mágneses domének, doménfalak, mikromágneses modellezés. Vezetési jelenségek: óriás mágneses ellenállás, anizotróp mágneses ellenállás, az áram által indukált mágneses átfordulás, transzport pontkontaktusokban.

In this course we discuss different phenomena in magnetic nanostructures that became of primary importance during the past two decades in relation to basic science and technology. Topics: Magnetism of surfaces, interfaces, thin films and finite atomic clusters. Magnetic anisotropy, reorientation phase transitions, magnetic patterns, spin-dynamics. The oscillatory interlayer exchange coupling. Magnetic domains, domain walls, micromagnetic modeling. Transport properties: giant magneto-resistance, anisotropic magneto-resistance, current induced magnetic switching, transport through point contacts.

*Irodalom / Literature:* válogatott review cikkek.

## Kvantumrendszerek fizikája tárgycsoport

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

Tárgyfelelős / Responsible lecturer: Varga Imre

A véletlen mátrix elmélet betekintést enged abba, hogyan lehet nagyon komplex viselkedésű rendszerekről viszonylag egyszerűen nyerhető ismereteket kapni a rendszerrel kapcsolatos mennyiségek statisztikai analízise segítségével. A tantárgy először a BSc szakon oktatott kvantummechanika illetve statisztikus fizika valamint a valószínűség elmélet segítségével felépíti a véletlen mátrix elméletet. Meghatározza a Dyson sokaságok tulajdonágait, a szintkülönbség eloszlást, a párkorrelációs függvényt és más származtatható mennyiségeket. Meghatározzuk a szintek termodinamikai modelljét, a sokaságok közötti átmenetet leíró szintdinamikát. A fizikai alkalmazások közül először az univerzalitási tulajdonságokat a klasszikusan integrálható illetve kaotikus rendszerek kvantum mechanikai modelljein mutatjuk be. Kitérünk a dekoherencia tárgyalására. Megvizsgáljuk kvázi egydimenziós mezoszkopikus rendszerekben az univerzális vezetési ingadozásokat. Tanulmányozzuk kritikus rendszerek modelljét. Véletlen kölcsönhatás modellek segítségével vizsgáljuk kvantum dotokban levő elektronok viselkedését. Véletlen mátrix modelleket használunk továbbá királis illetve hibrid (fém-szupravezető) rendszerek egyes jellemzőinek vizsgálatára. A fennmaradó időben kitekintésként olyan problémákat vizsgálunk, ami túlmutat a szigorúan vett fizikai alkalmazásokon: agyi EEG hullámok analízise, tőzsdei áringadozások korrelációinak analízise, tömegközlekedési problémák vizsgálata, stb.

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 prize fluctuations, mass transport fluctuations, etc.

*Irodalom / 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.

### Waveletek, koherens állapotok és változó felbontású analízis / Wavelets, coherent states and multiresolution analysis (2/0/0/v/3)

Tárgyfelelős / Responsible lecturer: Pipek János

Bonyolult eloszlások leírása fizikailag egyszerűen értelmezhető függvények segítségével. Fourier-analízis. Idő-frekvencia analízis, ablak Fourier-transzformáció. Gábor-transzformáció. Határozatlansági reláció, Shannon tétele. Folytonos wavelet transzformáció. Koherens állapotok. A Weyl-Heisenberg és az affín csoport. A Hilbert-tér bázisok általánosítása: keret rendszer. Diszkrét wavelet transzformáció. Riesz-bázis. Változó felbontású analízis. Finomítási egyenlet.

Biortogonális és ortogonális skálafüggvények. Kompakt tartójú waveletek: Daubechies konstrukciója. Folytonosság, deriválhatóság, eltűnő momentumok. Fizikai operátorok mátrixelemei wavelet bázisban.

Characterization of complex distributions using simply interpretable component functions. Fourier analysis. Time-frequency analysis, window Fourier transformation. Gábor transformation. Uncertainty principle, Shannon's theorem. Continuous wavelet transformation. Coherent states. The Weyl-Heisenberg and the affine group. The generalization of Hilbert space basis sets: frames. Discrete wavelet transformation. Riesz bases. Multiresolution analysis. The refinement equation. Biorthogonal and orthogonal scaling functions. Compactly supported wavelets: Daubechies' construction. Continuity, differentiability, vanishing momenta. Matrix elements of physical operators in wavelet bases.

*Irodalom / Literature:* Szőkefalvi-Nagy Béla: Valós függvények és függvénysorok (Tankönyvkiadó, Budapest, 1981); Ingrid Daubechies: Ten Lectures on Wavelets (SIAM, Philadelphia, 1992); Charles K. Chui: An Introduction to Wavelets (Academic Press, San Diego, 1992); Ola Bratteli, Palle Jorgensen: Wavelets Through a Looking Glass (Birkhauser, Boston, 2002).

### **A sűrűség funkcionál elmélet alapjai / Foundations of density functional theory (2/0/0/v/3)**

Tárgyfelelős / Responsible lecturer: Pipek János

Sok-részecskés Fock-tér és sűrűségoperátor. Redukált sűrűségoperátorok. A kölcsönható elektron rendszerek egzakt egyenletei és a független részecske közelítés sűrűségoperátor képpen.  $N$ -előállíthatóság. A Fermi-lyuk és a lokalizált pályák. Az elektron sűrűség. Kato tétele és a cusp (csúcs) feltételek. Az elektron sűrűség  $\nu$  és  $N$  előállíthatósága. Hohenberg és Kohn tételei. Az univerzális sűrűség funkcionál létezése. A Levy-féle korlátozott keresés módszere. Skálatulajdonságok. Kohn és Sham egyenletei. Tört betöltési számok. A kémiai potenciál és az elektronnegativitás. Közelítő módszerek. Gradiens sorfejtés. Modern funkcionálok.

Many-body Fock space and density operator. Reduced density operators. Exact equations and the independent particle approximation for the interacting electron gas in the density operator picture.  $N$ -representability. The Fermi hole and localized orbitals. The electron density. Kato's theorem and cusp conditions. The  $\nu$ - and  $N$ -representability of the electron density. The Hohenberg-Kohn theorems. Existence of the universal density functional. Levy's constrained search. Scaling properties. The Kohn-Sham equations. Fractional occupation numbers. The chemical potential and electronegativity. Approximate methods. The gradient expansion. Recent functionals.

*Irodalom / Literature:* Nagy Ágnes: Molekulák elektronsűrűség elmélete (KLTE Elméleti Fizika Tsz., Debrecen, 1994); R.M. Dreizler, E.K.U. Gross: Density Functional Theory (Springer, Berlin, 1990); R.G. Parr, W. Yang: Density-functional Theory of Atoms and Molecules (Oxford, New York, 1989); Kapuy Ede: Sűrűségfunkcionálok és alkalmazásuk a kvantummechanikai többszemp problémában (JATE, Szeged).

### **Variációs elvek a fizikában / Variational principles in physics (2/0/0/v/3)**

Tárgyfelelős / Responsible lecturer: Jakovác Antal

Elméleti fizika tárgy, fő célja a hagyományos tantárgyak, mechanika, relativitáselmélet, elektrodinamika és kvantummechanika, alapjait megfogalmazó variációs elvek áttekintése. Célja egyrészt egy széles körben használható matematikai-módszertani alapozás, másrészt a fizika egységét kifejező gondolkodásmód eleven demonstrációja. Témák: A virtuális munka elve (statika), D'Alambert, Gauss, Lagrange és Hamilton mechanikai hatáselv (dinamika), Maupertuis-elv, geodetikus mozgás, Einstein-Hilbert hatás (relativitáselmélet), elektromos és mágneses

téreneergia, a Gauss és Biot-Savart törvény mint feltétel, elektromos - mágneses dualitás, hullámok és mértékszimmétria (elektrodinamika), a Schrödinger egyenlet mint minimális szakítás a Hamilton-Jakobi egyenlettel (kvantummechanika).

This theoretical physics course gives a review over variational principles formulating basic laws in mechanics, relativity, electrodynamics and quantum mechanics. Its aim is to present a mathematical basis for use in disperse areas of physics as well as to demonstrate the unity of physics in the way of theory making. Topics: The principle of virtual work (statics), D'Alambert, Gauss, Lagrange and Hamilton principles, action (dynamics), Maupertuis principle, geodetic motion, Einstein-Hilbert action (relativity), electric and magnetic field energy conditioned by the Gauss and Biot-Savart laws, electric – magnetic duality, waves and gauge symmetry as reflected in the variational principle (electrodynamics), the Schrödinger equation as the minimal break with the classical Hamilton-Jakobi equation (quantum mechanics).

*Irodalom / Literature:* órai jegyzetelés / lecture notes

### **A pályaintegrál módszer a fizikában / The path integral method in physics (2/0/0/v/3)**

Tárgyfelelős / Responsible lecturer: Jakovác Antal

A fizika egyik alapvető elméleti eszköze a Feynman által bevezetett pályaintegrál. Egyszerű stochasztikus modellektől eljutunk a kvantummechanikai, statisztikus fizikai és térelméleti használatig. Témák: Egyszerű diffúziós modell, generátorfüggvény, Wiener mérték. Abszorptív diffúzió, Schwinger-Dyson egyenletek, harmonikus közelítés. Kanonikus állapotösszeg pályaintegrállal. Feynman-Hibbs pályaintegrál. Térelméleti pályaintegrál, S-mátrix, Feynman gráfok. Rács-térelmélet.

A basic theoretical tool of physics is the path integral introduced by Feynman. Starting with simple stochastic models we arrive at the path integral formalism as it is used in quantum mechanics, statistical physics and field theory. Topics: Simple models of diffusion, generating function, Wiener measure. Diffusion with absorption, Schwinger-Dyson equations, harmonic approximation. Canonical partition with path integral. Feynman-Hibbs path integral. Path integral in the field theory, S-matrix, Feynman graphs. Lattice field theory.

*Irodalom / Literature:* órai jegyzetelés / lecture notes

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

Tárgyfelelős / Responsible lecturer: Szalay Szilárd (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), összefonott 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 (Shrödinger's cat), compound systems and entanglement, operations (quantum teleportation) classification of entangled states (general arguments, LOCC, SLOCC, 2 and 3 qubit results), entanglement criterions (witness-operators, CHSH-Bell inequalities), entanglement measures (general arguments, 2 and 3 qubit results).

*Irodalom / Literature:* I. Bengtsson, K Zyczowski, 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

### **Véges hőmérsékletű és nemegyensúlyi térelméletek / Finite temperature and nonequilibrium field theories (2/0/0/v/3)**

Tárgyfelelős / Responsible lecturer: Jakovác Antal (Takács Gábor)

Pályaintegrál kezdeti feltételekkel, valós és képzetes idejű formalizmus; perturbációszámítás, propagátorok, kauzalitás és analiticitás, vágási szabályok; termodinamika, szabadenergia, fázisátalakulások; lineáris válasz elmélet, állapotok bomlása, Kubo-formula; Wigner transzformáció, Boltzmann egyenletek; klasszikus térelmélet limesz; renormálási csoport valós idejű formalizmusban, Feynman-Vernon konstrukció, zaj, fluktuáció-disszipáció tétel, Tsallis eloszlás; perturbációszámítás, ellentagok, renormálás, IR divergenciák, felösszegezés, 2PI formalizmus, Schwinger-Dyson egyenletek; O(N) és chirális O(N) model véges hőmérsékleten, fázisdiagram; mértékelméletek véges hőmérsékleten, HTL hatás, Vlasov egyenletek, Wong egyenlet, QCD fázisdiagramja.

Pathintegrals with initial conditions, real and imaginary time formalism, perturbation theory, propagators, causality and analyticity, cutting rules, thermodynamics, free energy, phase transitions, linear response theory, decay of states, Kubo-formula, Wigner transformation, Boltzmann equations, the limit of classical field theory, renormalization group in real time formalism, Feynman-Vernon construction, noise, fluctuation-dissipation theorem, Tsallis



distribution, perturbation theory, renormalization, IR divergencies, summations, 2PI formalism, Schwinger-Dyson equations,  $O(N)$  and chiral  $O(N)$  models at finite temperatures, phase diagram, gauge-theories at finite temperatures, HTL effect, Vlasov equations, Wong equation, QCD phase diagram.

*Irodalom / Literature:* M. Le Bellac: Thermal Field Theory (Cambridge University Press)  
J.I. Kapusta and C. Gale: Finite-temperature Field Theory. Principles and Applications (Cambridge University Press)  
N.P.Landsmann, Ch.G. van Weert: Real- and imaginary-time field theory at finite temperature and density. PR. 145 (1987)

### **Bevezetés az elméleti plazmafizikába / Introduction to the physics of plasmas (2/0/0/v/3)**

Tárgyfelelős / Responsible lecturer: Veres Gábor és Bencze Attila (Szunyogh László)

Statisztikus fizikai alapok, eloszlásfüggvény. Az ütközési operátor: Boltzmann és Landau operátor. Boltzmann-egyenlet, Vlasov-egyenlet. Coulomb-ütközések, Debye-árményékolás, plazmaparaméter. A kinetikus egyenlet momentumai, a lezárás problematikája. Ideális folyadékok: az Euler-egyenlet, lamináris és potenciáláramlás. Viszkózus folyadékok: a Navier-Stokes egyenlet. Hullámok közönséges folyadékokban és ideális magnetofolyadékokban. Magnetohidrodinamikai rendszerek engyensúlya és stabilitása. Magnetohidrodinamikai rendszerek instabilitásai: MHD instabilitások és Landau-csillapodás.

Statistical physical basics, distribution functions. The collision operator: the Boltzmann and Landau operator. Boltzmann's equation, Vlasov's equation. Coulomb-scattering, Debye-screening, plasma parameter. Moments of the kinetic equation, the problem of closing. Ideal liquids: Euler's equation, laminar and potential current. Viscous liquids: the Navier-Stokes equation. Waves in normal fluids and in magnetofluids. Equilibrium and stability of magneto-hydrodynamic systems. Instabilities in magneto-hydrodynamic systems, Landau damping.

*Irodalom / Literature:* Veres Gábor: Magashőmérsékletű plazmafizika alapjai (jegyzet).

### **Magnetohidrodinamika alacsony dimenziós rendszerekben /**

### **Magnetohydrodynamics in low dimensional systems (2/0/0/v/3)**

Tárgyfelelős / Responsible lecturer: Veres Gábor (Szunyogh László)

Alapok: Az ideális MHD egyenletek rendszere, az elmélet érvényességi határai; Az egyenletek konzervatív alakja, megmaradási mennyiségek az ideális MHD-ban; Az MHD erőoperátor és tulajdonságai, spektrál analízis; Az energia egyenlet; Peremfeltételek az MHD-ban. 1-D konfigurációk: Hosszú, egyenes plazmafonal. Hullámok terjedése: drift hullámok, Alfvén-módusok; Theta-pinch, Z-pinch, csavar-pinch; Egyensúly és stabilitás; Suydam-kritérium; Kruskal-Safranov-kritérium. 2-D konfigurációk: Axiálszimmetrikus toroidális rendszerek. Fluxuskoordináták; Hullámok terjedése: TAE-módusok; Grad-Safranov egyenlet; Egyensúly és stabilitás; Mercier-kritérium

Basics: The system of ideal MHD equations, the limits of applicability. The conservative form of the equations, conserved quantities for ideal MHD. The MHD force operator and its properties, spectral analysis. The energy equation. Boundary conditions in MHD. 1-D configurations: Long straight plasma line. Wave propagation, drift waves, Alfvén-modes, Theta-pinch, Z-pinch, twist-pinch. Equilibrium and stability, Suydam-criterion, Kruskal-Safranov criterion. 2-D configurations: Axisymmetric toroidal systems. Flux-coordinates, wave propagation: TAE-modes, Grad-Safranov equations. Equilibrium and stability, Mercier criterion.

*Irodalom / Literature:* Veres Gábor: Magashőmérsékletű plazmafizika alapjai (jegyzet).

## Statisztikus fizika tárgycsoport

### Skálázás és kritikus jelenségek / Scaling and criticality (2/0/0/v/3)

Tárgyfelelős / Responsible Lecturer: Zaránd Gergely

A kritikus jelenségek és a renormálási csoport alapjainak ismerete szinte elengedhetetlen egy aktív kondenzáltanyag-fizikus számára. A 'Skálázás és kritikus jelenségek' című tárgy a hallgatók Fizika alapképzésben elsajátított statisztikus fizikai ill. kvantummechanikai ismereteire építve a renormálási csoport és skálainvariancia fogalmainak bevezetését és egyszerű alkalmazásainak megismerését célozza, a szokásos igen komplikált térelméleti formalizmust mellőzve. A félév anyaga a következő témakörök köré épül fel: kritikus jelenségek, egyszerű rendszerek, univerzalitás, átlagtérelmélet, a renormálási csoport (Az egy dimenziós Ising modell, a renormálási csoport transzformáció, fixpontok, kritikus dimenziók, korrelációs függvények skálázása), fázis diagrammok és skálázás ('cross-overek', véges méret skálázás, kvantum kritikus pont, dimenzionális cross-over), a perturbatív skálázás (Fixpont Hamilton függvény, operátor szorzat kifejtés,  $\epsilon$  sorfejtés, anizotropia), alacsony dimenziós rendszerek (Az alsó kritikus dimenzió, az XY modell, Kosterlitz-Thouless fázisátalakulás, az  $O(n)$  modell  $2+\epsilon$  dimenzióban).

Understanding critical phenomena and their connection to renormalization group belongs to the basic knowledge of modern solid state physicists. The course 'Scaling and criticality' builds upon the BSC level statistical physics and quantum mechanics courses and introduces the notions of scale invariance and renormalization group while avoiding the usual heavy field theoretical formalism. The course is organized along the following topics: critical phenomena (simple systems, universality, mean field theory), the renormalization group (The one-dimensional Ising model, Wilson's renormalization group transformation, fixed points, critical dimensions, correlation functions), phase diagrams and scaling (cross-over phenomena, finite size scaling, dimensional cross-overs, quantum criticality), the perturbative scaling approach (fixed point Hamiltonian, operator product expansion, epsilon-expansion, anisotropy), low-dimensional systems (lower critical dimension, the XY model, Kosterlitz-Thouless phase transition, the  $O(n)$  model in  $2+\epsilon$  dimension).

*Irodalom / Literature:* John Cardy, Scaling and Renormalization in Statistical Physics, (Cambridge University Press, 1997), N. Goldenfeld, Lectures on phase transitions and the renormalization group, (Addison-Wesley, 1992).

### Fázisátalakulások / Phase transitions (2/0/0/v/3)

Tárgyfelelős / Responsible lecturer: Kertész János

A termodinamikai állapot stabilitása: fázisok egyensúlya és átalakulása, szimmetriasértés, osztályozás. A kondenzált anyag fázisátalakulásainak áttekintése. Kritikus exponensek. A fázisátalakulások modelljei. Egzakt eredmények. Hosszútávú korrelációk izotrop rendszerek szimmetriasértő fázisában. Klasszikus elméletek és kritikájuk: Landau-elmélet, átlagtér közelítés. Magashőmérsékleti sorok. A sztatikus skálahipotézis és következményei. A renormálási csoport transzformáció és kapcsolata a kritikus viselkedéssel: fixpont, skálázás, univerzalitás. A transzformáció konstrukciója valós térben és hullámszám térben. Az eredmények áttekintése. Dinamikai kritikus jelenségek: a konvencionális elmélet, a dinamikai skálahipotézis, példák.

Stability of the thermodynamic state: equilibrium and transition of phases, symmetry breaking, classification. Phase transitions of the condensed matter. Critical exponents. Models of phase transitions. Exact results. Long range correlations in symmetry breaking phases of isotropic systems. Classical theories and their critique: Landau theory, mean field approximation. High temperature expansions. The static scaling hypothesis and consequences. The renormalization group transformation and its connection to critical behavior: fixed point, scaling, universality.

Construction of the transformation in real and momentum space. Survey of the results. Dynamical critical phenomena: conventional theory, dynamic scaling hypothesis, examples.

*Irodalom / Literature:* P.M. Chaikin, T.C. Lubensky: Principles of condensed matter physics, Cambridge University Press, 1995, J. Cardy: Scaling and Renormalization in Statistical Physics, Cambridge University Press, 1996.

**Nemegyensúlyi statisztikus fizika / Nonequilibrium statistical physics (2/0/0/v/3)**

Tárgyfelelős / Responsible lecturer: Kertész János

A lineáris válasz elmélete: korrelációs és válaszfüggvények. Analitikus tulajdonságok, elemi gerjesztések. Klasszikus határeset. Disszipáció. Fluktuáció-disszipáció tétel. A mikroszkopikus időtükrözési szimmetria következményei. Transzport folyamatok: elektromos vezetés. A neutronszórás hatáskeresztmetszete. Sztochasztikus folyamatok jellemzése, Markov-folyamatok. Diffúziós folyamatok: Fokker–Planck-egyenlet, sztochasztikus differenciálegyenletek. Fizikai alkalmazások: Brown-mozgás, hidrodinamikai fluktuációk, Onsager-relációk. Ugró folyamatok: Master-egyenlet. A stacionárius eloszlás stabilitása, H-tétel. A Monte Carlo módszer alapozása. Fizikai alkalmazások. A Boltzmann-egyenlet származtatása. Relaxációs idő közelítés. Fizikai alkalmazások.

Linear response theory: correlation and response functions. Analytical properties, elementary excitations. Classical limit. Dissipation. Fluctuation-dissipation theorem. Consequences of the microscopic time reversal symmetry. Transport processes: electric conductance. Neutron scattering cross section. Characterization of stochastic processes, Markov processes. Diffusion processes: Fokker-Planck equation, stochastic differential equations. Physical applications: Brownian motion, hydrodynamic fluctuations, Onsager relations. Step processes: Master equation. Stability of the stationary distribution, H-theorem. Basics of the Monte Carlo method. Physical applications. Derivation of the Boltzmann equation. Relaxation time approximation. Physical applications.

*Irodalom / Literature:* Geszti Tamás: Nem-egyensúlyi statisztikus mechanika, Fizikai kézikönyv műszakiaknak, I. kötet, 5.6 fejezet, Műszaki Könyvkiadó, 1980, W. Brenig: Statistical theory of heat – Nonequilibrium phenomena, Springer Verlag, 1989.

**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 (2/0/0/v/3)**

Tárgyfelelős / Responsible lecturer: Noszticzius Zoltán

A tárgy a természettudomány különböző területein (fizika, kémia, biológia) használt determinisztikus modellek kvalitatív viselkedését tanulmányozza, és ezen belül a közönséges differenciálegyenlet-rendszerek valamint a leképezések segítségével leírható rendszerekkel foglalkozik az alábbi témakörök tárgyalásával: a Lotka-Volterra és a Brüsszelátor modell, konzervatív és határciklusos oszcillációk, disszipatív rendszerek attraktorai és bifurkációi, lokális és globális stabilitás, a logisztikus leképezés, Ljapunov exponens, káosz.

This course studies the qualitative behavior of deterministic models applied in various fields of natural sciences like physics, chemistry or biology. Within this topic the course deals with systems which can be described by ordinary differential equations and maps. The following subjects are discussed: the Lotka-Volterra and the Brusselator model, conservative and limit cycle oscillations, attractors and bifurcations of dissipative systems, local and global stability, the logistic map, Lyapunov exponent, chaos.

*Irodalom / Literature:* Noszticzius Zoltán, Volford András és Wittmann Mária: Dinamikai rendszerek (jegyzet és segédanyagok a tanszéki honlapon 1997-2007), J.M.T. Thompson and H.B.Stewart: Nonlinear Dynamics and Chaos (Wiley 1986), P.Gray and S.K.Scott: Chemical Oscillations and Instabilities Clarendon (Oxford, 1994).

### **Transzportfolyamatok / Transport processes (2/0/0/v/3)**

Tárgyfelelős / Responsible lecturer: Noszticzius Zoltán

A fizikai és kémiai folyamatok során különféle mennyiségek transzportja valósul meg, és ezen folyamatok megértése gyakorlati szempontból fontos. A következő témakörök kerülnek tárgyalásra: mérlegegyenletek, állapotegyenletek, konstitutív egyenletek, megmaradási törvények, tömeg és komponensmérlegek, belsőenergia-mérleg, Fourier-törvény, a hővezetés differenciálegyenlete és analitikus megoldásai, Green-függvény, diffúzió, membránok, termodiffúzió, többkomponensű diffúzió, kémiai reakciók.

During physical and chemical processes various quantities are transported and the understanding of these processes is important for the practice. The following topics are covered: balance equations, equations of state, constitutive equations, conservation laws, mass and component balances, balance of the internal energy, Fourier's law, equation of heat conduction and its analytical solutions, Green-function, diffusion, membranes, thermo-diffusion, multi-component diffusion, chemical reactions.

*Irodalom / Literature:* H. S. Carslaw, J. C. Jaeger, Conduction of heat in solids (Clarendon, Oxford, 1959); A. N. Tyihonov, A. A. Szamarszkij, A matematikai fizika differenciálegyenletei (Akadémiai Kiadó, 1956); M. Mulder, Basic principles of membrane technology (Kluwer Academic, 1992); J. Crank, The mathematics of diffusion (Clarendon, Oxford, 1975), Farkas Henrik: Transzportfolyamatok (jegyzet)

[www.fke.bme.hu/Staff/Henrik/public\\_html/transzport.html](http://www.fke.bme.hu/Staff/Henrik/public_html/transzport.html).

### **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, nyeremény, 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: Kertész 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 hierarhikus 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)

## Optika tárgycsoport

### **Fizikai optika / Physical Optics (4/0/0/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 lézerelmélet. 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).

### **Holográfia és alkalmazások / Holography and applications (2/0/0/v/3)**

Tárgyfelelős / Responsible lecturer: Gyimesi Ferenc

A tantárgy a holográfia elméletét, különböző megjelenítési és mérés technikai technikáit és azok alkalmazási példáit mutatja be. Főbb témakörei: holografikus képalkotás, hologramtípusok, gyakorlati holográfia, látványholografiai és biztonságtechnikai alkalmazások, holografikus optikai elemek és memóriák, mérés technikai alkalmazások (deformáció-, rezgés- és alakmérés; átlátszó tárgyak törésmutató-változásának mérése), digitális holográfia. A tantárgy a Fizika alapképzési (BSC) szakon megszerezhető általános optikai ismeretekre épít.

This course describes the theory of holography, the several display and measurement techniques and their application examples. The main topics: holographic imaging, types of holograms, practical holography, applications of display holography and security holograms, holographic optical elements and memories, measurement applications (deformation, vibration and shape measurements; refractive index change measurement for transparent objects), digital holography. The course is based on the general optics knowledge provided by a BSC degree in Physics.

*Irodalom / Literature:* P. Harihartan: Optical Holography (Cambridge University Press, 1996), H. M. Smith: Holographic recording materials (Springer Verlag 1977), P. K. Rastogi: Holographic interferometry (Ed.) (Springer-Verlag 1994), T. Kreis: Holographic interferometry (Akademie Verlag 1996), U. Schnars: Digital Holography (Springer Verlag 2004).

### **Optikai anyagok és technológiák I / Optical materials and technologies I (2/0/0/v/3)**

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 hallgatókat 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 előállítás 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 anyagok és technológiák II / Optical materials and technologies II (2/0/0/v/3)**

Tárgyfelelős / Responsible lecturer: dr.Kocsányi László

Ez egy, a mesterszakon (MSc) előadásra kerülő tárgy második része, melynek leghatékonyabb elsajátítására akkor van lehetőség, ha az első részt a diák már lehallgatta, ugyanakkor abból a sikeres vizsga megléte nem követelmény. E tárgy keretében az elektromágneses fényelmélet és a szilárdtestfizika eredményeire alapozva megismertetjük hallgatóinkat a fény és anyag közötti speciális kölcsönhatások (anizotrópia, kristályoptika nemlineáris optika, vékonyrétegek, hullámvezetés, stb.) gyakorlati hasznosításával. Tárgyaljuk az ezeken az effektusokon alapuló optikai elemek előállítására alkalmazható anyagokat, kristályokat és azok legfontosabb tulajdonságait. Ismertetjük az optikai kristályok előállításának, megmunkálásának és minősítésének alapvető eljárásait, így pl. a növesztést, az orientálást és a vágást. Összefoglaljuk a csiszolási és polírozási technológiák eltérését az üvegnél alkalmazottakhoz képest. Diákjaink elsajátítják a vékony réteg optikák (tükrözés gátló rétegszerkezetek, lézertükrök, interferencia-szűrők, stb.) tervezésének, gyártásának és minősítésének alapjait. Hallgatóink betekintést nyernek a felületi struktúrák és a hullámvezetők létrehozásának (litográfia, diffúzió, ionscere, protoncsere, maratások, ionimplantáció, stb.) témakörébe, miáltal eljutnak a legkorszerűbb optikai eszközök, köztük az integrált optikai áramkörök (OIC) működésének, gyártástechnológiai problémáinak megértéséhez.

This is the second part of a two semester MSc course, which can be attended without passing the examination at the end of the first part. Based on electromagnetic light theory and solid state physics, we make students acquainted with the application of special interactions of light and matter (anisotropy, crystal-optics, nonlinear optics, thin film optics, waveguide optics, etc.). We discuss the most important optical crystals and summarize their production technologies (orientation, sawing, grinding, polishing etc.) as well as the applied machines and tools. Our students will learn the basic design, production and characterization methods of optical thin film elements (e.g. antireflection layer, laser mirrors, interference filter, etc.). Students get introduced to surface structuring (e.g. lithography) and to modern material modification technologies (diffusion, ion-exchange, proton-exchange, ion-implantation, etching, etc.) applied for optical purposes. The aim is to make students qualified for the speculative production of state of the art optical devices including integrated devices (Optical Integrated Circuits- OIC).

*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; Horváth J.: Optika, elektromágneses fényelmélet, Tankönyvkiadó 1966; Amnon Yariv, Pochi Yeh: Optical Waves in Crystals, Propagation and Control of Laser Radiation, Wiley-Interscience, 2003; HK. Pulker: Coatings on glass, Elsevier, 1984, ISBN0-444-42360-5; Hiroshi Nishihara, Mashimitsu Haruna, Toshiaki Suhara: Optical Integrated Circuits, McGraw-Hill Book Company, New-York, 1985, ISBN 0-07-046092-2.



## **Optikai jelfeldolgozás és adattárolás / Optical information processing and data storage** (2/2/0/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. Színmérés, 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/4)**

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.

**Kvantumelektronika / Quantumelectronics (3/0/0/v/4)**

Tárgyfelelős / Responsible lecturer: Barócsi Attila

A tárgy a kvantummechanika és a klasszikus elektrodinamika tárgyak ismeretére épít. Témakörök: Atomos gáz szuszceptibilitása (félklasszikus tárgyalás), sugárzási tér kvantálása, vákuumingadozás Lamb-féle eltolódás, fotoeffektus H-atomon, Thomson szórás kölcsönhatási kép, időfejllesztő operátor, Raman szórás, frekvencia kétszerezés, parametrikus erősítés, fáziskonjugáció szabadelektron lézer.

The course based on the course of quantummechanics and classical electrodynamics. Topics: Susceptibility of atomic gas (semiclassical treatment), quantization of free electromagnetic field, vacuum fluctuation Lamb shift, photoeffect on H-atom, Thomson scattering interaction picture, time evolution operator, Raman scattering, frequency doubling, parametric amplification, phase conjugation, free-electron-laser.

*Irodalom / Literature:* A.Yariv: Quantumelectronics, Landau-Lifsic: Elméleti fizika, Nem relativisztikus kvantummechanika, Elektrodinamika, Marx Gy.: Kvantummechanika.

### **Optikai adatátvitel fizikai alapjai / Basic physics of optical communication (2/0/0/v/3)**

Tárgyfelelős / Responsible lecturer: Papp Zsolt

A tantárgy a Fizika BSc szakon elsajátított optika ill. kvantummechanika alapkursus anyagára épít. Az optikai adatátvitel fizikai alapjait a következő témakörök szerint tárgyalja: optika (nyalábterjedés inhomogén közegben, diszperzió, stb.), lézerfizika (szál-lézerek, optikai szál-erősítők, DFB lézer, stb.), nemlineáris optika (nemlineáris effektusok, fázismoduláció, szolitonok, stb.), optikai szálak – hullámvezetők (optikai szálak, módusok, diszperzió, fotonikai kristályok, száloptikai csatolók, stb.).

This course gives an introduction to physics of optical communication building on knowledge of optics gained on a BSc course program in Physics. The following topics will be treated: optics (ray propagation in lenslike media, dispersion, etc.), laser physics (fiber-laser, optical fiber-amplifiers, DFB laser, etc.), nonlinear optics (nonlinear effects, phase-modulation, soliton, etc.), optical fibers – wave guiders (optical fibers, modes, dispersion, photonic crystals, couplers, etc.).

*Irodalom / Literature:* Lajtha György - Szép Iván: Fénytávközlő rendszerek és elemeik (Akadémiai Kiadó, Budapest, 1987.), Cebe László: Fénytávközlés (A Kandó Kálmán Villamosipari Műszaki Főiskola jegyzete) A. Yariv: Optical electronics (Harcourt Brace Jovanovich College Publishers, 1991), A. Hasegawa: Optical Solitons in Fibres (Springer, 1989), J. D. Joannopoulos: Photonic crystals (Princeton Univ. Pr., 1995)

### **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.

### **Bevezetés az ultragyors impulzusok fizikájába / Introduction to the Physics of Ultrafast Pulses (2/0/0/f/2)**

Tárgyfelelős / Responsible lecturer: dr. Maák Pál

A tantárgy célja, hogy a hallgatók megismerkedjenek az egyre nagyobb teret nyerő femtoszekundumos és pikoszekundumos impulzusok természetével, különleges viselkedésével és mindennapjaink részévé váló alkalmazásaikkal. Magyarországon épül az európai kutatás egyik lézertechnikai zászlóshajójának számító ELI ALPS intézet, amelyben ultrarövid impulzusú nagy teljesítményű lézerek és az általuk keltett még rövidebb attoszekundumos impulzusok szolgálják az anyag fizikai megismerését minden eddigénél nagyobb energiájú és rövidebb gerjesztő és mérő

folyamatok útján. A tárgy egyik célja, hogy a BSc szinten diplomázó hallgatók sikerrel kapcsolódhassanak be az ezirányú fejlesztésekbe vagy bármilyen más területen sikerrel dolgozhassanak, ahol ez a technológia használatos (távközlés, adattárolás, mikroszkópia, sebészet stb.) A tárgy áttekinti a móduscsatolt impulzuskeltési technikákat, lézertípusokat, erősítőanyagokat, az impulzusokhoz szükséges speciális mérés technikát, spektrális komponensek és fázisok kezelését, tipikus nemlineáris fény-anyag kölcsönhatásokat. A hallgatók gyakorlatokon és demonstrációkon vehetnek részt az Atomfizika Tanszék femtoszekundumos lézertudományi laboratóriumában.

The aim of the course is to get insight into the fast evolving techniques of femtosecond and picosecond pulse generation, amplification and application. The use of ultrashort pulses generated by modelocking becomes part of our everyday life and is the basis of the techniques implemented in the new Hungarian international high power laser facility, the ELI ALPS. Big part of the research performed here is oriented to light matter interaction involving high power ultrashort pulses and attosecond XUV pulses. The task of the course is to facilitate the participation of BSc students and BSc grade physicists in these research topics and the technologic development of laser setups. The covered topics include generation and measurement of ultrashort modelocked pulses, spectral and phase management, pulse amplification, nonlinear light-matter interactions characteristic to these pulses, practical exercises and demonstrations in the femtosecond laboratory of the Department.

*Irodalom / Literature:* A kurzushoz segédanyagokat biztosítunk nyomtatott vagy elektronikus formában. R. Paschotta: Encyclopedia of Laser Physics and Technology, John Wiley & Sons, 2008, Wolfgang Demtröder: Laser Spectroscopy Vol. 2., Springer, 2008.

### **A femtoszekundumos lézerektől az attofizikáig / From Femtosecond Lasers to Attophysics (2/0/0/v/2)**

Tárgyfelelős / Responsible lecturer: dr. Maák Pál

A tárgy kidolgozója és előadója Dr. Dombi Péter (MTA Wigner Fizikai Kutatóközpont). A kurzus megismerteti az ELI lézerberuházás (szegedi "szuperlézer") alapjait is szolgáló femtoszekundumos lézertechnológiával, valamint az ilyen lézereknek egy gyorsan fejlődő alapvető alkalmazásával (attofizika). A tananyag a nemlineáris optikai bevezető után tárgyalja a módusszinkronizált lézerműködés alapjait, az ilyen lézerek kvantitatív leírásával együtt. A rövid lézerimpulzusok előállítására alkalmas szélessávú lézertípusok ismertetése után a leggyakrabban használt Ti:zafir lézerek felépítését és az ehhez kapcsolódó optikai technológiai kérdéseket veszem sorra. A félév első felét a femtoszekundumos lézerimpulzusok erősítésével és összenyomásával kapcsolatos kérdések zárják le. Külön előadást szentelek a vivő-burkoló fázis fogalmának, fázisstabilizált lézereknek, optikai hullámformák reprodukálható előállításának, és az ezekhez kapcsolódó, a 2005-ös fizikai Nobel-díjban jelentős szerepet játszó optikai frekvenciametrológiának. A félév második felében az ún. extrém nemlineáris optikai tartományban lejátszódó fény-anyag kölcsönhatási folyamatok kerülnek sorra, különös figyelmet fordítva a magasharmonikus-keltésre épülő attoszekundumos impulzuselőállításra. Az elmúlt tíz év áttörést hozó alapvető attoszekundumos kísérleteinek ismertetése után, az MTA Wigner Fizikai Kutatóközpont-beli laborlátogatás zárja a félévet.

This course, held by the research associate of the Wigner Physical Research Institute, Peter Dombi, gives an introduction and a basic insight into the femtosecond laser technology. This is also the basic technology used in the Hungarian international high power laser institute, ELI ALPS. The course also contains introduction into the field of attosecond pulses, generated by high power femtosecond laser and characterized with sophisticated interferometric methods. The material contains introduction into the nonlinear optics, basics of mode-locking, construction of lasers emitting femtosecond pulses, used material types, as well as techniques for amplification, stretching and compressing of ultrashort pulses. In the second part of the course carrier envelope

phase stabilized and specially formed pulses are analysed, then the ultra-strong nonlinear interactions between light and matter are reviewed with emphasizing high order harmonic radiation and attosecond pulse generation.

*Irodalom / Literature:* W. Demtröder, Laser Spectroscopy I-II., Springer Berlin Heidelberg 2008.

### **ELI előkészítő laboratórium / ELI Preparatory Laboratory (0/0/4/f/2)**

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/2)**

Tárgyfelelős / Responsible lecturer: dr. Maák Pál

1. Lézerfizikai ismétlés: 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 erősítőben fellépő nemlineáris hatások, csörp és zajok becslésének 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, diódapumpa-rendszerek 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, but 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 (2/2/0/v/3)**

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, fáziskorrekció, zerofilling. mFényforrások, monokromátorok, detektorok jellemzői. Abszorpciós és reflexiós alpmérések, a dielektromos függvény meghatározása. Fázisátalakulások spektroszkópiái 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

## 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 folyamatainak 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) Mérnöktovábbképző 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 megszerzhető 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 működésének megértéséhez szükséges alapismereteket (Fermi-szint, n,p-típusú vezetés, exciton-állapotok). Megtárgyaljuk, hogy a pont hibák 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.

### **Vizsgálati módszerek az anyagtudományban I / Experimental methods in material science I (3/0/2/f/6)**

Tárgyfelelős / Responsible lecturer: Hárs György

A tárgy célja az anyagtudományban az anyagok jellemzésére legáltalánosabban használt módszerek elvi és gyakorlati szintű, az alkalmazási lehetőségekre is kiterjedő megismertetése. Az előadások során ismertetésre kerül a módszerek elve, a technikai megvalósítás jellemzői, a minta előkészítés és a mérés technikai feltételei, valamint a mérésből nyerhető információk és azok kiértékelése. Bemutatásra kerülnek gyakorlati mérési példák és az azokból nyerhető technológiai információ. A kiválasztott módszerek mindegyikéről a témával foglalkozó elismert szakember tart előadást, amihez demonstratív laborgyakorlat csatlakozik a Budapesten elérhető legmodernebb módszerek mellett.

The objective of the course is to provide a broad perspective of the experimental methods used for the characterization of the materials, with a special respect to the practical applications. In the lectures the principle of the specific method is discussed first. Later the technical details of the measuring equipment, the preparation of the sample, evaluation of the information generated in the measurement are treated, Practical case studies are presented at most of the methods. Each presentation is held by the appreciated expert of the specific measuring method. The demonstrative laboratory practicum is presented by the most up to date experimental equipment available in Budapest.

*Irodalom / Literature:* O. Brummer, J. Heydenreich, K.H.Krebs, H.G. Schneider: Szilárd testek vizsgálata elektronokkal, ionokkal és röntgensugárással. Műszaki Könyvkiadó, Budapest, 1984, valamint az egyes előadók által az előadásokhoz mellékelt néhány oldalas aktuális segédletek.



## **Vizsgálati módszerek az anyagtudományban II / Experimental methods in material science II (3/0/2/f/6)**

Tárgyfelelős / Responsible lecturer: Hárs György

A tárgy célja az anyagtudományban az anyagok jellemzésére legáltalánosabban használt módszerek elvi és gyakorlati szintű, az alkalmazási lehetőségekre is kiterjedő megismertetése. Az előadások során ismertetésre kerül a módszerek elve, a technikai megvalósítás jellemzői, a minta előkészítés és a mérés technikai feltételei, valamint a mérésből nyerhető információk és azok kiértékelése. Bemutatásra kerülnek gyakorlati mérési példák és az azokból nyerhető technológiai információ. A kiválasztott módszerek mindegyikéről a témával foglalkozó elismert szakember tart előadást, amihez demonstratív laborgyakorlat csatlakozik a Budapesten elérhető legmodernebb módszerek mellett.

The objective of the course is to provide a broad prospective of the experimental methods used for the characterization of the materials, with a special respect to the practical applications. In the lectures the principle of the specific method is discussed first. Later the technical details of the measuring equipment, the preparation of the sample, evaluation of the information generated in the measurement are treated, Practical case studies are presented at most of the methods. Each presentation is held by the appreciated expert of the specific measuring method. The demonstrative laboratory practicum is presented by the most up to date experimental equipment available in Budapest.

*Irodalom / Literature:* O. Brummer, J. Heydenreich, K.H.Krebs, H.G. Schneider: Szilárd testek vizsgálata elektronokkal, ionokkal és röntgensugárással. Műszaki Könyvkiadó, Budapest, 1984, valamint az egyes előadók által az előadásokhoz mellékelt néhány oldalas aktuális segédletek.

## **A felületfizika alapjai (2/0/0/f/2)**

Tárgyfelelős: /Responsible lecturer: Homokiné 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.

Részletes tematika: Felületfizika: definíció és jelentőség. Jól definiált felületek, határfelületek és vékonyrétegek előkészítése. Nanoszerkezetek és előállításuk. Felületek, határfelületek és vékonyrétegek morfológiája és szerkezete, nukleáció, felületi szerkezet vizsgálati lehetőségei. Adsorpció a szilárdtest felületén: fizisorpció, kemisorpció, kilépési munka és mérési módszerei. Tömbi és felületi diffúzió. Felületanalitikai mérési módszerek és összehasonlításuk.

The main goal of the course is to introduce the basic concepts of surface physics, measurement methods and the main applications - based on the knowledge of previous physics courses. The following topics are discussed: Surface physics: its definition and importance. Preparation of well defined surfaces, interfaces and thin films. Nanostructures and their preparation. Morphology and structure of surfaces, interfaces and thin films, Nucleation, Experimental methods of surface structures. Adsorption on solid state surfaces: Physisorption, Chemisorption, Work-function and its measurement methods. Diffusion (Bulk, Surface). Surface Analytical measurement techniques and their comparison.

*Irodalom / Literature:* H. Ibach: Physics of Surfaces and Interfaces, P. W. Atkins: Fizikai kémia I - III., H. Lüth: Solid Surfaces, Interfaces and Thin Films

### **Felületfizika és vékonyrétegek 1. (2/0/0/v/3)**

Tárgyfelelős / Responsible lecturer: Homokiné Dr. Krafcsik Olga

A tárgy szilárdtestfizikai alapismeretekre 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.

This course covers the main fields 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 are also discussed.

*Irodalom / Literature:* Giber J. és szerzőtársai: Szilárdtestek felületfizikája, Műszaki könyvkiadó, Budapest, 1987., Giber J., Gyulai J., V.K. Josepovits, L. P. Biró: Diffúzió és implantáció szilárdtestekben, Műegyetemi Kiadó, 1997., O. Brummer, J. Heydenreich, K. H. Krebs, H. G. Schneider: Szilárd testek vizsgálata elektronokkal, ionokkal és és röntgensugárással. Műszaki Könyvkiadó, Budapest, 1984. A. Many, Y. Goldstein, N. B. Grover: Semiconductor Surfaces, North-Holland Publishing, Amsterdam, 1971.

### **Felületfizika és vékonyrétegek 2. (2/0/0/v/3)**

Tárgyfelelős/Responsible lecturer: Homokiné Krafcsik Olga

A tárgy szilárdtestfizikai alapismeretekre építve tárgyalja a felületfizika és vékonyréteg fizika főbb területeit. Részletes tárgyalásra kerül a felületek rácsrezgéseinek leírása. A tárgy foglalkozik az adhézióval különböző határfelületeken, valamint abszorpciós jelenségek, felületi reakciók és transzportjelenségek leírásával.

This course covers the main fields of physics of surfaces and thin layers, based on solid state physics fundamentals. A detailed description is given on the lattice vibrations of surfaces. Adsorption, surface reactions and transport phenomena are also discussed.

*Irodalom / Literature:* Giber J. és szerzőtársai: Szilárdtestek felületfizikája, Műszaki könyvkiadó, Budapest, 1987., Giber J., Gyulai J., V.K. Josepovits, L. P. Biró: Diffúzió és implantáció szilárdtestekben, Műegyetemi Kiadó, 1997., O. Brummer, J. Heydenreich, K. H. Krebs, H. G. Schneider: Szilárd testek vizsgálata elektronokkal, ionokkal és és röntgensugárással. Műszaki Könyvkiadó, Budapest, 1984. A. Many, Y. Goldstein, N. B. Grover: Semiconductor Surfaces, North-Holland Publishing, Amsterdam, 1971.

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

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. Exemples. 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, kristallográfiai irányok és síkok. Egykristályok, polikristályos anyagok, anizotrópia, nemkristályos anyagok. Polimorfizmus és allotrópia. A szén és szilícium az anyagtudományban. Szén- és szilícium módosulatok, ezek sajátosságai. 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/2)**

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 (vákuumpárologtatás, lézerablációs párologtatás, molekulásugaras epitaxiás rétegnövesztés, porlasztás), kémiai rétegleválasztási módszerek (kémiai gőzfázisú leválasztás, kémiai folyadékfázisú leválasztás). Adalékolás (diffúzió, ionimplantáció). Litográfia (fóto, 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). Litography (photo-, X-ray, electron / ion beam litography). 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: 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.

### **Kristályos és amorf anyagok / Crystalline and amorphous materials (2/0/0/v/3)**

Tárgyfelelős / Responsible lecturer: Kugler Sándor

A kristályos, az amorf és az üveg állapot. Amorf felvezetők, kalkogén üvegek osztályozása, előállítás, Phillips elmélete. Szerkezetvizsgálat: diffrakciós mérések, számítógépes modellezés, Mott féle (8-N) szabály. Elektron szerkezet: DOS, töltésfluktuációk, adalékolás. Hibahelyek: lógó kötések, void-ok, koordinációs hibák. Fotóindukált jelenségek. Optikai tulajdonságok. Alkalmazások: napelem, Xerox másoló, DVD, stb. Az egyensúlyi és nem-egyensúlyi fázis diagrammok. Lehűlés olvadékból kristályosodás elkerülésével, üvegátalakulás, kinetika. Amorf ötvözetek szerkezetének jellemzése, vizsgálati módszerek. Amorf ötvözetek elektronszerkezete és mágnessége.

Crystalline, amorphous and glassy states. Classifications of amorphous semiconductors and chalcogenide glasses. Preparations. Phillips theory. Structure investigations: diffractions and computer modeling. Mott's (8-N) rule. Electronic structures. DOS, Charge fluctuations, doping. Defects, dangling bonds, voids, coordination defects. Photoinduced effects. Optical properties. Applications: solar cells, Xerox, DVD, etc. Equilibrium and non-equilibrium phases. Quenching, glass transition, kinetics. Structures of alloys. Methods. Electronic structure and magnetic properties of amorphous alloys.

*Irodalom / Literature:* K. Morigaki: Physics of Amorphous Semiconductors (World Scientific) 1999, Jai Singh and Koichi Shimakawa: Advances in Amorphous Semiconductors (Taylor and Francis) 2003, Jai Singh: Optical Properties of Condensed Matter (Wiley) 2006., S. Kugler-K. Shimakawa: Amorphous semiconductors (Cambridge University Press) 2014

### **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 tárgyaló 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 spektroszkópiai 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 (3/2/0/f/5)**

Tárgyfelelős / Responsible lecturer: Aszódi Attila

Előadás: az atomenergetika története. Reaktorfizikai, reaktortechnikai 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, dozimetriai 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 (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 (2/0/0/v/2)**

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 (2/1/0/v/3)**

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 (3/1/0/v/4)**

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, egyenlőtlenségek kialakulását a kiegészítő 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 (2/0/3/v/5)**

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 mérés technikai módszerek segítségével, nukleáris módszerek alkalmazása az elem analitikában 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. Liljenzin, 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 (3/0/0/v/3)**

Tárgyfelelős/ Responsible lecturer: Fehér Sándor

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 kiégett 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 (2/0/0/v/2)**

Tárgyfelelős/ Responsible lecturer: Sükösd Csaba

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-prolifерációs rendszer elemei, jelentősége, működése. A nukleáris fegyverzetkorlátozás története: előzmények, Hiroshima és Nagaszaki, az atomkorszak és a hidegháború. Az Atomszorompó 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-prolifерáció 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 atomszorompó 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).

## **Fenntartható fejlődés és atomenergia / Sustainable development and nuclear energy**

(2/0/0/v/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; Csernobil.

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.

## **Fúziós plazmafizika I / Plasmaphysics and fusion I (2/0/0/v/2)**

Tárgyfelelős/ Responsible lecturer: Pór Gábor

Bevezetés, alapfogalmak, osztályozás, Debye hossz, plazmafrequencia. Részecskék mozgása mágneses térben, a vezető centrum, egy- és kétfolyadékos modell; Atomfizika plazmákban, alapvető fogalmak, energiaszintek gerjesztési együtthatók; Elektromágneses hullámok terjedése plazmában (hullámegyenlet, hullámterjedés homogén/inhomogén közegben), a diszperziós reláció;MHD hullámok, instabilitások; Transzport jelenségek; Plazmák kinetikus elmélete, az eloszlásfüggvény értelmezése, Liouville-tétel, Boltzmann-egyenlet, Vlasov-egyenlet; Tér- és időskalák rendezése, drift-rendezés, MHD-rendezés, girációs rendezés; Plazmák magnetohidrodinamikai elmélete, az eloszlásfüggvény momentumai, a kinetikus egyenlet momentumai, megmaradási törvények, az elmélet lezárásának problematikája; Driftek a folyadékképben, MHD-drift közelítés és véges Larmor sugár effektusok; Általánosított Ohm-törvény, az MHD elmélet alkalmazásai.

Introduction, basics of fusion, classification, Debye length, plasma frequency. Motion of particle in magnetic field, one and two fluid model; Atom physics in plasma, energy levels Electromagnetic waves in plasma, dispersion MHD waves, instability transport effects, kinetic theory to plasma distribution functions Boltzman equation, Vlasow equation Scaling in space and in time, MHD theory, drifts Larmor radius and effects, generalized Ohm-law. Application of MHD theory in practice.

## **Fúziós plazmafizikai laboratórium / Laboratory in plasma physics (0/0/4/f/4)**

Tárgyfelelős/ Responsible lecturer: Pór Gábor

A résztvevők egy alacsony nyomású ködfénykiszülésen fognak különböző, nagy fúziós berendezéseken is használt diagnosztikai eszközök segítségével méréseket végezni. Háromféle mérést kell majd végrehajtani: Meg kell határozni Langmuir szonda segítségével az elektronhőmérsékletet és elektronsűrűséget a kiszülés különböző tartományaiban, Vizsgálni kell Langmuir szonda segítségével a plazmaparaméterek fluktuációit, Fel kell venni az ívkiszülés plazmájának spektrumát változó plazmaösszetétel esetén egy nagyfelbontású spektrométer segítségével. A mérések során a résztvevők feladata lesz az adatgyűjtési rendszer (pl. analóg-dbvigtál átalakítók, triggerek) részbeni programozása is.

Low-pressure plasma is used in a tube. Using Langmuir probes the temperature and density will be estimated at different levels of ionization. Fluctuations are investigated using Langmuir probes, and finally high-resolution spectroscopy helps to find the spectral density of the discharge at different intensity and different plasma parameters. Participants have to program also the data collection and data evaluation system.

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

(2/0/1/v/3)

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 MŰSZ alapján), IAEA TECDOC 3789, és 4568.

## **Sugárvédelem II / Health physics II (2/0/2/v/4)**

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 mérésével 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 szabályzási 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 (2/2/0/v/5)**

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 becsülő 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.

### **Szimulációs technika / Simulation techniques (2/0/1/f/4)**

Tárgyfelelős/ Responsible lecturer: Fehér Sándor

A tantárgy nukleáris energetikai ismeretek oktatásában és az atomerőművi gyakorlatban használatos szimulációs programok fejlesztéséhez szükséges ismereteket foglalja össze az alábbi tematika szerint: szimulációs alapelvek, valós idejű, interaktív szimulátorok tervezése, felépítése; közönséges differenciálegyenletekkel leírható rendszerek modellezési technikái; numerikus módszerek differenciálegyenletek valós idejű integrálására, szimulátor interface tervezése; szoftverkövetelmények, operációs környezet; atomerőművi szimulátorok fajtái; reaktorkinetikai folyamatok modellezése, szimulációja; nyomottvizes atomerőmű primerkörü folyamatainak szimulációja; atomerőművi főberendezések szimulációja.

In the course the knowledge required to the development of real-time, interactive simulators used for the education and training in the field of nuclear energy is discussed according to the following topics: simulation principles; design and development of real-time interactive simulators; simulation techniques for systems modeled with ordinary differential equations; numerical methods for real-time integration; simulator interface design; software and operational system issues; types of nuclear power plant simulators; simulation of nuclear reactor kinetics; simulation of thermohydraulic processes taking place in the primary circuit of PWR type power plants; simulation of the operation of the main components of a nuclear power plant.

*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 primerkörü szimulátor fizikai és matematikai modelljének leírása; BME-NTI-241/1999; BME Nukleáris Technikai Intézet, Budapest, 1999.

### **Atomerőművi szimulációs gyakorlatok / Nuclear power plant simulation exercises (0/0/2/f/3)**

Tárgyfelelős/ Responsible lecturer: Fehér Sándor

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> primerkörü szimulátor; SSIM szekunderkörü 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 primerkörü 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.

### **Termohidraulikai számítások / Calculations in thermohydraulics (3/1/0/v/5)**

Tárgyfelelős/ Responsible lecturer: Aszódi Attila

Termohidraulikai rendszer kódok ismertetése, különös tekintettel a VVER alkalmazásokra; RELAP5, CATHARE, APROS kódok fő jellemzői; alkalmazás előkészítése; primer és szekunder körű rendszerek modellezése; üzemi és üzemzavari állapotok modellezése; kódvalidációs módszerek; APROS és RELAP5 számítási gyakorlatok.

Introduction of thermal hydraulic system codes, focused on VVER applications; Main features of RELAP5, CATHARE, APROS codes; Preparation of the application; Modeling of primary and secondary side systems; Modeling of operational and accidental states and transients; methods for code validation; Simulation practices with APROS and RELAP5 codes.

*Irodalom / Literature:* N. E. Todreas, M. S. Kazimi: Nuclear Systems I., II. 1990, L.S. Tong, J. Weisman: Thermal Analysis of Pressurized Water Reactors, ANS, 1996.

### **Radiológiai technikák fizikai alapjai / Physical principles of radiological methods (3/0/0/v/4)**

Tárgyfelelős/ Responsible lecturer: Czifrus Szabolcs

A tárgy keretében a hallgatók az orvosi gyakorlatban alkalmazott radiológiai képalkotó eljárások fizikai alapjait ismerik meg. A tárgy fő témakörei a következők: Orvosi képalkotáshoz használt sugárforrások jellemzői, a sugárzások anyaggal való kölcsönhatása, a sugárzásdetektálás fizikája és modellezése, a képalkotás fizikai modellezése, a kép leírása, képjellemzők, képalkotó eljárások, projekciós radiológia, tomográfiai technikák fizikai alapjai. A tárgy keretében bemutatjuk a CT, SPECT és PET technikák fizikáját, valamint a radiológiai technikák tendenciáját, fejlődését (több funkciót egyidejűleg megvalósító vizsgálati eljárások terjedését) is. A tárgyat a képfeldolgozási algoritmusok alapjaival zárjuk.

In the frame of the course students study the physical principles of radiological imaging techniques applied in medicine. The main subjects are the following: Principal characteristics of radiation sources used for medical imaging, properties of radiation-matter interaction, physics and modeling of radiation detection, physical modeling of the imaging process, characterization of the image, imaging techniques, projection radiology, and physical principles of tomography techniques. The physics of CT, SPECT and PET, furthermore, the worldwide trends of radiology techniques, such as multimodality techniques) are described. The last topic of the course is the basic principles of image processing algorithms.

*Irodalom/Literature:* W.R. Hendee, E.R. Ritenour: Medical Imaging Physics, Wiley-Liss, 2002 (fourth edition).

### **Radioaktív anyagok terjedése környezeti és biológiai rendszerekben / Migration of radioactive species in environmental and biological matter (2/2/0/v/4)**

Tárgyfelelős/ Responsible lecturer: Zagyvai Péter

A tantárgy a Fizika alapképzési (BSC) szakon megszerezhető 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 – forrástágok 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 (3/0/1/v/4)**

Tárgyfelelős/ Responsible lecturer: Zagyvai Péter

A tantárgy a Fizika alapképzési (BSC) szakon megszerezhető 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 (2/0/0/v/2)**

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. Kiegész.

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.



### **Diagnosztikai módszerek / Methods in diagnostics (2/0/0/v/2)**

Tárgyfelelős/ Responsible lecturer: Pór Gábor

Jelek és jelrendszerek osztályozása, eloszlásfüggvény, spektrumok, koherencia FFT alapú mérés technikája (mint korábbi ismeretek átisméltése, és matematikai megalapozása). Egy- és többdimenziós Autoregressziós modellezés és használata ok-okozati összefüggések vizsgálatára. Szekvenciális valószínűségi hányados teszt és hipotézisvizsgálatok. Fuzzy modellezés és szabályozás, ideghálózati (nemlineáris) módszerek alapjai. Wavelet elméleti alapjai és alkalmazása a diagnosztikában és a szűrésben. Szakértői rendszerek áttekintése, diagnosztikai példaesetek atomreaktorokban és fúziós kísérleti berendezésekben.

Classification of signals. Measuring distribution function, spectra, coherence based on FFT technique (summarizing previously learnt technique with basic mathematical calculations). One-dimensional and multidimensional autoregressive modeling and its use for revealing causal relationship. Mathematical basics and application of the Sequential probability ratio test for hypothesis test. Basics of fuzzy ensembles and its use for control of physical or industrial systems. Basics of wavelet technique for stationer and nonstationer spectral analysis its application in diagnostics. Survey of expert systems and case studies in industrial diagnostics and applications in conventional and fusion nuclear reactors.

*Irodalom / Literature:* D. Schnell: Jelek és jelrendszerek (Műszaki Könyvkiadó 1965), R. Norman Digitális jelfeldolgozás (Műszaki Tankiadó, 1977), Pór Gábor: Műszaki diagnosztika (2006), Kiegészítő füzetek (2007) Mallat, A Wavelet Tour of Signal Processing (1998).

### **Fúziós diagnosztika / Diagnostics in fusion devices (2/0/0/v/2)**

Tárgyfelelős/ Responsible lecturer: Pór Gábor

Fúziós elméleti alapok ismétlése, és számítások, Transzport jelenségek a tokamakban. Mágneses hidrodinamika, stabilitás, egyesített továbbfejlesztett tokamak fizika; Alfvén hullámok és instabilitások; Mágneses diagnosztikák: Rogowski és Mirnov tekercsek, Halo áram érzékelők; Neutron diagnosztikák: Gamma spektrométerek, neutron fluxus monitorozás, Kallódó alfarészecske detektorok, nagyfelbontású neutron spektrométer; Optikai és infravörös diagnosztikák: Lítium beam spektroszkópia, Thomson szórás, bolometerek, polarizációs diagnosztika, Spektroszkópiák: Töltéscsere spektroszkópia, H-alfa sugárzás, Ultraibolya spektroszkópia, Lágy röntgen sugárzás spektroszkópia, Fűtőáram spektroszkópia; Mikrohullám: ECE, Reflektometria, interferometerek, Látható fény: Infravörös kamerák, termoelemek, Langmuir próba, Pormonitorok, Gyors Tv kamerák. Pellet diagnosztika.

Fusion Theory and Computations, Tokamak Confinement and Transport; Magnetohydrodynamics, Stability, and Integrated Advanced Tokamak Physics; Alfvén Wave Instabilities; Magnetic Diagnostics: External Rogowski, Mirnov coils, Halo Current Sensors; Neutron Diagnostics: Gamma Ray Spectrometers, Neutron Flux Monitors, Lost Alpha Detectors, High Resolution Neutron Spectrometer; Optical /IR Diagnostics: Thomson Scattering (core, Edge, X point, Divertor), Bolometers, Polarimeter; Spectroscopic and NPA: CXRS, H-Alpha, VUV, Soft X-Ray Array, MSE Based On Heating Beam; Microwave Diagnostics: ECE, Reflectometer, Interferometer ; Plasma Facing and Operational Diagnostics: IR Cameras, Vis/IR TV, Thermocouples, Langmuir Probes, Dust Monitor.

## Orvosi fizika tárgycsoport

### ***Sugárbiológia/Radiobiology (2/1/0/v/3)***

*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 sejtstruktúra 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:* 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; Nias A.H.W.: An Introduction to Radiobiology. J. Wiley & Sons, Chichester, England, 2000.

### ***Sugárterápia fizikai alapjai/ Physics of Radiotherapy (2/0/2/v/4)***

*Tárgyfelelős/ Responsible lecturer:* Pesznyák Csilla

A tantárgy célkitűzése és részletes tematikája: a sugárterápiához kapcsolódó orvosi fizikai fogalmakat, mérés technikai 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/2)***

*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, metszetképalkotó 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/v/2)***

*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, forraserősség, 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, metszetképalkotó 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/3)***

*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 minőségellenőrzése. A tervezőrendszerek minőségbiztosítása /minőségellenőrzése. A mérendő paraméterek és tűréshatárai. A nem-invazív mérések elvei és eszközei. Az egyes vizsgálatfajták eszközsüksége. Az eredmények értékelése. Különböző röntgenmunkahelyek minőségellenőrzése (felvételi, átvilágító, CT, mammográfiás, angiográfiás 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:* WPM Mayles, R Lake, A McKenzie, EM Macaulay, HM Morgan, TJ Jordan and SK Powley: Physics Aspects of Quality Control in Radiotherapy (IPEM 81) The Institute of Physics and Engineering in Medicine 1999. ISBN 0 904181 91 X; Assurance of quality in the diagnostic X-ray department. London: The British Institute of Radiology; 1988. Recommended standards for the routine performance testing of diagnostic X-ray imaging systems. IPEM Report No. 77. The Institute of Physics and Engineering in Medicine, York, 1997.

### ***Sugárvédelem az orvosi fizikában/ Radiation Protection in Medical Physics (3/0/1/v/4)***

*Tárgyfelelős/ Responsible lecturer: Zagyvai Péter, 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 résztestszámolás, 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 (2/1/0/v/3)***

*Tárgyfelelős/ Responsible lecturer: Jánossy András*

A tárgy célkitűzése és részletes tematikája: a mágneses rezonancia és klinikai alkalmazásaihoz kapcsolódó orvosi fizikai 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 sajátosságai; a mágneses rezonancia (MR) alapjai: relaxációk, koordináta rendszerek, Bloch egyenletek; impulzus MR, spin echo; 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/3)***

*Tárgyfelelős/ Responsible lecturer:* Czirfus Szabolcs

A tantárgy célkitűzése és részletes tematikája: a nukleáris medicinához kapcsolódó orvostudományi 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, fotomultiplikátorok, 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 gyorsítóban, 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 dózissenőrzés. 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 tomográfiai rekonstrukció gyakorlata. Multimodalitású rendszerek, regisztráció, szegmentáció, fúzió. Képtároló 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/3)**

*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, koincidenca. 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;

### ***Ultrahang diagnosztika (2/0/0/v/2)***

*Tárgyfelelős / Responsible lecturer:* Dóczi Rita

Az ultrahang keletkezése. Az ultrahang terjedése. Az ultrahang kölcsönhatásai. A szövetek akusztikus sajátosságai. Műszerek. Leképezési eljárások. Műtermékek és képminőség. Doppler technika. Az ultrahang leképezés klinikai alkalmazása. Az ultrahang terápiás alkalmazása. A szövetek jellemzői. Speciális technikák, pl. mikroszkópia, holográfia, tomográfia. Biológiai hatások. Az UH expozíció és a méréshez szükséges műszerek. Biztonságtechnika.

Creating ultrasound waves. Propagation of ultrasound. The interactions of ultrasound. Acoustic properties of tissues. Ultrasound devices. Imaging techniques. Artefacts and image quality. Doppler techniques. Clinical applications of ultrasound imaging. Therapeutic uses of ultrasound. Special techniques: microscopy, holography, tomography. Biological effects. Ultrasound exposition and measurement devices. Ultrasound hazards.

*Irodalom/Literature:* Thomas L. Szabó: Diagnostic Ultrasound Imaging: Inside Out, 2013, Elsevier

### ***Méréstechnika a sugárterápiában (2/0/0/v/2)***

*Tárgyfelelős/ Responsible lecturer:* Pesznyák Csilla

Cilindrikus, plánparalell és PinPoint ionizációs kamrák, well-type ionizációs kamra alkalmazása a brachyterápiában, gyémántdetektorok, elektrométerek alkalmazása. Félvezető detektorok (p és n típusú), különböző típusú mátrix detektorok (félvezető és ionizációs kamra), portál dozimetria, termolumineszcens és optikai doziméterek, radiografik és radiochromik filmdozimetria. CT dozimetria, dozimetriai és képminőségi paramétereinek ellenőrzése különböző homogén és antropomorf fantomokkal. Relatív és abszolút mérések eszköztára kobalt ágyúknál és lineáris gyorsítóknál, forrás kalibráció. Alfa dózismérők, neutron dozimetria. Modern besugárzási technikák (IMRT, IGRT, IMAT) dozimetriai ellenőrzésének eszköztára. In vivo dozimetria.

Cylindrical, plan-parallel ionization chambers and PinPoint chamber, well-type chamber for brachytherapy, diamond detectors. Semiconductor detectors (p and n type). Different type of 2D detector array with semiconductor material or ionization chambers. Portal dosimetry, thermoluminescent (TL) and optically stimulated luminescence (OSL) dosimeter, radiographic and radiochromic film detectors, CT dosimetry, quality parameters of photon and electron dosimetry, image quality parameters, different homogeneous and antropomorf phantoms. Relative and absolute dosimetry for cobalt unit and linear accelerator, source calibration, alpha and neutron dosimetry, special equipment for modern radiation therapy (IMRT, IGRT, IMAT). In vivo dosimetry.



*Irodalom / Literature: IAEA TRS 398, Ionization Radiation Detectors for Medical Imaging, szerk: Alberto Del Guerra, 2004; Handbook of Radiotherapy Physics, szerk: P Mayles, A Nahum, JC Rosenwald, Taylor & Francis, 2007. ESTRO Booklet 5(Methods for in vivo dosimetry in external radiotherapy) szerk: J. Van Dam and G. Marinello, 2006. ESTRO Booklet 9. Guidelines for the verification of IMRT, szerk: B Mijnheer, D Georg, 2008.*