

Doktori értekezés

2020

Schramek Anikó

A kvantummechanika tanítása, illetve egyéni
fejlődési lehetőségek középiskolában

Schramek Anikó

Témavezető: Dr. Cynolter Gábor

Eötvös Loránd Tudományegyetem

Természettudományi Kar

Fizika Doktori Iskola

Vezető: Dr. Gubicza Jenő

Fizika Tanítása Doktori Program

Vezető: Dr. Tél Tamás

2020.

Tartalom

Bevezetés	5
1. A kvantummechanika témakörben tanítandó tananyag, lehetőségek a különböző iskola vagy osztálytípusokban	7
1.1 A tananyag rendezése, tantervi és kimeneti követelmények összefoglalása	7
1.2 Tartalmak a követelményekhez igazítva	9
1.3 Tapasztalatok, felmerülő problémák, a megértést segítő segédanyagok.....	13
1.4 A számonkérés tapasztalatai, a jegyzet hasznossága	17
1.5 Összegzés	18
2. A kvantummechanika megalapozása mechanikai hullámok témakör tanításakor	20
2.1 Kétrés kísérlet	21
2.2 Bragg-féle visszaverődés	22
2.3 Állóhullámok	24
2.4 Alagúteffektus.....	26
3. A kvantummechanika és a biológia, avagy tantárgyközi kapcsolatok	28
3.1 A témaválasztás indoklása	28
3.2 Az előadás bevezető része.....	30
3.3 Kollagenáz, avagy az enzimek és az alagúteffektus	33
3.4 A szaglás is rezgések érzékelése?	34
3.5 A vörösbegy	36
3.6 Összegzés	38
4. Diákok részvétele detektorépítésben, a kutatás illetve projektmunka lehetséges hozadékai 40	
4.1 A program és a résztvevők bemutatása	40
4.2 Az ismeretek megalapozása	41
4.3 A kamra építése, az ehhez szükséges ismeretek	41
4.4 Összegzés	44
5. A vezetéssel zajló mentorprogram bemutatása.....	47
5.1 Az új utak szükségességének indoklása	47
5.2 A program gyakorlati megvalósítása	48
5.3 A programokban résztvevők eredményei.....	49
5.4 Összegzés	50
6. Egy saját projekt: a szinkronizáció	51
6.1 Néhány saját projekt rövid bemutatása	51
6.2 A szinkronizáció, rövid elméleti áttekintés	52
6.3 A vizsgálatok menete	53

6.4 A projektek diákokra való hatása, eredményei	56
Köszönetnyilvánítás	58
Melléletek.....	59
Jegyzet diákjaim számára.....	59
A kvantummechanika előzményei	59
RÉSZECSKETERMÉSZET	60
Hőmérsékleti sugárzás	60
Fotoeffektus	62
Katódsugárzás	63
Vonalas színekép	64
Compton-effektus.....	64
Franck-Hertz kísérlet.....	65
MÉGIS HULLÁM?	66
Röntgen sugárzás	66
Bragg diffrakció	67
Davisson-Germer kísérlet.....	67
KETTŐS TERMÉSZET	68
Michaelson-Morley interferométer	68
Young-féle kétrés kísérlet	68
ATOMMODELLEK.....	70
Thomson-féle modell, 1902	70
Lénárd-féle modell, 1904	70
Rutherford-féle modell, 1911	70
Bohr-féle modell	71
Sommerfeld-féle modell.....	72
de'Broglie-féle modell	74
Schrödinger-féle, vagy kvantummechanikai értelmezés.....	75
Heisenberg-féle határozatlansági reláció	75
A ψ függvény	76
A Schrödinger egyenlet.....	76
Az egyenlet „megoldása”	77
Potenciálgödör, vagy dobozba zárt részecske	78
Potenciálgát, alagúteffektus	80
Dolgozat	83

Bevezetés

A fizika tantárgy népszerűségének folyamatos csökkenéséről sok írás született. Ennek okai részben rajtunk – tanárokon – kívül állnak, kevés eszközünk van, hogy tegyünk ellene. Abban azonban van felelősségünk, hogy saját környezetünkben az adott körülmények között mindent megtegyünk, hogy a fizikát úgy adjuk át, ahogyan azt diákjaink be tudják fogadni, meg tudják szeretni. Természetes, hogy mindenkinek nem ez lesz a szakterülete, de még csak kedvenc tantárgya sem, de törekednünk kell arra, hogy a diákok tehetségének, érdeklődésének megfelelően úgy válasszuk meg mind a tananyagot, mind a módszereinket, hogy attól a diákok fejlődjenek. Az említett „fejlődés” sokrétű, jelenti a diákok tudásának, gondolkodásának, vagy akár személyiségének fejlődését is.

Fentiek megvalósításához elengedhetetlen, hogy a tanítás folyamatát tervezzük, adott iskola illetve osztálytípusra, az általunk tanított diákokra szabjuk. Első lépésben szükséges a tanterv és a kimeneti követelmények pontos ismerete, valamint diákjaink későbbi terveinek, lehetőségeinek figyelembevétele. Ez utóbbi egy osztályon belül is széles skálán mozoghat, ennek megfelelően gyakran használjuk az oktatásban a differenciálás szót, fogalmat. Én azt gondolom, ha a fizika sokoldalúságát kihasználva, annak minél több oldalát, szemléletét megmutatjuk diákjainknak, ők maguk fogják tudni kiválasztani a saját tehetségüknek, érdeklődésüknek megfelelő tartalmakat, leírásmódokat. A matematikában tehetséges diákok számára egyértelműen adott a jelenségek matematikai leírása, a természettudományos gondolkodású diákok jól boldogulnak a jelenségek értelmezésével, mélyebb megértésével. Azok, akik gyakorlatiasabbak, jó kézügyességgel rendelkeznek, a mérésekben, eszközkészítésben találhatnak örömet, a humán érdeklődésű tanulókhhoz pedig a fizikatörténet hozhatja közelebb a tantárgyat. Tapasztalataim alapján, ha sikerül a tantárgyat érzelmileg közel hozni a diákokhoz, akkor a fent felsorolt kategóriák kiszélesednek, vagyis egy-egy diák nem csak a hozzá legközelebb álló nézőpontnak megfelelően, hanem más szemszögből is érti, vizsgálja a természetet. Tanítványaim közül több humán beállítottságú diák készített például kísérleti eszközt, oldott meg összetett, matematikai ismereteket igénylő feladatokat önként, vagy írt le jelenségeket kifejezetten természettudományos szemlélettel. Meggyőződésem, hogy ehhez motivációként egy jó osztályzatra való vágyakozás kevés, kellett hozzá, hogy az adott témában meglásson, megértse valamit, ami felkeltette az érdeklődését.

Bár a két szintű érettségi bevezetése óta az érettségi feladatsorok nem csak a matematikai leírást követelik meg, a korábbi évtizedek hatása, illetve a fizika versenyek többségének feladatai még mindig azt a tévhitet erősítik a diákokban, hogy a fizika a matematika „rokona”. Ennek következtében még mindig kissé háttérbe szorul a jelenségek képekkel való leírása, a modellek megértést segítő használata. Fenti célok eléréséhez pedig szükség van ennek megerősítésére éppen úgy, mint a matematikai modellek, matematikai összefüggések megismertetésére. A tantárgy megszerettetéséhez, a megértés segítéséhez emellett fontosnak tartom az új ismereteknek a már meglévő ismeretekhez, más tantárgyak keretében tanultakhoz való kötését, illetve azok jól átgondolt megalapozását.

A kvantummechanika középiskolai tanítása különösen nehéz, hiszen a téma önmagában is elvont, hétköznapi tapasztalatainkon kívül esik. Doktori munkámban a tanítandó fogalmak, érettségiben szereplő követelmények összegyűjtése után, az ennek megfelelő módszertani, tudás átadására vonatkozó lehetőségeket taglalom. A tananyag különböző érdeklődésű, tehetségű diákoknak megmutatható tartalmát gyűjtöm össze, az átadás és megértés segítésére keresek módszereket. Vizsgálom, hogy a klasszikus fizika témakörébe tartozó, mechanikai hullámokat leíró fejezetben mik azok a jelenségek, amikre időt szánva, azokat kiemelve megalapozhatjuk néhány a kvantummechanikában előkerülő jelenség könnyebb megértését, valósághoz való kötését. Egy példán keresztül bemutatom, hogyan köthető a téma a biológiához, milyen lehetőséget ad ez a megértés, illetve a tantárgy megszerettetésének erősítésében.

A részecskefizika nem része a középiskolai fizika tantervnek, de napjainkban elkerülhetetlen, hogy fizika órán szóba kerüljön. Egy pályázatnak köszönhetően néhány diákkal lehetőségem volt részt venni kutatók munkájában, részecskeedetektor építésében. A téma egyrészt köthető a kvantummechanikához, másrészt a munkában való részvétel új lehetőségeket mutatott. Ennek megfelelően összegzem diákok kutatásban, projektekben való részvételének tudásukban, motivációjukban megmutatkozó hozadékait, ennek társaikra gyakorolt hatását. Ez a lehetőség, és annak diákok körében mutatkozó népszerűsége további lehetőségek felkutatására sarkallt, aminek következménye egy az iskolánkban indított új program beindítása lett. Egyik tézisemben a program megszervezését, eddig megvalósult eseteket mutatom be, annak hatásait vizsgálom.

1. A kvantummechanika témakörben tanítandó tananyag, lehetőségek a különböző iskola vagy osztálytípusokban

Doktori munkámban összegyűjtöttem a NAT illetve a kerettanterv szerint a témában kötelezően megtanítandó, és az érettségi követelményekben szereplő tartalmakat. Ezt egészítettem ki olyan – a középiskolába bevihető - a megértés elmélyítésében segítő elemekkel, amelyeket a tanítás során gyakorlatban kipróbáltam. Erre a tematikára készítettem el saját jegyzetemet, melyet diákjaim használnak, a téma rendszerezését, megértését segíti.

Elsődleges célom a témához tartozó tananyag rendszerezése volt, illetve annak taníthatóságának vizsgálata. Időközben a témát humán, természettudományos, és matematika tagozatos osztályban is tanítottam, ezen tapasztalataim alapján rendezem a tartalmakat adott osztálytípusban bemutatható csoportokba. Diákjaim számára saját jegyzetet írtam, amit mellékletben csatolok. A jegyzet a „hagyományos”, Károlyházi professzor által képviselt valószínűségi-sűrűség és hullám szemlélettel íródott, melyet korábbi tankönyvben Tóth Eszter Tanárnő, a Doktori Iskola Fizika Tanítása programban Gnadig Péter Tanár Úr is alkalmazott.

1.1 A tananyag rendezése, tantervi és kimeneti követelmények összefoglalása

Választott témám a kvantummechanika tanítása, amihez először felmértem, hogy a NAT [1], a Kerettanterv (B változat) [2] és az érettségi követelmények [3] szerint pontosan milyen témaköröket, fogalmakat kell tanítanunk, milyen jártasságot kell a diákoknak szerezniük a témában. A NAT röviden témaköröket vázol, ezen témakörök részleteit fogom leírni a kerettanterv alapján, illetve kiegészíteni az érettségi követelményekben találtakkal. Ugyanezen dokumentumokban a kémiában tanítandó tartalmakat is vizsgáltam, hiszen abban sok olyan témakör szerepel, ami a fizika témaköreire is vonatkozik. Mivel a kémia tantárgyat középszinten tanulók a tizedik év végén befejezik kémia tanulmányaikat, fizikából pedig tizenegyedik évfolyamon tanítjuk a kvantummechanikát, erre talán alapozhatunk a fizika tanítása során. Azt próbáltam felmérni, hogy ezt hogyan és mely részekenél tehetjük. Az alábbiakban tehát a kvantummechanika témakörében tanítandó tartalmakat, illetve az ezeket

mind fizika, mind kémia órákon megelőző és megalapozó fogalmakat veszem sorra.

Mielőtt a tananyagban a modern fizikához érünk, a halmazállapot változások tanítása során beszélünk a különböző halmazállapotokra jellemző szerkezetekről. Ezt addigra a kémia tantárgy keretein belül már megtanulták a diákok, tapasztalataim szerint jól értik és emlékeznek rá. Az elektrodinamika tanítása során találkoznak az elektronnal mint részecskével, megismerik annak részecsketulajdonságait, valamint az elemi töltést. A vezetők és szigetelők tulajdonságait szintén a kémiában megismert szerkezetükkel magyarázzuk. Végül az RLC kör tanítása után az elektromágneses hullámok keletkezésével, jellemző tulajdonságaival ér véget ez az anyagrész. Az optika tanítása során a fény hullámtulajdonságait mutatjuk be a diákoknak.

Kémia tanulmányaik során a diákok tanulják az atom szerkezetét, a Bohr-féle atommodellt, kvantumszámokat, az alap és gerjesztett állapot fogalmát, a Pauli elvet, kémiai kötések típusait, molekulák és (atom-, ion-, molekula-) rácsok szerkezetét. Tanulnak a radioaktivitásról, megtanulják az izotóp fogalmát, a sugárzások fajtáit [2]. Tapasztalataim alapján a diákok a Bohr-modellre jól emlékeznek, az energiaszintek és a kvantumszámok részletes tárgyalására azonban szükség van. Ennek okát egyrészt abban látom, hogy a kémia tanítására nagyon kevés az idő, így nem jut az egyes részekben való elmélyülésre, másrészt pedig tizedikben a diákok életkoruk miatt még nem érthetnek meg olyan elvont fogalmakat, mint a kvantumszámok.

Az előzetes ismeretek birtokában a NAT alapján a következőket kell megismertetnünk a tanulókkal: Anyagszerkezet, az atom szerkezete, Rutherford és Bohr modellje, a kvantummechanikai atommodell, az anyag kettős természete. Emellett diagnosztikus és terápiás módszereket kell hogy ismerjen a diák, „azok célját és fizikai alapelveit” [1].

A kerettanterv [2] a részletek között Dalton, Avogadro és Faraday törvényeit sorolja az atomos szerkezet bevezetéseként. Ezek a kémia tantervben szintén szerepelnek. Az atommodellek között Thomson modelljét, az ehhez vezető kísérletet is sorolja, valamint a többi modell esetén is elvárja a modellhez vezető út és a modell hibájának ismeretét. A kvantummechanikát megalapozó kísérletek tanítását is megköveteli, ezek: a hőmérsékleti sugárzás és Planck hipotézise, a fotoeffektus és Einstein fotonelmélete, a fény kettős természete, a gázok vonalas

színképe és a Frank-Hertz kísérlet. Tanítanunk kell, hogy a Bohr-modell a jelenségeket hogyan magyarázza, illetve a Pauli elvet és a periódusos rendszer elektronszerkezettel való kapcsolatát. A következő szakasz az elektron de Broglie hullámhossza és kettős szerkezete, alkalmazásként az elektronmikroszkópot említik, végül a kvantummechanikai atommodellt és a Heisenberg-féle határozatlansági relációt. A következő szakaszban a kémiai kötések, az ion- és fémrácsot, a vezetési tulajdonságokat sorolja a kerettanterv. Ezen belül a szupravezetést, és a félvezetők szerkezetét, p-n átmenetet és a félvezetők gyakorlati alkalmazásait olvashatjuk. Ez a rész szinte teljes egészében szerepel a kémia tantervben, de a részletek és a hangsúlyok (részletezés hossza) eltérnek. A kerettanterv egy következő, fizika és társadalom című részben említi a diagnosztikában használt eszközöket. A témához kapcsolódóak ezek közül a röntgen és a CT.

Az érettségi követelmények [3] emelt szinten megkövetelik, hogy a diák tudja értelmezni Thomson és Millikan kísérletét, a Planck állandó kísérleti meghatározását, tudjon számításokat végezni az atom által elnyelt energiamennyiségekkel kapcsolatban. Közép szinten is kell tudnia értelmezni a fotoeffektust, ismernie kell az ezzel kapcsolatos formulákat. Meg tudja fogalmazni a fény kettős természetét. Ismernie kell a kvantumszámokat, emelt szinten ezek fizikai jelentését (!), és az elektron de Broglie hullámhosszát. Emelt szinten kell hogy tudja alkalmazni a Pauli elvet és a Hund-szabályt az elektronpályák betöltési rendjére a periódusos rendszerben, valamint ismernie kell az atom kvantummechanikai modelljét, vagyis az elektron „tartózkodási helyének” jelentését a modell szerint.

1.2 Tartalmak a követelményekhez igazítva

Az ismeretek rendszerezésének több módja van, különféle logikai kapcsolatok alapján alakíthatjuk ki az egyes elemek átadásának sorrendjét. Én két elv mentén rendeztem a kvantummechanika előzményeiként tanítandó tartalmakat. Egyrészt szétválasztottam a részecske- és a hullámtulajdonságokat igazoló jelenségeket, másrészt – a két csoporton belül – a felfedezések időrendi sorrendjét igyekeztem megtartani. A fejezet elején elmondtam a diákoknak, hogy az egyes jelenségek több kérdést is fel fognak vetni, amikre majd az - éppen ezen jelenségek

magyarázataként kialakuló – atommodellek adják meg a választ. A téma kiválóan alkalmas arra, hogy a kutatás, a megismerés módszereit, a modellalkotás folyamatát bemutassuk.

A fejezet bemutatását ott kezdem, ahol az elektrodinamika fejezet véget ér, az elektromágneses sugárzások spektrumát mutatom be. Ezek között vannak, amiket majd csak a fejezet tanítása során ismerünk meg részletesebben, de a spektrumon való elhelyezés már előre egyértelművé teszi például a röntgen sugárzás hullámtermészetét. Szükséges továbbá a hőmérsékleti sugárzás ily módon történő bemutatása, hiszen arról a korábbiakban a diákok nem tanultak. A hőmérsékleti sugárzáshoz kapcsolódó fekete test fogalma, illetve a Wien-féle eltolódási törvény nincs sem a kerettanterv, sem az érettségi követelmények között, de Planck munkássága, illetve a kvantummechanikában való szerepe igen, erre irányuló kérdések több emelt szintű érettségi témakifejtési feladatban szerepeltek [4]. Követelmény továbbá a hőkamerás képek értelmezése, illetve az infrahőmérő szerepelt lehetséges példaként egy hőmérséklet méréssel kapcsolatos témakifejtős feladatban. A vonalas színekhez kötve mind a kerettantervben, mind az érettségi követelmények között szerepel az abszorpciós és emissziós színek fogalma. Én az elnyelés és visszaverődés fogalmát szintén a hőmérsékleti sugárzás bemutatása során vezetem be, az abszolút fekete test fogalmához erre szükség van.

A követelmények [3] között hangsúlyosabb a fotoeffektus jelenségének ismerete, az emelt szintű érettségien követelmény a fotocella működési elvének és ehhez gyakorlati alkalmazásra vonatkozó példa ismerete, a Planck-állandó kilépési munka vizsgálatából való meghatározásának módja, illetve számítási feladatok elvégzése. A jelenséghez köthető számítási feladatok és tesztkérdések is többször előfordultak az emelt szintű érettségi írásbeli feladatai között [4]. Követelmény továbbá Einstein kvantummechanikában, a kvantumhipotézis megalkotásában betöltött szerepének ismerete. Erre irányuló kérdést is találunk a témakifejtős feladatok között.

Diákjaim számára írt jegyzetemben ezután a katódsugárzás, a vonalas színek, a Compton effektus és a Frank-Herz kísérlet leírása következik. Thomson neve és a katódsugárcső ismerete az érettségi követelmények között, míg a Frank-Herz kísérlet a kerettantervben szerepel. Előbbi bemutatása témakifejtésként szerepelt is az emelt szintű érettségi feladatai között. A vonalas színek mint jelenséget mindkettő tartalmazza, emelt szinten követelmény az energiaszintekkel

kapcsolatos számítási feladatok elvégzése is. Ilyenek szerepeltek is az érettségi feladatsorokban mind teszt, mind számításos kérdésként. A Compton effektust egyik dokumentum sem említi, egy tesztkérdés azonban elektron és foton ütközése során a foton tulajdonságainak változásáról szól.

A hullámtermészetet bemutató jelenségek között a Röntgen-sugárzást, illetve annak hullámtermészetét igazoló Bragg-diffrakciót, majd a Davisson-Germer kísérletet írom le. Ez utóbbiak név szerint sem az érettségi követelmények között, sem a kerettantervben nincsenek megemlítve, mindkettő megköveteli azonban, hogy a tanuló ismerjen az elektron hullámtermészetét bizonyító kísérletet, tudja megfogalmazni a kettős természet jelentését, illetve a kerettanterv kifejezetten elektron-interferencia kísérletet és az elektronmikroszkópot említi.

Jegyzetemben a Michaelson-Morley-féle elrendezést, és a kétrés kísérletet - mint a részecske vagy hullám kérdés eldöntésére használt eszközt – mutatom be. Előbbinek a relativitáselmélet során is lesz szerepe, utóbbit a kerettanterv [2] említi a hullámtermészetet igazoló kísérletként.

Ezután az atommodelleket írom le, melyek közül a Lénárd-féle modellt sem a kerettanterv, sem az érettségi követelmények között nem találjuk. A kerettanterv [2] meg is fogalmazza, hogy az atommodelleken keresztül hogyan mutatható be a modellalkotás lényege: a diák „értse az atomokról alkotott elképzelések fejlődését: a modell mindig kísérleteken, méréseken alapul, azok eredményeit magyarázza; új, a modellel már nem értelmezhető, azzal ellentmondásban álló tapasztalatok esetén új modell megalkotására van szükség.” Ennek bemutatását Thomson és Rutherford modelljén keresztül várja el. Én ezt a logikát mindvégig megtartom jegyzetemben, minden modelltől leírom mely jelenségek magyarázataként született, és mi az, amit nem tud magyarázni, ami miatt el kellett vetni. A Bohr-modell bemutatását a kerettanterv a vonalas színek magyarázataként követeli meg. Ezzel szemben az érettségi követelmények között Rutherford szórás kísérlete és modellje szerepel, a dokumentum a hangsúlyt Bohr és Rutherford modelljének összehasonlítására fekteti. Érettségi témakifejtési feladatokban a Rutherford- és a Bohr-modell leírása fordult elő, azok összehasonlítása, illetve korlátaik (hibájuk) leírása.

Mind a kerettanterv, mind az érettségi követelmények alapján szükséges a kvantumszámok és azok fizikai tartalmának ismerete - bár az érettségi követelményekben csak a fő- és mellékkvantumszámot találjuk megnevezve -, a

Pauli-elv és a Hund-szabály mint az elektronszerkezetet és a periódusos rendszert összekötő szabályok. A pályák betöltésére vonatkozóan mindössze egy tesztkérdést és egy számításos feladatban részfeladatként szereplő kérdést találtam. Ezek a kémiában is tanult – számmal jelölt főkvantumszám, betűvel jelölt mellékkvantumszám, felső indexben az elektrópályán tartózkodó elektronok száma – jelölést követelték meg. Jegyzetemben a kvantumszámokról - mint Sommerfeld Bohr modelljéhez adott kiegészítéseiről – részletesen írok, miközben az erről szóló bekezdés elején tisztázom, hogy ez továbbra is „csak” modell, ami a kísérletekben találtakat jó közelítéssel, de korlátozottan írja le. Mindkét követelményrendszerben megtalálható a „kvantummechanikai modell” illetve a de Broglie hullámhossz is. A kerettanterv részletesebb, a modellt így írja le: a modell „az elektronokat hullámként írja le, aminek kinetikus energiája hullámhosszától függ. A stacioner állapotú elektron állóhullámként fogható fel, hullámhossza - ezért energiája is – kvantált.” Jegyzetemben erről de Broglie modelljében, a megtalálási valószínűségről Schrödinger-féle, vagy kvantummechanikai modell néven írok. Érettségi feladatsorokban témakifejtős feladatban találkozhatunk a „kvantummechanikai modellre” vonatkozó kérdéssel. A Heisenberg-féle határozatlansági reláció leginkább ez utóbbi modellhez köthető, így én is itt írok róla. A kerettantervben szintén a modell leírásaként szerepel, hogy „Az impulzus és hely egyszerre nem mondható meg”. Az érettségi követelmények között erre utaló nevet, fogalmat nem találunk, de egy érettségi tesztkérdés (2011. május) így szólt: „Mit mond ki a Heisenberg-féle határozatlansági reláció az elektronra alkalmazva?” a helyes válasz szerint „Egy elektron sebességének és helyzetének nem lehet egyszerre pontosan meghatározott értéke”.

Jegyzetemben az ezután következő részt csak természettudományos, illetve matematika tagozatos osztályok, fizika emelt szintű csoportjaiban mondtam el. Itt a „pszí függvény” Born-féle értelmezéséről írok, majd a Schrödinger-egyenlet stacionárius alakja alapján vizsgálom azt. Célom egyrészt egy képi, illetve egy leegyszerűsített matematikai modell nyújtása, ami a megértést, a valószínűség „megszokását” segítheti, másrészt a több példa elemzésén keresztül való beépülés, a tanulási folyamat segítése, arra idő biztosítása.

1.3 Tapasztalatok, felmerülő problémák, a megértést segítő segédanyagok

Az anyagrészt a fenti rendszerezés után iskolánk minden eltérő osztálytípusában tanítottam: humán orientációjú és általános tantervű osztályban, matematika tagozatos, illetve természettudományos orientációjú emelt szintű csoportban. A sorrend időrendi sorrendet is takar. A humán és az általános tantervű osztályban az emelt szintű képzés az alapóra feletti heti 2 órában, csoportban zajlik, de az alapórán a fizikát választó és nem választó diákok együtt vannak jelen. Én itt az alapórás foglalkozásokat tartottam, vagyis az egész osztállyal találkoztam. A humán osztályból hárman, az általános tantervű osztályból heten jártak délutáni fakultációra, amit nem én tartottam, a tananyag és az időbeosztás nem egyezett az alapórán tanultakkal. A természettudományos és a matematika tagozatos osztályokban a közép- és emelt szintű csoportok külön tanulják a fizikát, vagyis én csak a fizikát választó diákokat tanítottam, heti 4 órában. Az elkészült jegyzetet a természettudományos osztály használta, a korábban tanított csoportok esetében még nem készült el.

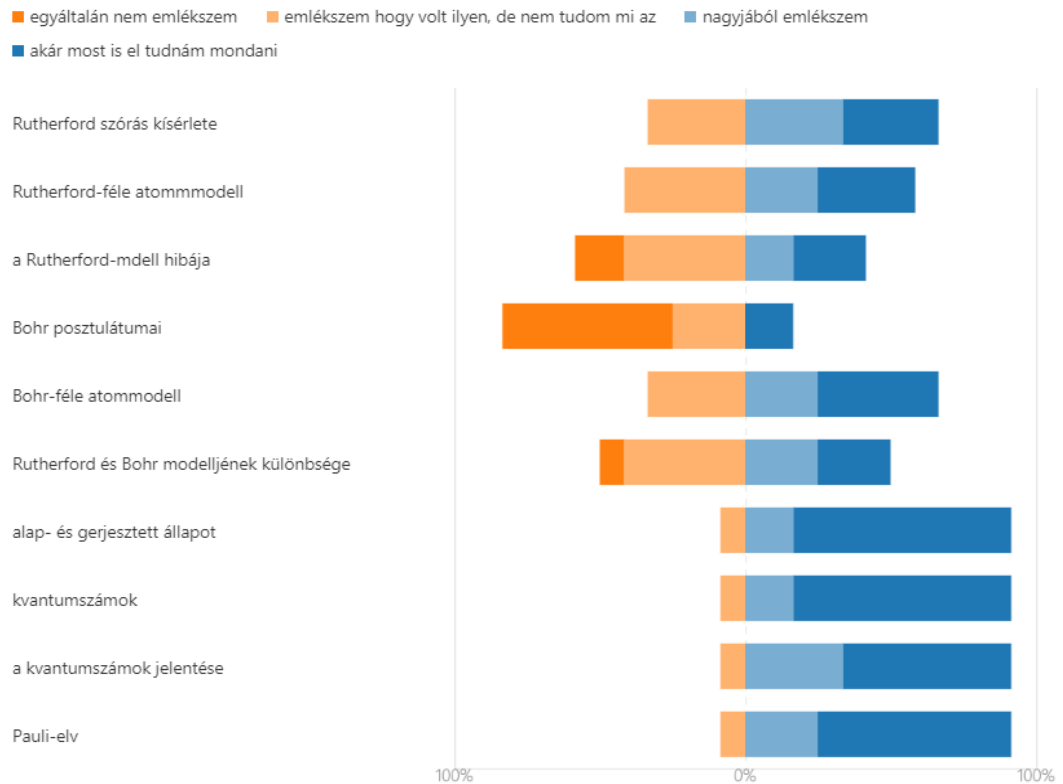
A tanítás szemlélete és módszerei kapcsán arra jutottam, hogy a fő különbséget a diákok matematikai ismeretei, a matematikához való viszonya jelenti. A tartalmakat tekintve a humán érdeklődésű osztályban gyakorlatilag matematikai leírások nélkül, csak a jelenségeket mondtam el, az atommodellekkel, illetve a de Broglie-moddal bezárólag. Az általános tantervű osztály összetétele vegyes, humán és természettudományos érdeklődésű tanulók egyaránt megtalálhatók. Ennek megfelelően itt több szó esett a hőmérsékleti sugárzás matematikai leírásáról és a Wien-féle eltolódási törvényről, de más különbség a tanított tartalomban nem volt. A humán osztályban a jelenségek, és a mögéjük helyezett modellek, képek jól taníthatók, a diákok kifejezetten érdeklődők a témában. A jelenségek közötti logikai összefüggéseket jól értik, ezt előrevivő kérdéseik mutatják. Színesíthető az előadás fizikatörténettel, humán érdeklődésű diákok számára ez még vonzóbbá teszi ezt a részt. A matematikai leírást magas szinten nem igénylik, de alapvető mennyiségi leírásokat jól kezelnek. A megszokott összefüggéseket használtuk, ezeket sorolom fel az alábbiakban. A foton energiájának frekvencia függése: $E_f = hf$, ahol h a Planck-állandó, f a frekvencia; a fényelektromos egyenlet: $hf = W_{ki} + E_{kin}$, ahol W_{ki} a kilépési munka, E_{kin} a mozgási energia; a Bohr-féle pályafeltétel: $mrv = n \frac{h}{2\pi}$, ahol m az elektron

tömege, v a sebessége, r a pálya sugara, a szorzat az elektron perdülete; a vonalas színek értelmezése és kibocsájtott/elnyelt foton energiájának számolása a fentiek alapján: $hf = E_2 - E_1$, ahol jobboldalon a pályák energiaszintjeinek különbsége áll; a részecske és hullámtermészet összefüggése: $p = \frac{h}{\lambda}$, ahol p a foton lendülete, λ a hullámhossz.

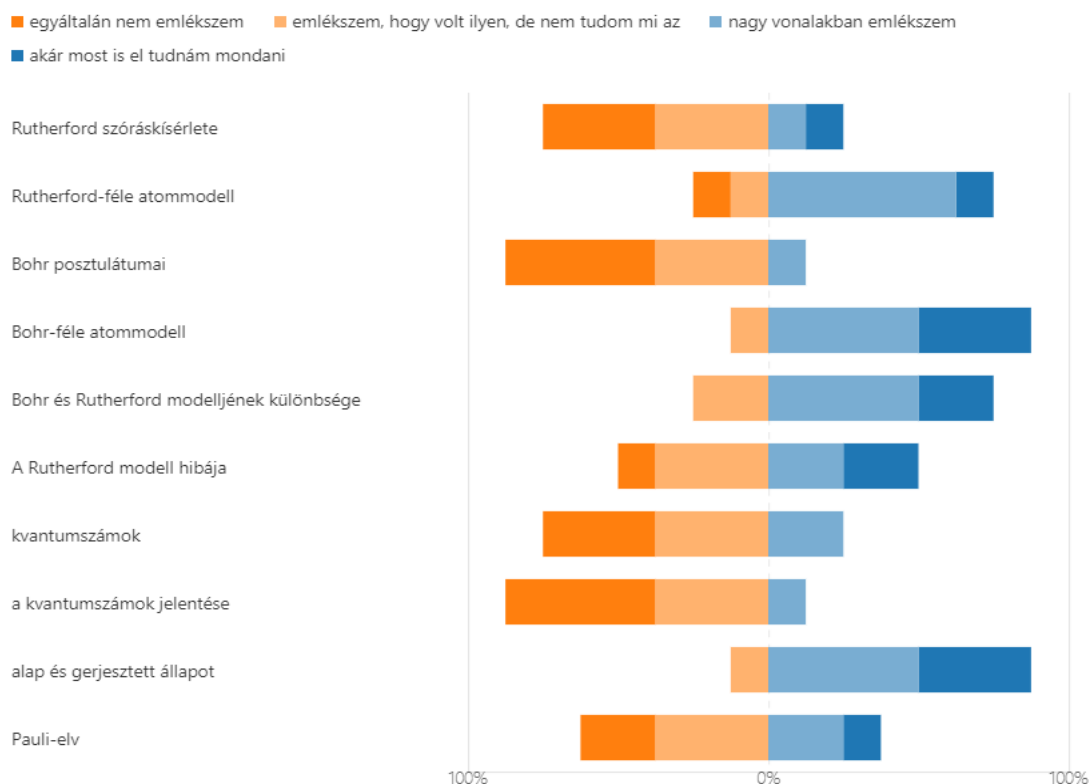
Mindkét csoportban nagy szükség volt kísérletek, animációk és szimulációk bemutatására. Iskolánk eszközei között szerepel katódsugárcső, különböző gázokkal töltött kisülési csövek, ezek vizsgálatához spektroszkóp, minden ami a fotoeffektus bemutatásához szükséges, illetve friss beszerzésből a Planck állandó mérésére alkalmas eszköz. Több internetes forrásban található mind animációk, mind szimulációk a Rutherford kísérletre, atommodellekre, fotoeffektusra, különböző bomlásokra és hasadásra. Ezek nagyban segítik, és gyorsítják a megértést. Néhány oldalon akár a tananyagot túlmutató jelenségekre, illetve a gyakorlati alkalmazásokra is találunk animációkat, szimulációkat.

A modern fizika rész tanítása előtt két csoportban felmérést végeztem arra vonatkozóan, hogy a diákok mire és milyen mélységben emlékeznek a kémia órákon tanultakra, a fizika tanítása során mennyire építhetnek erre. Az egyik csoport humán osztály, a kémia tantárgyat tizedik évfolyamon, a fizikát tizenegyedik évfolyamon tanulják utoljára. A kérdőívet a tizedik év végén töltötték ki, mert ezt követően tanulják a témakört fizikából. A kémia és fizika tantárgy tanulását emelt szinten jellemzően nem folytatják. A másik csoport természettudományos osztály, ők szintén tizedik évfolyamon fejezik be kémia tanulmányaikat, de sokat folytatják emelt szinten választva a tantárgyat. Fizikát tizenkettedikben is tanulnak, függetlenül attól, hogy milyen szinten választották. Ők a tizenegyedik év végén töltötték ki a kérdőívet, mert a témát tizenkettedik évfolyamon tanulják fizikából. A kérdőívben a mindkét tantárgy követelményei között szereplő jelenségeket és fogalmakat soroltam fel, és ezek mindegyikénél a megmaradt tudás mélységére kérdeztem rá. A diákok az „egyáltalán nem emlékszem; emlékszem, hogy volt ilyen, de nem tudom mi az; nagy vonalakban emlékszem; akár most is el tudnám mondani” lehetőségek közül választhattak az egyes fogalmak kapcsán. Az erre adott válaszok összeecsengtek eddigi tapasztalataimmal. A diákok közül a humán osztályban is sokan emlékeztek Rutherford és Bohr atommodelljére. Bohr posztulátumaira viszont a diákoknak

csak kis hányada, a többség nem tudta megfogalmazni mi a különbség Bohr és Rutherford modellje között, illetve mi a Rutherford modell hibája. Ez a természettudományos osztályban is jellemző. A kvantumszámok léteire emlékeztek, de humán osztályban ennek részleteire nem sokan. A humán osztályban hasonlóan halványak voltak a diákok emlékei a Pauli elv kapcsán.

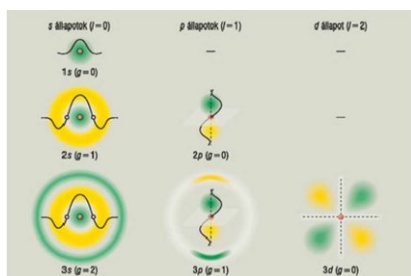


1. ábra, A természettudományos osztály kérdőívre adott válaszi alapján jól emlékeznek a kémia órán atomfizika témakörben tanultakra.



2. ábra, A humán osztály emlékei a témakörben kevésbé élénkek.

A természettudományos és a matematika tagozatos csoportban megmutattam a Schrödinger egyenlet időfüggetlen alakját, ez alapján vizsgáltuk a ψ függvény



3. ábra, Kép a kvantummechanikai atommodellhez az [5] forrásból

alakját különböző energiák mellett, illetve beszéltem a ψ függvény valószínűségi tartalmáról, ezek alapján vizsgáltuk azt alap- és gerjesztett állapotokban, különböző potenciális energiákkal leírható elrendezések mentén. A matematika tagozatos csoport ezt a részt azonnal értette, vagy érteni vélte, a szóba jövő elrendezésekben a potenciális energia függvényét maguk adták meg, törekedtek a teljes matematikai leírásra. Ez természetesen problémákat is felvetett, de „beletörődtek”, hogy a teljes leíráshoz nincs elegendő matematikai ismeretünk. A képi modellek iránt kevésbé mutattak érdeklődést, ahogyan más témaköröknél is, úgy tűnt arról gondolják hogy értik, amit le tudnak írni matematikailag. A természettudományos csoport ezzel szemben kevésbé lelkesedett a matematikai leírásért, akkor kezdtek érdeklődést mutatni, amikor a függvény mögé képet helyeztünk, az elektron tartózkodási helyét összekötöttük a függvény alakjával. Ekkor felismerték, hogy a kémiából

ismert modellekhez jutottunk, emlékeztek az ott látott modellekre. Több hasonló, majd kissé eltérő eset tárgyalása láthatóan segítette a megértést, a tudás elmélyülését. Ezt a természettudományos csoportban direkt kérdések feltételével vizsgáltam, folyamatos visszajelzést kértem a diákoktól. Kis gondolati egységek után rendszerint feltettem a kérdést, hogy ki az, aki úgy érzi, van már képe arról, hogy hogyan viselkedik az elektron kötött állapotokban. A valószínűségi leírás egyszerű ismertetése után – bár kiemelkedően tehetséges diákok alkotják a csoportot – egy félig emelt kéz jelezte, hogy egy diáknak valami fogalma van erről, de ő sem biztos benne. Ezt minden különböző potenciális energiával és elektron energiával leírható eset (lásd a jegyzetben „Az egyenlet megoldása” részt) taglalása után megismételtem, a harmadik elrendezés után már minden kéz legalább félig felemelkedett. Ezt követően a következő órán még egyszer átismételtük ezen eseteket, hogy a rácsszerkezettel (Lásd a jegyzet „Két- illetve több potenciálgödör” című részét) folytathassuk az elektron helyzetének vizsgálatát kötött állapotokban.

1.4 A számonkérés tapasztalatai, a jegyzet hasznossága

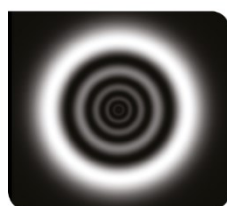
A számonkérés alapját mindkét csoportban – matematika tagozatos illetve természettudományos orientációjú csoport - az eddigi emelt szintű érettségi feladatokból válogatott kérdések adták. A dolgozatba - mely a mellékletben megtalálható - mind számításos feladatokat, mind teszt- illetve témakifejtős feladatokból kiragadott mondatokat válogattam. A két csoport tanítása között fontos különbséget jelentett, hogy a természettudományos csoport tanítása idejére elkészítettem saját jegyzetemet a témáról, amit a diákokkal megosztottam. (Irodalmat a matematika tagozatos csoportnak is ajánlottam, ugyanazokat a szimulációkat bemutattam, használtuk őket.) Ez a dolgozatok eredményén látszik, míg a matematika tagozatos csoportban a dolgozatok 54%-a lett jeles, a természettudományos csoportban 87%. A különbség egyértelműen mutatja, hogy a tankönyv szükséges a tanuláshoz, valódi segítséget jelent. A matematika tagozatos csoporttal íratott dolgozat megoldásaiban az egyik tipikus hiba volt, hogy a feladat által kért „kvantummechanikai modell” leírásaként a diákok (11 diákból 9) a kvantumszámokat sorolta fel, és írta le azok jelentését. Nem tettek említést a valószínűségi leírásról, rájuk jellemző módon mennyiségekkel, nem

mondatokkal írják le a jelenségeket. Ebből okulva a természettudományos osztályban, amikor az atommodellek leírását befejeztük, elmeséltem korábbi tapasztalatomat, és felhívtam rá a figyelmet, hogy a kvantummechanikai modell lényege nem a kvantumszámokkal való jellemzés. Ennek megfelelően a dolgozatban erre a kérdésre – helyesen – a diákok az elektron helyének valószínűségi leírását, illetve a de Broglie modell szerinti állóhullám képet adták válaszul. Egy diák emellett a kvantumszámokról is írt, mintegy „biztos ami biztos” alapon.

1.5 Összegzés

A kerettanterv és az emelt szintű érettségi követelményeit figyelembe véve, én ezeken kissé túlmutató tartalmakat is bemutattam a fizikát emelt szinten tanuló természettudományos és matematika tagozatos csoportokban. Az a tapasztalatom, hogy ez segíti az érettségien szükséges tudás elmélyítését. Egyrészt fontos, hogy időben többet foglalkozunk a témával, vagyis van idő arra, hogy az új ismeretek beépüljenek a diákok tudásába, másrészt azzal, hogy egy teljesebb rendszert építünk, szintén segítjük az ismeretek beépülését. Azzal, hogy az új ismereteket több más ismerethez kötjük, rendszerbe helyezzük, biztosabb tudást, valódi megértést érünk el. [6]

Utószó



Elektronállapotok szemléletes ábrázolása. Ahol erőteljesebb a fény, ott nagyobb valószínűséggel található az elektron. A kép a H-atom elektronjának egyik magasan gerjesztett állapotát ábrázolja (az $n = 5$ főkvantumszámhoz tartozó).

valószínűséggel található az elektron az adott pont kis környezetében. A kvantummechanikai számítások során természetesen adódott, hogy az elektron az atom körül csak jól meghatározott állapotokban (sajátállapotok) lehet, és ezekhez jól meghatározott energiák (sajátenergiák) tartoznak. A fizikusok – először a hidrogénatom esetében – kiszámolták az atommag körül lévő elektronok állapotfüggvényeit, és azt, hogy milyen valószínűséggel találhatók az elektronok az atommag körüli tér egyes pontjaiban.

Az eredmények birtokában egyre kevésbé tűnt helyesnek az atom körül lévő elektront parányi részecskének elgondolni. Hogyan lehet egy részecské bizonyos valószínűséggel minnélenni az atommag körül, ráadásul a tér – az ábra által világossá jelzett – egymástól elkülönülő tartományokban?

A KVANTUMMECHANIKAI ATOMMODELL

A Bohr-modell azonban önkényes feltételeseken alapult. Miért nem sugároznak a feltételezett körpályákon mozgó elektronok? A XX. század elején olyan új fizikai elmélet született, ami Niels Bohr különös feltételezése is magyarázatot adott, és az atomok szerkezetének jobb megértését eredményezte. Ez az elmélet a kvantummechanika volt, ami lényegesen új szemlélet kialakulásához vezetett. A megelőző évszázadokban az anyagot alkotó apró részecskéket leginkább kis testeknek képezték, amiknek alakja, tömege, sebessége – tehát lendülete is – van. Ezt tükrözi a részecske elnevezés is. A kvantummechanikai atommodellben a részecskéket nem a helyükkel és sebességükkel jellemzik, hanem az állapotfüggvényükkel. Az állapotfüggvényből a részecskék helyét és lendületét csak bizonyos körülmények között és csak bizonyos valószínűséggel lehet meghatározni. Az állapotfüggvény abszolút értékének négyzete a tér egy pontjában megadja azt, hogy milyen

Dolgozatom írása közben jelent meg a 2020-as NAT és az ehhez illeszkedő kerettanterv. Ebben a foto-effektus, Rutherford és Bohr modellje, valamint a vonalas színek mint az anyag vizsgálatának módszere szerepel, a „kvantummechanikai atommodell” kifejezés itt nem, de az erre épülő online elérhető tananyagban, tankönyvben szintén szerepel. Itt olvashatunk az elektron helyének valószínűségi leírásáról, amire az ellenőrző kérdések egyike is rákérdez [7]. Elvárásként a

kerettanterv megfogalmazza az elektronmikroszkóp működésének magyarázatát az elektron hullámtermészetével.

Szintén dolgozatom készítése idejére esett a koronavírus-járvány okozta rendkívüli helyzetben a digitális oktatási rendre való átállás. Az MTA-ELTE Fizika Tanítása Kutatócsoport tagjaként néhány kollégával egy online elérhető kísérleti tankönyv egy fejezetét készítettük el, amit ebben az időben teszteltünk saját diákjainkkal. A rendkívüli helyzetre való tekintettel ezt nyilvánossá tettük, ennek egyik fejezeteként a fenti témában írt saját jegyzetem is megtalálható [9].

Források:

[1] NAT: <http://ofi.hu/nemzeti-alaptanterv>

[2] Kerettantervek: https://kerettanterv.ofi.hu/03_melleklet_9-12/index_4_gimn.html

[3] Érettségi, részletes vizsgakövetelmények:

https://www.oktatas.hu/koznevelas/erettsegi/altalanos_tajekoztatas/vizsgatargyak_2017tol

[4] Érettségi feladatok: <https://www.oktatas.hu/koznevelas/erettsegi/feladatsorok>

[5] Fizika 11-12. Közép- és emelt szintű érettségire készülőknek, Mozaik Kiadó

[6] MAGYAR PEDAGÓGIA 104. évf. 4. szám 443–470. (2004) A TANULÁS TANULÁSA AZ ÉRTELEMGAZDAG TUDÁS ELSAJÁTÍTÁSA ÉRDEKÉBEN Habók Anita Szegedi Tudományegyetem, Neveléstudományi Doktori Iskola Letöltve: http://publicatio.bibl.u-szeged.hu/4786/1/Habok_MP1044.pdf

[7] https://www.nkp.hu/tankonyv/fizika_11/lecke_03_022 Utoljára megtekintve: 2020. 07. 07.

A témához köthető publikációk

[8] Schramek Anikó, Néhány gondolat az atomfizika középiskolai tanításához, *Fizikai Szemle*, 2020/7-8.

A témában nyilvánossá tett saját anyag

[9] <https://drive.google.com/file/d/1Y0-DK5nAX7V-asGaaMHdjSzXaH3BSy4/view>

2. A kvantummechanika megalapozása mechanikai hullámok témakör tanításakor

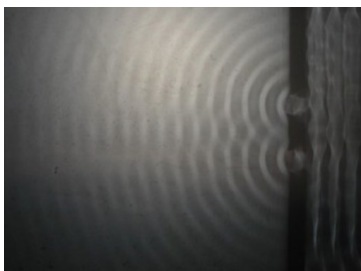
A kvantummechanikai jelenségek között találhatóak olyanok, amelyeket már a mechanikai hullámok tanításakor megmutathatunk, felhívva rá a diákok figyelmét, hogy később más összefüggésben lesz jelentőségük. Doktori munkámban ezeket gyűjtöttem össze, mutattam be. A magyarországi oktatásban ez a két téma időben is, szemléletben is távol van egymástól. Munkámban rávilágítok, hogy ha ezt a távolságot megszüntetjük, a kvantummechanikát a diákokhoz is közelebb hozhatjuk.

A hullámtulajdonságok, és az ezekhez kapcsolódó jelenségek közül több szóba kerül a kvantummechanika előzményeiként tárgyalt, illetve a részecskék hullámtermészetével magyarázható jelenségek között. Dolgozatomban a kétrés kísérlet, a Bragg-féle reflexió, az állóhullámok, és az alagúteffektus jelenségének bemutatását segítő szemléltető eszközöket mutatok be, melyeket már a mechanikai hullámok tárgyaláskor használhatunk. Ezzel a két témát közelebb hozhatjuk egymáshoz, az elvontabb „anyag hullámokat” leíró részt is valóságosabbá tehetjük, a megértést segítő képet helyezhetünk mögé. A hullámok témakör szokásos, lineáris felépítésétől eltérő, a hullámtulajdonságok szerint a hullámfajták párhuzamos tárgyalását egy kísérleti tankönyvben valósítottuk meg néhány kolléga közös munkájaként. A projektet Finta Zsanett és Jenei Péter fogta össze.

A mechanikai hullámok tanításának elején, a matematikai leírást a hullámfüggvény felírásával kezdjük, ez jól mutatja a hely és idő szerinti periodicitást. A függvény ismeretének, és a klasszikus fizikában való bemutatásának a későbbiekben is hasznát vesszük, a kettős természet illetve részecskék helyzetének hullámfüggvénnyel (Ψ) való leírásakor. A hullámfüggvényt egy dimenzióra, $\Psi = A \sin(kx + \omega t + \varphi_0)$ alakban írjuk le, ahol $k = \frac{2\pi}{\lambda}$ a hullámszám, x a vizsgált pont origótól vett távolsága – egy dimenzióban a helye -, $\omega = \frac{2\pi}{T}$ a körfrekvencia, φ_0 a hullámforrás kezdőfázisa. (λ a hullámhossz, T a periódusidő.) Ezt mechanikai hullámok esetén a kitérés (y) idő és hely szerinti változásának felírására használjuk.

Egyszerűbbé válik a függvény, ha megállapodunk, hogy a kezdőfázist zérusnak választjuk, a hullámszám pedig kihagyható, ha a következő logikával jutunk a hullámfüggvényhez: A hullámforrástól x távolságra lévő tömegponthoz a hullám $\frac{x}{c}$ idő alatt jut, az ennyivel később jön rezgésbe, vagyis kitérése az idő függvényében: $y = A \sin \omega(t - \frac{x}{c})$. Az $\omega \frac{x}{c}$ szorzat éppen a kx szorzattal egyezik meg.

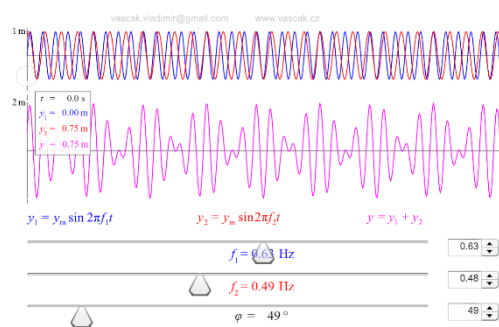
2.1 Kétrés kísérlet



1. ábra, Kétrés kísérlet felületi hullámokkal

A Young-féle kétrés kísérletet és a rácson való elhajlást a fény, később az elektron hullámtermészetének bizonyítékeként tanítjuk a témakörben. A jelenséget azonban bemutathatjuk hullámkádban a mechanikai hullámok tárgyalásakor. Hullámkád hiányában az 1964-ben a Massachusetts Institute of Technology által

készített, a mechanikai hullámok tulajdonságait hullámkádban zajló kísérletekkel bemutató filmen megtalálható a jelenség. (A fizikaszertárakban „hurokfilm” néven ismert felvételek, a későbbiekben így utalok rá.) Két réssel a film az internetes videómegosztókon is fellelhető [1]. A filmen több rész mellett is megfigyelhető a jelenség, ezt a részt azonban az említett oldalakon nem találtam.



2. ábra, az [2] szimuláció

Adott pontban a kitérést a hullámforrásokból érkező hullámok kitérésének összegeként írhatjuk fel. Ez minden esetben harmonikus függvények összege, amit két rés esetén tetszőleges frekvenciák és kezdőfáziskülönbség mellett a [2] szimulációval vizsgálhatunk. (2. ábra)

A hullámkádban megfigyelhető esetben a hullámforrások kezdőfázisa és az amplitúdó azonos. Ekkor tetszőleges pontban lévő tömegpont kitérése:

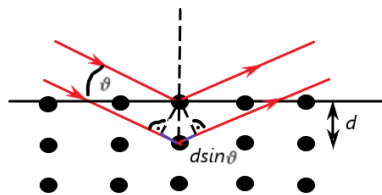
$$y = A\sin(ks_1 + \omega t + \varphi_0) + A\sin(ks_2 + \omega t + \varphi_0)$$

$$= 2A\sin\left(k\frac{s_1 + s_2}{2} + \omega t + \varphi_0\right)\cos\left(k\frac{s_1 - s_2}{2}\right)$$

Látható, hogy az amplitúdó nagyságát adott helyen az útkülönbségek határozzák meg, azonos amplitúdójú pontok azok, ahol az útkülönbség azonos. Természetesen a trigonometrikus leírás elhagyható, az útkülönbségek szerepének felismeréséhez elegendő az interferenciánál tanultakra utalni. Ennek megfelelően fontosnak tartom, hogy az interferencia tanításakor kitérjünk a találkozó hullámok fázisviszonyainak az erősítésben illetve gyengítésben betöltött szerepére, illetve a fázisviszonyok és útkülönbségek összefüggésére.

2.2 Bragg-féle visszaverődés

A kettős természet bemutatása előtt jegyzetemben először a részecsketermészettel magyarázható, majd a hullámtermészetet erősítő jelenségeket sorolok. Ez utóbbi csoportba tartoznak az interferenciajelenségek. A röntgensugarak hullámtulajdonságainak vizsgálatára először Laue javasolt eljárást, kísérletében



3. ábra, Az egymást követő atomrétegekről visszaverődő Röntgenhullámok útkülönbségének szemléltetése

azt cinkszulfát lemezen szórva. Mivel a sugárzás hullámhossza az atomi méretek skálájával összemérhető, az atomrácok hasonló viselkedést mutatnak a röntgensugarakkal szemben, mint az optikai rácsok fény esetén, vagyis interferenciához vezetnek, amit fotolemezen láthatóvá tehetünk.

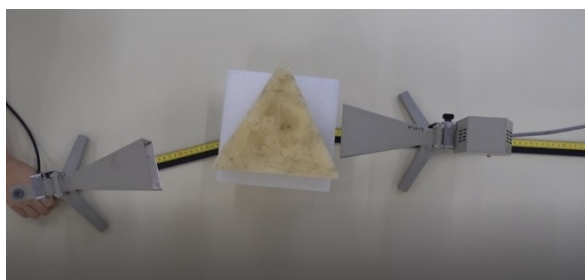
A William Henry és William Lawrence Bragg nevéhez köthető jelenség során egy atomrác egymást követő rétegeiről visszaverődő sugarak interferálnak, ezzel alátámasztva a sugárzás hullámtermészetét. Ha az atomrác érintett rétegeinek távolsága d , a beesési és visszaverődési szög ϑ , a 3. ábráról leolvasható, hogy az interferáló visszavert hullámok útkülönbsége $d \cdot \sin\vartheta$. A beesési szög változtatásával ennek megfelelően erősítést és gyengítést tapasztalunk. Ha a mechanikai hullámok témakörben az interferencia tanításakor megfelelő hangsúlyt fektetünk az erősítés és gyengítés feltételeinek tárgyalására, itt elegendő utalnunk arra.

W. H. Bragg és fia W. L. Bragg ennek megfelelően azt találták, hogy azon szögeknél, melyekre igaz, hogy $n\lambda = 2d\sin\theta$, ahol n egész szám, erősítés tapasztalható [3].



4. ábra, Bragg-féle visszaverődés szemléltetése felületi hullámokkal

A fentebb említett hurokfilm az elhajlás és interferencia rész után felületi hullámokon keresztül ismerteti a jelenséget. A kristályrácsot szabályos rendben elhelyezett akadályok képviselik, ezen halad keresztül a felületi hullám. A filmen nem csak a beesési szög, hanem a hullámhossz is változik. Adott hullámhossz mellett visszaverődő hullámokat látunk, majd a hullámhosszt változtatva a visszavert hullámok eltűnnek, kioltást találunk. További változás után a visszavert hullámok akkor jelennek meg újra, amikor a hullámhossz az első esetben megfigyelt hullámhossz fele. Az újra „elrontott” erősítést követően a beesési szög változik, így adott beesési szög mellett újra láthatóvá válnak a visszavert hullámok. Ahogyan az a 4. ábrán is látható, a filmen a megértést a valós jelenségre szerkesztett ábrák segítik. Itt az ábra a matematikai leíráshoz szükséges szögeket, derékszögű háromszögeket tartalmazza. A jelenséget felületi hullámokkal bemutató az látható, a diákoknak nem képzeletükre hagyatkozva kell elképzelniük a jelenséget. Ez kevésbé elvonttá, könnyebben érthetővé teszi a Röntgen-hullámokkal nem látható jelenséget.

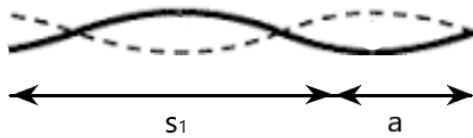


5. ábra, Elektromágneses hullámokparaffin prizmán való törésének szemléltetése

Néhány középiskolai szertárban megtalálhatók az elektromágneses hullámok hullámtulajdonságainak vizsgálatához szükséges eszközök. Ezek a nem látható – mikrohullámokat – hallhatóvá teszik, a vevő készülékben azokból hanghullámokat előállítva. Az 5. ábrán az elektromágneses hullámok paraffin prizmán való törésének bemutatása látható, de az eszköz a Bragg-féle reflexió bemutatására is alkalmas lehet.

2.3 Állóhullámok

Az elektront kötött állapotban állóhullámként írjuk le, így az állóhullámok kialakulásának megtanítása a mechanikai hullámok tárgyalásakor, szintén a téma megalapozását segíti.



6. ábra, Vonalmenti állóhullám rögzített vég esetén

Állóhullám kialakulását vonalmenti hullámok esetén gumikötéllal bemutathatjuk, a kialakulás egyszerű matematikai leírását ennek segítségével tehetjük érthetővé. Egy a hullámforrástól s_1 , a visszaverődés helyétől a távolságra

lévő tömegpont kitérése az idő függvényében a hullámforrásból érkező, és a visszavert hullám kitérésének összege. Rögzített vég esetén a hullám π fázisugrást szenved, így ez az összeg a következőképpen alakul:

$$y = A \sin(ks_1 + \omega t + \varphi_0) + A[\sin k(s_1 + 2a) + \omega t + \varphi_0 + \pi]$$

$$= 2A \sin\left(n\pi + \omega t + \varphi_0 + \frac{\pi}{2}\right) \cos\left(2\pi \frac{a}{\lambda} + \frac{\pi}{2}\right)$$

Kihasználtuk, hogy az $s_1 + a$ összeg éppen a kötéll hossza (l), ami állóhullám esetén a félhullámhossz egész számú többszöröse. Ezt a frekvencia megválasztásával értjük el. ($f = n \frac{c}{2l}$) Az eredményt érdemes elemezni, a helyére kitüntetett távolságokat helyettesíteni. Ebből látható, hogy a kötéll vége, és attól a félhullámhossz egészszámú többszörösére lévő tömegpontok maradnak helyben, vagyis alakul ki csomópont, míg, a negyed hullámhossz páratlan számú többszörösét írva a helyére, maximális amplitúdóhoz, vagyis duzzadóhelyhez jutunk.



7. ábra, Vonalmenti állóhullám szabad vég esetén

Hasonlóan vizsgálhatjuk a visszaverődést szabad végről, ebben az esetben a visszavert hullám nem szenved fázisugrást, vagyis a $\frac{\pi}{2}$ -es tagok eltűnnek

mind a szinusz, mind a koszinusz argumentumából. Ennek megfelelően a megfelelő a távolságok behelyettesítésével az előzőhöz képest negyed periódussal, vagyis a hullámhossz negyedével elcsúsznak a csomópontok és duzzadóhelyek. A kitüntetett pontokat nem matematikai megközelítéssel, logikus érveléssel is megtalálhatjuk. Rögzített vég esetén a végpontban a haladó hullám

és az ellentétes fázisú visszavert hullám szuperpozíciója zérus kitérést ad. Hasonlóképpen a kötel végétől a félhullámhossz egészszámú többszörösére lévő pontban a két hullám útkülönbsége a hullámhossz egészszámú többszöröse, ami fázisugrás nélkül maximális erősítést jelentene, a fázisugrás okán azonban éppen ellentétes fázist, vagyis kioltást eredményez. Ha a a negyed hullámhossz páratlanszámú többszöröse, az útkülönbség a félhullámhossz páratlanszámú többszöröse lesz, a fázisugrásnak köszönhetően ez maximális erősítéshez vezet, az amplitúdó az eredeti hullám amplitúdójának kétszerese. Szabad vég esetén hasonló logika mentén érvelhetünk.

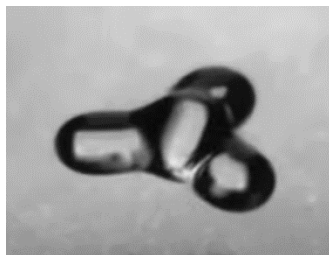


8. ábra, Kétdimenziós állóhullám téglalap alakú kereten



9. ábra, Állóhullám körfelületen

kialakított állóhullám látható, a hártya hossza egyik irányban fél-, másik irányban két teljes hullámhossz. A 9. ábrán egy kör alakú állóhullám szintén szappanhártyán, ami az elektronpályák alakjának megértését segíti. A képen a 2s pályának megfelelő modell látható, az amplitúdó a megtalálási valószínűséget mutatja.

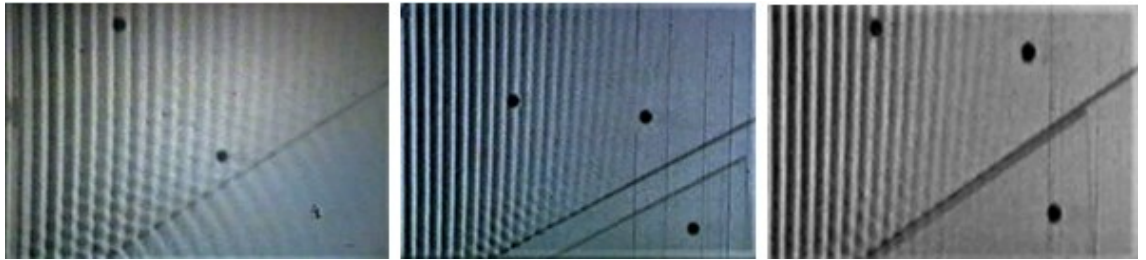


10. ábra, térbeli állóhullám

A síkon kialakuló állóhullámok leírása és bemutatása ezután nem jelent nagy logikai ugrást, a két tengely mentén terjedő hullámokat egymástól függetlenül kezeljük. Ezeket bemutathatjuk szappanhártya vagy gumilepedő felhasználásával. Eszközök, vagy idő hiányában a szemléltetést szintén megtaláljuk az említett film felvételei között mind kör, mind téglalap alakú felületen, ezekről emeltem ki képeket. A 8. ábrán egy téglalap alakú szappanhártyán kialakított állóhullám látható, a hártya hossza egyik irányban fél-, másik irányban két teljes hullámhossz. A 9. ábrán egy kör alakú állóhullám szintén szappanhártyán, ami az elektronpályák alakjának megértését segíti. A képen a 2s pályának megfelelő modell látható, az amplitúdó a megtalálási valószínűséget mutatja.

A térbeli állóhullámokat nehezebb elképzelni, ilyen folyadékcseppek szemléltet egy videómegosztókon megtalálható film [4], ez a 10. ábra forrása is. A térfogati hullámok mögé helyezett kép ugyancsak az elektronpályák tárgyalásakor segít azok elképzelésében.

2.4 Alagúteffektus



11. a) ábra

11. b) ábra

11. c) ábra

1. a) ábra: A hullám a közegek határán részben törik, részben visszaverődik. Az eredeti és a visszavert hullám adja a négyzethálós mintázatot. 1. b) ábra: Ebben a szögben a hullám nem hatol be az új közegbe, csak visszavert hullám látható. 1. c) ábra: Az azonos közegek között a rést szűkítve, a hullám átjut az előbb „elkerült” közegben, bár amplitúdója csökkent, ezért halványabban látható.

Az alagúteffektus ugyan nem a kötelező tananyag része, de a valószínűségi leírás megértését segítheti, ha beszélünk róla, és több folyamat lejátszódásáért felelős, így felmerülhet kérdésként több terület tanítása során. Tipikusan ilyen jelenség az alfa-bomlás, de már a mechanikai hullámok két közeg határán való viselkedése is jó példa. Itt a megtört hullám mellett van visszavert hullám is, hiszen a visszaverődés valószínűsége nem nulla. Ezenkívül a diákokat elérő információáradatban jó eséllyel felbukkan valamilyen formában, így előfordulhat, hogy egy diákunk maga kérdez rá a jelenségre.

A hurokfilmben a törés, teljes visszaverődés résznél láthatjuk. A hullám sekély vízből mélyebb vízbe érkezéskor törik (11. a ábra), a határszögnél nagyobb beesési szög esetén teljesen visszaverődik (11. b ábra). Ha a mélyebb víz után újra sekély víz réteget helyezünk el, és a két közeget egymáshoz közelítjük, kellően keskeny mélyvíz szakasz esetén a hullám megjelenik a második sekély rétegben is (11. b ábra). Vagyis valamilyen amplitúdóval átjut azon a rétegen, amelybe – úgy tűnt – nem hatolhat be. Az átjutás után az amplitúdó annál nagyobb, minél keskenyebb a második, magasabb energiát jelentő réteg. Az alagúteffektus tárgyalásakor emlékeztethetjük a diákokat a jelenségre, és összeköthetjük a Born-féle értelmezéssel, megmutatva az amplitúdó szerepét a valószínűségi leírásban.

Források

- [1] <https://www.youtube.com/watch?v=vLpzEIVvthQ> Utoljára megtekintve: 2020. 08. 19.
- [2] https://www.vascak.cz/data/android/physicsatschool/template.php?f=kv_skladani_kmitani_3&l=hu Utoljára megtekintve: 2020. 07. 07.
- [3] *Fizika*, szerkesztette Holics László, Műszaki Könyvkiadó, 1986
- [4] <https://www.youtube.com/watch?v=4z4QdiqP-q8> Utoljára megtekintve: 2020. 07. 06.

A témához köthető publikációk, konferencia megjelenések

Schramek Anikó, Néhány gondolat az atomfizika középiskolai tanításához, *Fizikai Szemle*, 2020/7-8.

Publikáció alatt: Finta Zsanett, Jenei Péter, Schramek Anikó (2019), The subject of waves in a new approach introductory steps of a Design Based Research (DBR), *GIREP-ICPE-EPEC-MPTL 2019 International Conference, Budapest*

3. A kvantummechanika és a biológia, avagy tantárgyközi kapcsolatok

Új ismeretek megértésében, elraktározásában segít, ha azokat már meglévő ismeretekhez tudjuk kötni, vagy a fejünkben már meglévő rendszerbe tudjuk illeszteni. Ezért is fontos a tantárgyak közötti kapcsolat, illetve adott témakör több szempontból való bemutatása. Ilyen tantárgyközi kapcsolatot találhatunk a kvantummechanika témakörében a biológiával. A két területet ötvöző kvantumbiológia friss tudomány, ezért egyrészt felébresztheti a diákok természetes kíváncsiságát, másrészt lehetőségként kínálhatja magát mint kutatási terület. A téma középiskolai diákokkal való megismertetésére biológus kollégámmal vállalkoztunk egy iskolai előadás keretében.

A teljes előadás másfél órás volt, a közönségben pedig a gimnázium minden évfolyamáról voltak diákok. Ez azt jelentette, hogy tulajdonképpen előismeretek nélkül, rövid idő alatt kellett elvont jelenségeket bemutatni úgy, hogy azt a tanulók a témához szükséges szinten megértsék, egyszerű képet kapjanak róla. Ebben is a főleg az interneten fellelhető képek, illetve a felületi hullámok témakörhöz készült „hurokfilm” segített. Az előadásra való felkészülés segített abban, hogy a témát már a mindennapi munkám során is meg tudom említeni, a tanított csoport érdeklődésének megfelelő mélységben.

3.1 A témaválasztás indoklása

Az interdiszciplináris oktatás ma divatos kifejezés. Előnyei közé sorolható, hogy valós problémákon, életszerű helyzeteken keresztül adhatunk át ismereteket, ezáltal egyrészt a rugalmas gondolkodást, kreativitást is fejlesztve, másrészt a motivációt növelve [1]. Sok tanulmány született a természettudományos oktatás nehéz helyzetéről, a módszertani megújulás fontosságáról is [2,3]. A legtöbb írás a hagyományosnak nevezett módszer túlságosan elméleti voltát kifogásolja, a tapasztalás, gyakorlati alkalmazás fontosságára hívja fel a figyelmet [1,3]. Külföldi oktatási rendszerekben, és hazai alternatív oktatási intézményekben is láthatunk példát a természettudományos tárgyak integrált, projektek köré épülő oktatására, ami a megújulás egyik változata lehet [4]. A magyar közoktatás ma erre nincs felkészülve, de a projektek, különböző iskolai rendezvények teret

adhatnak ilyen jellegű próbálkozásoknak. A mi esetünkben egy ilyen kínálkozó alkalommal éltünk. Egy gimnáziumunkban tartott előadás keretében Jim Al-Khalili és Johnjoe McFadden Az élet kódja [5] című könyvének bemutatásán keresztül beszéltünk biológiáról, kvantummechanikáról, és a kettő találkozásáról. Az előadásra ketten vállalkoztunk, egyikünk biológia, másikunk fizika szakos tanár. A könyv a kvantumbiológia jelenlegi helyzetét, a terület legújabb ismereteit mutatja be, biológia, kémia és fizika tartalmakban bővelkedve. Ahogyan a könyv is, előadásunkban először is a kvantumbiológia születéséről, a mai ismeretekhez vezető út legfontosabb állomásairól beszéltünk. Ezután a felsorolt folyamatok mindegyikében megjelenő fizikai - leginkább kvantummechanikai - ismereteket mutattuk be, ez az én feladatomból volt. Ezek a téma megértéséhez szükséges ismeretek, jelenségek: hőmozgás, kvantáltság, vonalas szinkép illetve spektroszkópia, kettős- illetve a hullámtermészet, részecskék helyzetének valószínűségi leírása, az alagúteffektus, kvantumösszefonódás és kevert állapot.

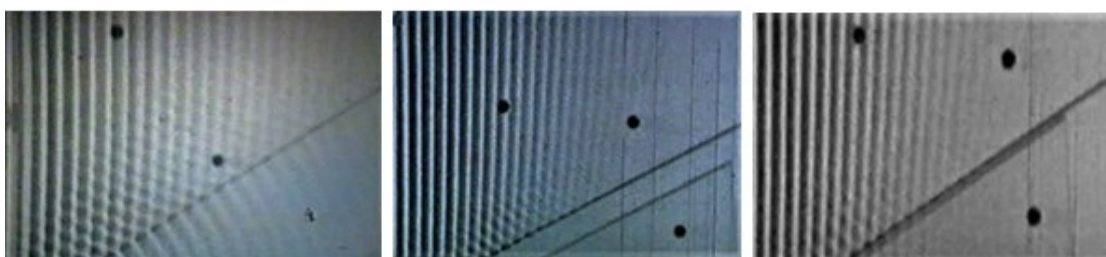
A szerzők a könyvet nem szakértőknek írták, céljuk az ismeretterjesztés, ennek ellenére sok magas szintű ismeretet tartalmaz. Előadásunk fő célja a könyv egyes részeinek, ezen keresztül a kvantumbiológia – mint új, de napjainkban gyorsan fejlődő tudományterület – bemutatása volt. Természetesen a könyv teljes tartalma egy előadás keretein időben is túlmutat, így igyekeztünk 3-4 olyan jelenséget kiválasztani, ami a mű szellemiségét tükrözve, középiskolás közönség számára érthető és élvezhető. Ezen jelenségeket egymást váltva mutattuk be, a biológiai és a fizikai tartalmak szerint felosztva. Mivel a közönség soraiban gimnáziumi tanulmányaik elején járó diákok is szép számmal voltak, igyekeztünk úgy bemutatni a vizsgált folyamatokat, hogy az különösebb előképzettség nélkül is érthető legyen. A fenti „szellemisége” szó sok mindent tartalmaz, amit természettudományokat tanító tanárokként fontosnak tartunk. A mű tulajdonképpen egy tudományos nyomozás története, amiben egy feltett kérdésre jelenségek megismerésén keresztül, azok összefüggéseit megtalálva találjuk meg a választ. Ebből a történetből érezhető a tudósok kíváncsisága, látható a természettudományos megismerés folyamata, módszerei. Tudósokat, élettörténeteket ismerhetünk meg, a vizsgálódás idő- és energiaigényes, de emberi voltát. Az alábbiakban az előadás tartalmát írom le. A mű elején feltett kérdés

egyszerűnek tűnik: Honnan tudja a vörösbegy, hogy vándorlása során merre kell haladnia?

3.2 Az előadás bevezető része

A kvantummechanika alapja, hogy a részecskék energiája kötött állapotban kvantált. Ez azt jelenti, hogy például egy atomban (kötött állapotban lévő) elektron energiája nem vehet fel bármilyen tetszőleges értéket, csak meghatározott energiaszinteken, meghatározott energiájú elektronok tartózkodhatnak. Vagyis az energiaspektrum nem folytonos – minden értéket tartalmazó –, hanem kvantált – meghatározott értékeket vehet csak fel. Ha egy elektron éppen annyi energiát vesz fel, amennyi két ilyen energiaérték különbsége, a többletenergia felvételével magasabb energiájú – gerjesztett – állapotba lép.

Folyadék halmazállapot esetén - minket az adott esetben ez a halmazállapot érdekel majd - hőmozgás során az anyagot alkotó atomok, molekulák szabadon mozognak, egymástól való távolságuk véletlenszerűen változik. Ennek a távolságnak energiájuk, és az adott távolsághoz szükséges helyzetienergia szab határt.



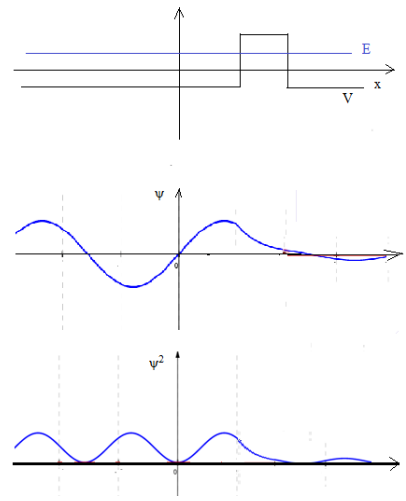
1. a) ábra

1. b) ábra

1. c) ábra

1. a) ábra: A hullám a közegek határán részben törik, részben visszaverődik. Az eredeti és a visszavert hullám adja a négyzethálós mintázatot. 1. b) ábra: Ebben a szögben a hullám nem hatol be az új közegbe, csak visszavert hullám látható. 1. c) ábra: Az azonos közegek között a rést szűkítve, a hullám átjut az előbb „elkerült” közegbe, bár amplitúdója csökkent, ezért halványabban látható.

Alagúteffektusról akkor beszélhetünk, ha a részecskéket hullámtulajdonságaikkal írjuk le. Atomi méretek esetén azt mondjuk, az anyag kettős természetű, vagyis részecske és hullámtulajdonságokat is mutat. A hullámokról mindenkinek van kialakult képe, az óvodások rajzain megjelenő ábra nekünk elegendő. Az ábra értelmezése már elvontabb gondolkodást igényel. Parányi részecskék esetén azok helyét nem tudjuk a matematikában megszokott pontossággal megadni, csak egy tartományra tudjuk szűkíteni tartózkodási helyüket, illetve meg tudjuk mondani minden egyes pontról, hogy ott milyen valószínűséggel tartózkodik a keresett részecske. Jelentse a hullám „magassága”, vagyis annak négyzete a vizsgált részecske adott helyen való tartózkodásának valószínűségét. Ahol hullámhegyet rajzoltunk, ott nagy valószínűséggel tartózkodik a részecske, ahol hullámunk a vízszintest metszi, vagyis magassága



2. ábra: A V -vel jelölt vonal a helyzeti energiát jelenti, vagyis a fekete vonal a "potenciálhegy", a kék a részecske energiáját mutatja. Alatta a Ψ hullám amplitúdója a hegy túoldalán kisebb, így annak négyzete, vagyis az ott tartózkodás valószínűsége is. A fenti ábrával való szemléltetés forrása a [6] előadások

nulla, ott nem lehet a részecske. Ez a valószínűséget leíró hullám hasonlóan viselkedik, mint a jól ismert felületi hullámok. A felületi hullámok, ha két közeg határához érnek, részben behatolnak az új közegbe, részben visszaverődnek. Hogy melyiket milyen mértékben teszik, függ attól, hogy milyen beesési szöggel érkeznek a közegethatárhoz. Ezt az 1. ábra képei mutatják. Egy bizonyos szög felett a hullám csak visszaverődik, nem hatol be az új közegbe. A képen víz hullámok törnek meg az új közegben, illetve verődnek vissza a közegethatárról. A két különböző közeget itt a sekély illetve mélyebb víz tartományok jelentik, ami – bár mindkét esetben víz, - hullámtani szempontból eltérő közegnek tűnik. Egy adott beesési szög felett nincs tovább haladó – megtört – hullám. De ha a sekély víz után újra mélyebb szakasz közeledik, és a sekély részt egyre keskenyebb sávban hagyjuk csak meg, megfelelően keskeny sávban a hullámok mégis átjutnak, bár amplitúdójuk (magasságuk) csökken, hiszen energiájuk egy része a visszavert hullámnál maradt. Energia szempontjából vizsgálva a jelenséget azt mondhatjuk, adott szög esetén a hullám nem lép át az új közegbe, mert az magasabb energiájú állapotot jelent számára, és nem rendelkezik ehhez elegendő energiával. Ha

azonban a magasabb energiájú szakasz keskeny, valahogyan mégis átjut rajta, minél keskenyebb a sekély szakasz, annál nagyobb valószínűséggel. Ezt egy energia szempontjából egyszerűbben elképzelhető jelenséggel szoktuk hasonlítani. Ha egy golyó gurul, és egy számára túl magas hegyhez érkezik, azon felfelé indulva elfogy a mozgási energiája, nem jut át a hegyen, visszagurul. Ezzel szemben a hullám, hullámtermészetével átjutott a magasabb energiájú „potenciálhegyen”. Olyan, mintha a golyó egy alagutat találna a hegyen, így azon mégis átjutna. Innen az alagúteffektus elnevezés.

Kvantumos összefonódásról két olyan részecske esetén beszélhetünk, melyek egyazon folyamatban keletkeztek, vagy egyéb okból van köztük különleges kapcsolat. Ez az ok lehet például az, hogy ugyanazon elektronpályán tartózkodnak egy atomban. Egy ilyen pályán két elektron tartózkodhat, melyeknek a Pauli-elv értelmében minden kvantumszámuk nem egyezhet meg. Ha azonos elektronpályán vannak, akkor a pályát leíró



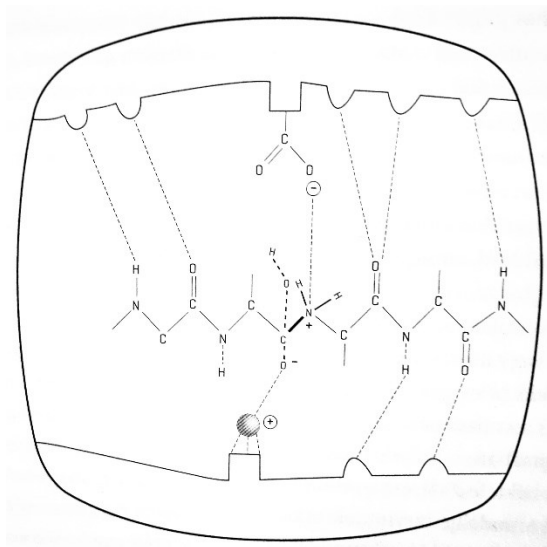
3. ábra Azonos pályán tartózkodó, ellentétes spinű elektronok ábrázolása

kvantumszámaik megegyeznek, csak spinjükben térnek el. A spin szó arra utal, hogy ez a jellemző valahogyan forgással kapcsolatos. Az elektronokat leíró modellünkben az elektronok forognak saját tengelyeik körül, és az azonos pályán lévők csak ellentétes irányba foroghatnak, vagyis spinjük ellentétes. Két ilyen elektron kémia órán tanult ábrázolásának módját mutatja a 3. ábra. Ha az ilyen kvantumos összefonódásban lévő részecskék valamiért eltávolodnak egymástól, ellentétes tulajdonságuk – esetünkben spinjük – akkor is megmarad. Vagyis ha két részecskéről tudjuk, hogy „származási helyük” megegyezik, de eltávolodtak egymástól, és mi csak az egyikükkel találkozunk, ennek vizsgálata a másik részecske adott tulajdonságát is felfedi előttünk. Vagyis egy tőlünk tetszőlegesen távol lévő részecskéről tudunk biztosat mondani, ha társát megvizsgáljuk. Talán ennél is érdekesebb, hogy a két összefonódott részecske úgynevezett kevert állapotban van, amíg ezt vizsgálódásaink meg nem zavarják. A kevert állapot azt jelenti, hogy a részecskék nem az egyik vagy a másik állapotban vannak, hanem egyszerre a kettőben. (A két állapot szuperpozíciójában.) Példánk esetén mindkét elektron mindkét spinnek megfelelő állapotban van, ezek egyikét akkor „választja ki”, amikor mi vizsgálatainkkal erre kényszerítjük. Ezt magyarázza a sokak által már hallott „Schrödinger macskája” történet. Ebben egy dobozban egy radioaktív atommag és egy szerkezet van, ami ha az atommag elbomlik, valami módon

elpusztítja a macskát. Amíg a dobozt nem nyitjuk ki, nem tudjuk, hogy a macska él, vagy elpusztult. Ezt csak akkor tudjuk meg, ha a dobozt kinyitjuk. A hasonlatban a doboz kinyitásáig a macska az élő és holt állapotok szuperpozíciójában van, vagyis egyszerre rendelkezik az élő és a holt tulajdonsággal. Ez az állapot akkor szűnik meg, ha megvizsgáljuk a macska állapotát. Nehéz elképzelni az egyszerre élő és holt macskát, de az összefonódott részecskék esetén a kevert állapot valóban azt jelenti, hogy az adott ellentétes tulajdonságokkal egyszerre rendelkezik.

3.3 Kollagenáz, avagy az enzimek és az alagúteffektus

A kollagén egy fehérje, az állatok és az emberek szervezetében is sok szövetben megtalálhatók különböző típusai. A kollagén „tartja egyben” a szöveteket, illetve biztosítja azok rugalmasságát. Erre nagy szakítószilárdsága miatt alkalmas, de ha feleslegessé válik, éppen emiatt nehéz lebontani. A lebontást, vagyis a molekulalánc „darabolását” végzi a kollagenáz nevű enzim.



4. ábra, A kollagenáz enzim működése. A kép az [5] forrásból származik.

A folyamatban egy hidroxid ion és egy hidrogén ion (proton) vándorol, ennek során szakad szét a molekula. Az ábrán + jellel jelölt cink ion és a negatív oxigén ionok elektromos tere segíti az ionok megfelelő irányú vándorlását, amit hőmozgás is okozhat, de alagúteffektusra is szükség lehet. Ha a folyamatban a hőmozgásnak van szerepe, akkor magasabb hőmérsékleten gyorsabban zajlik, hiszen a

résztevő ionok gyorsabban mozognak, rövidebb idő alatt következhet be hogy a megfelelő helyre érnek. A hőmérséklet ugyanakkor az alagúteffektus esetén is fontos, hiszen ha az ionok energiája nagyobb, nagyobb eséllyel jutnak át a potenciálhegyen. Ebben az esetben a cink és oxigén ionok által létrehozott tér a potenciálhegy magasságát csökkenti. Hasonló folyamatokat vizsgált Don deVault és Britton Chance az 1960-as években.

A hőmérséklet reakciósebességre gyakorolt hatását vizsgálták annak eldöntése érdekében, hogy hőmozgás vagy alagúteffektus során jutnak új helyükre a résztvevő ionok [7]. Azt találták, hogy a hőmérséklet csökkenése a folyamat gyorsaságának csökkenését okozza, de 100 K (-173 °C) alatt ez a sebesség nem csökken tovább. Ez a tetőzés arra utal, hogy nem hőmozgás, hanem alagúteffektus segít a molekula szakadásában. Ezt a feltevést erősítették meg később Judith Klinman vizsgálatai, melyekben ADH enzimből cserélt hidrogén atommagokat deuteronra [8]. Ez a deutérium atommagja, ami a hidrogén izotópja, vagyis szintén egy protont, de emellett egy neutron is tartalmaz. Tudjuk, hogy a kvantummechanika szabályai csak „apró” részecskékre igazak, a minket körülvevő méretek, testek esetén nem találkozunk az alagúteffektussal. Nem tudjuk pontosan, hol van az a határ, ami ennek lehetőségét megszabja, de beláthatjuk, hogy nagyobb tömegű részecskék kevésbé viselkednek hullámként. Vagyis a hidrogén deutériumra való cseréje a folyamat sebességének csökkenését okozta, hiszen kisebb valószínűséggel következik be. A hőmérsékletváltozás hasonlóképpen hatott a folyamatra, mint deVault és Chance vizsgálataiban. A cserével járó módosításokat és annak hatásait kinetikus izotópeffektusnak nevezték el.

3.4 A szaglás is rezgések érzékelése?

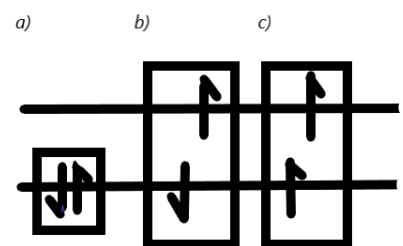
A szagok, illatok érzékelésének módja szintén a megfejtendő kérdések közé tartozik, mai tudásunk alapján úgy tűnik, ebben is van szerepe a kvantummechanikának. Az első elképzelések szerint az orrban lévő receptorok rájuk jellemző illatanyagok molekuláira érzékenyek, a szagokat az alapján azonosítjuk, hogy melyik receptor „jelez”. Hamar kiderült azonban, hogy míg a receptorok száma maximum pár száz lehet, illatanyagokból több tízezret ismerünk. Malcolm Dyson volt az első, aki 1937-ben feltételezte, hogy a szaglás során receptoraink a molekulák rezgéseit érzékelik [9]. Ahogyan a bevezetőben írtuk, kötött állapotban az elektronok csak meghatározott energiájú állapotokban lehetnek. Ezek az energiaszintek, illetve ezek különbségei az adott anyagra jellemzőek, ezek ismeretében az anyag beazonosítható. Hasonlóan, molekulákban az atomok a közöttük lévő kötések mentén rezgéseket végeznek, ezek a rezgések is csak meghatározott energiákon zajlanak. Ha egy foton (a fény energiáját

hordozó részecske) egy molekulával ütközik, energiájából átadhat annyit, amennyi egy magasabb energiájú rezgéshez szükséges. Az energiavesztésre való utalásként ezt a találkozást rugalmatlan (fény)szórásnak hívjuk. Az energiát veszített foton detektálásával megállapítható, hogy mennyi energiát veszített, ebből pedig hogy milyen molekulával találkozott. A módszert Raman-spektroszkópiának hívjuk, a jelenség felfedezője után. Dyson ebben látta az illatok érzékelésének nyitját, de nem talált magyarázatot arra, hogy mi tölti be a molekulával ütköző foton szerepét. Luca Turin adott választ a kérdésre fél évszázaddal később. Ötletének alapja, hogy ha két fémlemez (elektrodát), melyek között vákuum van, nagy feszültségre kapcsolunk, a negatívan töltött lemezelekttronok alagúteffektussal átjuthatnak a pozitív lemezre, ha a lemezek megfelelően közel vannak egymáshoz (keskeny a potenciálgát). Ennek az a feltétele, hogy a pozitív lemezen legyen egy olyan „lyuk”, állapot, melynek energiaszintje éppen akkora, amennyi energiával az elektron rendelkezik. Ha a két elektróda között nem vákuum van, hanem az elektron egy molekulával találkozik, annak a rá jellemző molekularezgésekhez szükséges energiaadagot adhat át, így kezdeti energiájánál ennyivel kisebb energiájú állapotú helyet kell találnia a másik lemezen. Turin szerint az orrban lévő receptorok, fehérjék kis „nyúlványai” ilyen elektródákként viselkednek. Az egyik nyúlványról egy elektron a pozitívabb potenciálú nyúlványra jut, miközben egy illatmolekulának - annak rezgéseinek megfelelő nagyságú - energiát ad át. Az energiavesztés és az alagúteffektus okán ezt rugalmatlan alagutazásnak hívjuk. Ezt az energiavesztést érzékeljük, ezek jellemző nagysága okozza az illat érzetét. Feltételezésének bizonyítására Turin a molekulaszervezetük alapján jóslta meg egyes anyagok illatát, majd kinetikus izotópeffektussal próbálta bemutatni, hogyan változik az illat a szerkezet – és az energiaszintek - megváltozásával, a változást azonban csak az ő orra érzékelte. Később a görög Skoulakisszal közös kísérletekben vizsgálták gyümölcslegyek acetofenon illatának érzékelését, illetve érzékelésének következtében való viselkedésüket. A mintában ezután hidrogént deutériumra cserélve azt tapasztalták, hogy a gyümölcslegyek 5 atom kicserélése után már különbséget tudtak tenni a két illat között. Később azt is megállapították, hogy az emberi orr átlagosan 28 kicserélt atom után tud különbséget tenni a minták között [5]. Az ezredforduló elején többen végeztek hasonló kísérleteket, melyekkel a rezgésérzékelés elméletét igazolták.

3.5 A vörösbegy

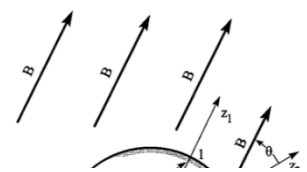
A vándorló madarak navigációs képességének rejtélye már az 1800-as években foglalkoztatott néhány tudóst, majd a II. világháború alatt katonai szempontból is fontossá vált, mert az akkor még használtak postagalambokat üzenetek továbbítására. Henry Yeagely feltételezte, hogy a madarak a Föld mágneses terét érzékelik, ezt bizonyítandó tíz galamb szárnyára mágnest, tíz galamb szárnyára pedig egy rézdarabot erősített, majd adott helyen szabadon engedte őket. A rézzel ellátott madarak közül nyolc, a mágnessel ellátottak közül mindössze egy talált haza [5]. Ezt követően több vándorló faj testében találtak mágneskristályokat, vagy mágnesezhető – a mágneses térre érzékeny – anyagot, mely iránytűként szolgálhat, de a vörösbegy testében ilyen nem találtak. A 1960-as években a Wiltschko házaspár folytatott vizsgálatokat, és figyelt meg speciális ketrecben vándormadarakat. Azt találták, hogy a vándormadarak nem érzékenyek a mágneses tér polaritására – vagyis az északi és déli pólusok felcserélésére, kizárólag a térerősség vektor vízszintessel bezárt szöge alapján indulnak - indulnának, ha a ketrec engedné - valamilyen irányba [10].

Itt egy kis kitérőt kell tennünk, mert a további eredményekhez egy fizikai kémiával foglalkozó tudós cikke vezetett. A spinről, és a kvantumösszefonódásról már írtunk. A spin kapcsán fontos megemlíteni, hogy irányát külső mágneses térrel befolyásolni tudjuk. Ha két elektron egyazon pályán – energiaszinten - tartózkodik, spinjük csak ellentétes lehet. De ha két összefonódott elektron



5. a) ábra szingulett állapot b) gerjesztett szingulett állapot c) gerjesztett tripllett állapot. A vízszintes vonalak az energiaszintet szemléltetik.

közül az egyik elektron gerjesztett – magasabb energiájú - állapotba lép, így két különböző pályán tartózkodnak, spinjük lehet azonos vagy ellentétes. Ellentétes spin esetén szingulett-, azonos spin esetén tripllett állapotról beszélünk. Ha emellett az elektronok kevert állapotban vannak, akkor a szingulett és tripllett állapot egyszerre valósul meg. Klaus Schulten, aki doktori dolgozatát fizikai kémia témában írta, vizsgálta a szingulett- illetve tripllett állapotok hatását fotokémiai folyamatokban. Feltételezte, hogy a vizsgált folyamatokban a



6. ábra, A mágneses térrel különböző szöget bezáró fénysugarakra a szemben található receptorok különböző érzékenységet mutatnak. A kép a [10] forrásból származik.

reakciósebességet növeli az összefonódás, és mivel a spin érzékeny a mágneses térre, a folyamatban keletkező végtermékek arányát befolyásolja a mágneses tér. Feltételezésének igazolására kollégája, Hubert Staerk kísérleti eredményeit használta fel [5]. Az adatok között megtalálta amit keresett, a folyamatok végtermékében a végtermékek arányát valóban megváltoztatta a mágneses tér jelenléte, iránya. Erről írt cikke alapján a Wiltschko házaspár újabb kísérleteket végzett vándormadarakkal, ezúttal sötétben. Azt találták, hogy a madarak fény hiányában elvesztik tájékozódóképességüket [10], amiből arra következtettek, hogy a mágneses tér érzékelése a szemben történik. Újabb előrelépést a vándorló fajok tájékozódásának megfejtésében az hozott, hogy muslicák szemében kriptokrómot találtak [5]. A kriptokróm egy fényérzékeny fehérje, mely felelős lehet a cirkadián ritmus (nappal és éjszaka váltakozásának hatása) alakulásáért. Ilyet találtak a – szintén vándorló – királylepkék csápjában, de az emberi szemben is. Ebben egy foton energiáját felvéve, egy elektron szabadul ki a molekulából, egy „lyukat” hátrahagyva. (A páratlan vegeértékelektront tartalmazó molekulát hívjuk szabadgyöknek.) Ezt a lyukat töltheti be egy másik molekula kötőelektron párjának egyik tagja. Az ennek következtében zajló kémiai folyamatok végtermékeiben fordulhatnak elő szingulett és triplett állapotok, ezek előfordulásának arányát befolyásolja a mágneses tér. Ma azt feltételezik, hogy a szemben lévő fényérzékeny receptorok a retinán a szemgolyó érintősíkjának irányában helyezkednek el, és érzékenységükre hatással van az elektronok spinje, vagyis a molekula szingulett vagy triplett állapota. Vagyis a szembe különböző irányból érkező fénysugarak és azok mágneses térrel bezárt szöge a retina eltérő helyein eltérő érzékenységet okoz a szem receptoraiban. Ennek következtében „látják” a vándormadarak a mágneses mezőt.

A terület nagyon új, fenti elképzelések először 2000-ben jelentek meg egy cikkben. Néhány ezzel foglalkozó tudós egyetért abban, hogy az elmondottak magyarázzák a vándormadarak navigációs képességét, illetve szaglásunkat, de széles körben még nem elfogadott a nézet. Ettől lehet igaz, de bizonyosságra még várunk kell.

3.6 Összegzés

Az előadásra a diákok előzetesen online jelentkeznek, nagyszámú előadás közül kiválasztva az őket érdeklőket. Erre több napjuk van, tanulmányozhatják a kínálatot. A résztvevők számát a jelentkezési felület minden előadás esetén korlátozza, esetünkben a létszám felső határa 50 fő volt. Ez a felület megnyitásának napján megtelt, ami mutatja a téma iránti érdeklődést. A közönség soraiban kollégák is kiemelkedően nagy számban jelentek meg – ők természetesen szabadon látogathatják az őket érdeklő előadásokat -, ami mutatta, hogy nem csak a diákok között népszerű a téma. Az előadás közben, és végén feltett kérdések azt mutatták, hogy a diákok értették az elmondottakat, azokat tovább is tudták gondolni. Ez is megerősíti azt a feltételezésünket, hogy a témának és a tantárgyközi kapcsolatok erősítésének van helye a középiskolában.

Források:

[1] Soupeze, Jean-Baptiste. (2016). *An Interdisciplinary Approach to Education: Case Study of an Academic Exchange*

https://www.researchgate.net/publication/320865656_An_Interdisciplinary_Approach_to_Education_Case_Study_of_an_Academic_Exchange letöltve 2020. 04. 16.

[2] Chrappán Magdolna, *A természettudományi tárgyak helyzete és elfogadottsága a közoktatásban*, Magyar Tudomány 2017/11 https://mersz.hu/dokumentum/matud_37 letöltve 2020. 04. 16.

[3] Máth János, *A természettudományos oktatás válsága*, Magyar Tehetségsegítő Szervezetek Szövetsége, 2014

[4] Nahalka István, *A természettudományos nevelés helyzete Magyarországon a kerettantervek írása idején* http://www.tani-tani.info/a_termeszettudomanyos, letöltve 2020. 04. 16.

[5] Jim Al-Khalili, Johnjoe McFadden, *Az élet kódja – titokzatos kvantumok*, Libri

[6] Gnädig Péter *Szemléletes kvantumelmélet órái*, ELTE, Fizika doktori iskola, Fizika tanítása program, 2016/2017 tanév, I. félév

[7] D Devault, B Chance, *Temperature Dependence of Cytochrome Oxidation Rate in Chromatium. Evidence for Tunneling*, Biophys J, 1966

[8] J P Klinman, *Moving Through Barriers in Science and Life*, Annual Review of Biochemistry, Vol.88: 1-24, <https://www.annualreviews.org/doi/10.1146/annurev-biochem-013118-111217>

letöltve: 2020. 05.23.

[9] *A molekulák illata* <https://www.kfki.hu/~cheminfo/hun/hir/cikk/szag.html>,

letöltve 2020. 05. 24.

[10] Thorsten Ritz, Salih Adem, Klaus Schulten, *A Model for Photoreceptor-Based Magnetoreception in Birds*, Biophysical Journal, Published by Elsevier Inc., February 2000, 707-7018.o. <https://www.cell.com/action/showPdf?pii=S0006-3495%2800%2976629-X>

letöltve 2020. 06. 01.

A témához köthető előadás

2018. március Fazekas+ Fesztivál, Előadás a Budapesti Fazekas Mihály Gyakorló Általános Iskola és Gimnázium rendezvényén, dr. Erős-Honti Zsolt, Schramek Anikó

4. Diákok részvétele detektorépítésben, a kutatás illetve projektmunka lehetséges hozadékai

Diákjaimmal a MTA Wigner Fizikai Kutatóközpont által meghirdetett pályázat keretében sokszálas propcionális számláló építésében vettem részt. A program során megtapasztaltam milyen hozadéka lehetnek a diákok számára a kutatásban való részvételnek, a kíváncsiság vezérelte vizsgálódásnak. Ez a hatás nem csak a programban résztvevő diákokra érvényesül, hanem környezetükre, osztály- és iskolatársaikra is. Ezt igazolja a programban résztvevő diákok, és osztálytársaik hasonló programokban való részvétele, azok nagy száma, illetve továbbtanuláskor egyetem és szakválasztásuk is. Mind a résztvevők, mind társaik között nagyarányú volt a fizikához köthető szakválasztás.

4.1 A program és a résztvevők bemutatása

A Részecske és Magfizikai Intézet Nagyenergiás Fizika osztályán dr. Varga Dezső vezetésével működik az MTA Lendület Innovatív Detektorfejlesztő Kutatócsoport, amely többfajta részecskefizikai érzékelő berendezéssel foglalkozik. Nagy hangsúlyt fektetnek az utánpótlás oktatására is. Dr. Lévai Péter főigazgató szintén felismerte, hogy a hazai fizikus és mérnök utánpótlás biztosítására tervet kell kidolgozni, és már a középiskolákban szükség van a pálya iránti érdeklődés felkeltésére. Terve egy az intézeten belül működő középiskolásoknak létrehozott labor volt. Dr. Oláh Éva Mária doktori munkája során kapcsolódott be diákjaival a Nagyenergiás Fizika osztály munkájába, így volt tapasztalata abban, hogy hogyan lehet a munkát megvalósítani a gyakorlatban. Fentiek alapján alakult ki egy pályázat ötlete, ami a középiskolás diákok munkába való bevonását, az érdeklődés felkeltését célozza. A „Kutató tanári Program” pályázatot 2017 tavaszán írta ki az intézet, a 2017/2018-as tanévben egyfajta pilot programként indult. (Az elnevezés nem a pedagógus életpálya modell azonos nevű besorolására utal.) A hosszú távú terv szerint minden évben két iskola pályázó tanára nyeri el a lehetőséget, hogy diákjaival a kutatócsoport munkájában részt vegyen, fizikusok, illetve az Intézet alkalmazásában álló középiskolai tanár irányításával. Ebben a munkakörben

munkánkat dr. Oláh Éva Mária kolléganő segítette. A munka során a diákok demonstrációs célra, sokszálas proporcionális kamrákat építenek.

Kezdetben négy diákkal vettem részt, majd az első év után újabb tanévre kaptunk lehetőséget, ekkor még nyolc diákot vontunk be. Az első év tapasztalatai azt mutatták, hogy a heti rendszerességgel megjelenés egy teljes tanéven keresztül nagy leterheltséget jelent, ezért terveztünk a második évben több diákkal. Így egy-egy diák számára a munka már nem minden héten jelentett elfoglaltságot, de mindig volt aki a detektor készítésével haladni tudott.

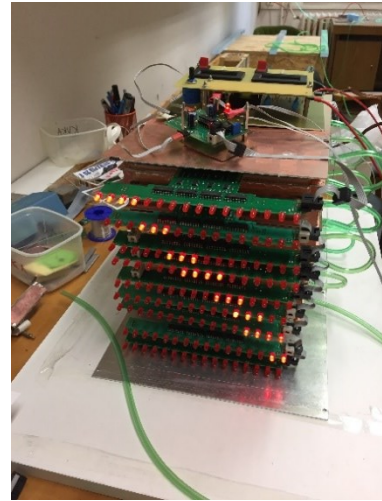
4.2 Az ismeretek megalapozása

Az első évben résztvevő diákok akkor kilencedik és tizedik évfolyamon tanultak, így a fizika több témakörében kellett bővíteni ismereteiket a munka megkezdése előtt. A detektor működési elvének megértéséhez elektrosztatikai ismeretekre, a keresett részecskék bemutatásához mag- illetve részecskefizika tudásra volt szükség. Ezeket röviden, megalapozás nélkül, de érthetően kellett bemutatni, jól megtervezve, hogy mi az amire szükség van, mi az ami elhagyható. Emellett ügyelni kellett arra, hogy a rövid bemutatás ne okozzon félreértéseket, rossz értelmezést. Mindössze az általános iskolában tanult alapfogalmakra, elképzelésekre építhettem. Természetesen a munka során egyéb területek hiánya is kiderült, ilyenkor igyekeztem ezeket hasonlóan óvatosan, de hatékonyan pótolni, amiben az intézet fizikusai is komoly segítséget nyújtottak. Ilyen volt például a relativitáselmélet és a kvantummechanika egy-egy részlete is. Ezek az ismeretek tehát azonnal a gyakorlati alkalmazással együtt kerültek elő, a diákok nem a megszokott módon tanulták őket. Ennek egyrészt a beépülésben, másrészt a motivációban van szerepe. A második évben már az első év résztvevőit kértem meg, hogy az újonnan becsatlakozó diákoknak mutassák be a szükséges fizikai hátteret, és magát a detektor elkészítésének folyamatát is. Ez mind az ő tudásuk rendszerezésében, mind az új résztvevők motiválásában hasznosnak bizonyult.

4.3 A kamra építése, az ehhez szükséges ismeretek

Az első sokszálas proporcionális kamra készítője Georges Charpak (1992 Nobel-díj), működése a töltött részecskék *ionizáló hatásán* alapszik. A kamra a Geiger-

Müller számlálóhoz hasonlóan működik. A detektor belsejében lévő, gázon áthaladó részecske ütközik a gáz atomjaival, a keletkező szabad elektronok felgyorsulva újabb ütközéseket eredményeznek, így egy úgynevezett *elektronlavina* jön létre és kelt jelet a kamrában elhelyezett vezető szálakon. A sok szál szerepe éppen az, hogy a jelek keletkezésének helyeiből a részecske pályájára következtethetünk [1]. A kamra általunk használt formája az intézet fizikusainak ötlete alapján készül, a célok között az egyszerű és költséghatékony gyártási mód szerepelt. A kamra alapját és tetejét nyáklemezek, oldalát erre a célra legyártott plexi falak alkotják. Ezeket precíz illesztés után kétkomponensű ragasztóval rögzítjük egymáshoz. A speciális vezetőket egy erre a célra kifejlesztett eszköz alkalmazásával, tekerve illesztjük a helyükre, majd szálanként forrasztással rögzítjük. A vastagabb szálak tipikusan 100 μm vastagságú bronzból, a vékonyabbak 24 μm vastagságú aranyozott wolframból készültek. A szálak távolsága 12 mm, az általunk készített kamrák alapja, 20 cm \times 12 cm, magasságuk 2 cm. Az 1650 V-os nagyfeszültségre kapcsolt anódszálak a speciális, 24 μm átmérőjű W-Au szálak. Kellően kis átmérőjüknek a *térerősség* nagyságában van szerepe, emellett pedig fontos, hogy a mechanikai igénybevételnek is megfeleljen. A vastagabbak, az úgynevezett térformáló szálak, amelyek az anódszálak között helyezkednek el felváltva, a teret, illetve az *erővonalak* elrendeződését optimalizálják, átmérőjük 100 μm . Ezeket ugyanezen eszközzel illesztjük a helyére, majd - a kamra szálakkal párhuzamos alsó és felső lapjához hasonlóan - föld potenciálra kötjük. A ragasztás után a lezárt kamrákat ellenőrizzük, hogy nem maradtak-e lyukak, ahol a gáz megszökhet belőlük. A kamrákba töltött gázkeverék összetételét is kísérletek előzték meg, minden szempontból legkedvezőbbnek az argon és szén-dioxid 4:1 arányú keveréke bizonyult, ezért ezt használjuk. A kész kamrát lassan, körülbelül 5 liter/óra sebességgel töltjük fel és a továbbiakban a gázt áramoltatjuk működtetés közben. Egy a kamrába nagy sebességgel érkező töltött részecske okozta elektronlavina következtében már mérhető jeleket tudunk észlelni a szálakon, és bár a keletkező elektromos jelet



1. ábra, a detektor egy áthaladó részecske nyomát jelzi.

akár számítógéppel is fel lehet dolgozni, a mi általunk készített eszközök középfokú oktatásban is használható változatban készülnek, ezért az adott szálak végére kötött LED égősor felvillanása jelzi számunkra az áthaladó részecskét (1. ábra).

Ahhoz, hogy a diákok értsék milyen részecskék detektálására alkalmas az eszköz, ezeket a lehetséges *töltött részecskéket* kellett bemutatni, illetve beszélni arról, miért az a legvalószínűbb, hogy a kamrában észlelt részecske egy *müon*. Beszéltünk a *radioaktív bomlások* fajtáiról, itt a tizedikesek esetében számíthattam kémiai ismeretekre is. Emellett a *Standard modellben szereplő részecskéket* tárgyaltuk röviden, célirányosan.

A fentiekben dőltbetűvel kiemelt ismereteket röviden, az alapfogalmak pontos leírása nélkül, inkább gyakorlatiasan mutattam be a diákoknak, remélve, hogy az általános iskolában tanult alapfogalmak segítenek abban, hogy ne alakulhassanak ki rossz értelmezések. Magyarázataimban igyekeztem rajzokat, ábrákat használni, ma már több – az interneten elérhető - szimulációt használnék. A munka során előforduló újabb ismeretek átadásában a fizikusok szerepe nagyobb volt, láthatóan örömmel meséltek a fizikáról a diákoknak. Az átadás módja ezekben az esetekben kifejezetten gyakorlatias volt, az ismereteket adott jelenségekkel, a szóban forgó ismeret azokban való hatásával mutatták be. Így ezeket a diákok tudták mihez kötni, rögtön rendszerben, illetve mögé helyezett képpel együtt „kapták”.

A diákok a rendszeres látogatásaik alkalmával olyan feladatokat is végezhetnek, amelyekkel a gimnáziumi oktatás keretein belül soha nem lenne alkalmuk megismerkedni. A műhelyekben ipari fűrőgéppel, fűrészsel, vágóberendezéssel készítették elő a detektorhoz szükséges elemeket. A kamrák lezárását követően a kiolvasáshoz szükséges elektronikai alkatrészeket kellett beforrasztaniuk a megfelelő helyekre. Eközben megtanulták, mit jelentenek a kondenzátorokon lévő feliratok, miért csíkosak az ellenállások és az adott színek mekkora ellenállást jelentenek. A diákok a fentieknek megfelelően sok munkafolyamatban vehettek részt, esetenként tanulhatták meg azokat. Ezek között a fűrészelés és a ragasztás éppen úgy előfordult, mint a tekercselés vagy a forrasztás. A részecskék nyomának követése céljából több kamrát helyezünk egymásra, ezek mindegyikét csatlakoztatni kell mind a nagy-, mind a föld potenciálra, a jelek továbbításához pedig az erre alkalmazott áramkörökre. Az ezekhez szükséges, végükön kivezetésekkel ellátott vezetékeket szintén a diákok készítették. A különböző

munkafolyamatok előtt mindig előzetes elméleti oktatásban részesültek a tanulók, a laboratórium vezető kutatói mindig elmondták mit, miért és hogyan kell használni, milyen folyamat eredményezte az eszközök kialakítását, amellett hogy a szükséges fizikai ismereteket is újra átbeszélték a diákokkal.

4.4 Összegzés

Fentiek alapján azt tapasztaltuk, hogy a valódi kutatás, kísérletezés a vártnál is több alkalmat ad a tanulásra. Míg az osztályteremben többnyire induktív módszerekkel vezetjük be az adott témakört, a kutatómunkák során a szinte játékos építési feladatok közben észrevétlenül tanulják meg az elméletet, maguk jönnek rá, hogy az eszköz működésének mélyebb megértéséhez milyen ismeretekre van szükségük. Mi mentortanárok is minden alkalommal ott vagyunk diákjainkkal, munka közben jó hangulatú, kötetlen beszélgetések alakulnak ki, így rengeteg új ismeretet adhatunk a tanulóknak és további kérdéseket vethetünk fel bennük. Emellett a programban résztvevő diákok örömmel adtak elő, mutatták be munkájukat iskolai rendezvényeken, illetve fizika órákon. Ez szintén segíti a tanultak rendszerezését, tudásuk elmélyítését, a tudományhoz való érzelmi viszonyulásukat. A program motiváló hatása is érezhető. A diákok a felmerülő kérdéseknek saját kíváncsiságuk okán néznek utána, több oldalról járnak körül egy-egy jelenséget. A pályázat különleges lehetőséget jelent, de talán maga a módszer - a tevékenyen tanulás - átültethető iskolai körülményekre is.

A programnak nem csak a résztvevőkre volt hatása, hanem társaikra is, akik hozzájuk hasonlóan beleláthattak, hogy a fizika nem pusztán egy tantárgy, hanem valódi tudomány, amiben az elmélet iránt fogékonyak, és a gyakorlati alkalmazásra nyitottabbak is megtalálhatják az őket érdeklő területeket. A kutatás fontos szerepét felismerve saját projektekbe is belevágtam, illetve a Wigner Intézetben is adódtak más programok középiskolás diákok számára. Ezeket mindig minden általam tanított osztályban bemutattam, azok vehettek részt, akik ehhez kedvet éreztek. Mégis a résztvevők azokból az osztályokból kerültek ki, amelyekben a detektorépítésben résztvevők tanultak. Ez egyértelműen azt mutatja, hogy a programnak a társakra is volt hatása.

Tapasztalatainkról nem csak az intézet alkalmazásában munkánkat segítő dr. Oláh Éva kolléganővel és a munkában diákjaival hozzám hasonlóan résztvevő Horváth

Norbert kollégával írtunk cikket [2], hanem két résztvevő diákom bevonásával is [3].

Utószó

A programban, illetve a Wigner Intézet más programjaiban résztvevő diákok közül hatan dolgozatom írása idején érettségiztek, jelentkeztek egyetemekre. Közülük első helyen egy diák az ELTE Programtervező informatikus szakára, egy Fizika szakra, egy diák a BME Mérnökinformatikus szakára, hárman külföldi egyetemekre matematika illetve mérnök szakra jelentkeztek. Az érintett osztály természettudományos orientációjú. Iskolánk matematika és természettudományos tagozatán az utóbbi években egyre nagyobb számban jelentkeztek diákok külföldi egyetemekre, a hazai egyetemet választók száma elenyésző volt. A folyamat az előző tanévben megállni látszott, ebben az érintett osztályban újra többen vannak azok, akik hazai egyetemet választottak. Az azonos évfolyamon matematika tagozaton végzett diákok körülbelül 65%-a jelentkezett első helyen külföldi egyetemre, ami a korábbi évekhez képest szintén csökkenést sejtet. A matematika tagozaton nagyobb arányú külföldi jelentkezésekben szerepe lehet annak is, hogy a természettudományos orientációjú osztályokból többen jelentkeznek orvosi egyetemre, és ez a képzés Magyarországon több szempontból kedvezőbb mint külföldön.

Források:

[1] Dezső Varga, Zoltán Gál, Gergő Hamar, Janka Sára Molnár, Éva Oláh, Péter Pázmándi, Cosmic Muon Detector Using Proportional Chambers, Eur. J. Phys. 36 (2015) 065006: EJP-101114.R1

A témához köthető publikációk

[2] Oláh Éva Mária, Schramek Anikó, Horváth Norbert, Kutatódiákok a Wignerben, *Nukleon* XI. évf. (2018) március 213. o.

[3] Schramek Anikó, Oláh Éva Mária, Telek Zsigmond, Péter Kristóf, Research-based teaching at Wigner Research Centre for Physics, *Canadian Journal of Physics*, 2020, 98(6): 588-592, <https://doi.org/10.1139/cjp-2019-0460>

A témához köthető előadások

GIREP 2019, Schramek Anikó, Oláh Éva Mária, Research-based teaching at Wigner Research Centre for Physics, 2019. július 02.
https://girep2019.hu/GIREP_ICPE_EPEC_MPTL_Conference_Abstract_Book.pdf 279.

oldal

5. A vezetésemmel zajló mentorprogram bemutatása

Felismerve, hogy a kutatásnak, illetve az iskolai tananyagon túlmutató tudásnak milyen nagy szerepe van a diákok motiválásában, és gondolkodásmódjuk alakulásában, iskolánkban az intézmény vezetőségének támogatásával mentorprogramot építettem ki. Ehhez kerestem, és kaptam segítséget több egyetem és kutatóintézet tanáraitól, kutatóitól, illetve az iskolánkban tanuló diákok szüleitől, öregdiákjainktól. Ők mentorként vonják be az erre jelentkező diákjainkat saját kutatásaikba, a közös munkából esetenként komoly eredmények születnek. A program hatása megmutatkozik diákjaink országos és nemzetközi versenyeken való szereplésében, TDK dolgozat születésében, illetve diákjaink továbbtanulásában is.

5.1 Az új utak szükségességének indoklása

Iskolánkban sok tehetséges diák tanul, közülük többen szélsőségesen tehetségesek. Gyakori, hogy ezen diákoknak a tananyag nem jelent elegendő kihívást, így motivációt sem. A tananyagon túlmutató tartalmak viszont kifejezetten vonzóak számukra, meglepően jól el tudnak mélyedni egy-egy speciális kérdéskör megismerésében akár önállóan is. Az ilyen vizsgálódások során felmerülő kérdéseiket azonban gyakran teszik fel nekünk, tanároknak, és természetesen nem minden kérdésre tudjuk a választ. Örömmel keressük azt a diákokkal együtt, de sok tehetséges diák esetén minden kérdés körüljárására nem jut idő. Ez, és az előzőekben leírt projektek hasznossága – és népszerűsége - adták az ötletet, hogy hasonló lehetőségeket kutassunk fel több diákunk számára. Ahelyett, hogy megpróbálnánk minden téma szakértőivé válni, vagy azt a látszatot kelteni, hogy ez lehetséges, adott témák szakértőit kérnénk fel, hogy diákjainkat azok felfedezésében segítsék. Ezért indítottuk el mentorprogramunkat. Ennek kereteiben diákjaink egy mentorral dolgozhatnak, aki a tananyagon túlmutató tudás megszerzésében segít, esetenként valódi kutatásba vonja be a diákot. A mentorprogram vezetését én látom el, a munkámat a vezetőség egyik tagja, és három diák segíti.

A program indításakor céljaink között szerepelt a külföldi egyetemeken való továbbtanulást választók számának visszaszorítása is. Ezt azért éreztük szükségesnek, mert iskolánk matematika és természettudományos osztályaiban nagyon elterjedté vált, volt olyan év, amikor egy teljes matematika tagozatos osztály ment külföldre tanulni az érettségi után. A természettudományos területeken mindenhol hiányoznak szakemberek, ha diákjaink már egyetemi éveik alatt ott tanulnak, nagyobb eséllyel fognak ott élni tanulmányaik befejezése után is. Szeretnénk, ha tehetséges diákjaink többen maradnának Magyarországon, tanulnának nagy hírű egyetemeken, és jelentenének utánpótlást hazai kutatóintézetekben, munkahelyeken.

5.2 A program gyakorlati megvalósítása

A mentorok kereséséhez számba vettük azokat az intézményeket, ahonnan segítséget reméltünk. Ezek egyetemek, kutatóintézetek. Az intézmények vezetőit kerestük meg, leírva tervünket, és segítségüket kértük. Emellett a szülők és az iskola öregdiákjai között is meghirdettük a programot, az ő segítségüket is kértük. A szinte azonnal érkező pozitív válaszok minket is megleptek, három hónap alatt elég nagy adatbázis alakult ki mentori feladatokra jelentkező kutatók elérhetőségével, sok esetben témajavaslatával. Ezeket a lehetőségeket hirdettük meg tizedik és tizenegyedik évfolyamon tanuló diákjaink körében. Azt gondoltuk, ezeken az évfolyamokon diákjaink már elegendően felkészültek egy ilyen munkára. A végzős évfolyamokon a diákok egyéb elfoglaltságai mellett túl nagy tehernek tartottuk a programban való részvételt. Ennek ellenére, amikor a programnak érdeklődő diákjaink körében híre ment, néhány végzős diák is jelentkezett, és osztályfőnökük támogatta a programban való részvételüket, így csatlakozhattak. A hirdetésben és az adminisztrációs feladatokban egy három fős diákcsoporthoz segíti a munkát, a lehetőségek meghirdetését ők nevezték el börszónak, ami beépült a „hivatalos” szóhasználatunkba. Az első börszóna után néhány diák maga keresett meg minket, hogy az őt érdeklő területen tudunk-e mentort keresni neki, így az eredetileg természettudományos területeket célzó program néhány humán területtel is kiegészült. Időközben az adatbázis tovább nőtt, közel 150 mentor ajánlotta fel segítségét. Eddig két félévben zajlottak közös munkák, ez körülbelül 60 diák részvételét jelenti. Az egyes munkák befejezése után a diákok

beszámolót írnak, amiben alkalmuk van nem csak a munka bemutatására, de saját fejlődésük, tapasztalataik felmérésére, rendszerezésére is.

5.3 A programokban résztvevők eredményei

A program nekünk is, a segítségüket felajánló mentorok többségének is új volt, nem egyformák voltak a diákok igényei sem. Néhány esetben inkább csak a pályaválasztásban nyújtott segítségre volt szükség, diákjaink közelebbről láthattak egy-egy területet. Két végzős diákunk egy állatorvos mindennapjaiban vehetett részt. Egyikük nagyon élvezte ugyan a programot, de rájött, hogy nem ezen a területen szeretne dolgozni. A másik résztvevő éppen dolgozatom írása közben nyert felvételt az Állatorvostudományi Egyetemre. Voltak, akik valódi kutatásba kapcsolódhattak be, komoly munkát végeztek, ennek eredménye a tanuló sikereiben is megmutatkozott. A 2018/2019-es tanévben három diákunk csatlakozott csillagászzal foglalkozó kutatásokhoz a Konkoly Thege Miklós Csillagászati Intézetben, közülük ketten a magyar csapat tagjai voltak a 2019-ben rendezett XIII. Nemzetközi Csillagászati és Asztrofizikai Diákolimpián. Mindketten bronzérmeket szereztek. Hasonlóképpen, az ELTE Kémiai Intézetében mentorra talált diákunk az országos versenyeken szerzett eredmények mellett mind a Mengyelejev Diákolimpián mind a Nemzetközi Kémiai Diákolimpián ezüstérmeket szerzett 2020 nyarán. Fizika területén zajló kutatásokban sokan vettek, vesznek részt. A 2019/2020-as tanévben hárman mutatták be saját projektjüket a középiskolásoknak meghirdetett Tudományos Diákköri Konferencián, egyikük dolgozata az ELTE TTK Fizikai Intézetének honlapjáról elérhető [1]. Fizika területén mentorokkal dolgozó diákjaink közül hárman jutottak az Országos Középiskolai Tanulmányi Verseny döntőjébe, annak élmezőnyébe.

A továbbtanulásra való hatást csak néhány esetben látjuk, a programban résztvevő, és azóta továbbtanulásba jelentkező diákok száma tíz, közülük öten hazai, öten külföldi egyetemre jelentkeztek. Figyelembe véve, hogy mindannyian természettudományos orientációjú osztályban tanultak, ahol a külföldi egyetemre jelentkezők aránya az elmúlt években ennél sokkal magasabb volt, ez az arány biztató.

5.4 Összegzés

Napjainkban gyakran találkozunk a probléma-alapú vagy kíváncsiság-alapú oktatás kifejezésekkel, illetve hosszabb múltra tekint vissza a projektmódszer, mint a tanulási folyamatban a diákok aktív részvételét biztosító eszközök [2]. Ezek hatásosságát több kutatás vizsgálta, melyek nem mindig hoztak hasonló eredményt [3]. A hatásosság vizsgálatában fontos szempont a cél meghatározása, illetve kérdéses, hogy az iskolai tanítás folyamatába mennyire építhetők be a fenti módszerek. A fent leírt esetekben a módszert nem tanórai keretek között használtuk, kizárólag fakultatív jelleggel, az erre jelentkező diákok esetében. Mindemellett beépült az iskola, diákjaink mindennapjaiba, az egyes jelentkezések újabb jelentkezők számára tették vonzóvá a lehetőséget. Diákjaink tanórai keretek között is beszámoltak saját munkájukról, a munka során szerzett tudásukról, a megismert módszerekről. Esetenként a tantervi anyaghoz kapcsolódóan is jelezték, hogy az éppen tanultakhoz hogyan kapcsolódik az általuk vizsgált terület. Ezáltal a program nem csak a résztvevőkre hatott, nem csak ők profitáltak belőle.

Források

[1] Tóth Ábel „Lépcsőn pattogó labda vizsgálata” című TDK dolgozata

[2] Csapó, B., Csikos, C., & Korom, E. (2016). Értékelés a kutatásalapú természettudomány-tanulásban: a SAILS projekt. *Iskolakultúra*, 26(3), 3-16.

<https://doi.org/10.17543/ISKKULT.2016.3.3>

<https://ojs.bibl.u-szeged.hu/index.php/iskolakultura/article/view/21773/21563>

Utoljára megtekintve: 2020. 08. 05.

[3] Anderson, R.D. Reforming Science Teaching: What Research Says About Inquiry. *Journal of Science Teacher Education* 13, 1–12 (2002).

<https://doi.org/10.1023/A:1015171124982>

https://www.researchgate.net/publication/226764428_Reforming_Science_Teaching_What_Research_Says_About_Inquiry

Utoljára megtekintve: 2020. 08. 05.

6. Egy saját projekt: a szinkronizáció

A szinkronizáció vizsgálatát a harmonikus rezgőmozgás során mutattam, mutatom be diákjaimnak, akik közül az erre fogékonyakkal komolyabb vizsgálatba kezdünk. Eszközöket szereztünk be, egy diák szimulációt készített.

Több iskolai projektben irányítottam diákjaim vizsgálódásait, ezek közül egyik a rezgőképes rendszerek szinkronizációja. Az ezen projekteken résztvevők szívesen tekintettek bele társaik munkájába, időnként segítve is egymásnak. Valódi műhelymunka alakult ki, ami mind a diákok motivációjára, mind pályaválasztására hatott.

6.1 Néhány saját projekt rövid bemutatása

Néhány tanulói kérdés, illetve a tanult témakörhöz köthető, tananyagot túlmutató, de röviden bemutatható jelenség kapcsán saját projektek is előkerülnek, melyekkel néhány diák a tanítási időn túl is foglalkozik. Ez néhány esetben teljesen önálló munkát jelent, néhány esetben igénylik az útmutatást, esetleg gyakorlati segítséget. Önállóan feldolgozott témák voltak például a színérzékelés, látáshibák, a hologramkészítés. Ezeket a témákat egy-egy diák kutatta, majd mutatta be előadás formájában saját csoportjának. Több osztályban előkerült a kérdés, hogy vajon mi határozza meg, hogy két közeg határán az energia hogyan oszlik meg a megtört illetve a visszavert hullám/sugár között. Főleg a fény, illetve elektromágneses hullám témakörnél vált érdekessé, néhány diák egymástól függetlenül járt utána, és számolt be róla röviden. Volt, aki a szertár eszközeit használva, segítségével mérésbe fogott, gyakorlatban vizsgálva a kérdést. Ez a téma köthető az anyaghullámokhoz, dolgozatomban írási idején éppen a visszaverődés és törés valószínűségének bemutathatóságát, a bemutatás lehetőségeit vizsgálom.

A leghosszabb időn át és legtöbb diákot foglalkoztató jelenség ezidáig a rezgőképes rendszerek szinkronizációjának vizsgálata volt. A téma a doktori iskola előadásai [1] közben érintett meg. Először Szatmáry-Bajkó Ildikó kolléganővel kezdünk vizsgálódásba, majd diákjaim körében is – sikerrel -

népszerűsítettem a témát. A másik középiskolában tanító kolléganővel való közös munka később egy másik – Eötvös munkásságával foglalkozó - projekttel is folytatódott, amibe szintén több diákot sikerült bevonnunk mindkét iskolából. Fentiek alapján a kíváncsiság vezérelte vizsgálódásokat több okból tartom hasznosnak. Szerepe van a diákok motiválásában, a tanulási folyamatban, a természettudományos módszerek megismerésében. Emellett a közös munka mind a hozadéka az egymástól tanulás, ami az egymást tanító diákoknál mélyebb megértést eredményez. Az eközben átélt „aha élmények” érzelmileg is közelebb hozzák a fizikát a tanulóhoz. Hasonlóan fontos a tanárok közötti együttműködés, ami egyrészt saját tapasztalataink, tudásunk megosztásához vezet, másrészt a különböző iskolák diákjai közötti kapcsolathoz is, ami – az eddig felsoroltakon kívül - megerősítést adhat abban, hogy a projekt amiben részt vesznek, érdekes és értékes.

6.2 A szinkronizáció, rövid elméleti áttekintés

A szinkronizáció szó összehangolást, egyidejűsítést jelent. Rezgőképes rendszerek esetén akkor beszélünk szinkronizációról, ha azok fázisa vagy fáziskülönbsége hosszú időn át megegyezik [2]. Az első, aki a jelenséget megfigyelte, Huygens volt. Az általa készített faliórák működése kapcsán tűnt fel neki, hogy az azonos falon lévő órák ingái azonos fázisban lengenek, szinkronizálódtak. Az órákat különböző helyre akasztva a jelenség megszűnt, vagyis beigazolódott gyanúja, miszerint az összehangolt mozgást az órák kölcsönhatása okozta [2,3]. Hasonló jelenségekről találhatunk néhány filmet videó megosztó oldalakon, többnyire véletlenszerűen indított, egymással kölcsönható metronómok rövid idő után bekövetkező azonos fázisban való működéséről. Két különböző, de „szemre” azonos periódusidejű rendszer szinkronizációját tanórai keretek között is bemutatathatjuk. (Gyakorlatban ez lehet két eltérő rugóállandójú rugó, melyeket alkalmasan megválasztott, eltérő tömegű nehezékekkel látunk el.) Nagyobb lélegzetű vizsgálódásra azonban nagyobb számú, egymással kapcsolatban álló oszcillátort tartalmazó rendszer érdemes [1]. Ha az oszcillátorok mindegyike hasonlóan kölcsönhatásban áll, az elméleti leírásra a Kuramoto-modell használható. A modell alapján az egyes kölcsönhatások a kölcsönhatásban résztvevő két rezgő rendszer

fáziskülönbségétől függnnek, a hatás ennek harmonikus függvényeként írható fel. A kölcsönhatás erősségét egy K együtthatóval jellemezzük, ez a csatolás szorosságától függ. Fentiek alapján az i -edik oszcillátor fázisának változását az időben a következőképpen írhatjuk le:

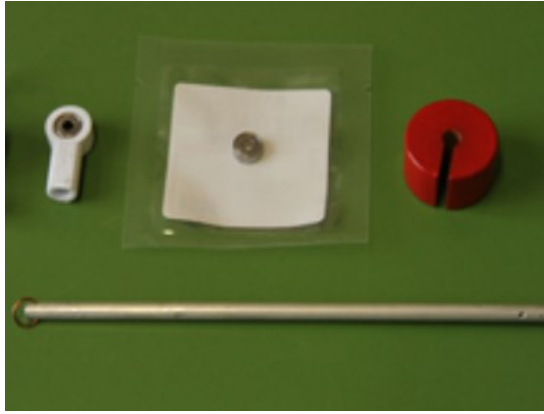
$$\frac{d\varphi}{dt} = \omega_i + \frac{K}{N} \sum_{j=1}^N \sin(\varphi_i - \varphi_j)$$

ahol N az oszcillátorok száma, φ_i a vizsgált, φ_j a kölcsönhatásban résztvevő j -edik oszcillátor fázisa, ω_i a vizsgált oszcillátor saját körfrekvenciája. Bevezethető egy rendparaméter, $q = \frac{1}{N} \langle |\sum_{j=1}^N e^{i\varphi_j}| \rangle$, ahol a csúcsos zárójel időbeli átlagot jelent. A rendparaméter értékére nagy számú oszcillátor esetén 0 adódik, ha a fázisok eloszlása tökéletesen véletlenszerű, és 1 ha a fázisok tökéletesen megegyeznek. Köztes érték parciális szinkronizációt mutat. [1, 2] A modell alapján K egy kritikus értéke felett megfigyelhetünk szinkronizációt.

6.3 A vizsgálatok menete

Kezdetben három egyazon zsinegre akasztott rugó szinkronizációját vizsgáltam, mutattam be diákoknak. Ezek különböző rugók voltak, a rájuk akasztott tömegek megválasztásával igyekeztünk hasonló periódusidőt elérni. Ehhez először páronként vizsgáltuk a rugókat, ekkor mindig hamar beállt a teljes együtt mozgás. Három rugó-test rendszer mozgását Bajkó Ildikó kolléganővel vettük filmre, hogy a film elemzésével vizsgáljuk az összehangolódást. Itt először úgy tűnt, kialakult a szinkronizáció, a hosszabb vizsgálódás után azonban kiderült, amit találtunk inkább hosszú lefolyási idejű lebegés.

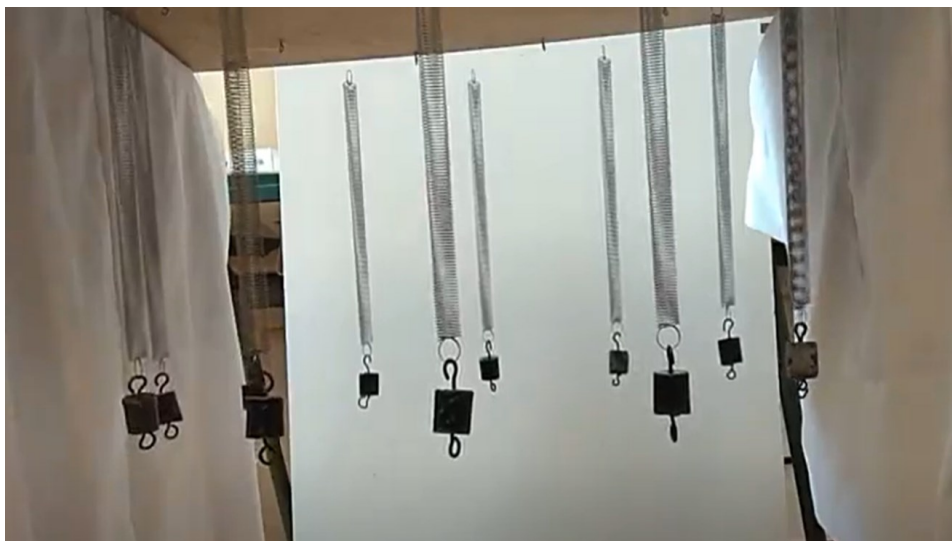
Később egy a téma iránt fogékony diákcsoport alakult ki, akikkel nagyobb számú oszcillátor vizsgálatába fogtunk. A vizsgálatok elején rögtön kiderült, hogy az azonos csatolási állandó megvalósítása nehézséget okoz, így diákjaim többféle elrendezést, csatolást és rezgőképes rendszert próbáltak ki. Rugón rezgőmozgást végző test helyett fizikai ingát alkalmaztunk.



1. ábra A képen a kezdetben használt fizikai inga részei láthatók.

Ehhez megfelelő méretű csapágyakat kaptunk a Babes-Bólyai Tudományegyetemtől, illetve dr. Néda Zoltántól. A csapágyakat az ingákhoz egy diákunk által tervezett és 3D nyomtatóval legyártott alkatrészsel rögzítettük. Ez az eszköz látható az 1. ábra baloldalán, benne és mellette kis tasakban a csapágy. A piros nehezék az inga aljához rögzíthető, az inga teste egy vékony rúd, aminek egy része a kép alján látható.

Az ingákat először hengereken gördülő deszkára rögzítettük, de már négy inga mellett is látszott, hogy ez nem jelent elég szoros csatolást, ritkán alakult ki valamiféle kollektív mozgás. Ezután ugyanezeket az ingákat, szabályos tizenkétszög csúcaiban elhelyezett kampókba fűzött közös damilszállra függesztve vizsgálták. Az elrendezés az ingák között a korábbinál is gyengébb kölcsönhatást eredményezett. Végül az 1-es ábrán látható rendszer bizonyult a legérdekesebbnek a kollektív viselkedés kialakulását illetően. A képen látható deszkába a diákok egy kör 12 – egymától azonos távolságonként elhelyezkedő – pontjába fűrt kampókon damilszálat vezetettek át, erre akasztották a 12 egyforma rugót. Rugókat először rugókészítővel gyártattunk, de ezek rezgése nagyon rövid idő alatt csillapodott, így taneszköként kapható rugókat vásároltunk.



2. ábra Az utolsó vizsgált rendszer, melyben kollektív viselkedést kerestünk

Ebben az elrendezésben a szomszédos oszcillátorok csatolása azonos, de a nem szomszédos tagok csatolásának szorossága ehhez képest elhanyagolható.

Kisszámú oszcillátort tartalmazó rendszerek esetén az összehangolódást a rendszer mozgásáról készített filmen Tracker programmal vizsgáltuk, nagyobb számú oszcillátorral azonban ez a megoldás sok nehézségbe ütközik. A mozgásokról készített filmek egyikén teljes szinkronizáció is látható, ami digitális elemzés nélkül is megfigyelhető, ez azonban nagyszámú eset közül csak egyszer fordult elő. Részleges szinkronizációt, úgynevezett chiméra szerű eseteket is vélünk felfedezni, ehhez azonban még keressük a digitális bizonyítékot. A valóságot modellezendő, egy diák szimulációt készített, melyben a Kuramoto-modellből indult ki. A kölcsönhatások okozta erőket a szomszédos oszcillátorok fáziskülönbségének harmonikus függvényeként írta fel. Ez alapján az i -edik oszcillátor fázisának változását az időben a következőképpen írta le:

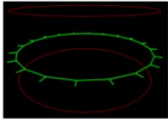
$$\frac{d\varphi}{dt} = \omega_i + K \sin(\varphi_i - \varphi_{i+1}) - K(\varphi_i - \varphi_{i-1})$$

Különböző számú oszcillátor, véletlenszerű kezdőfázisok, és változtatható K csatolási állandó mellett vizsgálta a rendszer viselkedését. K értéke erősen befolyásolta, hogy kialakul-e kollektív viselkedés, illetve K adott érték feletti megválasztása mellett minden esetben teljes szinkronizáció alakult ki [4]. Ez alatt az oszcillátorok száma befolyásolta a kialakuló rend milyenségét, illetve a rend beálltáig eltelt idő hosszát. Pár tíz oszcillátor esetén kollektív viselkedés elegendően hosszú idő után mindig megfigyelhető volt. A rend formája volt különböző 20, 40 vagy ennél több tag esetén. Ennek leírását látjuk a [4] forrásból származó képen, ahol a zöld görbék a hengerpaláston elhelyezkedő oszcillátorok függőleges kitérését jelzik. Az utolsó ábrán 200 tagot tartalmaz a rendszer, itt fehér pontok jelzik a kitérését.

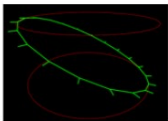
Készítettünk szimulációt, melyben módosíthat az oszcillátorok száma, frekvenciája, kezdő fázisa, valamint a csatolási állandó. Euler-módszert alkalmaztunk a minél pontosabb eredmény eléréséhez, ami természetesen nagymértékben lassítja a számolást, de még így is képes a nagyjából 2000 szerez gyorsaságra, egy 1 másodperc körüli időre a gépjelölésű beábrázolásához. Meggyőzőbbé az oszcillátorok egy henger palástján egyenletesen vannak elhelyezve, a kibérésüket a magasságuk jelöli, a szomszédos oszcillátorok össze vannak kötve (ez a csatolást jelöli). Készítettünk olyan nézetet is, amely a fáziskülönbségeket ábrázolja (jött az y koordinátát jelöli az oszcillátor sorozatának függvényében).

A szimuláció alapján a leírás elrendezéséről mindig kialakul **gyűlölközlő** viselkedés (csak eltérő idő alatt), az állandósult (stabil) állapotok leírhatók általános módon, viszont azonban gyakori speciális esetek, ezek közül néhány:


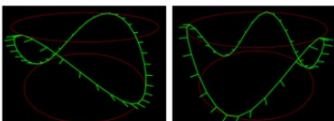
- Mindegyik oszcillátor fázisa megegyezik, a nagyon kevés (~20-nál kevesebb) oszcillátorból álló rendszerek véletlenszerű kezdőfázisból indulva ehhez az esethez tartanak.



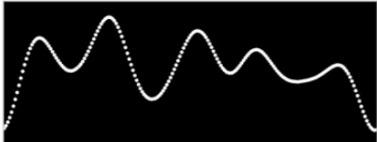
- A szomszédos oszcillátor fáziskülönbsége állandó és a fáziskülönbségek összege 2π , a kevés (~20-40 darab) oszcillátorból álló rendszerek véletlenszerű kezdőfázisból indulva ehhez az esethez tartanak (amikor nem az elhód).



- A sok (~40-nél több) oszcillátorból álló rendszerek az előbbi eset egy általános formájához tartanak, viszont: A szomszédos oszcillátor fáziskülönbsége állandó és a fáziskülönbségek összege 2π , az... (De többszöröse), tartanak véletlenszerű kezdőfázisból indulva ehhez az esethez, viszont általában ritkán.

A **gyűlölközlő** állapotokban a fáziskülönbségek állandók és egyenlők ($2\pi k/n$, ahol k egész és n az ingák száma), viszont vannak olyan stabil esetek is, amelyekben ezek állandók, de nem egyenlők, itt látható egy eset, amihez egy 200 oszcillátorból álló rendszer konvergált.



Ez közelebb visz minket a **gyűlölközlő** helyzetek általános leírásához. A későbbiekben ezeket az állapotokat szeretnénk általánosítani leírni, valamint matematikailag belátni, hogy tetszőleges kezdeti állapotból indulva két szomszédos oszcillátor fázisának különbsége mindig **gyűlölközlő** lesz, vagyis mindig kialakul kollektív viselkedés (a rendszer elég idővel stabil állapotba kerül).

6.4 A projektek diákokra való hatása, eredményei

A felsorolt projektekkel a 2018/2019-es tanévben öten vettek részt a középiskolásoknak meghirdetett Országos Tudományos Diákköri Konferencián [5]. Közülük négyen 2020-ban érettségiztek, mindannyian magyarországi egyetemen tanulnak (ELTE fizika szak, ELTE Programtervező Informatikus szak, BME Mérnökinformatikus szak, BME Energetikai Mérnök szak). Mindannyian természettudományos orientációjú osztályba jártak, ahol nagyarányú a külföldi továbbtanulás. Az OTDK-n való részvétel olyan élményt jelentett a diákoknak, amit hetekkel később is lelkesen emlegettek. Biztos vagyok benne, hogy ez sokat jelentett a továbbtanulási terveik mérlegelésekor.

Források

- [1] Néda Zoltán előadásai, ELTE TTK Fizika Tanítása Program, <http://fiztan.phd.elte.hu/>
- [2] Néda Z., Káptalan E.: A sokaság ritmusa – meglepő szinkronizációs folyamatok. *Fizikai Szemle*, 2009/9
- [3] A. Pikovsky, N. Rosenblum, J. Kurths: Synchronization – A universal concept in nonlinear sciences. Cambridge University Press, Cambridge, 2001

[4] Hervay Bence és Barna Attila TDK munkája

[5] A XXIV. OTDK eredményeket bemutató előadás anyaga, 20. oldalon
diákjaim:

https://fifoma2019.uni-eszterhazy.hu/assets/elfinder/files/OTDKFIFOMA2019_teljes_jo.pdf

Köszönetnyilvánítás

Mindenekelőtt köszönöm témavezetőmnek, Dr. Cynolter Gábornak, hogy mindvégig támogatott, dolgozatom témáján túl is bármilyen kérdéssel fordulhattam hozzá. Bátorított és lelkesített, vagy éppen gyakorlati tanácsokkal segített, ha arra volt szükség.

Köszönöm Dr. Tél Tamásnak is, aki szintén mindenben támogatott, segítséget nyújtott és odafigyelt haladásomra. Tanácsaival segítette munkámat, emlékeztetőkkel jelezte az elvégzendő feladatokat.

Köszönöm továbbá Dr. Gnädig Péternek a hasznos és élvezetes előadásokat, valamint munkám egyes részeinek átolvasását, azokhoz fűzött tanácsait, észrevételeit.

Köszönöm a Fizika Tanítása Doktori Program megalkotóinak és oktatóinak a színes és inspiráló témákat, előadásokat. A tanítási napokat minden alkalommal nagyon vártam, a tudás megszerzése mellett feltöltődést, élményt is adtak. Köszönöm hallgatótársaimnak a sok közös gondolkodást, ötleteket, valamint a kellemes légkört, az összetartozás érzését.

Köszönöm diákjaimnak, akik vállalták a rajtuk való kísérletezést, kérésemre bármikor hajlandók voltak kérdőíveket kitölteni.

Nem utolsósorban köszönöm családomnak, hogy támogattak, ha kellett elviselték távolléteket vagy hangulatváltozásaimat.

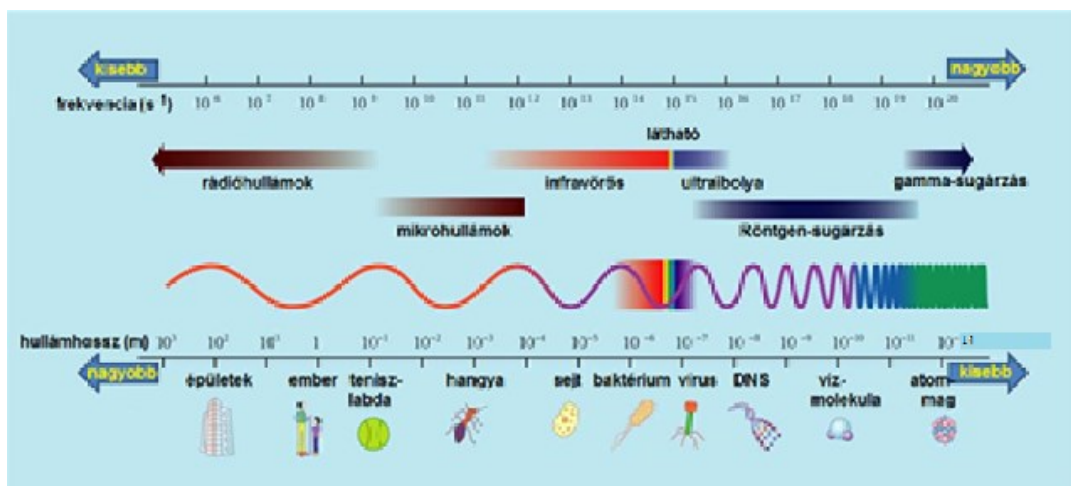
Mellékletek

Jegyzet diákjaim számára

A kvantummechanika előzményei

A XIX.-XX. század fordulóján, az elektrodinamika megismerésének vége után néhány hasonló kísérlet több különböző eredményre vezetett. Az alábbiakban ezekből írok le néhányat, nem feltétlenül időbeli sorrendben. Emiatt első olvasásra talán kissé kuszának tűnik majd a sorrend, de reményeim szerint a végére kiderül, hogy van benne logika.

Az elektrodinamika lezárásakor az egyik legizgalmasabb terület az elektromágneses sugárzás volt. Maxwell egyenletei ennek leírását is segítették, kiszámolhatóvá tették a sugárzások terjedési sebességét, amire $3 \cdot 10^8$ m/s adódott. Mivel a fény terjedési sebessége ismert volt, felmerült a gondolat, –majd bebizonyosodott, - hogy a fény is elektromágneses sugárzás. Ilyenek továbbá a rádióhullámok, később kiderül, hogy a Röntgen és a gamma sugárzás is. Az elektromágneses sugárzások spektrumát az alábbi ábrán láthatjátok.



4. ábra Forrás: https://www.tankonyvtar.hu/hu/tartalom/tamop412A/2010-0012_eghajlatvaltozas/ch02s02.html

RÉSZECSKETERMÉSZET

Hőmérsékleti sugárzás

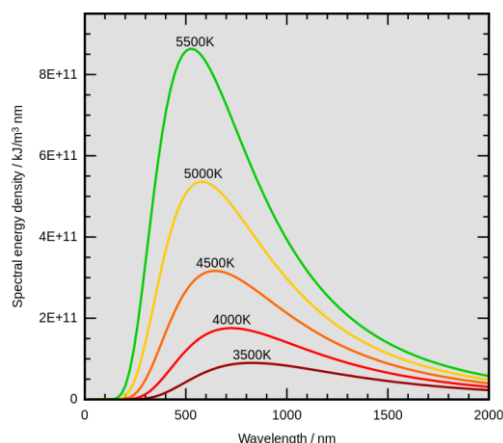
Az egyik többek által vizsgált jelenség a hőmérsékleti sugárzás. Mint tudjuk, a hő átadásának három formája közül az egyik a hősugárzás, ami elektromágneses sugárzás. Vizsgálata során a következőket figyelték meg:

- Minden test sugároz (emisszió) és elnyel (abszorpció) sugárzást, a jó sugárzó test egyben jó elnyelő is (Kirchhoff sugárzási törvénye: bármely testnél egy adott hullámhosszon és hőmérsékleten a spektrális *emisszióképesség* és az *abszorpcióképesség* hányadosa állandó).

Ha egy test minden rá eső sugárzást elnyel, vagyis abszorpciós képessége 1, *abszolút fekete test*nek nevezzük. Éppen a teljes ráeső sugárzás elnyelése okán, az ilyen abszolút fekete test sugárzásának vizsgálata során a hőmérsékleti sugárzás megfigyelhető úgy, hogy a jelenséget nem befolyásolja a test, illetve az, hogy mennyi az általa visszavert sugárzás. Ilyen test a természetben nem létezik, de ha előállítunk ilyet, vagy ezt nagyon megközelítő testet, a hőmérsékleti sugárzást tisztán, egyéb befolyásoló tényezők nélkül figyelhetjük meg. Ha egy feketére festett, vagy fekete anyaggal bevont üregre (dobozra) egy lyukat vágunk, és ezen a lyukon jutattunk a belsejébe sugárzást, az a belső visszaverődések során a falára eső sugárzás nagy hányadát elnyeli, kisebb részét veri vissza. Mivel a lyuk kicsi, kevés eséllyel jut ki a visszavert sugárzás, vagyis a sorozatos elnyeléseket követően a rá eső sugárzást végül szinte teljes egészében elnyeli a test. Az alábbi megfigyelések már az ilyen fekete test sugárzására vonatkoznak. A modell [ebben az animációban](#) látható.

- A sugárzó test által egységnyi idő alatt egységnyi felületen kisugárzott energia mennyisége (intenzitás, vagy sugárzási fluxus, I) egyenesen arányos az abszolút hőmérsékletének negyedik hatványával. (*Stefan-Boltzmann törvény*: $I = \sigma \cdot T^4$, $\sigma = 5,672 \cdot 10^{-8} \text{ W/m}^2$)
- A sugárzás széles frekvencia, illetve hullámhossz tartományban történik. Adott hőmérsékleten találhatunk egy hullámhosszt, melyen a sugárzás a legintenzívebb, a test ezen a hullámhosszon (λ_{max}) sugározza ki az energia legnagyobb hányadát. Az, hogy ez a maximum hová esik, a sugárzó test hőmérsékletétől függ, azzal

fordítottan arányos. (*Wien féle eltolódási törvény: $\lambda_{\max} * T = 0,0029 \text{Km}$*) Ez az alapja annak, hogy az izzó anyag színéből tudunk következtetni hőmérsékletére.



5. ábra Forrás: Wikipedia

[Itt](#) találsz szimulációt a jelenséghez

növekszik. Az ábrán látható görbe kísérleti megfigyelésekből adódott, elmélet modellekkel és azok matematikai leírásával többen próbálták magyarázni. A klasszikusnak nevezett modellek azonban nem tudtak magyarázattal szolgálni. (Nézz utána: ultraibolya katasztrófa)

A görbét Planck feltevése, és modellje írta le helyesen, amit azonban ő maga sem tudott magyarázni. Feltevése szerint a kisugárzott energia nem folytonos, hanem kvantált (diszkrét). Ez azt jelenti, hogy ez az energia nem vehet fel bármilyen értéket, csak egy legkisebb egység egész számú többszörösét. Erre utal a kvantált kifejezés: az energia adagokban, energiakvantumokban hagyja el a testet. Egy ilyen energiaadagot, vagyis az őt hordozó részecskét hívjuk fotonnak. Planck szerint egy ilyen foton energiája, vagyis az energia egysége a sugárzás frekvenciájával egyenesen arányos (1900), vagyis $E_{\text{foton}} = hf$, ahol h a Planck állandó, $6,62 \cdot 10^{-34} \text{Js}$. A kvantáltság okát Planck nem tudta magyarázni, de modellje helyesen adta vissza az intenzitás eloszlását leíró görbét. Feltevése később beigazolódott, ezért nevezik őt a kvantummechanika atyjának, illetve ezért fontos jelenség a hőmérsékleti sugárzás a kvantummechanika szempontjából. A magyarázat elfogadásának késlekedése Planck Nobel-díjának késlekedését is eredményezte, de végül megkapta a díjat (1918).

Fotoeffektus

1902-ben Lénárd Fülöp (Philip Lenard) vizsgálta a jelenséget. Egy Zn lemezt világított meg UV fénnel, aminek hatására a fémből elektronok léptek ki. Lénárd a következőket figyelte meg:

- A megvilágító fény frekvenciáját változtatva, található egy küszöbfrekvencia (f_0), ami alatt a jelenség nem indul be.
- A megvilágítás hatására a kilépő elektronok vagy azonnal megjelennek, vagy egyáltalán nem indul be a folyamat.
- A megvilágító fény intenzitását növelve a kilépő elektronok energiája nem, de száma növekszik.
- A megvilágító fény frekvenciáját növelve a kilépő elektronok energiája növekszik.

A megfigyelésekre Einstein adott magyarázatot, a jelenséget összekötve Planck feltételezésével. Einstein szerint a fény által szállított energia valóban kis adagokban, fotonok formájában terjed. Vagyis a fény *részecsketermészetű*, fotonok, vagyis részecskék alkotják. Ez ellentmond a korábban tapasztalt hullámtulajdonságoknak, vagyis a fény hullámtermészetének. A fémre érve egy foton egy elektronnal lép kölcsönhatásba. Az elektronnak a fém elhagyásához energiára van szüksége, ezt az energiát kilépési munkának hívjuk. Ha egy foton energiája fedezi ezt a kilépési munkát, az elektron kilép a fémből. Ez magyarázza a küszöbfrekvenciát, hiszen ha a foton energiája a frekvenciájával arányos, akkor a frekvenciának el kell érnie azt az értéket, hogy a hf_0 energia fedezze a kilépési munkát. Ha egy foton energiája ennél nagyobb, a fennmaradó energia adja az elektron mozgási energiáját. A kvantáltságot alátámasztja, hogy a jelenség vagy azonnal bekövetkezik, vagy egyáltalán nem, vagyis nem fordulhat elő, hogy a fény által folyamatosan szállított energiát egy elektron összegyűjti, és idővel ki tud lépni a fémből. A magyarázatot az *Einstein-féle fényelektromos egyenlet* írja le matematikailag:

$$h \cdot f = W_{ki} + \frac{1}{2}mv^2$$

ahol h a Planck állandó, f a megvilágító fény frekvenciája, W_{ki} a kilépési munka, m az elektron tömege, v az elektron sebessége. Einstein később ezért a magyarázatért kapott Nobel-díjat.

Az egyenletből is kiolvasható, hogy hogyan befolyásolja a frekvencia változása az elektron sebességét. A fény intenzitásának változtatása a fotonok számának növekedését eredményezi, így ezzel a fotonok által „eltalált”, vagyis a kilépő elektronok száma változik.

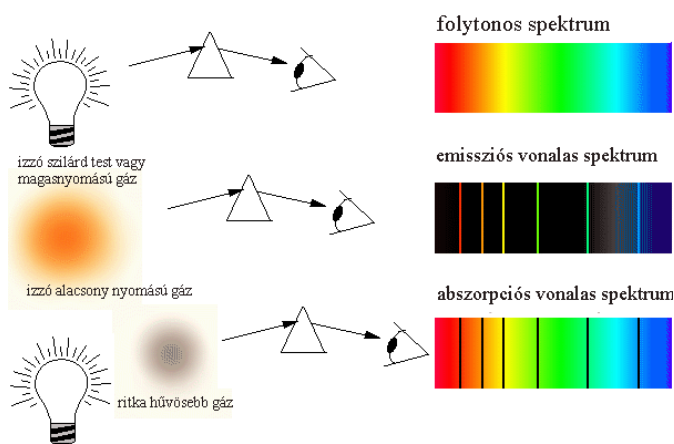
[Ezen a linken](#) egy szimuláció található, melyben a kilépő elektronok egy kondenzátor elektromos terébe lépnek. (A megvilágított fémlap a kondenzátor egyik fegyverzete.) A polaritás, illetve a másik fegyverzet potenciáljának változtatásával a tér tovább gyorsítja, vagy éppen fékezi az elektronokat. Megtalálható az a feszültség, ami mellett az elektronok energiája még éppen elegendő ahhoz, hogy a tér ellenében a negatívabb potenciálú fegyverzetre jussanak. (Ezt a feszültséget a megvilágító fény frekvenciájának függvényében ábrázolva a kilépési munka meghatározható.) Emellett változtatható a megvilágító fény frekvenciája, és a megvilágított fegyverzet anyaga, vagyis a kilépési munka.

Katódsugárzás

J. J. Thomson egy kisülési csőre (elektródákkal ellátott üvegcső) nagy feszültséget kapcsolva, a csőben a levegőt ritkítva, vákuum közeli állapot mellett különleges sugárzást fedezett fel. Az egyenes vonalban terjedő sugárzás az üvegben sárgászöld színű, elektromos és mágneses térrel eltéríthető. Az ismert mágneses térben való eltérülés irányából és mértékéből Thomson arra a következtetésre jutott, hogy a sugárzás valójában parányi negatív töltésű részecskék árama. A részecskéket elektronnak nevezte el. Méréseiből az elektron *fajlagos töltését* tudta meghatározni (q/m), amiből a Faraday törvények alapján feltételezett elemi töltést feltételezve az elektron töltésének, tömege is meghatározható. Mivel a sugárzás a katódról indult, Thomson katódsugárzásnak nevezte el. Thomson az elektron felfedezéséért Nobel-díjat kapott.

Vonalas színekép

Gázkisülési csőnek hívjuk a gázzal töltött, elektródákkal ellátott üvegsövet, melyben a gáz nagy feszültség által létrehozott elektromos térben vezetővé válik, és energiát sugároz ki, a látható tartományban is. Ezt a kisugárzott fényt spektroszkóppal felbontva azt tapasztaljuk, hogy a színeképe nem folytonos, hanem a gáz anyagára jellemző színes vonalakat látunk, vagyis a gáz csak meghatározott energiákon sugároz. Ez a jelenség is az energia, illetve a fény kvantáltságát, részecsketermészetét támasztja alá.



A képen a fehér fény folytonos spektruma alatt egy izzó gáz által kisugárzott fény vonalas színeképe látható. A legalsó színes ábra egy gázon keresztül bocsájtott fehér fény spektruma. Látható, hogy a gáz rá jellemző frekvenciájú fotonokat nyel

6. ábra Forrás: <http://astro.u-szeged.hu/spectra/spektr5.html>

el. Ezek éppen megegyeznek azokkal, amiket hevített állapotban a gáz kisugároz.

A hidrogén vonalas színeképében fellelhető frekvenciákra egymástól függetlenül több fizikus (Balmer, Paschen, Lyman, Brackett) talált összefüggést. Ezek különbségét az adta, hogy UV, IR, vagy látható tartományba eső sugarakat vizsgált-e megtalálójuk. A formulákat Rydberg egyesítette egy általános alakban.

$$\left(\frac{1}{\lambda} = R\left(\frac{1}{n^2} - \frac{1}{m^2}\right)\right), \text{ ahol } n \text{ és } m \text{ egész, } n < m, R = 1,097 \cdot 10^7 \text{ 1/m, Rydberg-állandó}$$

A színekép az anyagra jellemző, a vonalak elrendeződése alapján az anyag felismerhető. Különböző gázok prizmával felbontott (vonalas) színeképét [ebben a szimulációban](#) láthatod.

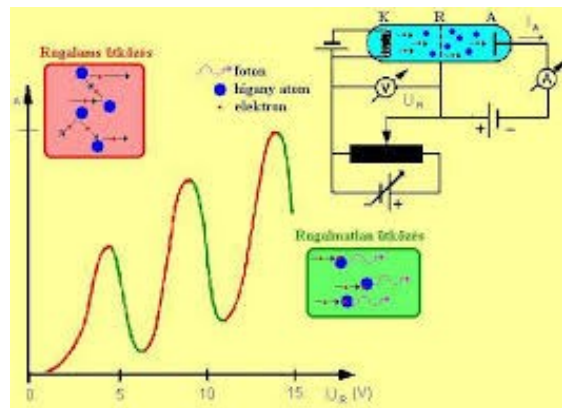
Compton-effektus

1922-ben Compton Röntgen sugarakat (lásd később) szórt paraffinon, aminek következtében a sugárzás hullámhossza változott. Az optikában tanultak alapján

ez nem következhet be, a sugárzás hullámhossza ugyanabba a közegbe visszatérve ugyanakkora. Compton a jelenséget a Röntgen sugárzás részecsketermészetével magyarázta. Egy Röntgen foton és egy elektron kölcsönhatását mint tökéletesen rugalmas ütközést értelmezve, felírható az impulzus- és az energia-megmaradás. Az egyenletekből számolható hullámhosszváltozás éppen megegyezett a kísérleti tapasztalattal.

Franck-Hertz kísérlet

Franck és Hertz higanygőzre kapcsolt feszültség változtatása mellett, az áramerősség változását figyelte. Azt tapasztalták, hogy egy ideig - a várakozásnak megfelelően – növekszik az áramerősség a feszültség növelésével, majd 4.9 V-nál hirtelen leesés mutatkozik az áramerősségben. A feszültséget növelve a leesés 4,9 V-onként újra



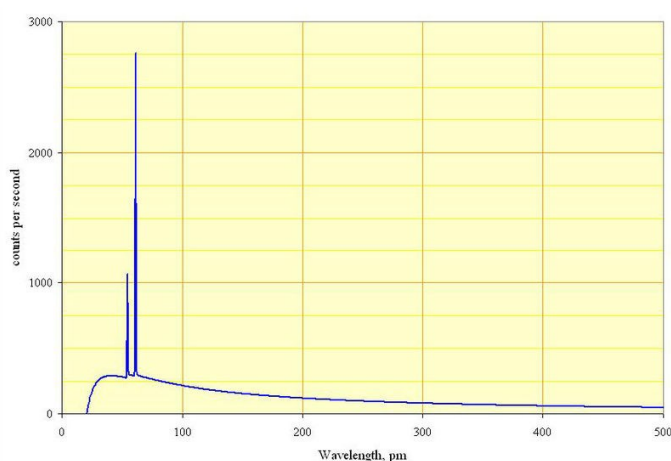
7. ábra Forrás:
<http://atomfizika.elte.hu/akos/orak/geoatom/pdf/atom-ea9.pdf>

megjelent. Ez szintén az energia kvantáltságára utal, hiszen a feszültséggel a töltések potenciális energiája változik, és jól láthatóan van egy olyan energiaérték, ami nem a töltések mozgási energiáját változtatja, nem az áramerősséget befolyásolja, hanem valami más folyamatban jelenik meg.

MÉGIS HULLÁM?

A fényről a klasszikus fizikában azt tanultuk, hogy hullám, hiszen rendelkezik a hullámtulajdonságokkal. A fentiek alapján azonban az derül ki, hogy a fény részecskék árama. A következőkben néhány – az előzőekben bemutatott – részecskéről derül ki, hogy hullám.

Röntgen sugárzás



8. ábra Forrás: Wikipedia

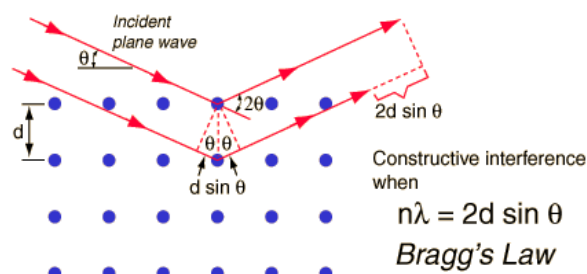
1895 november 8-án Röntgen – kisülési csövekkel folytatott vizsgálatai közben - egy addig ismeretlen sugárzást fedezett fel, amit X-sugárzásnak nevezett el. Rövid idő alatt megismerte a sugárzás tulajdonságait,

és eredményei hamar elterjedtek egész Európában, így azt 1896. január 11-én már használták az orvosi diagnosztikában. (Angliában John Hall-Edwards egy kollégája kezébe fúródott tűt keresett Röntgen felvétel segítségével.) Röntgen kapta az első fizikai Nobel-díjat 1901-ben.

Röntgen megfigyelései alapján megkülönböztetjük a *lágyszög*- (alacsonyabb frekvenciatartomány) és *kemény* (magasabb frekvenciatartomány) *röntgensugarakat*. Előbbit a kis tömegszámú elemek átengedik - ilyen pl. a hidrogén, szén -, a nagyobb tömegszámú elemekben – mint a kalcium vagy magnézium - elnyelődik. Ez az alapja az orvosi diagnosztikában való használatának, hiszen lágyszög szöveteinket jellemzően kisebb tömegszámú elemek alkotják, míg a csontokat nagyobb tömegszámúak. A kemény röntgen-sugárzás áthatolóképessége nagy, vékony rétegeken anyagtól függetlenül áthatol, vastagabb rétegeken szóródik. Anyagvizsgálatra, repedések, üregek keresésére használják.

A röntgensugarakat más szempont – keletkezésük módja - alapján is csoportosíthatjuk. A sugárzás intenzitását a frekvencia függvényében vizsgálva azt találjuk, hogy egy adott tartományban minden frekvencián hasonló intenzitással keletkezik röntgensugárzás, de az anód anyagától függően egy vagy két csúcst látunk, ezeken a frekvenciákon nagyobb intenzitású a sugárzás. A két csúcshoz tartozó frekvencián keletkező sugárzást *karakterisztikus sugárzás*nak nevezzük, hiszen ők az anód anyagát jellemzik, a többi frekvencián *fékezési sugárzás*ról beszélünk. A keletkezések módjára a későbbiekben visszatérünk.

Bragg diffrakció



9. ábra Forrás: <http://hyperphysics.phy-astr.gsu.edu/hbase/quantum/bragg.html>

A röntgensugarak hullámtulajdonságainak vizsgálatára Laue javasolt eljárást, kísérletében azt cinkszulfát lemezen szórva. Mivel a sugárzás hullámhossza az atomi méretek skálájával összemérhető, az atomrácsok hasonló viselkedést mutatnak a

röntgensugarakkal szemben, mint az optikai rácsok fény esetén, vagyis interferenciához vezetnek, amit fotolemezen láthatóvá tehetünk. A Bragg nevéhez köthető jelenség során egy atomrács egymást követő rétegeiről visszaverődő sugarak interferálnak, ezzel alátámasztva a sugárzás hullámtermészetét.

Davisson-Germer kísérlet

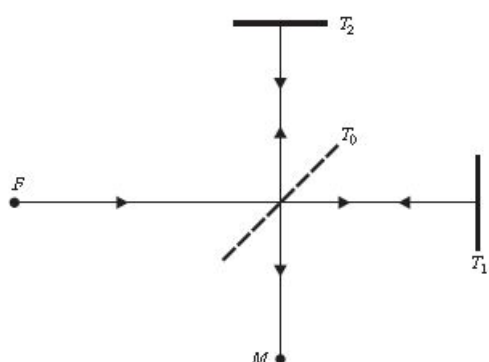
Hasonló ötlet alapján szórt elektronokat Davisson és Germer nikkelkristályon. A vékony kristályrácsra áthatoló sugárzás itt is interferenciát eredményezett, vagyis az *elektronról* is kiderült, hogy *hullámtulajdonságokat mutat*. A kísérletet G. P. Thomson is elvégezte, aki a katódsugárzást felfedező J. J. Thomson fia. Míg az apa az elektron - mint részecske - felfedezéséért kapott Nobel-díjat, fia az elektron hullámtermészetének igazolásáért. A Davisson-Germer kísérlet szimulációját [itt](#) találod, az atomok mérete és távolságuk változtatható.

KETTŐS TERMÉSZET

Az egymást követő kísérletek során először a fényről derült ki, hogy részecske tulajdonságokat mutat, majd az elektronnál, hogy hullámtulajdonságokat. Több kísérletben próbálták eldönteni, hogy a fény részecske vagy hullám, de minden kísérlet a fénynek azt a tulajdonságát támasztotta alá, melyet éppen vizsgáltak. Az alábbiakban a részecske vagy hullám kérdés eldöntését célzó kísérleteket írok le.

Michaelson-Morley interferométer

A legismertebb Michelson-Morley féle kísérleti elrendezés, melyet a két fizikus nem ennek a kérdésnek az eldöntésére dolgozott ki. A kísérletben egy fényforrásból induló fénysugarat egy féligáteresztő tükörrel választanak ketté, majd a keletkező két sugarat két tükörről visszaverődés után újra egyesíti ugyanaz a féligáteresztő tükör. Az újraegyesített sugarak egymással interferálnak, az interferencia az ernyőn látható.



1. ábra. A Michelson-interferométer elvi elrendezése, F – fényforrás; T_0 – részben áteresztő tükör; T_1 , T_2 – tükör; M – megfigyelési pont.

10. ábra Forrás: Fizikai szemle, 2009/9

Ha a tükör helyére detektorokat (bármilyen eszköz, ami a beérkező fényt „érzékel” és ezáltal a beérkezést detektálja – lehet például egy fény hatására szcintilláló, felvillanó anyag) helyezünk, és a forrásból származó fény intenzitását annyira lecsökkentjük, hogy egy időben csak egy-egy foton hagyja el a forrást, egyszerre mindig csak egy detektor jelez. Ez azt mutatja, hogy a fény részecske, nem tud egyszerre két helyen lenni. A tükör használata mellett azonban ez a gyenge fénysugár is interferenciát eredményez, vagyis kettéválasztottuk, hullámként viselkedik.

Young-féle kétrés kísérlet

Az 1800-as évek elején Young fényinterferenciát hozott létre egy fénysugár két közeli résen való szétválasztásával, majd a sugarak újraegyesítésével. 1909-ben

Taylor a fent leírthoz hasonló módon csökkentve az intenzitást, szintén a *fény kettős természetét* mutatta ki. 1961-ben Jönssön a kísérletet elektronnal is elvégezte, igazolva annak kettős természetét. Mára a kísérletet atomokkal és (gömbalakú, C₆₀) molekulákkal is elvégezték.

A kettős természet azt jelenti, hogy a fény és minden részecske egyszerre mutat hullám és részecsketulajdonságokat is. Ezt részecskékre is általánosítva, azokat *anyag hullámoknak* nevezve Louis *de Broglie* feltételezte, az 1920-as évek közepén. Később feltevését a leírt kísérletek alátámasztották.

ATOMMODELLEK

Az anyag atomos szerkezetére sok jelenség utal, mint tudjuk maga a szó, és létének első feltételezése az ókori görögöktől származik. Ezután a gázok kinetikus modellje, illetve Avogadro törvénye sugallja egy legkisebb alkotó létét. Hasonlóképpen a Faraday törvények, illetve az elemi töltés is ezt a feltételezést erősíti.

Thomson-féle modell, 1902

Thomson az elektron felfedezése után arra a következtetésre jutott, hogy ha a semleges atomban vannak negatív töltésű részecskék, akkor pozitív töltésnek is lennie kell. Úgy gondolta, a pozitív töltésű atomban, ami valamiféle massa, elszórtan helyezkednek el az elektronok. (A modellt hívják mazsolás puding modellnek, ami az angol pudding és a magyar puding szó különbözősége miatt nem tökéletes fordítás.)

Lénárd-féle modell, 1904

Lénárd éppen a katódsugarak által áthatolható üveg okán jutott arra a következtetésre, hogy az atom nem lehet egy áthatolhatatlan „massza”, inkább csak parányi részecskék a hozzájuk képest nagy légüres térben. Mivel az ellenkező előjelű töltések vonzzák egymást, feltételezte, hogy az atomban ezek párokba rendeződve vannak jelen.

Rutherford-féle modell, 1911

Ez a modell már az, amire sokan gondolunk az atom szót hallva, legalábbis a képi megjelenítést tekintve. Rutherford kísérleti úton jutott el modelljéhez. Szórás kísérletében vékony arany fóliát bombázott He atommagokkal (természetes forrásból származó alfa részecskékkel – részletesebb tárgyalása a magfizika részben aktuális), és azt tapasztalat, hogy azok eltérése nagyon különböző. A részecskék egy része alig változtatva a haladási irányán hatol át a fólián, míg néhány részecske jelentősen eltérül, majdnem „visszapattan” az aranyról. A szórás-kísérletre, illetve annak bemutatására, hogy az miért mond ellent Thomson modelljének, [itt](#) találsz szimulációt illetve animációt. A nagymértékű eltérést erős taszítóerőnek kell okoznia, amiből arra következtetett, hogy az atomban a pozitív töltések egy helyen, koncentráltan vannak jelen. Mivel a negatív töltésű

részecskéket vonzzák, azok nem állhatnak egyhelyben, a pozitív töltésű atommag körül kell hogy keringjenek. A körmozgáshoz szükséges középpont felé mutató erő a Coulomb-erő. A modell hibája, hogy a klasszikus képben, ha az elektron körmozgást végez, akkor gyorsul, és mint tudjuk gyorsuló töltés elektromágneses sugárzást okoz. Ez azt jelentené, hogy az elektron energiát sugároz ki, vagyis energiát veszít, ami sebességének csökkenéséhez, végül az atommagba való zuhanásához vezetne.

Bohr-féle modell

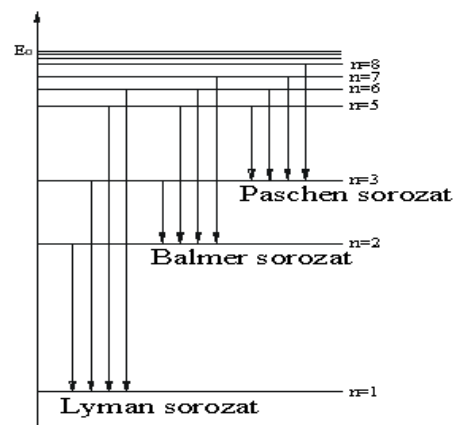
A Rutherford modell hibáját Bohr egyik feltételezésével (posztulátumával) küszöbölté ki. Két posztulátuma: 1. Az elektron meghatározott pályákon nem sugároz. 2. Ezen meghatározott pályákon csak meghatározott számú elektron tartózkodhat.

Azt, hogy miért nem sugároz az elektron bizonyos pályákon, Bohr nem magyarázta, de megadta azt a \hbar pályafeltételt, ami alapján ezek a pályák kiválaszthatók. Azokon a pályákon tartózkodhatnak elektronok melyeken igaz, hogy perdületük a (h vonás) egész számú többszöröse. Képlettel:

$$m \cdot r \cdot v = n \cdot \hbar$$

ahol m az elektron tömege, v a sebessége, r a pálya sugara, n pozitív egész, „ h vonás” pedig $h/2\pi$, ahol h a Planck-állandó. (Feladat: A forgómozgás fejezetben tanultak alapján lásd be, hogy az mrv szorzat az elektron perdülete!)

A modell alapján hidrogén atomra könnyen számolható az a pályasugár, ami a lehetséges legkisebb energiájú állapotot jelenti az elektron számára, valamint ezen energia értéke is. (Pálya sugár 0,5 Å adódik, energiára -2,2 aJ) Számolható továbbá a további pályákhoz tartozó energia értéke. Ehhez mindössze a pályafeltételt, az elektron mozgásegyenletét, és energiáját mint a potenciális és mozgási energia összegét kell felírunk. Ha az elektron gerjesztett



11. ábra

Forrás: https://www.tankonyvtar.hu/hu/rtalom/tamop425/0033_SCORM_GEFIT6102/sco_11_02.htm

(magasabb energiájú) állapotból alapállapotba jut vissza, a megfelelő pályákhoz

tartozó energiák különbségét, vagyis többletenergiát foton formájában kisugározza. Hasonlóképpen, ha az elektront gerjesztett állapotba szeretnénk juttatni, a megfelelő energiák különbségére van szükségünk.

Az egyenletekből a *Rydberg-formula* is levezethető, és a számolt értékek jól egyeznek a mért értékekkel. A modell tehát jól magyarázza a vonalas színeképet. Az ábra az elektron adott héjakról alacsonyabb energiaszinthez tartozó héjakra való visszajutása közben kisugárzott energiaadag nagyságát szemlélteti. A különböző energiájú fotonok, különböző frekvenciájú sugárzást jelentenek. Lyman a nagyobb frekvenciájú, UV (ultraibolya) tartományba eső sugarakat, Balmer a látható fény, Paschen az IR (infravörös) sugarakat írta le matematikailag.

A *karakterisztikus röntgensugárzás* létrejötte is az atompályák következménye. Ha az anódba csapódó elektron energiája éppen megfelel egy pályátmenet energiájának, az anód anyaga felveszi azt, és (röntgen) foton formájában kisugározza. Ha az energia nem felel meg egy átmenethez tartozó energiának, a fékeződő elektron (gyorsuló töltés) közvetlenül sugározza ki. Ez a fékezési sugárzás tehát bármilyen tetszőleges energiát, illetve frekvenciát jelenthet.

Az *energia kvantáltságát* általában, és hasonlóan a *Franck-Hertz kísérlet* tapasztalatait is jól magyarázza, hiszen *kötött állapotban* az elektron *energiája diszkrét*, nem vehet fel tetszőleges értéket. A higany esetén található olyan pályátmenetet, ahol az energiakülönbség éppen 4,9 eV.

Bár a hidrogén atom kapcsán a modell tökéletesen működött, nagyobb tömegszámú elemek esetén már eltérések mutatkoztak a számolt és mért értékek között. A modell tehát finomításra szorult.

Sommerfeld-féle modell

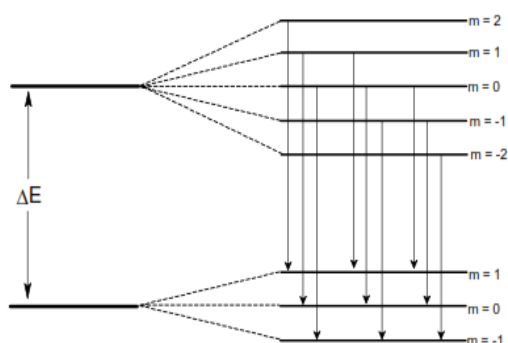
A finomításokat Sommerfeld kvantumszámai adták, amik az elektronok kölcsönhatásával, és a mozgásuk okán megjelenő mágneses térrel is számolt. Ez az a modell, amit kémia órán használtak, aminek segítségével az elektron pályák betöltését, betöltési sorrendjét fel tudjuk írni. A modell szemléletes kép, de a valóságot csak közelítőleg írja le. Négyféle kvantumszámot használunk, ezeket az alábbiakban részletezem.

Fő kvantumszám (n): tulajdonképpen az a szintén n -nel jelölt egész szám, ami Bohr modelljében is szerepel. Ez mutatja, hányadik elektronhéjon van a vizsgált elektron, milyen messze az atommagtól, vagyis milyen energiájú az általa leírt állapot. Ez pozitív egész szám lehet, kémia órán inkább a $K(n=1)$, $L(n=2)$, $M(n=3)$... jelölést használtatok.

Mellék kvantumszám (l): A pálya alakjára utal, értéke 0 - n -ig terjedő egész szám lehet. Kémia órán itt is inkább betűjeleket használtatok: s pálya ($l=0$) gömb alakra utal, p pálya ($l=1$), „piskóta” vagy végtelen jel alakú pálya, d pálya ($l=2$) ... a következők már nem leírható alakot mutatnak.

Mágneses kvantumszám (m): értéke $-l$ és l közötti egész. s pálya esetén ez csak 0 lehet, p pálya esetén $-1, 0$, vagy 1 , azaz három különböző értéket vehet fel. Ezt képileg is tudjuk magyarázni, a végtelen jel tengelye a tér három tengelye mentén állhat. d pálya esetén a mágneses kvantumszám már öt különböző értéket vehet fel, és így tovább. Ahogyan a neve mutatja, a mágneses kölcsönhatások indokolják megjelenését. (A pálya irányítását mutatja és, hogy milyen erősen hat kölcsön külső mágneses térrel.)

Spin (kvantumszám) (s): értéke $-1/2$ vagy $1/2$ lehet, klasszikusan az elektron sajátperdületével, saját tengelye körüli forgásával szemléltetjük, de az elektron valójában nem forog. A két előjel a perdületvektor két lehetséges, ellentétes irányát mutatja.



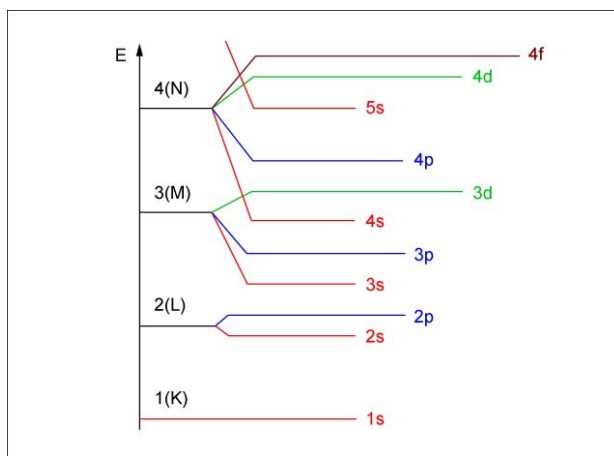
12. ábra Forrás: <https://www.wikiwand.com/hu/Atomfizika>

vonalak „felhasadnak”, egy-egy ismert vonal helyett több – az eredetihez közeli – vonal jelenik meg. Az ábra azt mutatja, hogyan módosulnak az elektron által

A különböző kvantumszámok azonos héjakon (azonos n) illetve alhéjakon (azonos l) kissé eltérő energiaszintekre utalnak, az elektronok kölcsönhatásaiból adódó módosulásoknak köszönhetően. Zeeman figyelte meg, hogy mágneses tér jelenléte mellett a hidrogén színekében a

felvehető energiaszintek az atomban, az egyes alhéjakon a mágneses kölcsönhatások figyelembevételével. Ezt írja le a mágneses kvantumszám.

A pályák feltöltésének sorrendjét a Pauli-elv, a Hund-szabály és a pályák energiaszintjei adják meg. A Pauli-elv értelmében egy atomban nincs két elektron, melyeknek minden kvantumszáma megegyezik. Ez azt jelenti, ha két elektron fő, mellék és mágneses kvantumszáma is megegyezik,



13. ábra Forrás:

<https://www.sulinet.hu/tovabbtan/felveteli/2001/1het/kemia/kemia1.html>

spinjük lesz ellentétes. A Hund-szabály szerint a pályák olyan sorrendben töltődnek fel, hogy minél több párosítatlan, vagyis azonos spinű elektron tartózkodjon egy alhéjon. Ez azt jelenti, hogy egy alhéjon először a különböző mágneses kvantumszámokhoz tartozó pályák telnek meg. Emellett mindig először az alacsonyabb energiaszintű pályák töltődnek fel.

Feladat: Írd fel az alumínium elektronpályáit, illetve hogy melyik pályán hány elektron tartózkodik. Vedd figyelembe, hogy a felhasadó energiaszintek néha azt eredményezik, hogy egy nagyobb kvantumszámmal leírható pálya alacsonyabb energiaszintet takar! A sorrendet a fenti ábráról leolvashatod.

de'Broglie-féle modell

de'Broglie az előzőekhez képest teljesen új szemlélet szerint képzei el az atomot. Azt mondja, az elektron az atommag körül hullámtermészetével van jelen, vagyis állóhullámot alkot. Ez akkor lehetséges, ha az elektronpálya kerülete az elektron hullámhosszának egész számú többszöröse, vagyis $2r\pi = n\lambda$, ahol r a pálya sugara, n pozitív egész, λ pedig az elektron hullámhossza. Ha az elektron állóhullám, nincs töltésátrendeződés, vagyis elektromágneses sugárzás sincs.

Ha Bohr és de'Broglie pályafeltételét is elfogadjuk, a két egyenlőség összevetéséből adódik: $p = \frac{h}{\lambda}$, ahol p az elektron impulzusa ($m \cdot v$), h a Planck állandó, és λ az elektron hullámhossza. Ez az egyenlőség kapcsolatot teremt egy

anyag hullám részecske és hullámtulajdonsága, vagyis a lendület és a hullámhossz között.

Schrödinger-féle, vagy kvantummechanikai értelmezés

Az elektron atomban elfoglalt helyét a későbbiekben részletezendő ψ függvény segítségével írjuk le. Röviden azt mondhatjuk, hogy ebben az értelmezésben az elektron tartózkodási helyéről csak valamilyen valószínűséggel tudunk információt, vagyis azt tudjuk hol mekkora valószínűséggel tartózkodik. Ábrákon ezt úgy szokás jelölni, hogy sötétebbre színezzük azt a térrészt, ahol nagyobb valószínűséggel találjuk, nem színezzük ahol nulla valószínűséggel.

s pálya esetén azt tudjuk, biztosan egy jól leírható sugarú gömbön belül található az elektron, a maghoz közelebb nagyobb valószínűséggel. Ábrán tehát egy gömböt színezzük, belül sötétebbre, a széle felé haladva halványabbra. p pálya esetén egy „piskóta alakot” kell színeznünk, a szélesebb helyek csúcsain sötétebbre, a széleken világosabbra.

Ez is, és némelyik a felsorolt modellek közül megtalálható [ebben a szimulációban](#), amin sok minden változtatható, és nagyon jól segíti a megértést.

Heisenberg-féle határozatlansági reláció

A valószínűségi leírással jól összecseng a *Heisenberg-féle határozatlansági reláció*, ami összetartozó mennyiségpárok bizonytalanságáról szól. Eszerint ilyen adatpárokat egyszerre tetszőleges pontossággal nem lehet meghatározni, bizonytalanságuk szorzata biztosan nem kisebb, mint „ h vonás”/2. Ilyen összetartozó értékpár például a hely és a lendület, vagyis egy részecske helyét és lendületét egyszerre csak bizonyos bizonytalansággal tudjuk megmondani. Ha Δx jelöli a hely x koordinátájának bizonytalanságát, Δp_x a lendület x komponensének bizonytalanságát, akkor

$$\Delta x \cdot \Delta p_x \geq \hbar / 2.$$

A ψ függvény

Bármilyen is az, amit hullámként keresünk, ha hullám, akkor térben és időben periodikus, vagyis hullámfüggvénnyel leírható. Az egyszerűség kedvéért térbeli helyvektor helyett csak egy koordinátával (x) dolgozunk. Így a hullámfüggvény:

$$\psi = A \sin(\varphi_0 + kx + \omega t)$$

ahol k a hullámszám ($2\pi/\lambda$), a térbeli periodicitást mutatja, ω pedig a körfrekvencia ($2\pi/T$), az időbeli periodicitás hordozója.

A Schrödinger egyenlet

Schrödinger - anélkül hogy a hullámfüggvénynek szemléletes tartalmat tulajdonított volna – egy egyenletre jutott, ami az anyaghullámok helyzetét, annak időbeli változását jól leírta. Mi ennek az egyenletnek az időfüggetlen – egy adott pillanatban jellemző értékeket tartalmazó – változatát fogjuk vizsgálni:

$$-\frac{\hbar^2}{2m} \cdot \frac{\partial^2}{\partial x^2} \psi(x) + V(x)\psi = E\psi(x)$$

ψ a fent leírt hullámfüggvény, $V(x)$ a részecske potenciális energiája a hely függvényében, E pedig az összes energiája.

Az egyenlet megszületése után röviddel, Max Born adott szemléletes tartalmat a függvénynek. Born szerint a hullámfüggvény négyzete a részecske adott (x) helyen való tartózkodásának valószínűségét mutatja, vagyis egy *valószínűségrőzség függvény*. Vagyis ha egy adott helyen – x értéknél - a függvény négyzetének értékét vesszük, az 0 és 1 közé esik, azt mutatja, hogy ha valahogyan detektálnánk a részecskét, akkor az esetek hány százalékában találnánk a vizsgált x helyen. Ez azt jelenti, hogy a függvény négyzetét a teljes térre integrálva, 1-et kell hogy adjon, hiszen valahol (összesen) 1 valószínűséggel megtalálható a részecske. A hullámfüggvény amplitúdóját ennek megfelelően kell megválasztani, ezt a „választást”, vagyis a $\int_{-\infty}^{\infty} |\psi(x)|^2 dx = 1$ egyenlet megoldását hívjuk *normálásnak*.

Az egyenlet „megoldása”

Az egyenlet teljes megoldása nem célunk, a függvény jellegét, a görbe milyenségét keressük, ebből már tudunk következtetéseket levonni. Az egyenlet kis átrendezése után

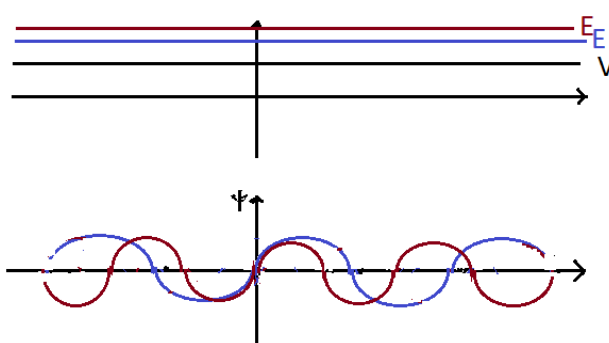
$$\frac{\partial^2}{\partial x^2} \psi(x) = \frac{2m}{\hbar^2} (V(x) - E) \psi(x)$$

kiderül, hogy a hullámfüggvénynek olyan alakúnak kell lennie, hogy a hely (x) szerinti kétszeres deriváltja csak egy együtthatóban különbözzék az eredeti függvénytől. Ez az együttható előjelétől függően valamilyen harmonikus függvény, vagy (e alapú) exponenciális függvény. Ha az adott helyen a $V(x)$ potenciálisenergia nagyobb, mint a részecske E energiája, akkor a függvény exponenciális, ha kisebb, akkor „szinusz szerű” (harmonikus). Az alábbiakban példákon keresztül igyekszem érthetőbbé tenni a függvény jelentését.

Részletesebben: Ha a kétszeres derivált együtthatója negatív, a függvényt szinuszos alakban keressük. A $\psi = A \sin(\varphi_0 + kx + \omega t)$ függvény x szerinti kétszeres deriváltja: $\psi'' = -k^2 A \sin(\varphi_0 + kx + \omega t) = -k^2 \psi$. Ebből a hullámszám

$$k = \sqrt{2m/\hbar^2 (E - V(x))}$$

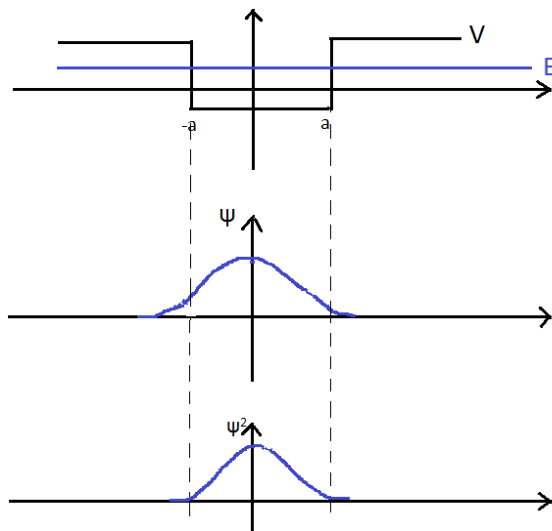
Grafikusan:



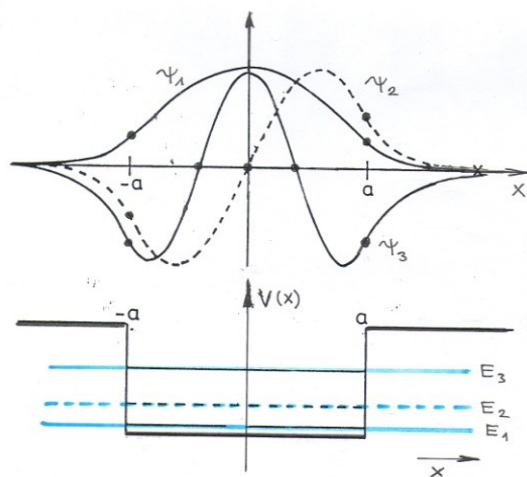
Mivel $k=2\pi/\lambda$, látható, hogy az, hogy a részecske összes energiája mennyivel nagyobb, mint az adott helyen a potenciális energia, az a hullámhosszt befolyásolja. Nagyobb energiakülönbség

kisebb hullámhosszt eredményez. Ha a potenciális energia változik, az energiák különbsége, és így a hullámhossz is változni fog.

Potenciálgödör, vagy dobozba zárt részecske

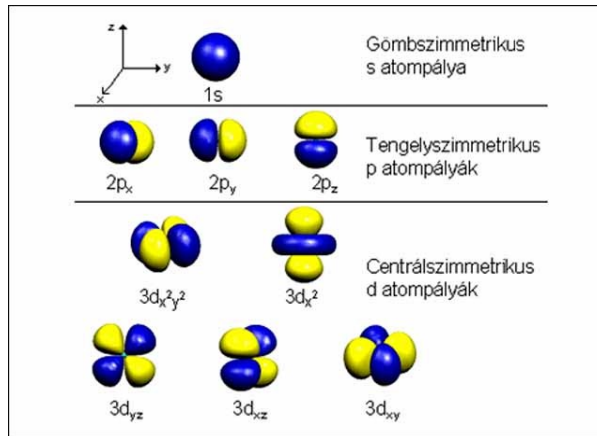


Ha a potenciális energia egy tartományban $(-a;a)$ érzékelhetően kisebb, mint a környezetében, *potenciálgödör*ről beszélünk. Ha a vizsgált részecske összes energiája a potenciálgödörben nagyobb, mint a potenciális energia, azon kívül pedig kisebb, a fent leírt okokból a ψ függvény a potenciálgödör tartományában szinuszos, azon kívül exponenciális lesz. Mivel a ψ^2 valószínűsűrűség teljes térre vett integrálja 1, ezek az exponenciális függvények a potenciálgödörön kívül „besimulnak a nullába”. A vizsgált részecske tehát nagy valószínűséggel a kisebb energiájú állapotban tartózkodik, de kis valószínűséggel azon kívül is megtalálható.



14. ábra Forrás:
http://uj.fizipedia.bme.hu/index.php?title=F%C3%A1jl:Potencial_godor_hullamfuggvények.jpeg

Ha a részecske összes energiája nagyobb, hullámhossza kisebb lesz, vagyis a vizsgált tartományba a hullámhossz nagyobb része „fér el”. Az elrendezés egyszerű modellje egy kötött állapotban lévő – vagy képi megfogalmazással dobozba zárt – elektronnak. Közelítésként úgy, hogy az elektron lehetséges legkisebb, vagyis alapállapotú energiához tartozó állapotában, a gödör/doboz szélessége éppen fél hullámhossz, első gerjesztett állapotban egy teljes hullámhossz, és így tovább. Az n . héjon a gödör, illetve az atom hossza $n \frac{\lambda}{2}$. A hidrogénatom méretét behelyettesítve, a modell jól visszaadja a Rydberg formulát.

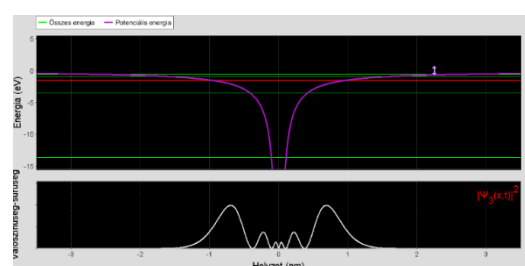
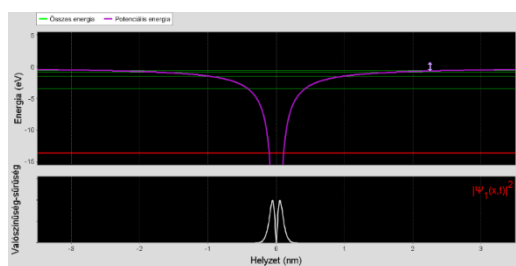


15. ábra Forrás:
http://www.rieth.hu/Vilagom/10b_ElektronSzerk.htm

Emellett atommodelljeinkben a pálya alakját is szemlélteti, hiszen fél hullám esetén az adott helyen tartózkodás valószínűsége (ψ^2) a zérus helyre (atommag) szimmetrikus, vagyis gömb alakú pályát eredményez. Az elektron a maghoz közelebb nagyobb valószínűséggel tartózkodik (a Heisenberg-féle

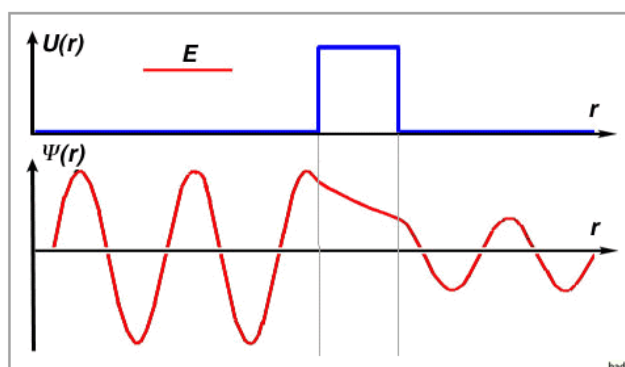
határozatlansági reláció által megengedett módon), az atomon kívül ez a valószínűség nullára csökken. Az első gerjesztett állapotban a hullámfüggvény az ábrán szaggatottan rajzolt görbe, vagyis az atom átmérője egy teljes hullám. Ekkor az elektron az atommag környezetében nulla valószínűséggel tartózkodik (csomópont), a ψ^2 valószínűség pedig jól visszaadja a „piskóta” vagy végtelenjel alakú pályát. A harmadik, másfél hosszú hullám pedig a d pályát szemlélteti.

Jobb közelítés, ha a potenciális energia függvény nem konstans szakaszokból áll, hanem ahogyan egy pozitív töltés körül egy negatív töltés potenciális energiája, a távolsággal fordítottan arányos. Mivel a k hullámszám – és így a hullámhossz is - a potenciális energia és a részecske energiájának különbségétől függ, ez azt eredményezi, hogy a szinuszos ψ függvény „hullámhossza”, vagyis frekvenciája nem állandó. Az ábrákon az [itt](#) található szimulációból másolt első és harmadik energiaszint valószínűsége függvényei láthatók. A második ábrán jól látszik, ahogy a hullámhossz a protontól távolodva növekszik. A lehetséges energiaszintek a képen zölddel jelölt csíkok, pirossal emelték ki azt, amihez tartozó ψ^2 függvényt látjuk.



Potenciálgát, alagúteffektus

Potenciálgátról beszélünk, ha a részecske haladásának irányában egy nagyobb potenciális energiát igénylő térrész található, mely mögött a potenciális energia újra csökken. Ha a részecske összes energiája kisebb,

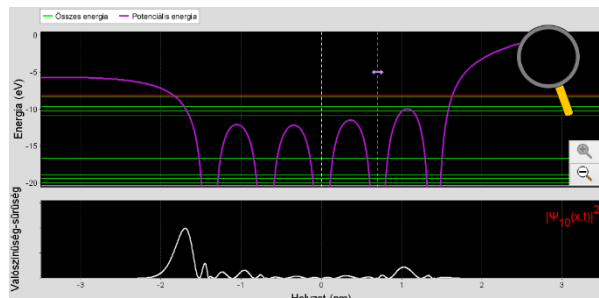
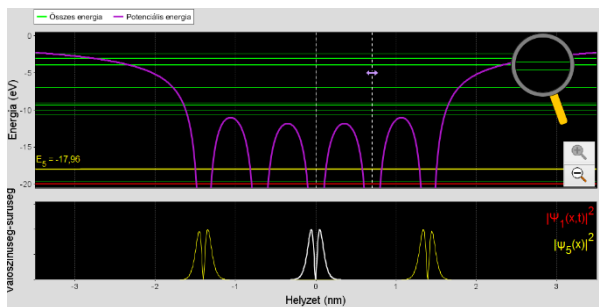
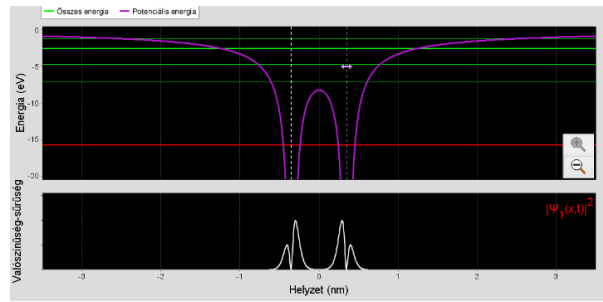


mint a potenciálgáthoz tartozó potenciális energia, a hullámfüggvény a következőképpen alakul: A gát előtt az $E - V(x)$ különbség pozitív, vagyis a ψ függvény szinuszos, a gát tartományában exponenciális, a gát mögött újra szinuszos. Ez azt jelenti, hogy a gát belseje felé haladva a részecske *megtalálási valószínűsége* csökken, de nem nulla, a részecske a gát túloldalán is megtalálható valamekkora valószínűséggel. A gyakorlatban ez azt jelenti, hogy a részecske átjutott egy az összes energiájánál nagyobb energiát igénylő állapotban, ami a klasszikus fizikában nem elképzelhető. A jelenség mögé helyezett modell szerint ez olyan, mintha egy gördülő golyó átjutott volna egy olyan magas hegyen, amire való feljutáshoz nem rendelkezett elegendő energiával. Mivel így a hegy tetejére nem juthatott fel, olyan, mintha egy alagúton jutott volna a hegy túloldalára. Ezért hívjuk a jelenséget *alagúteffektusnak*. Annak valószínűsége, hogy a részecske átjut a potenciálgáton, attól függ, hogy mekkora az összes energiája és a gát potenciális energiájának különbsége, illetve hogy milyen széles a potenciálgát.

Az alagúteffektus sok folyamatban megjelenik. Ilyen például az áram léte a konnektorba dugott eszközökben, az alfa bomlás, vagy a magfúzió. Alagúteffektussal találkozhatunk olyan biokémiai folyamatokban, mint a DNS spontán mutációja vagy a szaglás. Mind olyan folyamatok, amikben egy részecske (többnyire elektron) egy potenciálgáton való átjutás után kedvezőbb energiájú állapotba jut, vagyis a folyamat végül kisebb energiájú állapothoz vezet.

Két- illetve több potenciálgödör

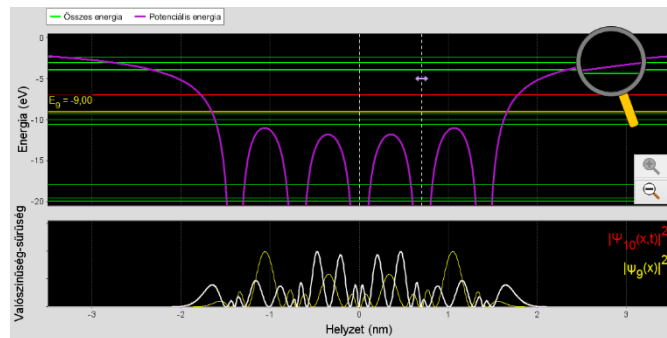
Ha a feljebb látható szimulációban két potenciálgödörre váltunk, és az $1/r$ szerint változó potenciális energia görbét választjuk, két proton körül egy elektron lehetséges pályáit, és a hozzájuk tartozó ψ^2 függvényt látjuk.



Még több potenciálgödör egy kristályrácsban pozitív töltésű atomtörzsek körüli elektronpályák energiaszintjeit modellezi. Az ábrákon két energiaszinthez (piros és sárga vonalak) tartozó valószínűség-sűrűséget emeltünk ki, az első ábrán alacsonyabb, a másodikon magasabb energiájú lehetséges pályákat választva. Látható, hogy a több pozitív töltés

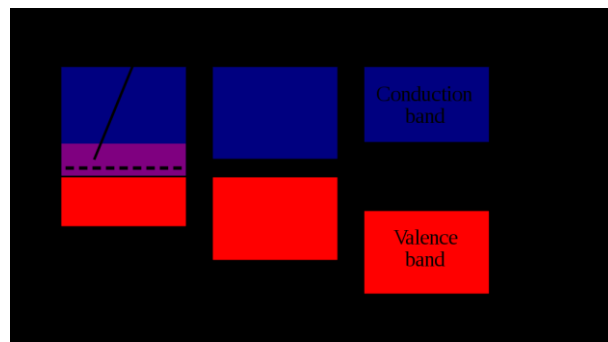
megjelenése több egymáshoz közeli energiaszint megjelenését eredményezte ott, ahol eddig egy energiaszint volt. Vagyis az egyes energiaszintek több közeli energiaszintből álló sávvá szélesedtek. Az alacsonyabb szintekhez tartozó pályák esetén az elektron megtalálási valószínűsége kis környezetben különbözik nullától, valamelyik atomtörzs közelében találhatjuk meg. Az itt található elektronok elektromos vezetésben nem tudnak részt venni (hacsak nem jutnak energiához, és kerülnek magasabb energiaszintre), hiszen helyhez kötöttek. Ez a valenciasáv. Magasabb energiaszintet választva, ez a megtalálási valószínűség a teljes rácsra terjed ki, mintha az elektron bármelyik atomtörzs közelében egyformán megtalálható lenne.

Ezeket az energiaszinteket az úgynevezett vezetési sávban találjuk, vagyis az elektron itt könnyen elmozdul, kis feszültséget létrehozva a kedvezőbb



potenciálú hely felé. A szimulációban ezt is meg tudjuk mutatni. Az ábrán látható, hogy a potenciális energia nem szimmetrikus, a baloldalon kisebb, így ott nagyobb a megtalálási valószínűség.

Ha a kisebb energiaszinteket tartalmazó valenciasáv és a vezetési sáv között az energiakülönbség nagy, az anyag szigetelő, hiszen elektronjai nem vesznek részt vezetésben. Ha ez a távolság kicsi, vagyis az elektronok kis gerjesztéssel, - vagy a



16. ábra

Forrás: <https://hu.wikipedia.org/wiki/S%C3%A1vszerkezet>

potenciális energiát feszültséggel módosítva – a vezetési sávba jutnak, vezetőkről beszélünk. A két eset között található a félvezetők.

Források:

Marx György: Kvantummechanika, Műszaki Kiadó

Geszi Tamás: Kvantummechanika, Typotex

Gnädig Péter Szemléletes kvantummechanika előadásai, Fizika Tanítása Program

Dolgozat

Számításos feladatok

1. Mekkora gyorsító feszültséget alkalmazunk, hogy a nyugalomból induló elektron de'Broglie hullámhossza 0,5nm legyen?

2. Tegyük fel, hogy egy hidrogénatom fotont bocsát ki, miközben elektronja az $n = 5$ főkvantumszámmal jelzett állapotból az $n = 3$ főkvantumszámmal jelzett állapotba jut. Az így kibocsátott fotont elnyeli egy másik hidrogénatom, amely így ionizálódik. Hányas főkvantumszámú állapotban lehetett az ionizált hidrogénatom elektronja a foton elnyelése előtt?

A hidrogénatom elektronjának energiája az n főkvantumszámmal jelzett állapotban $E_n = -13,6 \text{ eV} / n^2$.

3. Céziumkatódos fotocellára monokromatikus fénnel világítunk. A katódra jellemző kilépési munka $3 \cdot 10^{-19} \text{ J}$.

a) Legfeljebb mekkora legyen a megvilágító fény hullámhossza ahhoz, hogy elektronok lépjenek ki a katódból?

A vizsgált fotocellát $4 \cdot 10^{-7} \text{ m}$ hullámhosszúságú fénnel világítjuk meg.

b) Mekkora a kilépő elektronok sebessége?

c) Mekkora fékező feszültséget kell a fotocellára kapcsolni ahhoz, hogy a katódból kilépő elektronok ne jussanak el az anódra?

(Az elektron tömege $9,1 \cdot 10^{-31} \text{ kg}$, töltésének nagysága $1,6 \cdot 10^{-19} \text{ C}$, a Planck-állandó $6,6 \cdot 10^{-34} \text{ J}\cdot\text{s}$, a vákuumbeli fénysebesség $3 \cdot 10^8 \text{ m/s}$.)

4. Ha egy bizonyos fémből készült fotokatódot $1,5 \cdot 10^{15} \text{ Hz}$ frekvenciájú fénnel világítanak meg, akkor a fémből kilépő elektronok mozgási energiája $3 \cdot 10^{-19} \text{ J}$. ($h = 6,63 \cdot 10^{-34} \text{ Js}$)

a) Mekkora a fémre jellemző kilépési munka?

b) Mekkora a megvilágító fény határfrekvenciája?

c) Határozza meg azt a frekvenciát, amelynél a kilépő elektronok sebessége a korábbinak kétszerese lesz!

Elméleti kérdések

1. Ismertesse a fényelektromos jelenséget és annak Einstein-féle magyarázatát! Hogyan támasztja alá Einstein magyarázata a fény részecskemodelljét? Mit jelent az, hogy a fény kettős természetű?
2. Ismertesse az elektron atombeli helyének kvantummechanikai értelmezését a kvantummechanikai atommodell alapján!
3. A Bohr-féle atommodell alapján mutassa be az atomok fénykibocsátását és elnyelését, és értelmezze az izzó gázok szerkezetét!
4. Oldja meg a következő tesztkérdéseket!

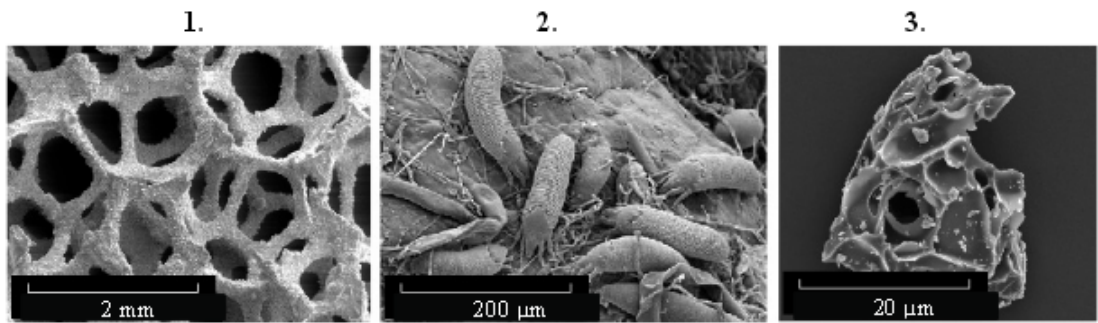
Változik-e a fotocella áramának erőssége, ha a megvilágító fényforrás teljesítményét növeljük, miközben a fény hullámhossza állandó marad?

- A) Igen, mert több foton érkezik a fotocella katódjára.
- B) Nem, mert az egyes fotonok energiája nem változik.
- C) Igen, mert a nagyobb teljesítményű fényforrás nagyobb energiájú fotonokat bocsát ki.
- D) Nem, mert bár a kibocsátott fotonok energiája nő, számuk nem változik.

Mit mond ki a Heisenberg-féle határozatlansági reláció az elektronra alkalmazva?

- A) Mivel a mérőműszereink pontatlanok, soha nem határozhatjuk meg pontosan egy elektron helyzetét és sebességét egyszerre.
- B) Egy elektron sebességének és helyzetének nem lehet egyszerre pontosan meghatározott értéke.
- C) Csak akkor mérhetjük meg egy elektron helyzetét pontosan, ha az áll, azaz sebessége pontosan nulla.

Egy elektronmikroszkóp segítségével különböző tárgyakról készítettünk képeket. Melyik kép készítésénél volt az elektronnyaláb gyorsító feszültsége a legnagyobb?



- A) Az első felvétel készítésénél.
B) A második felvétel készítésénél.
C) A harmadik felvétel készítésénél.

A Rutherford-modell szerint az elektronok különböző sugarú körpályákon keringenek az atommag körül. Egy atom két elektronját vizsgáljuk a modell alapján. Az egyik kisebb, a másik nagyobb sugarú körpályán kering. Melyiknek nagyobb a keringési ideje?

- A) A kisebb sugarú körpályán lesz nagyobb a keringési idő.
B) A nagyobb sugarú körpályán lesz nagyobb a keringési idő.
C) A két érték egyenlő.

ADATLAP
a doktori értekezés nyilvánosságra hozatalához*

I. A doktori értekezés adatai

A szerző neve: Schramek Anikó

MTMT-azonosító: 10075589

A doktori értekezés címe és alcíme: A kvantummechanika tanítása, illetve egyéni fejlődési lehetőségek középiskolában

DOI-azonosító: 10.15476/ELTE.2020.201

A doktori iskola neve: Fizika Doktori Iskola

A doktori iskolán belüli doktori program neve: Fizika Tanítása Program

A témavezető neve és tudományos fokozata: Cynolter Gábor PhD

A témavezető munkahelye: MTA-ELTE Kutatócsoport

II. Nyilatkozatok

1. A doktori értekezés szerzőjeként

a) hozzájárulok, hogy a doktori fokozat megszerzését követően a doktori értekezésem és a tézisek nyilvánosságra kerüljenek az ELTE Digitális Intézményi Tudástárban. Felhatalmazom a Természettudományi kar Dékáni Hivatali Doktori, Habilitációs és Nemzetközi Ügyek Csoportjának ügyintézőjét, hogy az értekezést és a téziseket feltöltse az ELTE Digitális Intézményi Tudástárba, és ennek során kitöltse a feltöltéshez szükséges nyilatkozatokat.

b) kérem, hogy a mellékelt kérelemben részletezett szabadalmi, illetőleg oltalmi bejelentés közzétételéig a doktori értekezést ne bocsássák nyilvánosságra az Egyetemi Könyvtárban és az ELTE Digitális Intézményi Tudástárban;

c) kérem, hogy a nemzetbiztonsági okból minősített adatot tartalmazó doktori értekezést a minősítés (*dátum*)-ig tartó időtartama alatt ne bocsássák nyilvánosságra az Egyetemi Könyvtárban és az ELTE Digitális Intézményi Tudástárban;

d) kérem, hogy a mű kiadására vonatkozó mellékelt kiadó szerződésre tekintettel a doktori értekezést a könyv megjelenéséig ne bocsássák nyilvánosságra az Egyetemi Könyvtárban, és az ELTE Digitális Intézményi Tudástárban csak a könyv bibliográfiai adatait tegyék közzé. Ha a könyv a fokozatszerzést követően egy évig nem jelenik meg, hozzájárulok, hogy a doktori értekezésem és a tézisek nyilvánosságra kerüljenek az Egyetemi Könyvtárban és az ELTE Digitális Intézményi Tudástárban.

2. A doktori értekezés szerzőjeként kijelentem, hogy

a) az ELTE Digitális Intézményi Tudástárba feltöltendő doktori értekezés és a tézisek saját eredeti, önálló szellemi munkám és legjobb tudomásom szerint nem sértem vele senki szerzői jogait;

b) a doktori értekezés és a tézisek nyomtatott változatai és az elektronikus adathordozón benyújtott tartalmak (szöveg és ábrák) mindenben megegyeznek.

3. A doktori értekezés szerzőjeként hozzájárulok a doktori értekezés és a tézisek szövegének plágiumkereső adatbázisba helyezéséhez és plágiumellenőrző vizsgálatok lefuttatásához.

Kelt: Budapest, 2020. december 14.



.....
a doktori értekezés szerzőjének aláírása

*ELTE SZMSZ SZMR 12. sz. melléklet