

Doktori értekezés

**A diákok fizika iránti érdeklődésének felkeltése
űrszonda modell építés és
egyéb motiváló módszerek és programok segítségével.**

Hudoba György

Témavezető: Dr. Bérczi Szaniszló ny. egyetemi docens

**ELTE TTK Fizika Doktori Iskola
Vezető: Dr. Tél Tamás egyetemi tanár**

**Fizika Tanítása Doktori Program
Vezető: Dr. Tél Tamás egyetemi tanár**



**Eötvös Loránd Tudományegyetem
Természettudományi Kar**

2016.

Tartalomjegyzék

Bevezetés	3
1. A HUNVEYOR-4 robotszonda építő tanulói projekt.....	13
1.1 Bevezetés	13
1.2 A projekt módszer.....	15
1.3 A HUNVEYOR-4 projekt célkitűzései.....	17
1.4 A feladatkiírás.....	17
1.5 Az első lépések	18
1.6 Megvalósítás	18
1.6.1 A robotszonda felépítése és fejlődéstörténete.....	19
1.6.2 A robotszonda műszerei – fizikai mennyiségek és mérések	23
1.6.3 Terepgyakorlatok és mérések	30
1.6.4 Oktatási eredmények – a projekt kritériumok teljesülése, hallgatói dolgozatok	37
Hivatkozások	38
2. A fizikai jelenségek szemléltetése	40
2.1 Bevezetés	40
2.2 Mágneses konfigurációk vizsgálata	40
2.2.1 A mágnes-golyók	41
2.2.2 A mágneses mező láthatóvá tételének módjai	42
2.2.3 Néhány mágnes-golyó konfiguráció vizsgálata.....	43
2.3 Részecske sugárzás szemléletes vizsgálata.....	48
2.3.1 A radioaktivitás felfedezése.....	49
2.3.2 A földet érő részecskesugárzás	49
2.3.3 A részecskesugárzás detektálása.....	50
2.3.4 A részecskesugárzás szemléltetése és elemzési lehetőségei	51
Hivatkozások	55
3. Naprendszeren kívüli Föld-szerű bolygók detektálása	56
3.1 Bevezetés	56
3.2 A Naprendszeren kívüli bolygók keresésének néhány módszere	57
3.2.1 Közvetlen megfigyelés	57
3.2.2 Közvetett módszerek.....	64
3.3 Kidolgozott feladatok	71
3.4 Exobolygó átvonulás fénygörbe szimulációja táblázatkezelővel	89
3.4.1 A szimuláció alapgondolata.....	89
3.4.2 A program használata	90
Források	93

4. Az energiafogalom felmérése az egyetemi hallgatók körében	94
4.1 A felmérő lap ismertetése	94
4.2 A középiskolai felmérés összefoglalása	98
4.3 Az egyetemi hallgatók között történt felmérés ismertetése	98
4.3.1 Az értékelés módja és szempontjai	99
4.3.2 Célcsoportok	100
4.4 Az eredmények áttekintő értékelése	100
4.5 Megjegyzések, javaslatok	106
4.5.1 Egy, az energiateszt 4-es kérdésével kapcsolatos megjegyzés	107
4.5.2 Az energia fogalom kialakítása.....	107
4.5.3 Javaslat az energia fogalmának a hagyományostól eltérő kialakítására	109
Hivatkozások	111
Összefoglalás	112
Függelék.....	114
Köszönetnyilvánítás.....	116
A tézisek alapjául szolgáló publikációk.....	117
Summary	118
A CD melléklet tartalma	120

„A ma fizikája a holnap technikája.”
(ismeretlen szerző)

Bevezetés

A műszaki felsőoktatásban a fizika tanulmányok célja az, hogy a mérnöki szakma önálló gyakorlásához csakúgy, mint a mindennapokban való eligazodáshoz megbízható elvi alapokat adjon, valamint logikus gondolkodásra és érvelésre neveljen. Rámutasson mi az általános, hogy lehet a konkrét esetektől elvonatkoztatni, kialakítsa az absztrakt gondolkodásmód, a lényeglátás képességét.

A fizika tárgya

De mi is a fizika? Mint a legtöbb tudomány, így a fizika esetében sem tudunk teljesen precíz, mindenre kiterjedő, logikailag ellentmondásmentes definícióval szolgálni, csupán többé-kevésbé - gyakran történeti perspektívába való helyezéssel - körülírni. A fizika feladatát például megfogalmazhatjuk úgy is, hogy az anyag, energia, tér és idő alapvető törvényeinek felismerése és megértése. Ezeket a törvényeket azért szükséges megismernünk, hogy a műszaki feladatok megoldása során céljaink érdekében hasznosíthassuk azokat. Fizika alatt eredetileg a természet ismeretét értették (a „φύσις” görög szó, jelentése „természet”), mely az idők folyamán differenciálódott az élő rendszerek tudományára (biológia) és az élettelen rendszerek leírására, melyek a későbbiekben tovább specializálódtak. Az utóbbit például tovább osztották aszerint, hogy a folyamatban részt vevő anyag mibenléte megváltozott-e (kémia) vagy sem (fizika). Természetesen mindegyik tudományág idővel tovább differenciálódott.

Némi egyszerűsítéssel azt mondhatjuk tehát, hogy a fizika tárgya a tőlünk függetlenül létező, objektívnek tekintett élettelen természet és az abban végbemenő változások. Hétköznapi megfogalmazással élve a fizika azt vizsgálja, „hogyan működik” a természet. A természet jelenségei azonban komplex módon összefüggnek egymással, s tanulmányozásuk több diszciplína eszköztárával nem csak hogy lehetséges, de jobb megismerésük érdekében szükséges is. A besorolhatóság tehát nem egyértelmű: például a radioaktivitás nehezen osztható be csak a fizika, vagy csak a kémia kutatási körébe. A csillagászat is különálló tudományággá nőtte ki magát.

Ugyanakkor önálló, speciális területként megjelentek olyan tudományágak, mint biofizika, asztrofizika, kozmológia, űrkutatás, ... stb.

A fizika módszere

A fizika természettudomány, vagyis egyrészt a tapasztalatok értelmezéséhez nem keres, és nem használ irracionális, természetfeletti magyarázatokat, hanem természettörvények formájában keresi az okokat, másrészt tudományos módszereket használ. A fizikában tehát megfigyelünk, kísérletezünk, mérünk, összefüggéseket és racionális magyarázatokat keresünk, törvényeket állapítunk meg, modelleket állítunk fel, ellenőrizhető következtetéseket vonunk le, melyek igazolják az elméletet, vagy éppen cáfolják azt. Ez utóbbi esetben finomítjuk a modellt, vagy új elméletet dolgozunk ki, végül az igazolt megszerzett tudásunk hasznosítjuk. A tudományos modellel szemben támasztott követelmények: a megfigyelés pontosságán belül helyesen írja le a jelenségeket, és helyesen adja meg az eddig még nem vizsgált esetekre vonatkozó következtetéseket. A modell alkalmazhatóságát előre jelző képessége megerősíti.

A tudományos ismeret megszerzésének elemi lépése tehát a megfigyelés. A körülmények változtatásával újabb és újabb méréseket, azaz kísérleteket végzünk. A kísérletezés folyamán megállapítjuk, melyek a lényeges, melyek az elhanyagolható, s melyek azok a zavaró körülmények, amelyekről igyekeznünk kell megszabadulni, vagy hatásukat egyéb módon számításba venni. A mérési eredményekből (adatokból), melyeket gyakran grafikusán ábrázolunk, megkísérlünk modelleket alkotni, és azokból újabb ismereteket szerezni, következtetéseket levonni. Olyan szabályokat keresünk, melyeket természettörvényekként tudunk általánosítani. Az egyedi események közös okára, valamilyen általánosabban érvényes dologra való következtetést Ciceró nyomán indukciónak nevezzük. Az általánosból a konkrét esetre való következtetést, levezetést dedukciónak hívjuk. Alapvetően ezen eredmények alakítják és határozzák meg a világról kialakított képünket.

Kísérleti ellenőrzés nélkül minden elmélet csupán hipotézis és nem több. A hipotéziseket, hogy tudományos igazsággá váljanak, igazolni kell! Az igazolás egyetlen kritériuma az ellenőrizhető (vagyis a klasszikus felfogás szerint bármikor, bárki által

megismételhető) mérés, megfigyelés, kísérlet¹. (Az áltudomány sokszor itt érhető tetten. Csak hipotézisei vannak, ám azokat vitathatatlan tényekként tálalja.) Ha a kísérletek eredménye nem támasztja alá az elméletből levont következtetést, az még nem baj, attól az még tudományos eredmény. A leghíresebb példa erre Michelson kísérlete az éter kimutatására, mely minden erőfeszítés ellenére negatív eredménnyel zárult.

A tudósnak olykor/sokszor nincs igaza. Ezzel tisztában van, s kétségei eloszlatására nem csak olyan módszereket keres, melyek igazolják az elképzelését, hanem olyanokat is, melyekkel az elmélet megcáfolható. (Az áltudósnak ezzel szemben – legalábbis saját hite szerint – mindig mindenben igaza van, hiszen csak azokat az eredményeket veszi figyelembe, amelyek őt igazolják. Ha valaki mégis rácáfol, akkor különféle külső zavaró körülménnyel, gyakran összeesküvés elmélettel áll elő.) Ha a levezetés (dedukció) eredményeit minden megfigyelés és kísérlet igazolja, és semmilyen módon sem sikerül megcáfolni, azt mondjuk, hogy természettörvényt kaptunk. A természettörvény a jelenségek sokkal szélesebb körére érvényes, mint amiből levezettük.

Ismereteink gyarapodása szemléletváltozást eredményez

Általánosan, mindenre és minden körülmények között érvényes természettörvényről nem lehet beszélni. Ezt nem is várjuk el, csak azt, hogy egy adott jelenségkör, adott körülmények (feltételek) között a mérési pontosságon belül helyesen írjon le. Időnként előfordul, hogy több, különböző modellel is leírhatók a megfigyelési eredmények. Ilyen esetekben a lehető legegyszerűbb modellt választjuk. Nem szükségképpen a valósághoz közelebb álló modell adja a megfigyelésekkel való jobb egyezést. A ptolemaioszi (földközéppontú) rendszer 1500 éven keresztül kielégítő pontossággal adta meg a bolygók égbolton elfoglalt pillanatnyi pozícióját. Arisztarchosznak a valósághoz lényegesen közelebb álló, és a XVI. században Kopernikusz által felújított napközéppontú modelljét visszautasították, és pedig jogosan, mert egyrészt az előzőnél rosszabb eredményeket adott, másrészt a megfigyelésekkel nem lehetett alátámasztani a modelltől adódó azon következtetést, hogy a Föld mozgásának tükröződni kellene az

¹ A valóságban természetesen megfelelő ismeretek, felkészültség és technika is szükséges, bizonyos esetekben pedig a klasszikus értelemben vett kísérletek végzésére sincs is mód, pl. a csillagászatban, ami megfigyelő tudomány, hogy a kozmológiáról ne is beszéljünk. Ilyen esetekben más módon történik az elméletek igazolása.

égitestek éves elmozdulásában (parallaxis). Ezt csak a mérés technika fejlődésével, 1839-ben sikerült Besselnek kimutatnia. A modell pontosítása, nevezetesen az ideálisnak tekintett körpályák ellipszis pályákra való lecserélése Kepler érdeme (1609.). Ezek után már a valósághoz közelebbi modell nyert polgárjogot, mert ez szolgáltatta a pontosabb eredményt, amit a jóval később megtalált parallaxis végül megszilárdított. A természet egyre jobb megismerésének következő lépcsőfokán Kepler minden empirikus (vagyis a tapasztalatból leszűrt) következtetése levezethető, sőt pontosítható volt Newton törvényeiből, vagyis nem csak a hogyanra, a miértre is választ lehetett adni.

A tudomány és a mérés technika fejlődése során kiderülhet, hogy az elmélet téves, körvonalazódnak alkalmazhatóságának határai, vagy az is kiderülhet, hogy a talált szabályszerűség csak véletlen egybeesés eredménye. Ilyenkor újabb, a korábbinál általánosabb modell kidolgozása válhat szükségessé, mely a jelenségek szélesebb körét is helyesen írja le, s az előzőt speciális esetként magában foglalja. A természet egyre alaposabb megismerése jelenti a fizika tudományának fejlődését. Egy-egy konkrét esetben ez jelentheti például azt, hogy a korábban általánosan érvényesnek gondolt elmélet érvényességi körét meg lehet határozni, mi által az egy új, átfogóbb elmélet speciális esetévé válik. Máskor kiderülhet, hogy egész más szemszögből kell megragadni a jelenségeket, s forradalmian új gondolatokra van szükség. Ezek az ún. paradigmaváltások, mint például a földközéppontú világtépről a napközéppontúra való áttérés, az anyag atomos szerkezetének, vagy az energia apró adagokban való átadásának felismerése mindig megrázóan hat a tudományos közösségre, esetleg a média hatására a hétköznapi emberekre is.

Miért nehéz tantárgy a fizika?

A görögök nagy érdeme az a felismerés, hogy a törvények felírásához idealizálás, elvonatkoztatás, absztrakció kell. (Persze mindebből nem szabad arra a következtetésre jutni, hogy a tudomány olyannal foglalkozik, ami nem is létezik. Épp hogy még ennél is tovább megy, a valóság egy jól körülhatárolt, és zavaró körülményektől megtisztított részét egy matematikailag kezelhető, azzal analóg módon viselkedő – a matematika nyelvén szólva azzal izomorf - absztrakt modellre képezi le. A tudomány feladata ezen modell megalkotása és vizsgálata.) Galileo Galilei (1564-1642) vallotta, hogy a természet törvényei a matematika nyelvén íródtak, a való világ számviszonyok által

meghatározott, és a tudományos megismerésnek két alapköve van; az értelem és a megfigyelés. A tudományos megismerés e módszerét ő használta először. Az addigi, pusztán bölcsekedések helyett ezzel vált a fizika valódi tudománnyá.

A tudomány fejlődéstörténete azt mutatja, a legnehezebb lépés maga az absztrakció, a fogalomalkotás, azaz a vizsgálat tárgyának, vagy a jelenségnek olyan leegyszerűsítése, amely annak alapvető jellegét nem változtatja meg, ugyanakkor kvantitatív tárgyalásra alkalmas. Csak keveseknek adatott meg, hogy egy márványtömbbe belelássák Dávidot, és csak egy valakinek sikerült belőle kiszabadítani. Hasonlóképpen; új összefüggések felismerése nagyon nehéz feladat, és ez csak kivételes képességű tudósoknak adatott meg. (Tiszteletünk jeléül nevüket törvények, összefüggések, vagy mértékegységek formájában őrizzük.)

A fizikaoktatásból sajnálatos módon szinte teljesen kiszorultak a kísérletek, melyek révén a tanulók számos megfigyelési tapasztalatra tehetnének szert, s ezen tapasztalatok összegzéseként módjuk nyílna befogadni és mihez kötni az absztrakt fizikai fogalmakat. Ugyanakkor e szármalmas helyzet mintegy túlkompenzálásaként létezik olyan „felfedezett” pedagógiai irányzat, mely szerint tanulókísérletek révén a diákok majd maguk fogják felismerni a természettörvényeket. Ez egyrészt merő illúzió, másrészt a tudomány működésének totális félreismerése, valójában a diákok félrevezetése.

A természet jelenségei között való eligazodáshoz, a sikeres műszaki munkavégzéshez ismerni kell a különböző fizikai mennyiségek évszázadok alatt kialakult és letisztult fogalmát (absztrakciókat), definíciókat és törvényeket. A fizika nehézsége azonban itt még nem ér véget, mert a következő lépcsőfokon a konkrét kísérleti tapasztalatok helyett már ezekkel a fogalmakkal kell dolgozni. A felsőoktatásban elvárás, hogy a beérkező hallgatók rendelkezzenek bizonyos fizikai fogalmakkal, és az absztrakt gondolkodás képességével. Míg ez az elvárás egy-két évtizeddel ezelőtt többé-kevésbé teljesült, a tapasztalataim szerint manapság illuzórikus.

Miért szükséges a fizika oktatása?

„A ma fizikája a holnap technikája.” mondják. Valóban; a modern technikai és információs társadalom eszközeinek működése olyan alapokon nyugszik, melyek a

fizika tárgykörébe tartoznak, s azok alapos ismerete nélkül nem is érthetők meg. A hétköznapi életben bárhova nézünk, a fizika törvényeit látjuk érvényesülni.

Lenyomjuk a kilincset, kinyitjuk az ajtót, ablakot: mozgással, erővel, nyomatékokkal, súrlódással – mind megannyi absztrakt fizikai fogalom - találkozunk. Felkattintjuk a villany-kapcsolót: a mechanikai jelenségeken túl (mint erő, nyomaték, rugalmasság) az elektromosság, hőtan, elektromágneses sugárzás is szerephez jutnak. Bekapcsoljuk a számítógépet, s már a felsorolás is oldalakat tenne ki. Természetesen megtaláljuk az egyszerű mechanikai jelenségeket, a háttértároló forgó mozgását, tehetetlenségi és impulzusnyomatékkal (miért megy tönkre, ha forgás közben billegtetjük), a félvezető alkatrészek esetében a kvantummechanikát, szilárdtestfizikát, a CD lejátszóban lézert, optikát, sugárzást, interferenciát, ...stb. A processzor működése eszünkbe juttatja, milyen árat kell fizetnünk energiában a gyorsabb működésért (a rezgés energiája a frekvencia és az amplitúdó négyzetével arányos, és mi egyre gyorsabb gépet szeretnénk), miért kell, és hogyan lehet hűteni (hőtan, entrópia, áramlástan), hogy lehet mindezt kézben tartani. A gyártásáról kristályszerkezet, diffúzió, az alkatrészsűrűséget korlátozó tényezők, vákuumtechnika, tisztatér-technika. A képernyőről fény, gerjesztés, sugárzás, folyadékkristályok, hullámok, polarizáció. Belépünk a hálózatba, s az adatok áramlását meghatározza a fémes vezetés, a mikrohullámú elektromágneses sugárzás (WiFi), alkalmanként műholdas kapcsolat (körmozgás, ellipszis pálya, Kepler-törvények, gravitáció, rakéta: impulzusmegmaradás törvénye, ...). A gerinchálózat az optikai adatátvitelt (üvegszáloptika, fényszóródás, reflexió, lézerek, detektorok, érzékenység, zajok, hullámvezetés...) teszi lehetővé, és eszünkbe juttatja még mindazt, ami korlátozza az adatátvitel sávszélességét (diszperzió, és egyéb hibaforrások...), melyek mind-mind a természetben működő fizikai törvények ismeretében érthetők meg, s mindezek ismerete és figyelembevétele szükséges az eredményes és hatékony mérnöki problémamegoldás során. Autónkban navigációs eszközként GPS-t használunk, hogy a kívánt helyre vezessen bennünket? A rendszerben mind a speciális, mind az általános relativitáselmélet eredményit figyelembe kell venni.

Információforrások használata

A szakirodalom, és egyéb források használata a tanulás, felkészülés során hasznos lehet, azonban használatuk során megfelelő elővigyázatosság szükséges. Elsősorban az

Internetet emelem ki, ahol sok értékes, de nagyon sok megbízhatatlan és téves információ is kering. A Wikipédiát, a szabad enciklopédiát például bárki szerkesztheti, következésképp közzé teheti saját gondolatait, magán véleményét is. Bár az internetes közösségnek van némi önkontrollja, a fenti okokból hivatalos, fenntartás nélküli referenciának nem fogadható el. A megbízhatóság megállapítása általában nem, vagy csak nagyon nehezen dönthető el, különösen a témával még csak ismerkedők számára. Már részben a hiteles források kiválasztása érdekében is szükség van az oktatóra, s nem szabad a tanulót teljesen magára hagyni a tanulásban, a téma feldolgozásában. (Másképpen az oktató személyiségével egyben mintát ad, nevel is, de ez a témakör nem tárgya a jelen dolgozatnak.)

A modern okoseszközök és szimulációs programok hasznos segédeszközök, de véleményem szerint nem helyettesíthetik az elmélyült tanulást, a saját tapasztalat szerzését. Egy szimulációt, egy bonyolultabb számításokat vagy elemzést elvégző programot különféle paraméterekkel futtatva hatékonyan (gyorsan) lehet alkalmazni, de mindez csak akkor lenne szabad használni, ha a feladatot a diák már önmaga is el tudná végezni, igaz verejtékes munkával. Másképpen csak szórakoztató, jobb esetben kontroll – az eredmény ellenőrzése - nélküli munkaeszköz marad.

A mindennapi életben a hírközlő csatornákon (mint pl. TV, rádió, napilapok, magazinok, népszerűsítő és szórakoztató kiadványok ... stb.) kaotikusan ránk zúduló információ-övényben sok esetben a tények és a sejtések, valóság és képtelenség úgy összekeverednek, hogy nem is nagyon lehet azokat szétválasztani, és arra kényszerülünk, hogy higgyünk, vagy ne higgyünk a látottaknak, hallottaknak. Az igazságtartalom eldöntése ránk hárul. A helyes döntéshez megbízható alapok, kritikus gondolkodás, megfelelő szemlélet szükséges.

A fizikaoktatás jelenlegi helyzete

A XXI. század elején sajátos ellentmondásnak lehetünk tanúi. Míg mindennapi életünkben egyre kiszolgáltatottabbakká válunk a technikának (elektromosság, számítógép, internet, okostelefon, ... stb.), ugyanakkor a mérnöki és kutatói életpályák iránti érdeklődés látványosan csökken, a fiatalok hátat fordítanak a műszaki és a természettudományi pályáknak. A természettudományok iránti érdeklődés ezen

össztársadalmi szinten megnyilvánuló hanyatlása nem csupán „hungaricum”, hanem világméretű jelenség. Pedig a XX. század eredményeinek továbbviteléhez, a fejlődés fenntartásához és megújulásához a lassan kiöregedő korosztálytól a fiataloknak fokozatosan át kell(ene) venniük a stafétabotot.

A technikai társadalom – mint neve is mutatja – a technika széles körű alkalmazására épül. A technika alapját pedig a fizika képezi. Ezt felismerve szerepel(t) a műszaki BSc képzés alapozó tantárgyai között a Fizika. Az elmúlt egy-két évtizedben azonban az „észszerúsítés”-nek nevezett, de valójában az oktatás költségeinek csökkentésére irányuló folyamat során a tantárgyi tematika fokozatosan erodálódott. A villamosmérnököket képező intézetünkben, a néhány évtizeddel ezelőtt még három félévben, heti öt órában oktatott fizika óraszama heti három órára és két félévre csökkent, véglegesen megszűnt a laboratóriumi mérés, amit az előadások és a számolási gyakorlatok óraszámának fokozatos, és szisztematikus csökkentése követett. Az utóbbi években pedig a két félévben, heti másfél órányi előadásra zsugorodott másod évre került fizikából – amely így végleg elveszítette alapozó funkcióját - már a számolási gyakorlat is eltűnt.² A tantárgy ilyen mérvű megcsönkítése, a fizikaoktatás ellehetetlenítése általam fel nem fogható, mert ugyan minek is egy mérnök embernek valamit kiszámolni tudni? Miért is kellene a természet működését szabályozó, a fizika által felismert sziklaszilárd alapelveket megismerni, melyek irányíthatnák a villamosmérnökök tervező/alkotó munkáját? Mindezek következményeként a hallgatók a fizika iránt alulmotiváltak. A bajt tetézi, hogy a középiskolában megszerzett alapképzettségük még nagy jóindulattal sem mondható megfelelőnek, igen szerény alapokkal, gyenge matematika és fizika ismeretekkel, ennek következtében az absztrakciós képesség hiányával érkeznek a felsőoktatásba.

A dolgozat célja

Jelen dolgozat célját tömören úgy fogalmazhatom meg, hogy megmutassam, milyen módokon próbálok a fentiekben ecsetelt állapotokon a magam eszközeivel és lehetőségeivel javítani.

² A jó hír az, hogy a 2015/16-os tanévtől egy órányi számolási gyakorlat ismét visszakerült a villamosmérnökök tantervébe, viszont a második félévben vizsgázni már nem kell.

Doktori dolgozatomban bemutatom azokat a témákat és módszereket, amelyekkel a BSC szintű, villamosmérnök szakon tanuló egyetemi hallgatókban több mint egy évtizedre visszamenőleg egy űrszonda modell építése révén közvetlenül, illetve indirekt módon megpróbálom felkelteni és ébren tartani a fizika iránti érdeklődést. A projekt öntevékenységgel motivált tanulás révén alkalmas a hallgatók fizikai ismereteinek elmélyítésére. Az előadásaim színesítésére kidolgozott demonstrációs kísérleteim közül kettőt részletesen ismertetek, bemutatom, a diákok alapismereteinek és az oktatási munkám eredményességének vizsgálatára vonatkozó felmérés eredményeit, továbbá felvillantom a tehetséggondozás érdekében, végzett tevékenységem.

A napjainkra már-már rutinszerűvé váló űrkutatás még mindig érdeklődésre tarthat számot, főként, ha egy-egy speciális űreszközre vagy eseményre a média is aktívan reagál. Ezt figyelembe véve, a fizikai ismeretek szerzésére való motiváció egyik eszközeként kidolgoztam, és több mint egy évtizede vezetem a HUNVEYOR-4 elnevezésű „űrszonda” (egy internetről vezérelhető mérési adat gyűjtő robot) építő programot. A program egy olyan oktatási kísérlet, amely a tervezési és építési feladatokon keresztül a benne résztvevő hallgatók fizika ismereteinek gyarapítását és elmélyítését is szolgálja, valamint ezeken túlmenően tudománynpszerűsítő feladatokat is ellát. Természetesen senki nem gondolja komolyan, hogy ezt az űrszondát kilőjük az űrbe. Nem az a cél, hogy egy kész és tartósan működő berendezés jöjjön létre! A valódi cél maga az építési folyamat, pontosabban az építés közbeni tanulás és tapasztalatszerzés, akár a szonda új eszközökkel való bővítése, akár a korábban már megépített egységeknek, a projektbe újonnan belépő hallgatók általi újratervezése és megépítése révén. Ennek megfelelően maga a HUNVEYOR-4 űrszonda modell az évek során sokat változott, és jelenleg is folyamatosan alakul, de továbbra is a fentiekben megfogalmazott oktatási célokat szolgálja. Ez irányú tevékenységemről és a projekt előrehaladásáról számos fórumon beszámoltam.

A szonda fizikai környezetének tágabb és alaposabb vizsgálatát szolgálják a mobil robotok. Ennek fényében a HUNVEYOR projekt szorosan kapcsolódik a már mintegy tíz éve folyó „Magyarok a Marson - Magyar Alkalmazott Mérnöki Tudományok” elnevezésű robotépítő versenyhez. A rendezvénysorozatnak három esetben is társszervezője voltam, és számos hallgatót buzdítottam a versenyen való részvételre.

A fizika iránti érdeklődés felkeltését illetve éberem tartását szolgálja még, hogy az előadásaimon a fizika alapfogalmainak jobb megértése és a gyakorlatban való alkalmazhatósága érdekében a lehetőségeimhez képest igyekeztem, és a jövőben is igyekszem szemléltetni az elhangzottakat. Az órai előadások életszerűbbé, színesebbé és emlékezetesebbé tételére újszerű demonstrációs kísérleteket dolgoztam ki, melyek közül a dolgozatban kettőt ismertetek. Az egyik a különböző, stabil és instabil mágnesgolyó konfigurációk vizsgálata egy, a konfigurációk mágneses erővonalait láthatóvá tevő eszköz használatával. A másik a részecskesugárzás újszerű szemléltetésével és értékelési módjával kapcsolatos, melyet olyan mérésen keresztül mutatok be, amely a földi légkör kozmikus sugárzás elleni védő szerepét is nyilvánvalóvá teszi.

Az Eötvös Loránd Tudományegyetemen folyó doktori képzés keretében összeállítottak egy 15+1 kérdést tartalmazó kérdőívet, mellyel azt kívánták felmérni országos szinten, hogy a végzős középiskolások körében milyen kép alakult ki a fizika egyik legalapvetőbb és aktuális fogalmáról, az energiáról. Kissé módosított formában én is csatlakoztam a felméréshez. Ezt a tesztet több éven keresztül kitöltöttem mind a villamosmérnök, mint az informatikus és menedzser szakon tanuló hallgatóimmal. Az oktatásom hatékonyságának vizsgálata céljából a tesztet kitöltöttem a fizika kurzus kezdetén és annak befejezése után is, valamint összehasonlításként néhány, már húsz éve gyakorló mérnökként dolgozó egykori diákkal is. Dolgozatomban részletesen ismertetem a vizsgálat módját és eredményét.

A fentiekén túlmenően lehetőségeim szerint részt vállalom, esetenként mint irányító, különféle rendezvények (pl. középiskolai fizika versenyek, ismeretterjesztő előadások, konferenciák) szervezésében. Rendszeresen tartok ismeretterjesztő előadásokat, távcsöves bemutatókat, foglalkozom tehetséggondozással, irányítom a Terkán Lajos Bemutató Csillagvizsgálót és vezetem az ott működő, tehetséges fiatalokból álló szakkört, amelyek mind alkalmat nyújtanak a résztvevők számára további fizikai és csillagászati ismeretek megszerzésére. A Földön kívüli élet és intelligencia kutatásának első lépéseként a földszerű bolygók keresése jelenleg aktuális tudományos kutatási téma, ami folyamatosan erős érdeklődést vált ki, még a hétköznapi emberekben is. Erre alapozva kidolgoztam, és a dolgozatban bemutatom azt az áttekintő, háttérismereteket is tartalmazó oktató feladatsort és számítógépes szimulációt, melyek szemléletesen érzékeltetik a Föld-szerű bolygók kimutathatóságának nehézségeit.

Amit olvasok, azt
elfelejtem.
Amit látok, azt
megjegyzem,
Amit csinálok, azt
megértem.

(Kínai bölcsesség)

1. A HUNVEYOR-4 robotszonda építő tanulói projekt



1.1 ábra A HUNVEYOR-4 űrszonda modell

1.1 Bevezetés

Amint a dolgozat bevezető részében a fizikaoktatás jelenlegi helyzetének elemzésekor bemutattam, elsőként a fizika laboratóriumi mérések szűntek meg. Pontosan az, amely során a hallgatók valódi, saját tapasztalatot szerezhettek volna a fizikai mennyiségekről, szembesülhettek volna a mérések gondos kivitelezésénél fellépő nehézségekről, a nehézségek áthidalásának lehetőségeiről, a mérések dokumentálásáról (jegyzőkönyv készítés), ...stb. Ez vezetett arra a meggyőződésre, hogy a megszűnt tantárgy pótlására egy projektet kell indítani. Ehhez első lépésként keresni kellett egy, a

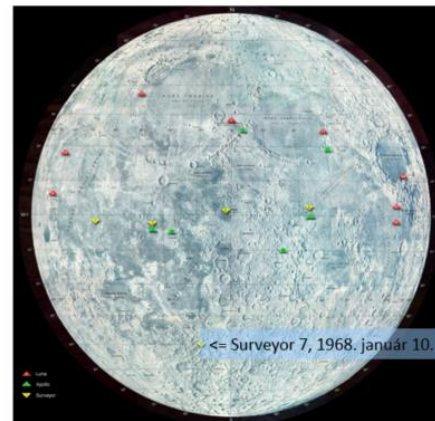
hallgatók számára vonzó, érdekes témát. Ezt egy űrszonda modell építésében találtam meg.

Bérczi Szaniszlóban (ELTE TTK Technika Tanszék Kozmikus Anyagokat Vizsgáló Űrkutató Csoport) 1997 őszén megfogalmazódott egy „Magyar Kísérleti Gyakorló Űrszonda” építésének terve [1],[2],[3], amely a HUNVEYOR nevet kapta. Az elnevezés a „Hungarian UNiversity SurVEYOR” angol megnevezésből alkotott műszó. Az első két tag jelentése magától értetődik, az utolsó tag pedig azt jelzi, hogy mintául az ember Holdra szállását előkészítő amerikai SURVEYOR-7 holdkutató robotszonda szolgált (1.2 ábra).



Surveyor-7

Kilövés: 1968. január 7., 06:30:00 UTC
Leszállás: 1968. január 10., 01:05:36 UTC
Hordozórakéta: Atlas-Centaur
Repülési idő: 65 h
Pozíció: 41.01°S 348.59°E
Leszálló tömeg: 305.7 kg



1.2 ábra A HUNVEYOR projekt mintájául szolgáló Surveyor-7 holdkutató űrszonda

A Hunveyor-1, a Surveyor-7-hez hasonlóan fedélzeti kamerával, valamint teleszkópos karokon elhelyezett mérőműszerekkel volt felszerelve, melyhez később terepasztal, kisautó és szimulátor is készült. [4], [5],[6] Az ötlet annyira sikeresnek bizonyult, hogy ezt követően – természetesen a helyi sajtóságokat figyelembe véve – hasonló munka indult el Pécsen a Janus Pannonius Tudományegyetemen (Hunveyor-2), valamint Szombathelyen, a Berzsényi Dániel Tanárképző Főiskolán (Hunveyor-3). [7],[8] Ehhez a sikeres „mozgalomhoz” való csatlakozásban láttam a tanulói projekt indításának lehetőségét, melyre az ötletgazdától a Hunveyor-4 megjelölést kaptam. Az

elkövetkezendő években a nálunk folyó munkáról több közös publikációban is beszámoltunk.³ [9],[10],[11] A HUNVEYOR-4 mint mérőrobot, szorosan kapcsolódik a mintegy tíz éve folyó „Magyarok a Marson - Magyar Alkalmazott Mérnöki Tudományok” elnevezésű robotépítő versenyhez, melyen több, a projektben dolgozó hallgatóm is részt vett.

1.2 A projekt módszer

A „projekt” elnevezés a latin „projectum” szóból ered, ami tervet, tervezetet, javaslatot jelent. A projektoktatás, mint módszer, több száz évre nyúlik vissza. 1671-ben a párizsi építészeti akadémián (Académie Royale d'Architecture) nevezték projektmunkának a diákok különböző feladatait. A XIX. században Német közvetítéssel Amerikában is megjelent építészeti, mezőgazdasági, és művészeti képzésekben, valamint az általánosan képző intézményekben is. John Dewey (filozófus és oktatási reformer, 1896. Chicago: Kísérleti Elemi Iskola) az alapelvet az alábbiakban fogalmazta meg: Az iskolának az életre kell felkészítenie, a tanulók képességeit úgy kell fejleszteni, hogy az élet minden területén helyt tudjanak állni. Ennek érdekében:

- a tanulásnak a személyes tapasztalaton kell alapulnia
- a tanításnak figyelembe kell vennie a tanulók fejlődési szükségleteit
- a tanulónak aktívan részt kell vennie saját tanulási folyamatainak alakításában
- a tanulót a közösség ügyeiben való aktív részvételre, a közösségért felelősséget érző polgárrá kell nevelni

A fenti gondolatoknak a mérnöki képzésben való alkalmazását illetően a Párizsban (1829), Karlsruheban (1833), Zürichben (1854) működő egyetemek érdemelnek említést. Az USA-ban 1957-ben bevezették a PBT (Project-Based Teaching) rendszerű, vagyis a projekt-alapú és projekt-orientált oktatási formát, melyet – visszakerülve Európába - több ország (pl. Dánia) is átvett. Az elterjedés fő oka az akkoriban népszerűvé vált új filozófiai irányzat, a pragmatizmus elveivel való közös nézet volt. A következőkben az irodalom alapján [12],[13],[14],[15],[16] tömören összefoglalom a projektmódszer jellegzetességeit, a hagyományos oktatással szembeni előnyeit, és alkalmazhatóságának kritériumait.

³ Az évek során az intézet többször nevet cserélt. A projekt indítás évében aktuális megnevezése: Budapesti Műszaki Főiskola, Kandó Kálmán Főiskolai Kar, Számítógéptechnikai Intézete volt.

A projektmódszer jellegzetességei:

- a projekt didaktikai hármasság alapelve: átélés – ismeretszerzés – megértés
- a módszer a tanulók érdeklődésére, szükségleteire és a közös tevékenységre épít
- a módszer alkalmazásával kilépünk a hagyományos időbeosztásból és tantárgyi keretektől.
- nem a pedagógus adja át az ismereteket, hanem a tanulók szerzik meg azokat a tevékenységek során
- a projekt megvalósítása során a hangsúly az együttes munkálkodáson, egymás segítésén, elfogadásán, a kommunikációs készségek és technikák elsajátításán van

A projektmódszer számos előnnyel rendelkezik, úgymint:

- a tanulók kezdeményező, aktív szerephez jutnak, saját érdeklődésük vezeti őket, így a motiváció igen erős
- fejleszti a kommunikációs és szociális képességeket, a kreativitást, az ismeretszerzési képességet, a problémamegoldó és analitikus gondolkodást, az önállóságot, a kooperációt, a tervezést, az alkalmazkodást, az időbeosztást, az információk megosztását
- az ismeretek, jártasságok, szokások elsajátítását indirekt úton biztosítja
- a diákok saját képességeiknek megfelelően tudnak részt venni egy-egy komplex probléma megoldásában
- konkrét, hasznosítható, gyakorlati tudást nyújt
- lehetőség nyílik újfajta tanár-diák kapcsolat kialakítására
- örömteli, stressz-mentes együttműködést biztosít
- megvalósul az egymástól történő tanulás elve

Végül a projekt oktatás kritériumai:

- a kiindulópont a hallgatók problémafelvető kérdése legyen, a tervezés közösen történjék
- a projekt megoldása a tevékenységen keresztül kapcsolódjon a valóságos helyzetekhez
- adjon módot mind egyéni, mind csoport munkára
- kidolgozása összefüggő, hosszabb időtartamra nyúljon el
- a cél az iskolán kívüli helyzet megismerésére vagy megváltoztatására vonatkozzék
- interdiszciplinaritás jellemezze
- az oktatók és a hallgatók egyenrangú, ám különböző kompetenciákkal rendelkező partnerekként dolgozzanak együtt.
- a hallgatók önállóan döntsenek, és legyenek felelősek saját döntéseikért
- az oktató vonuljon vissza stimuláló, szervező, tanácsadó funkcióba
- a hallgatók közötti kapcsolatok erősek, kommunikatívak legyenek

1.3 A HUNVEYOR-4 projekt célkitűzései

„A Föld környezetét végleg elhagyó űreszközöket űrszondáknak, vagy bolygóközi szondáknak nevezzük. Céljuk a Naprendszer égitesteinek megközelítése és helyszíni vizsgálata, illetve a bolygóközi tér tanulmányozása.” [17]

Mint azt a bevezetőben már említettem, az sosem állt szándékomban, hogy a HUNVEYOR-4 elhagyja a Földet. Célként azt tűztem ki, hogy a hallgatók számára hosszú távra biztosítsak egy vonzó, értelmes és hangulatos, öntevékenységet, önálló, saját kísérleti munkát igénylő keretprogramot, amely egyben lehetőséget biztosít a mérnöki készségek (tervezés, szervezés és kivitelezés) gyakorlására, kibontakoztatására, a legújabb technikák és technológiák, s nem utolsósorban a fizika alaposabb megismerésére. A résztvevők a projekt eredményeit mutassák be például Tudományos Diákköri tevékenység (TDK) keretében, valamint a tehetségesebb és kitartóbb hallgatók esetén akár diplomamunkák is születhessenek. A programban való részvétel szolgáljon referenciaként a végzett diákok számára, növelje a hallgatók versenyképességét a munkaerőpiacon, s nem utolsósorban mutassák meg, hogy a mai technikával már akár diákok is képesek egy 1960-as évekbeli űrszonda képességeit elérő szerkezetet konstruálni.

1.4 A feladatkiírás

A feladat kiírása ezek után a következőképp hangzott:

„Képzeljük el, hogy egy Földön kívüli égitestre (Holdra, Marsra, a Jupiter, vagy akár a Szaturnusz egyik holdjára) kutató űrszondát küldünk, melynek feladata egy jövőbeli kolónia megalapításának előkészítése. Készítsünk egy ilyen távolról vezérelhető mérési adatgyűjtő robotszondát! A korral haladva - a szonda legyen elérhető az Internetről is!

A fenti követelményeknek megfelelően a megoldandó főbb feladatok:

- az űrszonda fém tartóvázának elkészítése
- különböző műszermodulok építése
- a szonda műszer-együttesének vezérlése
- mérési adatok gyűjtése, tárolása, továbbítása, feldolgozása
- egyéb kiegészítő és kiszolgáló elektronikus és mechanikus elemek készítése

- *a szonda energiaellátásának biztosítása*
- *kommunikáció a „földi irányító központtal”*
- *a szonda külvilág számára való elérhetőségének biztosítása”*

1.5 Az első lépések

A projekt meghirdetése eleinte semmilyen érdeklődést sem váltott ki a hallgatók körében, pedig Intézetünk fő profilja a villamosmérnök képzés, így a szonda tartóvázának egyszerű elkészítésén kívül a fenti feladatok jól illeszkednek a diákokkal szemben támasztott követelményekhez. Fél évnyi várakozás után úgy gondoltam, ha a mechanikát már készen találjuk, akkor a többi feladat már vonzóbbá válik, ezért gépészmérnök kollégánk, Sasvári Gábor révén elkészült a remélt jövőbeli szonda alumínium vázszerkezete (1.3 ábra), amit az ismételt feladatkiírással együtt közszemlére bocsátottam a diákok számára. Az elgondolás helyesnek bizonyult, így már hamarosan több hallgató is érdeklődését fejezte ki a projekt iránt.



1.3 ábra A HUNVEYOR-4 alumínium vázszerkezete, Sasvári Gábor és a projektben résztvevő első két hallgató

1.6 Megvalósítás

A szonda építése a tervezéstől a megvalósulásig a fentiekben ismertetett projekt módszer elveinek megfelelően történik. A szonda építése összefüggő, hosszú, immár másfél évtizednyi időtartamot ölel fel. Vannak időszakok, mikor csak egy, de van, mikor

több hallgató is dolgozik egyszerre a projekten. A hallgatók különböző képességűek, mindegyik a számára legérdekesebb, egyéniségéhez, érdeklődéséhez és felkészültségéhez legjobban illő feladatot választ magának.

1.6.1 A robotszonda felépítése és fejlődéstörténete

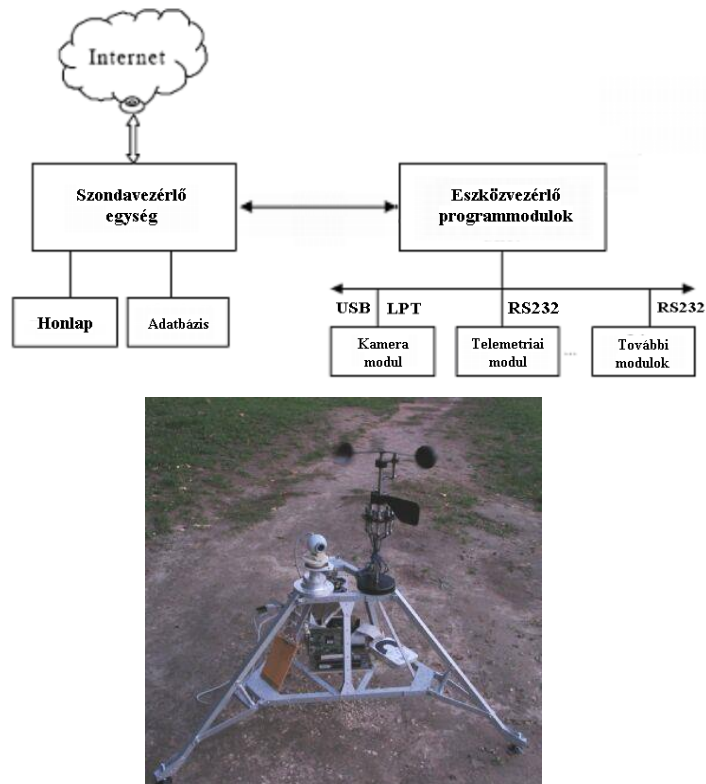
A korábbiakban ismertetett feladatkiírás szerinti robotszonda megépítése komplex feladat. Tartalmaz mechanikus alkotóelemeket, mint maga a szonda váza, de szükség van még egyéb manipulátorokra és pozicionáló elemekre is. Szükség van elektronikára, különféle vezérlőkre és interfészekre, valamint olyan hardver elemek, érzékelők, detektorok készítésére, melyek a szonda környezetéből különböző fizikai mennyiségek mérése révén adatokat szolgáltatnak. Bár mintaként a Surveyor-7 holdkutató szonda szolgált, a projekt során lényegesen kibővültek a funkciói, mint pl. szélesség és szélirány mérés, ami a Holdon ugyan nem, de más, légkörrel rendelkező égitesten hasznos. Hasonlóképp funkcióbővítés az internetes kommunikáció is, ami az 1960-as években még nem is létezett. További bővítést jelent, hogy a szonda egy mobil adatgyűjtő egységgel is kiegészült. Megemlíteném még, hogy a kutatások során nem csak a talaj közeli vizsgálatok érdekesek, ezért elindítottam a „Hunballoon” alprojektet. Ennek kapcsán eddig két magaslégköri meteorológiai ballont eresztettünk fel. Az egyik több mint 37 km-es magasságot ért el, miközben telemetriai és GPS pozíció adatokat, valamint fényképeket sugárzott le.

A HUNVEYOR-4 első megvalósítása egy PC alaplap köré épült, és annak perifériáit használta az egyes eszközökkel való kommunikálásra.

Konkrétan:

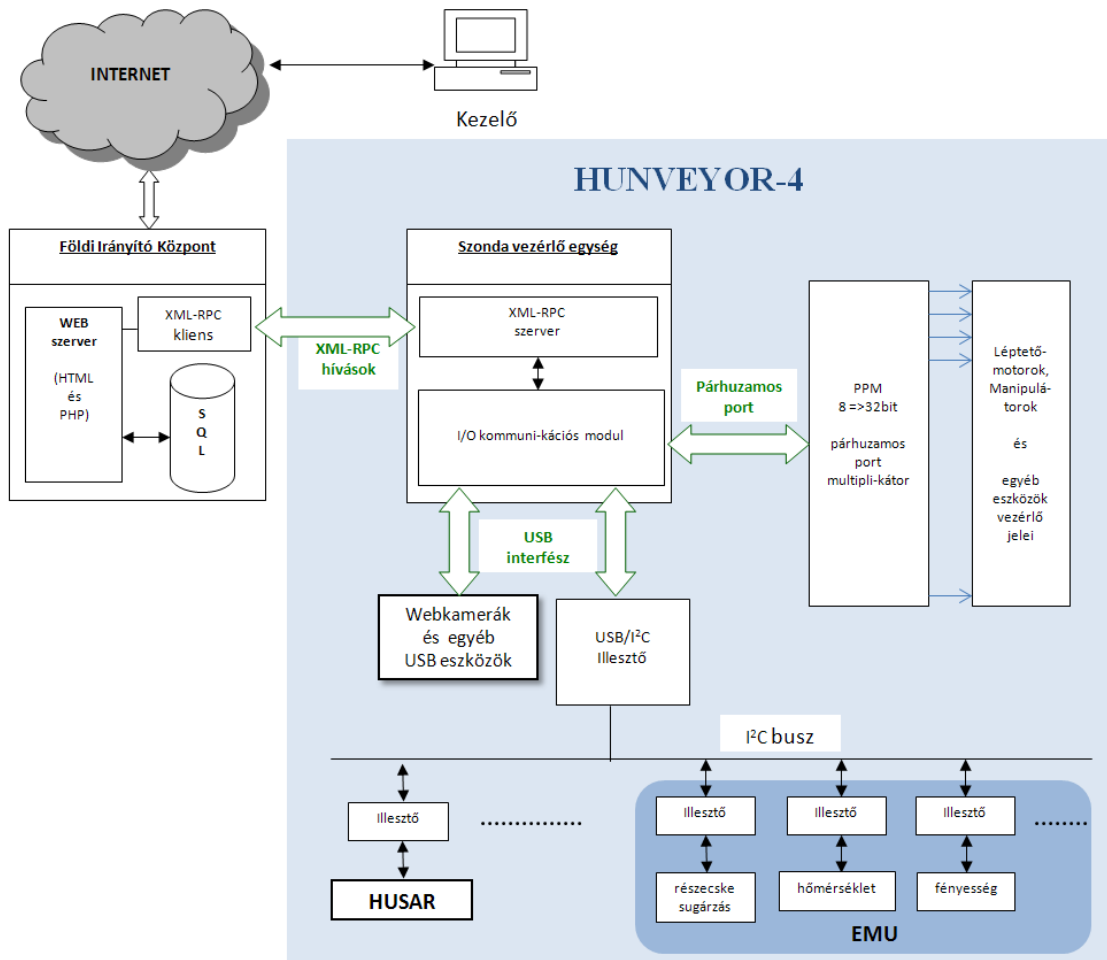
- USB port – a fedélzeti webkamera számára
- soros port – a meteorológiai állomás számára
- nyomtató port – a kamera forgató motor vezérlésére

A rendszer további bővíthetősége ezzel tulajdonképpen le is zárult. A továbblépéshez tanulmány szinten előjött még a CAN busz (Controller Area Network) alkalmazása, de ennek tényleges megvalósítására sosem került sor. A szonda fejlődése más irányt vett, amit később ismertetek.



1.4 ábra A HUNVEYOR-4 első megvalósítása

A rendszer blokkvázlatát és tényleges megvalósítását az 1.4 ábra mutatja. A képen jól felismerhető a PC alaplap, a tápegység, a merevlemez, a forgatható webkamera valamint a meteorológiai állomás - a „szélkakas”, amely szélesség, szélirány és hőmérséklet mérést tett lehetővé. Szoftver vonatkozásban minden program a szondán levő alaplapon futott, úgymint a szondát működtető Debian Linux operációs rendszer, a távoli elérést biztosító Apache webszerver, a webes felhasználói kezelőfelület előállítására szolgáló PHP programok, valamint az adminisztráció és az adatgyűjtés részére szükséges PostgreSQL adatbázis. Ennek a megoldásnak megvolt az a nagy előnye, hogy a szonda mobil, könnyen bemutatható, az IP címek egyeztetése után bármely számítógépről hálózaton összekötve egy böngésző segítségével közvetlenül elérhető, működése demonstrálható. A HUNVEYOR-4 a fentiekben felvázolt felépítésében megbízhatóan működött ugyan, de az újabb, a későbbiekben tervezett és megépített mérőeszközök és manipulátorok rendszerbe illesztése korlátokba ütközött volna, valamint terepen nem volt használható. Ezen korlátok mind hardver, mind szoftver oldalról jelentkeztek, melyek kiküszöbölése érdekében a hallgatókkal közösen kidolgoztuk a szonda második generációs rendszertervét, a HUNVEYOR-4b-t (1.5 ábra).



1.5 ábra A HUNVEYOR-4 második generációs rendszerterve

Az első verzió tehát csak a 230 V-os elektromos hálózathoz, valamint az iskola Internet hálózatára kötve működött. Meg kellett oldani tehát, hogy a szonda terepi körülmények között is használhatóvá váljon, vagyis függetlenné váljon az elektromos hálózattól, és vezeték nélküli Internet kapcsolattal rendelkezzen. Ennek érdekében az addig használt PC alaplapt lecseréltük egy alacsonyabb energiaigényű VIA EPIA anyakártyára, ami nem igényelt aktív hűtést, hisz légtérben (pl. a Hold felszínén) a ventilátor alkalmazása értelmetlen, a nagy energiaigényű merevlemez meghajtót lecseréltük FLASH memóriára, és a 230 V-os tápegységet egy olyanra, ami egy 12 V-os akkumulátor feszültségéből előállította az alaplap számára szükséges összes feszültséget, továbbá a rendszer bővült egy fedélzeti WiFi eszközzel. A szonda a szálló por és a csapadék elleni védelem céljából pedig burkoló lapokat kapott. (1.6 ábra)

A HUNVEYOR-4b rendszertervéből kiderül, hogy a szonda mind a szoftver, mind a hardver vonatkozásában gyökeres átalakuláson ment keresztül. A webszervert és az adatbázis-szervert leválasztottuk a szondáról, és az iskola egyik szerver számítógépén létrehozott „földi irányító központ”-ba telepítettük. A kliens gép ezentúl nem tud közvetlen kapcsolatba lépni a szondával, hanem csak a földi irányító központtal, amely egy speciálisan erre célra kidolgozott XML-RPC szerveren keresztül kommunikál a szondával. Ez egyben egy biztonsági megoldást is jelent. Az 1 GB-os flash memória korlátozott tárolókapacitásából adódó probléma ezzel megoldódott, viszont terepen, vagy bemutatók alkalmából csak olyan géppel lehet a szondához kapcsolódni, melyen telepítve van a földi irányító központ.

A hardver vonatkozásokat illetően látható, hogy a mérőeszközök és egyéb perifériális berendezések többé nem lépnek közvetlenül kapcsolatba az alaplappal, hanem a számukra kialakított speciális illesztő egységen keresztül az eszközvezérlővel kommunikálnak. A vezérlő egység a szondával USB sínen keresztül „beszélget”. Feladata egyrészt a szondától kapott parancsok továbbítása a mérőegységeknek, és a mért adatok visszaküldése a szondának, másrészt bizonyos eszközök közvetlen vezérlése. Maguk az egyes mérőegységek a vezérlőegységhez I²C sínen⁴ keresztül kapcsolódnak.

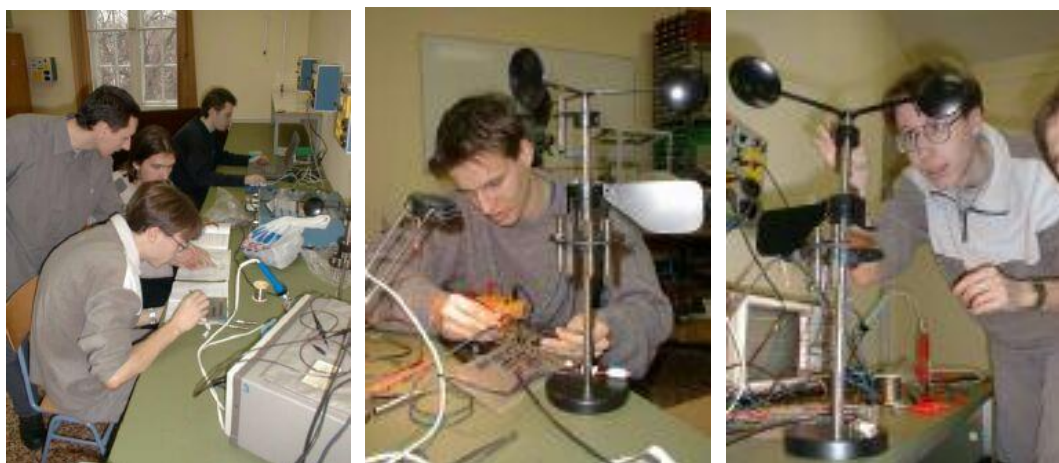
A további részletek ismertetése már messze túlmutat jelen dolgozat keretein. Annyit azért még hozzáfűzök az eddigiekhez, hogy jelenleg folyik a HUNVEYOR-4c kialakítása. Ebben a harmadik generációs megoldásban a vezérlő számítógépet egy még kisebb energiaigényű, ugyanakkor bizonyos funkciókat illetően gazdagabb Raspberry-PI-re cseréljük.

⁴ Az I²C sít IC-k közti kommunikációra tervezték. Neve ennek angol rövidítéséből származik (Inter IC => IIC => I²C). Az adatátvitel viszonylag gyors - 100 vagy 400 kbit/sec - amely 2 vezetéken valósul meg: az egyik az órajel (SCL), a másik az adat (SDA). E két vezetéken kívül szükséges a közös föld biztosítása is, ha az IC-k külön tápfeszültségről üzemelnek



1.6 ábra A HUNVEYOR-4b szerelés közben. A bal alsó sarokban látható inzerben az új alaplap, tápegység és az operációs rendszert tartalmazó 1 GB-os flash memória látható.

1.6.2 A robotszonda műszerei – fizikai mennyiségek és mérések



1.7 ábra Életképek a meteorológiai szonda építéséről



1.8 ábra A hallgatók az elkészült eszközt bemutatják a TDK konferencián

A robotszonda készítése a fizikához alapvetően a különböző műszerek építésén keresztül, valamint a szonda energiaellátásának biztosítása révén kapcsolódik. A fizikatanulás bújtatva, mintegy hasznos melléktermékként jelenik meg. Az eredményes műszerépítéshez az órai tananyagban hallottakon túl az ismeretek további bővítésére, elmélyítésére, kutatásra, az irodalom tanulmányozására és számos saját kísérlet elvégzésére, majd a megépült rendszer összehangolt működésnek vizsgálatára (pl. földi analóg terepgyakorlatokon való kipróbálására) is szükség van. A továbbiakban a fizikával kapcsolatos tudni- illetve tanulnivalókat tekintem át néhány kiragadott példán keresztül.

A szondának a környezete fizikai tulajdonságait, állapotát és annak változásait kell érzékelni. Egyik alapvető termodinamikai jellemző a hőmérséklet, egy másik a levegő áramlásának sebessége és iránya, mérendő továbbá a beérkező megvilágítás erőssége, ami például a napelemes energiaellátó rendszer számára meghatározó, és esetleg spektrális összetétele. Néhány további jellemző: a környezeti zaj, villámlás, légnyomás, páratartalom, gázösszetétel, részecskesugárzás. Mindezeket különböző fizikai vagy kémiai változások, illetve ezek elektromos jellé való átalakítása révén lehet mérni.

A félvezető alapú érzékelők kezdetben a mikroelektronikai kutatások melléktermékeként jelentek meg. Míg korábban elektromechanikus mérőrendszereket alkalmaztak, az 1960-as években felfedezték a félvezetők hőmérsékletre, fényre, nyomásra, mágneses erőtérre való érzékenységét. Ennek alapján a hetvenes években fejlesztették ki az első, a mai értelemben vett nyomás és hőmérséklet érzékelőket. [18.] A következőkben kiemelek néhány területet, ahol a szonda mérőműszereinek építése során a hallgatók fizikai ismeretei bővültek, elmélyültek, illetve a különböző területekről szerzett információk összekapcsolódtak.

Hőmérsékletmérés:

A hőmérséklet mérését lehetővé tevő körülmények:

- a testek hőmérsékletváltozása során fellépő fizikai jelenségek, mint pl.:
 - a testek térfogatának, ill. alakjának változása
 - vezetők és félvezetők elektromos ellenállásának megváltozása
 - a termoelektromosság függése a hőmérséklettől (Seebeck-effektus)
- az egymással érintkező testek hőmérsékletének kiegyenlítődése
- olyan folyamatok létezése, melyek mindig ugyanazon a hőmérsékleten mennek végbe (pl.: halmazállapot-változások)

A hőmérséklet elektromos meghatározására rendelkezésre álló lehetőségek:

- termoelektromos jelenség
- a fémek és félvezetők hő okozta ellenállás-változása

Minden mérőeszköznek, így a hőmérőknek is a következő követelményeknek kell eleget tenni:

- a mérendő rendszer állapotát ne változtassa meg, vagyis esetünkben a hőkapacitása elhanyagolható legyen a mérendő rendszeréhez képest
- a (termikus) egyensúly eléréséhez szükséges idő (beállási idő) kisebb legyen, mint a mérésre rendelkezésre álló idő
- a beállási időnek lényegesen kisebbnek kell lenni a mérendő (hőmérséklet)változás időtartamánál.
- a mérési tartományban megfelelő érzékenységgel kell rendelkeznie.

A hőmérséklet mérésére használt érzékelő kiválasztásának szempontjai:

- linearitás: a mérési tartománytól függően a lineáris, exponenciális, vagy a logaritmikus jellegű görbe az előnyösebb
- zaj
- stabilitás
- mérési tartomány, határadatok (ezt túllépve nem érzékeny, vagy tönkremegy a detektor)

Fényerősség mérés:

A fényerősség mérésére használt eszközök: fotoellenállások (Se, CdS, CdSe, PbS, PbSe), fotodióda, fototranzisztor, bolométer, mikrobolométer mátrix. Az optikai sugárzás mérésére a következő fizikai hatások alkalmasak:

- külső és belső fényelektromos hatás
- zárórétegben fellépő fényelektromos hatás
- termoelektromos fényelektromos hatás
- egyéb termikus hatás

A fotodetektorok fontos további paraméterei még a különféle zajok (termikus, vagy Johnson zaj, sörétzaj, fotonzaj, sötétáram).

Sorra lehetne még venni további, a diákok által elmélyülten tanulmányozott témákat, tervezett és megépített más eszközöket is, de már a fenti szemléltetésből is kiviláglik, hogy a szondaépítés komplex feladat, és eredményes megvalósításhoz széles körű fizikai ismeretekre és a szakirodalom tanulmányozására is szükség van, mint pl. [19][20][21], a gyártók honlapjáról és katalógusairól nem is beszélve. A más fizikai mennyiségek mérésére szolgáló mérőműszerekkel szembeni követelmények, és az alkalmazott detektorok kiválasztásával szemben támasztott követelmények hasonlóak a példaként bemutatott hőmérséklet mérésénél felsoroltakhoz.



1.9 ábra A HUNVEYOR-4 néhány, részben a diákok által készített, részben az általuk rendszerbe illesztett fontosabb modulja, a teljesség igénye nélkül

Az évek során a hallgatók az alábbi mérőeszközöket készítették el, vagy illesztették a szondára:

- szélsébség és szélirány mérő
- hőmérséklet mérő
- páratartalom mérő
- légnyomásmérő
- levegő összetétel (gáztartalom) mérő
- hangerő mérő

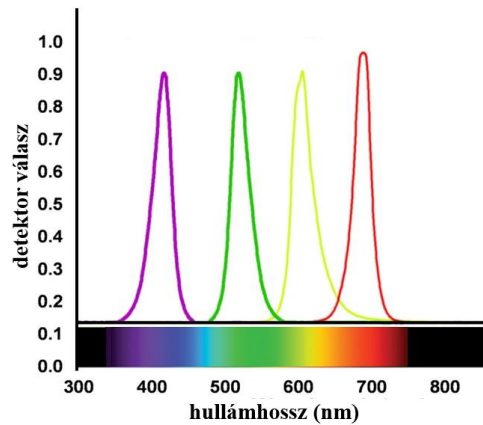
- fényerő mérő
- fény spektrális összetétel mérő
- radioaktív/gamma/kozmos sugárzás mérő
- villámdetektor
- talaj rezgések detektálása, iránymérési lehetőséggel
- lézeres pormérő

Szemléltető példaként tekintsük az időközben burkolatot kapott hőmérőt is tartalmazó szélesebb és széliránymérőt („szélkakas” modul)! Az érzékelők jelét egy mikrokontroller dolgozza fel, és illeszti az IIC buszra. A hőmérő mérési elve: feszültségmérésre visszavezetett hőmérsékletmérés. A hőmérséklettel fordítottan arányosan változik a termisztor ellenállása, így a rajta mérhető feszültség. Ezt a változást érzékeli a mikrokontroller, ami A/D átalakítás után továbbítja a mért értéket. A szélesebb mérése során az érzékelő leadott impulzusait számolja a mikrokontroller „Timer” áramköre. A számlálás időtartamát a felhasználó állíthatja be. Az időt a mikrokontroller rendszer időzítői mérik és az idő leteltével tárolják a mért értéket. A szélirány meghatározásához nyolc érzékelő jele kapcsolódik a mikrokontroller egyik portjára. Az aktuális adatok erről a portról kérhetők le. A mikrokontroller ezt a nyolc bites értéket kérésre továbbítja. Mivel egyszerre akár két szomszédos detektor is gerjeszhető, az eszközzel összesen 16 irány különböztethető meg.

A gamma/kozmos sugárzás erősségének mérése és a villámdetektálás szintén impulzus számlálásra van visszavezetve, míg az analóg mennyiségek (fényerősség: PerkinElmer gyártmányú A906013 fotoellenállás, hangerősség: egy elektrét mikrofon feszültsége, légnyomás: MPX100A piezorezisztív érzékelő, gáztartalom: CZGPAL ellenállás változáson alapuló fénoxid gázérzékelő) mérése feszültségmérésre. A légköri portartalom meghatározása egy lézersugár porszemcséken történő fényszóródás következtében a BPW21R típusjelű PIN-diódás fotodetektor feszültségének mérésével valósult meg.

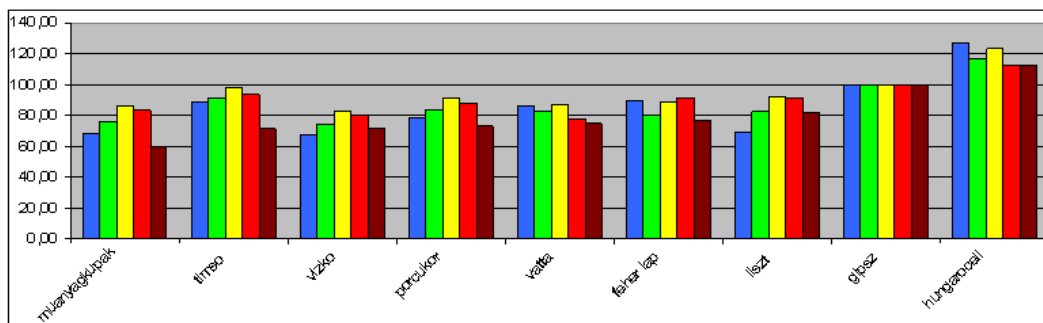
A megvilágító fény spektrális összetételének meghatározására szintén az egyik diák saját ötleteként elkészített mérőeszköz szolgál a rendszerben. Célja a látható tartományban a fény színképi összetételének közelítő meghatározása. Detektorként közönséges világító diódákat, LED-eket használ. A LED tulajdonképpen egy p-n

átmenetes rétegdióda. A kibocsátott fény hullámhosszát az alkalmazott anyag réteg, illetve sáv szerkezete határozza meg. A folyamat fordítva is lejátszódhat, vagyis a beeső fénykvantum az adott félvezető anyagban párkeltést idéz elő, így a dióda kivezetésein feszültség jelenik meg, mely a beeső fény intenzitásával arányos (1.10 ábra). A LED érzékenysége azon a hullámhosszon a legnagyobb ahol normál működés esetén a legerősebb a fénykibocsátása. Ily módon néhány különböző színű LED alkalmazásával lefedhető a teljes látható hullámhossztartomány. A mérőmodulban négy különböző LED került felhasználásra: vörös (660 nm), sárga (588 nm), zöld (525 nm) és UV (405 nm).



1.10 ábra Különböző LED-ek érzékenysége a hullámhossz-függvényében

A LED spektrométer különböző anyagminták spektrális visszaverődésének vizsgálatára szolgál. Használata során a mintát egymás után különböző színű (kék, zöld, sárga, vörös és infra) LED-ekkel megvilágítjuk, és a visszavert fény intenzitását mérjük. Az 1.11 ábra a fehér műanyagkupak, timsó, vízkő, porcukor, vatta, fehér papírlap, liszt, gipsz és hungarocell relatív spektrális visszaverő képességét mutatja, a gipszhez, mint etalonhoz viszonyítva.



1.11 ábra Különböző, az emberi szem számára egyformán fehérnek látszó anyagok LED spektrométerrel felvett „színeképei”

A rezgés érzékelése egy fordított irányban használt piezoelektromos hangforráson (buzzer) keletkező feszültség mérésével valósult meg. A tehetetlen tömeget egy merev huzalra forrasztott ólomnehezék adja. Az érzékelőben elhelyezett piezo-lapka a rezgéshullám hatására deformálódik, a keletkező feszültség arányos lesz a hullám amplitúdójával, és erősítés után feldolgozható. A szonda három lábán elhelyezett egy-egy ilyen rezgésérzékelő a forrás irányának meghatározását teszi lehetővé.

A szonda energiaellátását, illetve az akkumulátor csomag töltését egy 55 W-os napelem tábla adja. A táblát a beeső napfény maximális hasznosítása érdekében egy ekvatoriális jellegű, azaz a Föld tengelyével párhuzamosra állítható tengely körül forgatható állványra szereltük. Ez által egy, a megvilágítás irányára érzékeny detektor feszültségének felhasználásával mindig a megfelelő pozícióban, a beeső napfényre merőlegesen tudjuk tartani. Napnyugtával, vagy a nyugati végállás eléréssel a táblát azonnal visszaforgatjuk keleti pozícióba (mivel a visszaforgatáshoz szükséges energia ilyenkor még biztosan rendelkezésre áll), hogy napkeltekor mindjárt elkezdődhessen a töltés. A fentiekben megemlített eszközök egy része az 1.9 ábrán láthatók.

1.6.3 Terepgyakorlatok és mérések

Az úrkutatásban általánosan alkalmazott módszer, hogy a kifejlesztett berendezést olyan környezetben is megvizsgálják, amely bizonyos szempontokat tekintve a tervezett működési helyén is uralkodik, valamint kiállja a kilövéskor fellépő rezgéseket. Esetünkben az extrém körülmények közötti (mint pl. vákuum, alacsony és magas hőmérséklet, részecske sugárzás, ... stb.) vizsgálatokat eleve nem áll módunkban végezni, de ez nem is célunk. A HUNVEYOR projekt esetében a terepgyakorlatok célja az elkészült rendszer, vagy egyes részei működőképességének ellenőrzése, a mérőrendszer kipróbálása, használata, bele értve a környezeti paraméterek hosszabb időtartamú mérését, monitorozását, az adatok vezeték nélküli továbbítását, tárolását, illetve a teljes integrált rendszer koncepciójának használhatóságát.

A HUNVEYOR-4 rázásállóságának ellenőrzése a terepre (többnyire gépkocsival) történő szállítás során fellépő mechanikai rezgések révén történik. Ha helyszínen szállítva még mindig működik a rendszer, akkor kiállta a próbát. A próbák egy esetet kivéve

sikeresek voltak. A sikertelenséget ekkor sem a diákok eszközei, hanem egy vásárolt berendezés, a vezeték nélküli internet összeköttetést biztosító Access Point meghibásodása okozta.

A konkrét méréseken keresztül nemcsak az egyes eszközök működésének ellenőrzése valósul meg, hanem a szabad téri fizikává kiterjesztett, komplex, nem laboratóriumi körülmények között való mérések végzésekor fellépő nehézségekkel való találkozás is. Bizonyos méréseket, például a mágneses szőnyeggel való mérést az időnként fel-fel támadó szél erősen megzavart. A terepgyakorlatok, azon felül, hogy az iskolai környezetből való kiszakadás mindig élmény telibb és emlékezetesebb marad, alkalmat adnak a rendszer tovább gondolására, lehetséges változtatására, fejlesztésére. Például milyen típusú méréseket lehetséges, illetve célszerű az egyes kiválasztott analóg környezetekben elvégezni. Ezen mérésekhez milyen további eszközökre és fejlesztésekre lenne igény.

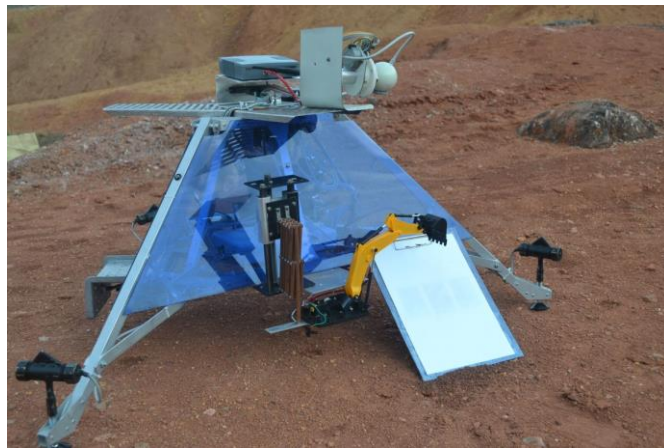


1.12 ábra A WLAN összeköttetés hatótávolságának ellenőrzése a terepen

A terepgyakorlatok során ellenőriztük a rádiós összeköttetés hatótávolságát (1.12 ábra), ami a szonda oldalon a normál bot antenna, a vételi oldalon egy irányított, parabola antenna használatával mintegy 5 km-nek adódott.

Az 1.13 ábrán a mágneses szőnyeggel történt mérés látható, melyet a Viking Mars Pathfinder szonda programja motivált. A marsi porban ugyanis sok mágnesezhető részecskét talált. A mérés elég egyszerű ahhoz, hogy diákok is elvégezhessék, de

ugyanakkor a több komponensű porkeverék helyszíni vizsgálata sokkal komplexebb, mint egy laboratóriumban elvégzett kísérlet. A mágneses szőnyeget egy fehér papírlap alá helyeztünk ~5 mT erősségű hűtőmágnesekből alakítottuk ki. A mágnes a lejtősen elhelyezett szőnyegre szórt anyagot tartalmazó porkeverékből megtartotta a ferromágneses részecskék egy részét. A szabad téri vizsgálat előkészítéseként laboratóriumi körülmények között a kísérletet elvégeztük különböző porkeverék (homok, rozsdá, vasreszelék, gipsz) kombinációkra 45 fokos lejtőszög esetén. (A választás azért esett a 45 fokra, mert a por lecsúszásához szükséges minimális lejtőszög a durva szemcsék esetén 32,5 foknak, finom szemcsékre 36 foknak adódott.) A mérés eredményét összehasonlító etalonnak tekintettük a szabad téri méréshez.



1.13 ábra A mágneses szőnyeggel való szabad téri mérés a marsi környezetet imitáló gánti bauxitbánya területén. A kaparó kar a felmarkolt port a 45 fokos elhelyezett mágneses szőnyegre szórja, és a fennmaradt részecskék alkotta mintázatot a kamera lefényképezi

A mérés során tanulmányozott fizikai tulajdonságok: a mágneses anyagok tapadása a lejtőn, a változó szélhőmérséklet hatása, a keverék összetételének hatása a tapadásra. A felmerülő fizikai fogalmak: lejtő, súrlódás, légellenállás, erő, vektorok összeadása és komponensekre bontása, az anyag mágneses (dia-, para- és ferromágneses) tulajdonsága, mágneses nyomaték, permeabilitás, haladóbb szinten a mágnesség atomszerkezeti magyarázata, áramok, domének.



1.14 ábra A HUNVEYOR-4 különböző geológiai viszonyokat mutató hazai helyszíneken

A terepgyakorlatok során meglátogattunk különböző geológiai viszonyokat mutató hazai helyszíneket is (1.14 ábra):

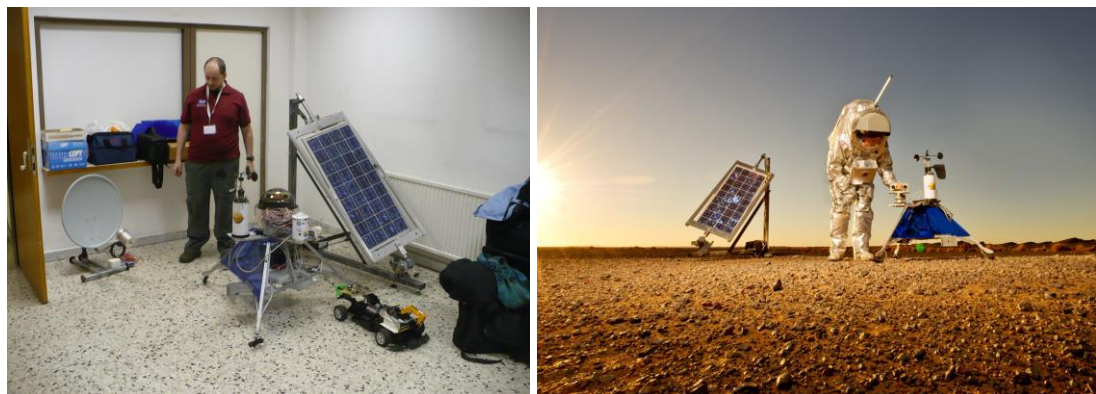
- Fülöpháza (Kiskunsági Nemzeti Park) - a futóhomok a marsi porra emlékeztet
- Gánt, egykori bauxitbánya - analógia a marsi alakzatokhoz (pl. 1.13. ábra)
- Nógrád - simára csiszolt sokszöglapú, jégkorszaki eredetű ún. „éles kavicsok”
- Szentbékállá – köpenyzárványokkal tűzdelt vulkáni tufa
- Bér – savanyú andezit
- Hegyesztű – bázikus bazalt

Külön kiemelendő az a nemzetközi terepgyakorlat, melyet az Innsbrucki Egyetem és az Österreichische Weltraum Forum (ÖWF) 2013. februárjára hirdetett meg [22], és

melyre a szakmai pályázatunk alapján a HUNVEYOR-4 meghívást kapott. A helyszíne Marokkó, a Szahara nyugati része volt (1.15 ábra), ugyanis a terep és februárban az ott várható időjárási és hőmérsékleti viszonyok nagyban hasonlítanak a Mars nyári éghajlatához. További részletekre vonatkozóan ld. [23] és [24]. A HUNVEYOR-4, bár nem probléma nélkül, de mindent összevetve sikeresen teljesítette a küldetését (1.16 ábra).

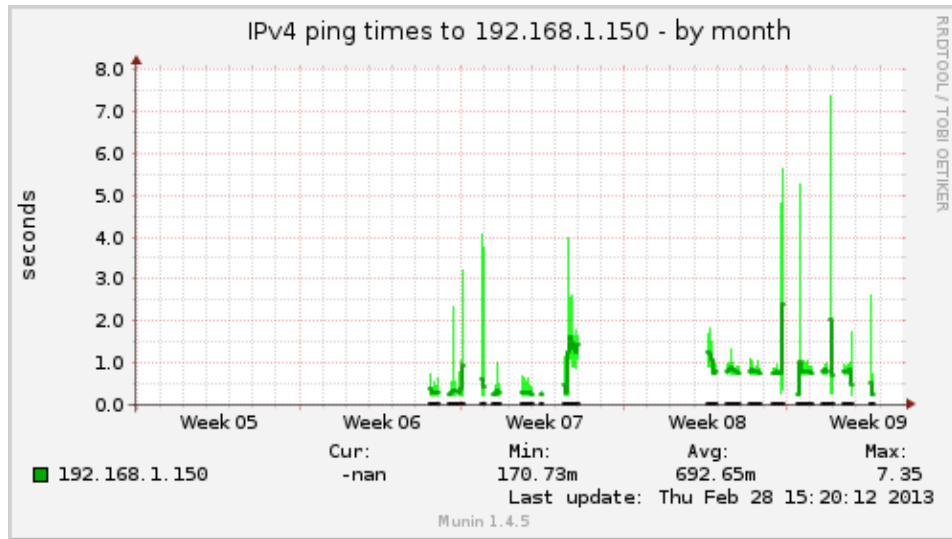


1.15. ábra Felhívás a marokkói marsi analóg terepgyakorlatra és helyszíne

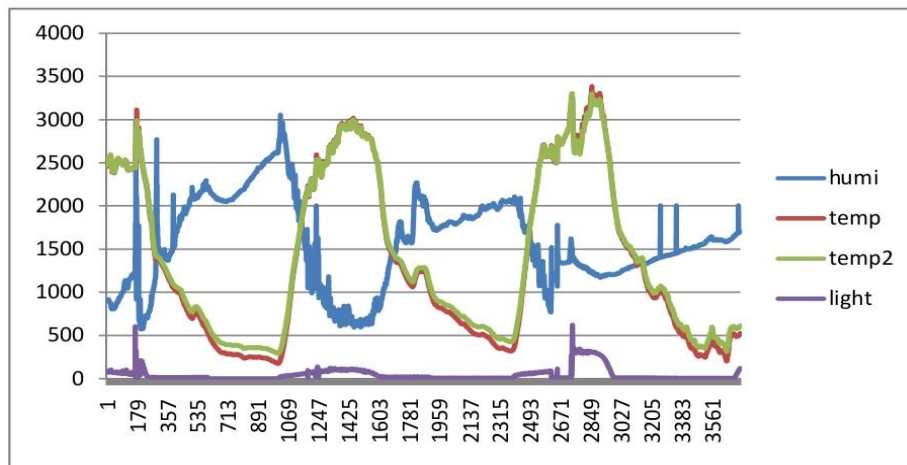


1.16 ábra *balra*: A HUNVEYOR-4 kipakolás után Innsbruckban, a projektben részt vevő egyik diákkal, *jobbra*: A HUNVEYOR-4 a marokkói marsi analóg terepgyakorlaton

A szonda működését itthonról, interneten keresztül ellenőriztük, s a mért adatokat is azon keresztül, műholdas összeköttetés segítségével hívtuk le. Az 1.17 ábrán a kapcsolat ellenőrzése, az 1.18 ábrán pedig egy méréssorozat eredménye látható.



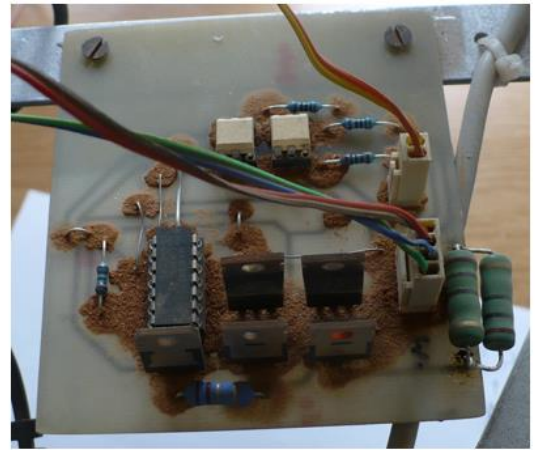
1.17. ábra PING-statisztika a marokkói marsi analóg terepgyakorlatról



1.18 ábra A marokkói marsi analóg terepgyakorlat során a hőmérséklet, páratartalom és a fényviszonyok alakulásáról felvett adatsor. A vízszintes tengelyen a mérés sorszáma, a függőlegesen a mért nyers érték látható.

A sivatagi porban levő esetlegesen mágneses részecskék kimutatására műanyag fóliába csomagoltan felszereltünk egy szétszedett mágneslemezes tároló fejmozgató

mágnesét (1.19 ábra, bal oldalt). Az eredmény kevés részecskét hozott. Sokkal meglepőbb volt, hogy az áramköri paneleken milyen sok por halmozódott fel (1.19 ábra, jobb oldalt). A por eloszlása pontosan kirajzolja a panel forrasztási, a képen nem látható alsó oldalán megfolyt gyantafoltokat.



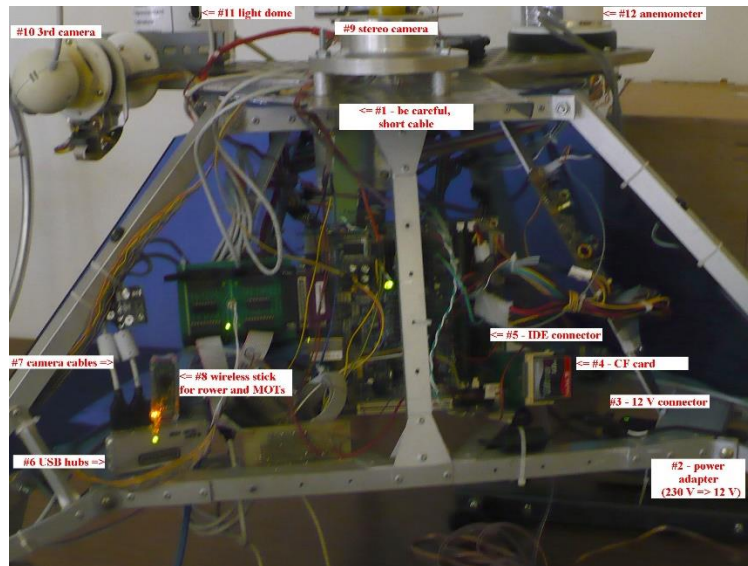
1.19 ábra A mágnesen (bal oldali kép) a sivatagi porból befogott vasszemcsék láthatók az elektronikán pedig rengeteg porszemcse gyűlt össze, valószínűleg elektrosztatikus feltöltődés következtében.

A MARS-2013 elnevezésű terepgyakorlat legfontosabb eredményeit az alábbiakban foglalom össze:

- a HUNVEYOR-4 túlélte a szállítást
- műholdas kapcsolatot tudunk teremteni a távoli szondával
- mérési adatokat tudunk gyűjteni a szondával (619 adatsomagot tudunk lehívni a meteorológiai állomástól)
- a napelemes energiaellátás kiválóan működött, az akkumulátorcsomag a nappali töltéssel elegendő energiát tudott raktározni a folyamatos éjszakai működéshez
- az I²C eszközök USB buszra illesztő egysége sajnos néhány nap után javíthatatlanul meghibásodott, ennek következtében nem tudtuk tovább elérni a mért adatokat

Részben a fenti tapasztalatok alapján, részben a technikai fejlődés irányvonalát követve kezdődött el a korábbiakban már említett HUNVEYOR-4c fejlesztése, mely

jelenleg is folyamatban van. Az 1.20 ábra szemléletesen mutatja a folyamatosan bővülő szonda már-már átláthatatlanná váló bonyolultságát, és a kábelek zűrzavarát.



1.20 ábra A marokkói terepgyakorlaton részt vett szondabelső bonyolultsága, jobbra az ezt részben kiváltani hivatott bankkártya méretű Raspberry-PI

1.6.4 Oktatási eredmények – a projekt kritériumok teljesülése, hallgatói dolgozatok

A szonda építése a tervezéstől a megvalósulásig a projekt módszer elveinek megfelelően folyik. Stimuláló, szervező, tanácsadó funkciót felvéve a tervezés a hallgatókkal közösen történik. A végső döntés mindig a diákok kezében van. A szonda építése összefüggő, hosszú, immár másfél évtizednyi időtartamot ölel fel. Ilyen viszonyok között még kritikusabb az egymást váltó, követő generációk közötti kommunikáció biztosítása. Vannak időszakok, mikor csak egy, de van, mikor több hallgató is dolgozik egyszerre a projekten. A hallgatók különböző képességűek, mindegyik a számára legérdekesebb, egyéniségéhez, érdeklődéséhez és felkészültségéhez legjobban illő feladat megoldásán dolgozik. Egy ilyen robotszonda

építéséhez a különböző diszciplínák egyidejű alkalmazására van szükség, a tervezéstől a mérő műszer készítésén át a programozásig és rendszerbe állításig. A fizikai ismeretek elsajátítása és elmélyítése a gyakorlati munka során, indirekt módon valósul meg.

A HUNVEYOR-4 projekt sikerét mi sem bizonyítja jobban, hogy számos fórumon bemutattuk, az évek során több Tudományos Diákköri dolgozat és 18 diplomamunka készült. A dolgozat címek természetesen nem a fizikának, hanem a villamosmérnök képzési profiának felelnek meg, de mint azt a korábbiakban számos példán keresztül megmutattam, az érintett hallgatók munkájuk során szoros kapcsolatba kerültek a fizikával. A dolgozat címeket a függelék tartalmazza:

Az 1. számú fejezet jelenti az 1. számú téziscsoport háttérét.

Hivatkozások

- [1] Sz. Bérczi, V. Cech, S. Hegyi, T. Borbola, T. Diósy, Z. Köllő, Sz. Tóth : Planetary geology education via construction of a planetary lander (1998), LPSC XXIX, #1267, LPI Houston
- [2] Sz. Bérczi, B. Drommer, V. Cech, S. Hegyi, J. Herbert, Sz. Tóth, T. Diósy, F. Roskó, T. Borbola: New programs with the Hunveyor experimental planetary lander in the universities and high schools in Hungary (1999), LPSC XXX, #1332, LPI Houston
- [3] Sz. Bérczi, S. Kabai, S. Hegyi, V. Cech, B. Drommer, T. Földi, A. Fröhlich, G. Gévyay: TUTOR on the Moon: A Discovery type multiple lunar probe (improved Surveyors) constructing and research program for universities (1999), LPSC XXX, #1037, LPI Houston
- [4] B. Drommer, G. Blénessy, G. Hanczár, K. Gránicz, T. Diósy, Sz. Tóth, E. Bodó: The 3D system and operations with Hunveyor (and its rover): WEB-site for students to use lander and instruments on a simulated planetary surface (1999), LPSC XXX, #1606, LPI Houston
- [5] Bérczi Sz., Diósy T., Tóth Sz., Hegyi S., Imrek Gy., Kovács Zs., Cech V., Müller-Bodó E., Roskó F., Szentpétery L., Hudoba Gy.: SPACE SIMULATORS IN SPACE SCIENCE EDUCATION IN HUNGARY (1.): A HUNVEYOR TYPE PLANETARY VOYAGE AND PLANETARY SURFACE OPERATIONS SIMULATOR (2002), LPSC XXXIII, #1496, LPI, Houston
- [6] Sz. Bérczi, S. Hegyi, Zs. Kovács, E. Hudoba, A. Horváth, S. Kabai, A. Fabriczy, T. Földi: SPACE SIMULATORS IN SPACE SCIENCE EDUCATION IN HUNGARY (2.): HUNVEYOR ORIENTATIONS AND ASTRONOMICAL OBSERVATIONS ON MARTIAN SURFACE (2003), LPSC XXXIV, #1166, LPI, Houston
- [7] Hegyi S., Kovács B., Keresztesi M., Béres I., Gimesi L., Imrek Gy., Lengyel I., Herbert J.: Experiments on the planetary lander station and on its rover units of the Janus Pannonius University, Pécs, Hungary (2000), LPSC XXXI, #1103, LPI Houston

- [8] Kovács Zs. I., Kővári I. E., Balogh R., Varga V., Kovács T., Hegyi S., Bérczi Sz.: PLANETARY SCIENCE EDUCATION VIA CONSTRUCTION OF THE HUNVEYOR-3 EXPERIMENTAL PLANETARY LANDER ON BERZSENYI COLLEGE, SZOMBATHELY, HUNGARY: ROCK RADIOACTIVITY MEASUREMENTS (2001), LPSC XXXII, #1130, LPI, Houston
- [9] Hudoba, Gy., Sasvári G., Kerese P., Kiss Sz., Bérczi Sz.: HUNVEYOR-4 CONSTRUCTION AT KANDÓ KÁLMÁN ENGINEERING FACULTY OF BUDAPEST POLYTECHNIK, SZÉKESFEHÉRVÁR, HUNGARY (2003), LPSC XXXIV, #1543, LPI, Houston
- [10] Gy. Hudoba, Zs. I. Kovács, A. Pintér, T. Földi, S. Hegyi, Sz. Tóth, F. Roskó, Sz. Bérczi: New experiments (in meteorology, aerosols, soil moisture and ice) on the new Hunveyor educational planetary landers of universities and colleges in Hungary (2004), LPSC XXXV, #1572, LPI, Houston
- [11] T. Földi, H. Hargitai, S. Hegyi, Gy. Hudoba, Zs. Kovács, F. Roskó, Sz. Tóth, A. Pintér, Sz. Bérczi: Europa analog ice-splitting measurements and experiments with Ice-Hunveyor on the frozen Balaton-lake, Hungary (2005), LPSC XXXVI, #1147, LPI, Houston
- [12] Sipka János István: Tanulóraszabott technikatörténeti kutatómunka (2006), mek.oszk.hu/04100/04182/04182.doc
- [13] Dr. Hegedűs Gábor: A projektmódszer, a projektpedagógia Magyarországon, <http://docplayer.hu/8382481-A-projektmodszera-projektpedagogiamagyarorszag.html>
- [14] Makó Ferenc: Projektoktatás és Motiváció (OE TMPK) továbbképzés, OE AMK, 2016.
- [15] Hortobágyi, Katalin (szerk.). Projekt kézikönyv. IFA-OKI, 1991.
- [16] NÁDASI Mária, M.: Projektoktatás. Budapest, Gondolat, 2003.
- [17] SH atlasz, Űrtan, 13. o., szerkesztők: Almár I.-Both E.-Horváth A.-Szabó Gy., Springer Hungarica, Bp. 1966. ISBN 963 845582 9
- [18] Magyar Elektronika XXIII. Évf. 3. szám
- [19] Bathiarov - Malinyin - Skolin: Analóg-digitális átalakítók, Műszaki Könyvkiadó, Budapest 1985.
- [20] Lampert Miklós: Mérőérzékelők az automatikában, Integra-Projekt KFT, Budapest 1993.
- [21] Dr. Szentiday Klára - Dr. Dávid Lajos: Mikroelektronikai szenzorok és alkalmazástechnikájuk, Martech KFT, Budapest 2000.
- [22] Morocco 2013 Mars Analog Field Simulation, <http://www.oewf.org/cms/mars2013.phtml>
- [23] MARS2013 Morocco Mars Analog Field Simulation Recap, http://www.youtube.com/watch?v=VDfENbC_FOY
- [24] This week on #simulateMars: MARS2013 Simulation Week 01, <http://www.youtube.com/watch?v=kfRDkS9VRoQ>

„Egy kép felér száz szóval...” -
hát még egy kísérlet!

2. A fizikai jelenségek szemléltetése

2.1 Bevezetés

A diákok fizika iránti alulmotiváltságának egyik okát abban látom, hogy az absztrakt fogalmakat nem tudják konkrét tapasztalatokhoz kötni, ezért nem látják az összefüggéseket és az elmélet gyakorlatban való alkalmazhatóságát, érvényesülését sem. Mivel a fizika fogalmi és az azokkal kimondott törvények egymásra épülnek, szilárd alapok hiányában a diákok hamar elveszítik a fonalat. Ezért törekszem arra, hogy az előadásaimon fogódzóként valamilyen módon szemléltessem is az elhangzottakat.

Az órai előadások életszerűbbé, színesebbé, s nem utolsó sorban emlékezetesebbé tételére több újszerű demonstrációs kísérletet dolgoztam ki. Az alábbiakban ezek közül kettőt mutatok be. Az egyik demonstrációs kísérletem különböző, stabil és instabil mágnes-golyó konfigurációk vizsgálata mágneses teret láthatóvá tevő eszköz illetve módszer használatával, a másik pedig a radioaktivitás, illetve részecske sugárzás újszerű szemléltetése, mely akár kvalitatív értékelésre is lehetőséget nyújt. A módszeremmel egyben a földi légkör kozmikus sugárzás elleni védő szerepét is demonstrálni tudom.

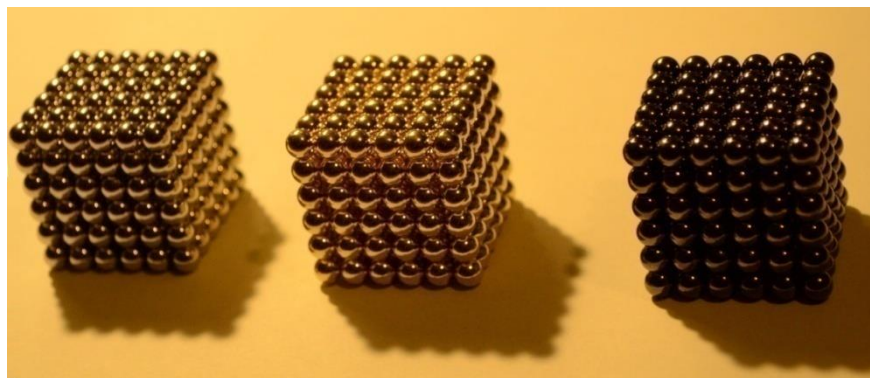
2.2 Mágneses konfigurációk vizsgálata

A kísérlet kidolgozását az inspirálta, hogy a szupererős mágnes-golyókat, rendszerint 216 darabból álló, 6x6x6-os ($216 = 6^3$) kocka formában elrendezve játékként árulják. A láthatatlan mágneses dipólusok kölcsönhatásai révén a golyócskák erősen összetapadnak, és így különféle alakzatok építhetők fel belőlük. A játéknak nincs előre meghatározott célja, nincs kitűzött forma, amit meg kell valósítani, hanem a játékos saját fantáziájára van bízva, mit szeretne, vagy inkább mit tud belőlük megvalósítani. Az Interneten számos, néha ámulatba ejtő konfigurációval találkozhatunk. Első próbálkozásként a kockaforma visszaállítása is nagy kihívást, akár több órás próbálkozást jelent a kezdő számára.

A demonstráció során az azonos építőelemekből (5 mm átmérőjű mágnes-golyócskákból) egyszerű, egy-, két- illetve háromdimenziós alakzatokat hozunk létre. A diákok e közben a fizikában lényeges szerepet játszó szimmetriákat és szimmetriaműveleteket (eltolás, tükrözés, forgatás) ismernek fel. A golyócskákkal különféle kristályrácsokat és kristályhibákat is tudnak modellezni. Azonban pusztán a formák vizsgálatával, legyenek azok bármilyen változatosak is, nem elégedhetünk meg. Arra is kíváncsiak vagyunk, milyen lesz az alakzat mágneses mintázata. A mágneses teret speciális módokon, kolloidális nikkell részecskéket tartalmazó mágnes-film, illetve a vasfolyadék (ferrofluid) segítségével láthatóvá is tudjuk tenni. Vizsgálataink során arra a meglepő eredményre jutunk, hogy a geometriai szimmetria nem minden esetben egyezik meg a kialakult mágneses tér szimmetriájával.

2.2.1 A mágnes-golyók

A mágnes-golyókat ritkaföldfém (elsősorban neodímium) ötvözetekből készítik. Maga a neodímium elég sérülékeny, ezért nikkell bevonattal látják el, esetenként többszörös bevonattal (NiCuNi, NiCuNiCr), ami által különböző színű (arany, ezüst, fekete) golyócskákat kapunk. A golyók érzékenyek a hőmérsékletre, 80 °C fölött elveszítik ferromágneses tulajdonságukat.



2.1. ábra Különböző színű 216 mágnes-golyó kockaformába rendezve

A szupererős mágnesek egyébként potenciális veszélyforrást jelentenek, ezért pl. az Egyesült Államokban árusításukat be is tiltották. Mivel nagy mágneses energia koncentrálódik bennük, kárt tehetnek a közelükbe került mágneses adattárolókban (bankkártya, merev-lemez, floppy diszk, ... stb.) és sérülékenyek is, a belső feszültség

miatt könnyen törnek (szétrobbanhatnak). Sokkal veszélyesebb tud lenni, ha pl. a szívritmus szabályozó (pacemaker) közelébe kerül. Kisgyermeknek hajlandóak elképesztő dolgokat fülükbe, orrukba dugni, vagy lenyelni. A lenyelt mágnes-golyó ferromágneses anyaggal, vagy egy másik hasonló golyóval összetapadva elröncsolja a belső szerveket, súlyos, akár halálos sérülést okozva.

2.2.2 A mágneses mező láthatóvá tételének módjai

A mágneses teret speciális módokon láthatóvá tudjuk tenni. Az egyik, a vasfolyadék, vagy ferrofluid, a másik a mágnes-film.

A vasfolyadék (ferrofluid)

A vasfolyadékot mintegy 30 évvel ezelőtt fejlesztették ki, és jelenleg ez az egyetlen folyékony anyag, amely reagál a mágneses térre. A vasfolyadékkal kapcsolatban az első szabadalmat a NASA nyújtotta be 1965-ben. Az űrprogram kezdeti szakaszában ugyanis arra gondoltak, hogy súlytalanságban a rakéta üzemanyagát mágneses térrel lehetne a kívánt helyre mozgatni.

A vasfolyadék nanométeres nagyságrendbe eső vasrészecskék (magnetit, vagy hematit) folyadékban levő stabil, kolloidális szuszpenziója. A mintegy 10 nm-es részecskék egy stabilizáló réteggel (sulfacant) vannak bevonva, amely még nagy gradienssel rendelkező mágneses térbe helyezve is megakadályozza, hogy azok összetapadjanak. (A „sulfacant”-nak tehát le kell győznie a részecskék között fellépő Van der Waals és a mágneses erőt.) A tipikus vasfolyadék összetétele: 5% mágneses anyag, 10% sulfacant és 85% hordozó folyadék.

Bár a vasfolyadék igen erősen reagál a mágneses térre, önmaga nem mágnes. Mágneses tér hiányában a részecskék mágneses momentumai véletlenszerűen helyezkednek el a folyadékban, eredő mágneses nyomatékuk zérus. Mágneses tér jelenlétében a részecskék mágneses nyomatéka beáll a tér erővonalainak irányába. A vasfolyadék azonnal reagál a külső mágneses tér változásaira, s megszűntével a

részecskék mágneses nyomatékainak iránya nagyon gyorsan véletlenszerűvé válik. Ha az alkalmazott térnek gradiense van, a teljes vasfolyadék úgy válaszol, mint egy homogén folyadék, mely az erősebb mágneses fluxus irányába mozdul el. Ez által a vasfolyadék külső mágneses térrel pontosan beállítható és mozgatható.

A vasfolyadék a mágneses tér szemléltetésén túl a gyakorlati élet számos területén is alkalmazható. Néhány mechanikai (pl. tömítés, csapágyazás, csillapítás, ...) vagy elektromechanikai (pl. hangszóró, léptetőmotor, ...) jellegű eszközben elterjedten alkalmazzák, és a jövőbeli felhasználására még további nagy lehetőségek rejlenek benne.

A mágnes-film

A mágnes-film a tér adott síkmetszetében uralkodó mágneses viszonyokról ad felvilágosítást. A mágneses pólusokat színváltozással teszi láthatóvá. Maga a film egy zselatinszerű mikrokapszulákat tartalmazó vékony réteggel bevont hajlékony műanyaglapka. A kapszulákban olajban szuszpendált kolloidális, túszerű nikkelrészecskék vannak. A nikkelrészecskék ferromágneses tulajdonságúak, és mágneses tér hatására a mikrokapszulákban szabadon el tudnak fordulni.

Ahol a mágneses mező merőlegesen halad át a film síkján, a részecskék befordulnak az erővonalak irányába, ami által a film színe sötétzölddé válik. Ahol az erővonalak a film síkjával párhuzamosan haladnak, a nikkelszemcsék úgy fordulnak el, hogy ez által a film színe világosabbá válik. Vagyis ahol sötétebb a film, ott pólus található. Hogy északi, vagy déli pólus, az nem állapítható meg, ahhoz más eszköz, pl. Hall-szenzor (vagy iránytű) szükséges. Minden esetre a sötét és világos tartományok kirajzolják a mágneses tér mintázatát. Kísérleteink során ezt az eszközt használjuk, mert biztonságosabb, és főleg tisztább.

2.2.3 Néhány mágnes-golyó konfiguráció vizsgálata

Az azonos építőelemekből (mágnes-golyócskákból) egy-, két- és háromdimenziós alakzatok, mintázatok hozhatók/jönnek létre. Ezen mintázatokban szimmetriák és

szimmetriaműveletek (eltolás, tükrözés, forgatás) ismerhetők fel. A kristálytanból ismert lehetséges kombinációk számát azonban a mágneses tulajdonságok erősen korlátozzák.

Az építőelem

Az építőelem a golyócska, mely kétpólusúra van felmágnesezve:

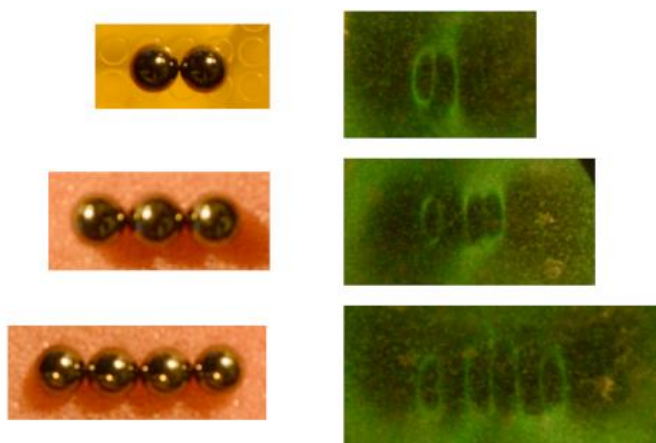


2.2. ábra A bal oldali rajzon a szokásos színek jelölik az É és D pólust, a jobb oldalon a mágnes-filmmel láthatóvá tett mező látható.

(Mint korábban említettem, az É és a D pólus nem különböztethető meg egymástól.)

Egydimenziós alakzatok

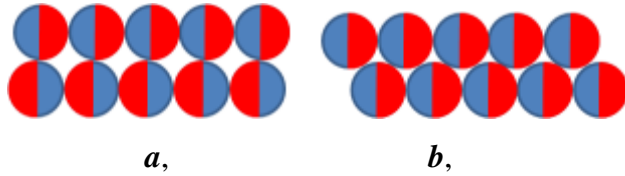
A mágnes-golyókat egymás után illesztve láncot hozhatunk létre.



2.3. ábra Láncba rendezett golyók és mágneses terük

Kétdimenziós alakzatok

A legegyszerűbb kétdimenziós alakzatot úgy kapjuk, ha két láncot egymás mellé illesztünk. Ennek az alábbi két módja lehetséges:



2.4 ábra Két lánc egymás mellé illesztési lehetőségei

Elsőként vizsgáljuk meg az *a*, esetet! A legrövidebb konfigurációban négy golyót egymás mellé helyezve az alábbi mágneses elrendeződést várjuk:



2.5 ábra Az *a*, eset szerinti legkisebb 2D elrendezés

Mágnes-filmmel megvizsgálva azonban azt kapjuk, ilyen alakzat nem létezik. Az átló irányú tasztítások ugyanis elforgatják a golyókat, létrehozva az alábbi, már stabil elrendeződést:



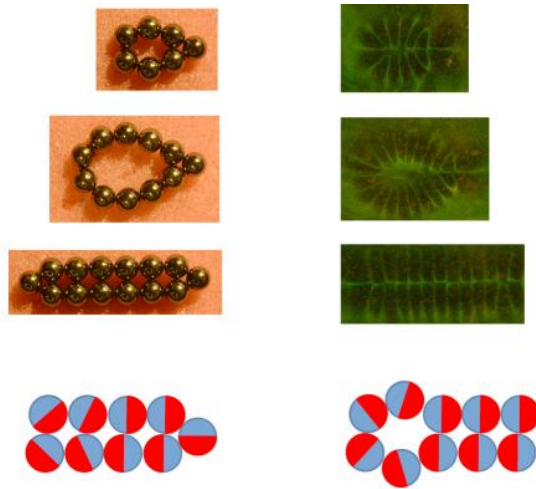
2.6 ábra Négy mágnes-golyó stabil elrendeződése

Hat golyót sem tudunk az *a*, alakzat szerint stabilan elrendezni, szétugorva egy gyűrűt formálnak. Viszont középre behelyezhetünk egy újabb mágnes-golyót. Az eredményt a 2.7 ábra mutatja.



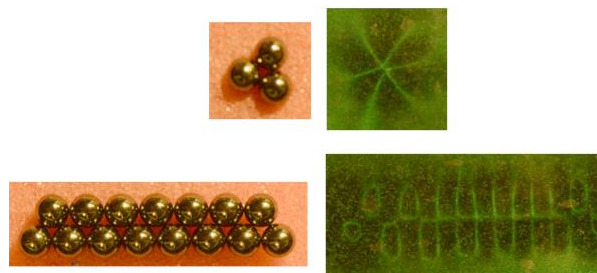
2.7 ábra Hat, illetve hét mágnes-golyó és ez utóbbi esetben kialakult mágneses tér. Világosan felismerhető, hogy a mágneses tér szimmetriája nem egyezik meg a golyók elhelyezkedésének szimmetriájával.

A további próbálkozások azt mutatják, az első stabil a , elrendezésű alakzatot kilenc golyóval tudjuk megvalósítani, akkor is csak úgy, hogy a kilencedikkel mintegy „lezárjuk” az előző nyolc golyó mágnes terét. A 2.8 ábrán bemutatok néhány további elrendezést.



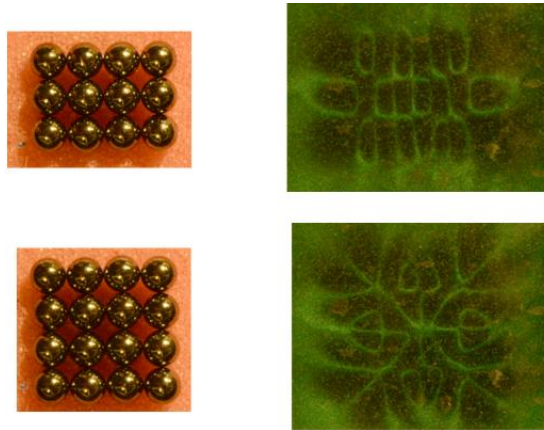
2.8 ábra Az első stabil a , konfigurációs alakzat kilenc mágnes-golyóval valósítható meg, de ha a lánc vége nincs lezárva, még a hosszabb lánc is kipúposodik

A b -vel jelölt elrendezés mindig stabil képződményt eredményez.



2.9 ábra Már a legkevesebb, három golyóból álló alakzat is stabil.

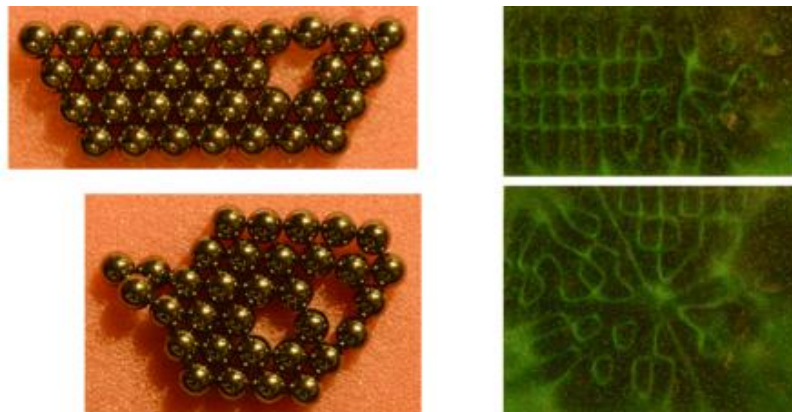
További láncokkal növelhetjük az alakzat méretét. Ismét az a -val jelölt elrendezés az érdekesebb. Három sor még a várt eredményt adja, de négy sor esetén a mágneses mintázat itt is tud váratlan meglepetést okozni.



2.10 ábra A három és négy sorból álló 2D alakzat és mágneses mintázata

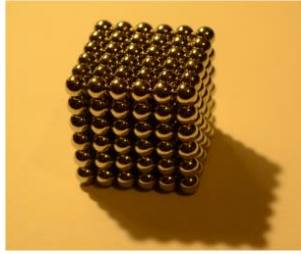
A eddigi tapasztalatok alapján felmerül a kérdés, a golyókból tudunk-e a ferromágneses anyagokra jellemző „domén”-eket kialakítani. Erre irányuló minden próbálkozásunk kudarcra van ítélve. A ferromágnesség ugyanis tipikusan kvantummechanikai effektus, kollektív viselkedés eredménye, amely a mágneses nyomatékok és a külső tér közötti kölcsönhatás mellett fellépő spin-spin kicserélődési kölcsönhatással magyarázható (Ising modell).

A mágnes-filmmel megvizsgálhatjuk különféle kristályhibák révén torzult mágneses teret is. Erre mutat példákat a 2.11 ábra.



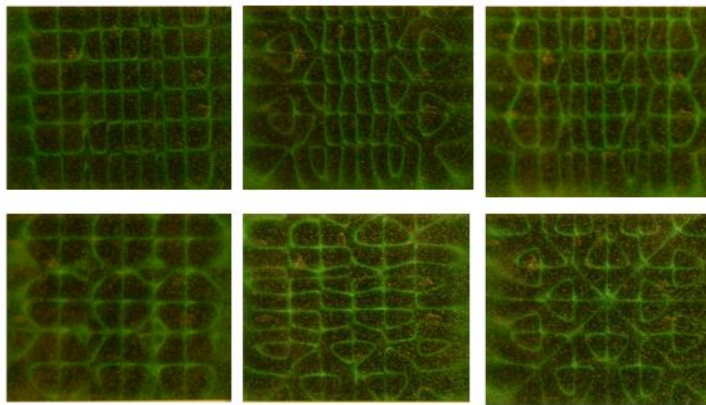
2.11 ábra „Kristályhibák” és a mágneses mintázatban okozott torzulások

Utolsó példaként bemutatom a mágnes-golyókból felépített kocka felületének mágneses mintázatát.



2.12 ábra A mágnes-golyókból felépített kocka

A kocka maximális szimmetriát mutat, ugyanakkor a hat felszín mágneses mintázata a várakozásunkkal ellentétben mégsem egyforma. Ezt mutatja be a következő ábra.



2.13 ábra A mágnes-golyókból felépített kocka lapjainak mágneses mintázata

2.3 Részecske sugárzás szemléletes vizsgálata

A részecskék⁵ detektálására nincsenek érzékszerveink, így a részecskesugárzások természetére nézve nincsenek hétköznapi tapasztalataink. Nincs veszélyérzetünk, mikor esetleg szükség volna rá, más esetben viszont indokolatlan pánikot kelt a sugárzás szónak még az említése is. Az oktatásban ezért fontos, hogy megfelelő módon foglalkozzunk a témával. Az összefoglaló néven radioaktív sugárzás különböző komponenseinek és azok tulajdonságainak, valamint a beütések gyakoriságának, eloszlásának, statisztikus jellegének és értékelésének megismerése sokat segíthet a hétköznapi életben való eligazodásban is, gondolok itt az információközlő csatornák szenzációra éhes híreire, a félig megértett, vagy szándékosan félremagyarázott közleményeinek helyes értelmezésére. Ezért a részecskesugárzás bemutatására

⁵ Az egyszerűség kedvéért a dolgozatban a gamma sugárzás fotonjait is részecskéknek tekintem.

kidolgoztam egy egyszerűen alkalmazható szemléletes, a vizsgálatot hallás, látás és adat értékelés révén egymást kölcsönösen kiegészítő és többszörösen megerősítő, a diákok számára maradandó élményt jelentő módszert. A méréshez GM-csöves detektort, a szemléltetéshez az ingyenes AudaCity programot használtam fel.

(Sugárzásmérő detektor egyébként a HUNVEYOR-4 gyakorló űrszondán is helyet kapott, ami pont azt a célt szolgálja, hogy a hallgatók figyelmét a részecskesugárzások tanulmányozásának irányába, a fizika felé fordítsam.)

2.3.1 A radioaktivitás felfedezése

A radioaktivitás felfedezése – éppúgy, mint a fizika több más váratlan eseménye – véletlenül történt. Henry Becquerel francia fizikus 1896 elején, miután hallott Wilhelm Conrad Röntgen német fizikus előző évi felfedezéséről - mi szerint az X-sugarak áthatolnak a kartonon, a fekete papíron, sőt az emberi testen is - elhatározta, hogy megvizsgálja, vajon a ráeső fény hatására világító, fluoreszkáló anyagok emittálnak-e valami röntgensugárhoz hasonlót. Mivel Becquerel azt gondolta, a várt sugárzás külső megvilágítás eredménye, az ablakpárkányra tűző napra erős fluoreszkáló tulajdonságáról ismert uranil kristályokat helyezett, melyek alá fekete papírba becsomagolt fényképlemezt tett. Előhívás után a kristályok alatt a lemezeken tisztán kivehető volt egy-egy fekete folt.

A párizsi eget 1896. február 26-án és 27-én sötét felhők borították, s Becquerel néhány napra a becsomagolt fotólemezeket és a kristályokat a fiókjába rakta. Mikor március elsején kisütött a nap, ismét elővette a lemezeket és a kristályokat, hogy folytassa a kísérletét. A fotólemezeken előhívás után az eddigi sötét foltok helyett szénfekete nyomokat kapott a kristályok alatt. Vagyis a sötétedés a bezárt fiókban is folytatódott, és nyilvánvalóan semmi köze nem volt a megvilágításhoz. [1],[2]

2.3.2 A földet érő részecskesugárzás

A Föld légkörét állandó részecskesugárzás záporozza. A részecske- vagy más néven korpuzkuláris sugárzás egyik fajtája a napszél, mely protonokból és elektronokból áll.

(A Nap másodpercenként kb. egymillió tonna atomos anyagot dob ki a térbe, amiből a Földet érő hányad másodpercenként mintegy fél kilogramm. E részecskék sebessége különböző, átlagosan 700 km/s.). [3]

A sugárzás másik fajtáját, a közel fénysebességgel érkező részecskesugárzást (energiájuk $10^9 - 10^{20}$ eV között van) kozmikus sugárzásnak⁶ nevezzük, melyet 1911-ben Hess és Kohlhörster fedezett fel. A légkör külső határához érkező primer kozmikus sugárzás a Föld felszínén nem észlelhető, a részecskék ugyanis kölcsönhatásba lépve a légkör atomjaival és molekuláival igen bonyolult és sokféle folyamatot váltanak ki. Az így keletkező szekunder sugárzásban megkülönböztetünk egy lágy és egy kemény komponenset. Az ismételt ütközések során egyre több részecske és foton keletkezik. A lágy szekunder sugárzás a primer sugárzás részecskéinek lefékezéséből származik. Egyetlen primer részecske egész kaszkádzáport vált ki. A szekunder kozmikus sugárzás kemény komponense mezonokból áll, és energiájuk olyan nagy, hogy a Föld kérgébe több száz méterre, a tengervízben akár egy kilométer mélyre is lehatolnak.

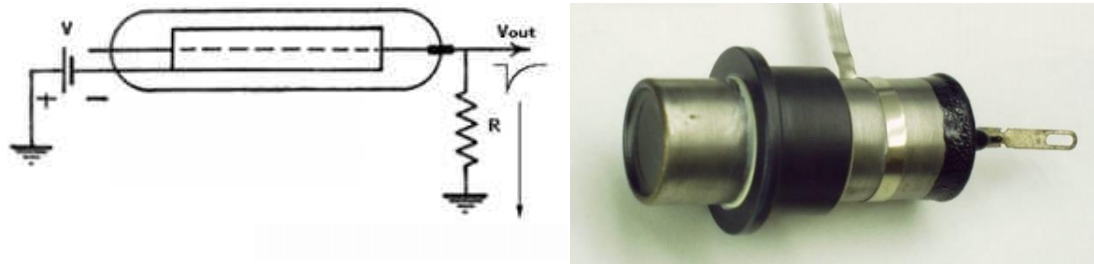
2.3.3 A részecskesugárzás detektálása

Hans Geiger és Ernest Marsden a Manchesteri Egyetemen Ernest Rutherford vezetése alatt az anyag szerkezetének felderítésére szolgáló szórás kísérleteket végeztek. Az egyetem pincéjében teljes sötétségben végzett kísérletekben a cinkszulfid ernyőbe becsapódó α -részecskék keltette halvány felvillanásokat kellett hónapokon, sőt éveken át számlálni. Az idegölő és lélekromboló munka megkönnyítése érdekében Geiger 1908-ban kiötlötte a számlálósövet, melyet később Rutherford egyik PhD diákja, Walther Müller tökéletesített.

A Geiger-Müller-féle számlálóső a radioaktív sugárzás kimutatásának és mérésének ma is egyik legfontosabb eszköze. [4] Ha a számlálósővön egy ionizáló részecske halad át, a keletkezett ionok a centrális elektróda körüli erős villamos térben olyan nagymértékben felgyorsulnak, hogy ionizáció révén további szekunder ionokat keltenek. A szekunder ionizáció révén megnövekedett töltés feszültséglökést eredményez. Ezeket

⁶ Az űrszondák méréseiből tudjuk, hogy a kozmikus sugárzás erőssége nő a Naptól való távolsággal.

a feszültséglökéseket számlálják, illetve hallhatóvá téve kapjuk a számláló jellegzetes kattogását.



2.14 ábra A Geiger-Müller számlálócső

A Geiger-Müller számlálócső, melynek több típusa is létezik, a gáztöltésű számlálók közé tartozik. Órai demonstrációs kísérletekre GM-csöves eszközöket használunk, míg a HUNVEYOR-4-en levő érzékelő félvezető detektort tartalmaz. A félvezető detektorok elvben ugyanúgy működnek, mint az ionizációs kamrák, azaz egy töltött részecske hatására a félvezetőben töltéshordozók szabadulnak fel, melyek az elektromos tér hatására az elektródákhoz áramlanak, és ott feszültségimpulzust keltenek. A félvezetők nagy előnye, hogy míg egy elektron szabaddá válásához a gáztöltésű számlálóban mintegy 30 eV szükséges, addig a félvezetőkben átlagosan elegendő már 3,6 eV is.

A modern technikának köszönhetően ma már az interneten (elfogadható áron) kaphatók olyan sugárzás mérők⁷, melyek egy okostelefon fülhallgató kimenetére dugva alkalmasak röntgen és gamma sugárzás mérésére.



2.15.ábra Smart Griger

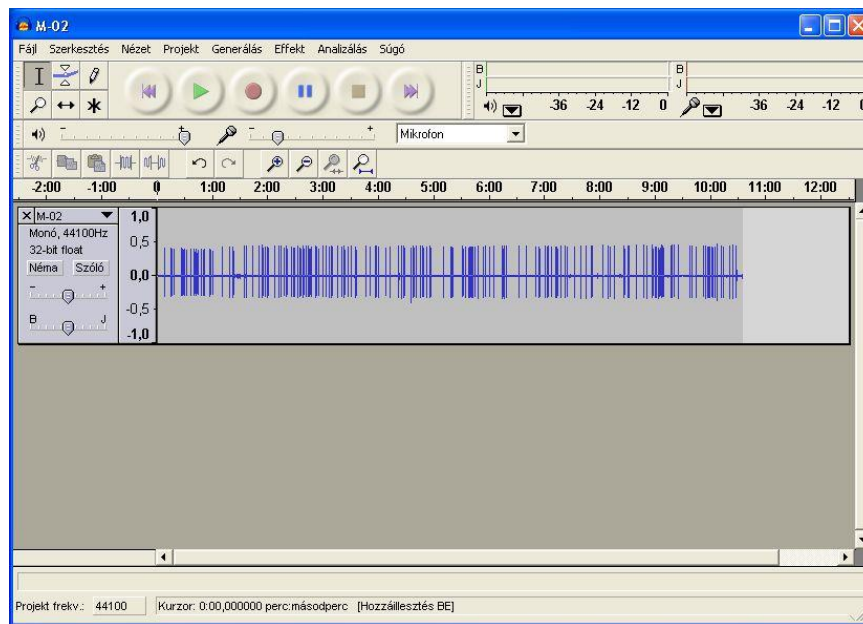
2.3.4 A részecskesugárzás szemléltetése és elemzési lehetőségei

Hogy a sugárzásra vonatkozóan szemléletes, esetleg még számszerű eredményeket is lehessen kapni, a detektort a laptop mikrofonja elé helyezve a kattánásokat az ingyenesen letölthető AudaCity programmal a számítógépen rögzítjük. Hangfelvétel természetesen sok egyéb módon is készíthető, pl. magnetofon, tablet, okostelefon, diktafon,.. stb., és utána digitalizáljuk az AudaCity-vel, vagy már eleve digitálisan rögzítjük a kattánásokat.

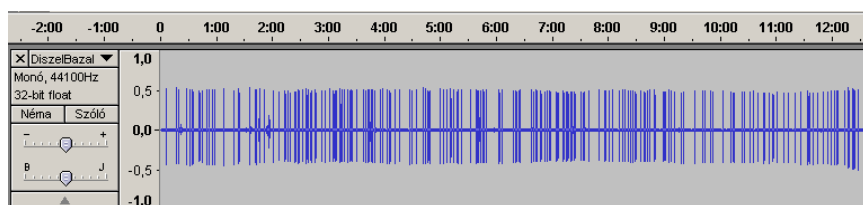
⁷ pl. Smart Geiger Radiation Counter, vagy Smart Geiger Pro SGP-001

(A sugárzás statisztikai jellege miatt célszerű mintegy tíz percnyi felvételt készíteni.)
 Eredményül a hangsávban szépen látszanak a beütéseket jelző tüskék. Ezzel máris szemléltethetővé vált a beütések sűrűsége, és statisztikai jelege, két érzékszerven keresztül összekapcsolódva rögzül a kísérleti élmény (2.16 – 2.18 ábra).

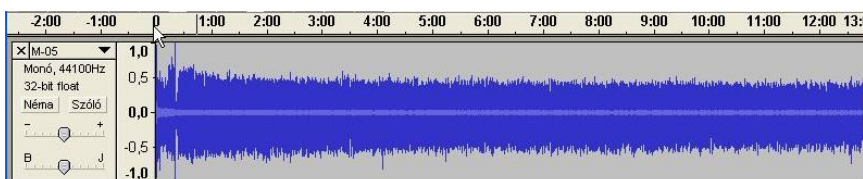
A rögzített felvételeket később is vissza lehet hallgatni, sőt a programmal több, különböző helyen és időben rögzített felvételt az egyes csatornában egymás alá lehet helyezni, vizuálisan azonnal össze elehet hasonlítani egymással, valamint ki lehet nagyítani belőlük részleteket is. Erre mutat példát a 2.19 ábra. A képek magukért beszélnek.



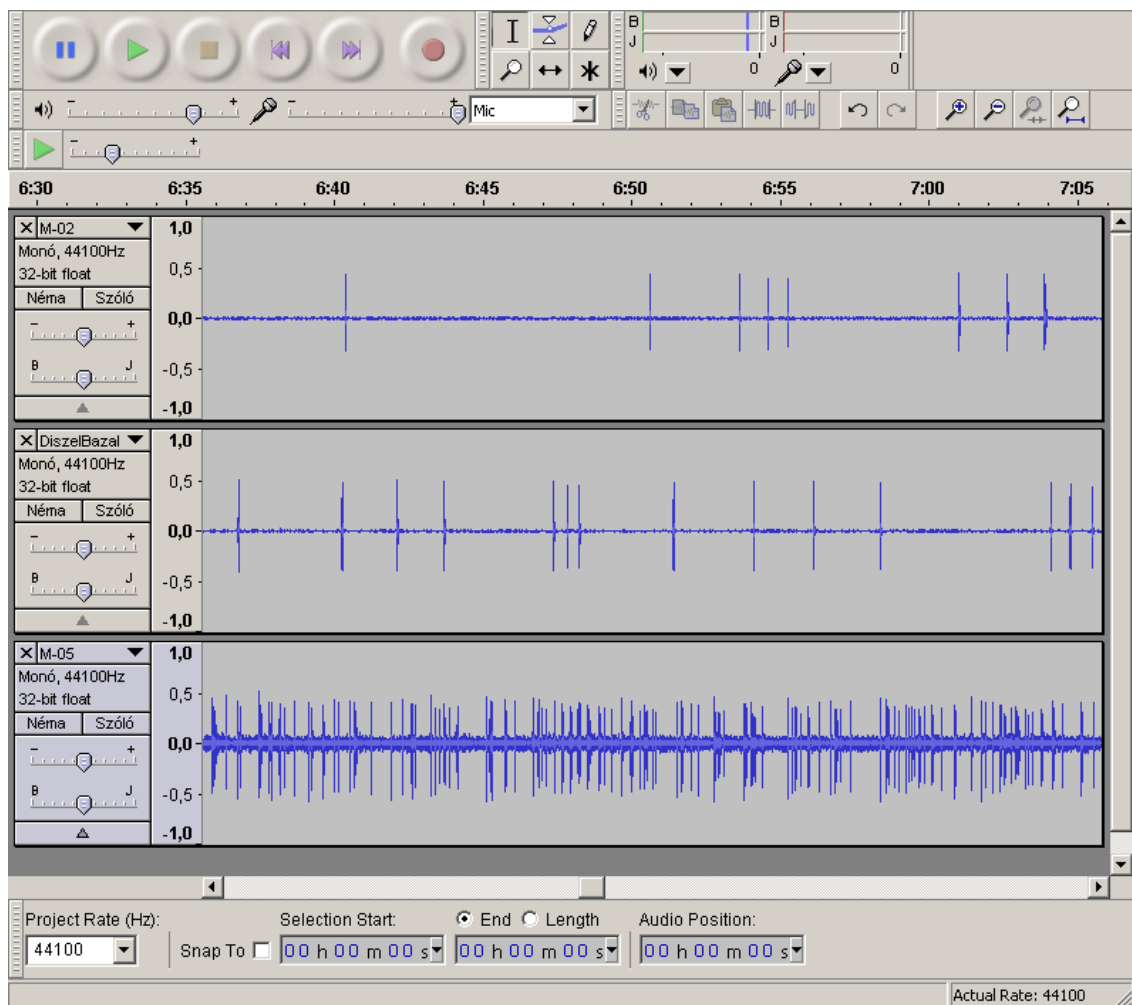
2.16 ábra Egy lakóházban rögzített felvétel



2.17 ábra A Balaton-felvidéken, a diszeli bazaltbányában rögzített felvétel



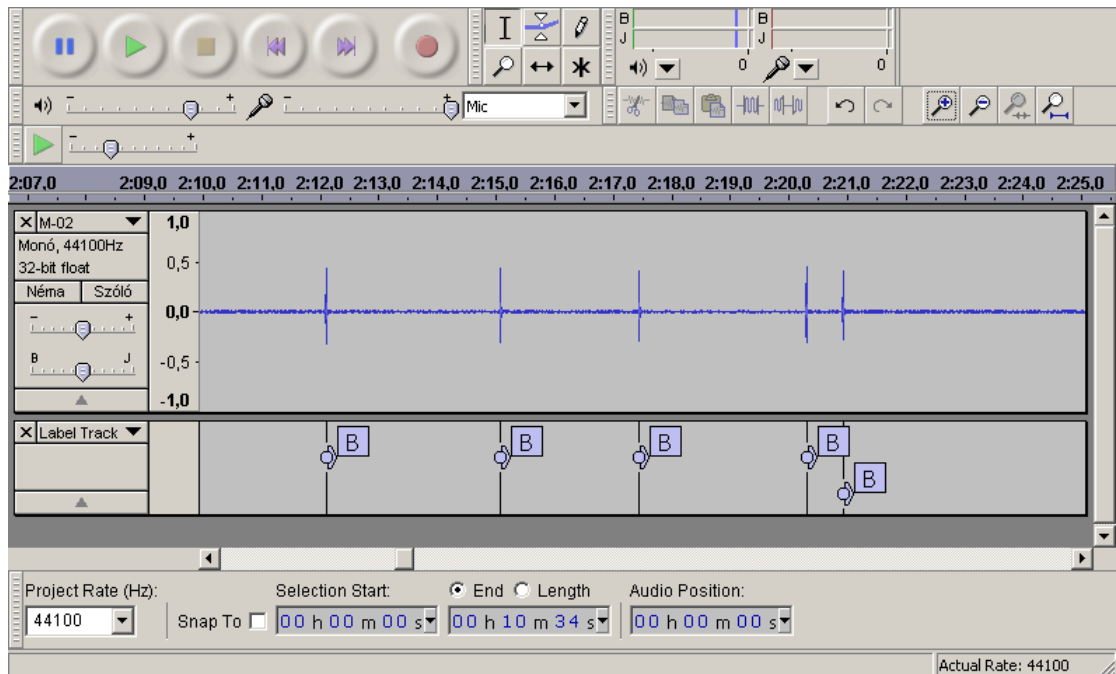
2.18 ábra Repülőgépen, 11 ezer méter magasban rögzített felvétel



2.19 ábra Az előző három felvétel (lakás, bazaltbánya, repülőgép) egy fél perces részlete egymás alatt

Az Audacity program azonban ennél sokkal többre is képes. A beütéseknek a felvétel kezdetétől számított időpontjait adatfájlba menthetjük. Az eljárás a következő.

- Betöltünk egy hangfelvételt, majd kijelöljük a vizsgálni kívánt részletét
- Az „Analizálás” menüpont alatt kiválasztjuk a „Beat Finder ...” funkciót
- Beállítjuk a beütés amplitúdójának küszöbértékét, amit általában próbálgatással célszerű megkeresni, majd az „OK” gombbal elindítjuk az analízist. Egy kis idő múlva a hangsáv alatt megjelenik egy új sáv, amelyen az egyes kattanások helyét egy „B” betű jelzi (2.20 ábra).
- Utolsó lépésként a „File” menü „Címkék exportálása” pontjára kattintva a beütések időpontjait elmentjük.



2.20 ábra A beütések időpontjait jelölő címkesáv

Az alábbiakban egy részlet látható a rögzített eredményből.

8,408000	8,408000	B
15,638000	15,638000	B
16,362000	16,362000	B
16,923000	16,923000	B
18,219000	18,219000	B
18,406000	18,406000	B

Az első adat a beütés kezdetét adja meg ezred másodperc pontossággal, a második a végét, míg „B” a beütés címke. Ezzel az időadatokat a számítógépen előállítottak, amelyhez majd megfelelő programot lehet készíteni, akár EXCEL-ben az adatok feldolgozására, értékelésére. A kiértékelés tudományos igényű elméletét és gyakorlatát az irodalom [5] részletesen tartalmazza.

A 2. számú fejezet jelenti a 2. számú téziscsoport háttérét.

Hivatkozások

- [1] G. Gamow: A fizika története, Gondolat, Bp. 1965.
- [2] G. Gamow – J.M.Cleveland: Fizika, Gondolat, Bp. 1973.
- [3] Kulin György – Róka Gedeon: A távcső világa, Gondolat, Bp. 1980.
- [4] Wolfgang Finkelburg: Bevezetés az atomfizikába, Műszaki Könyvkiadó, Bp. 1958.
- [5] Jánossy Lajos: Mérési eredmények kiértékelésének elmélete és gyakorlata, Akadémiai Kiadó, Bp. 1968.

Néhány hasznos Internetes forrás:

http://astro.elte.hu/icsip/csillkozi_anyag/kozmicussugarzas/index_in.html

<http://www.radprocalculator.com/Gamma.aspx>

"FILOTEO:Föl kell tenni ezért, hogy számtalan nap van, amelyek közül sok számunkra kis test formájában látható; de némelyikük kisebb csillagnak tűnik föl, holott sokkal nagyobb annál, amely nekünk a legnagyobbnak látszik.

ELPINO: Mindezt legalábbis lehetségesnek és ellentmondás nélkülinek kell tartani.

FILOTEO: Ama napok körül meg nagyobb és kisebb tömegű földek keringhetnek, mint a mienk."

(Giordano Bruno: A végtelenről, a világegyetemről és a világokról)

3. Naprendszeren kívüli Föld-szerű bolygók detektálása

3.1 Bevezetés

Az alábbiakban kidolgozott példákon keresztül megvizsgálom a Naprendszeren kívüli Föld-szerű bolygók detektálásának néhány módszerét, hogy ezen keresztül jobban érthetőek legyenek a kutatás nehézségei. Az anyag szakköri fogalalkozások keretében került feldolgozásra. A feladatok többségének megoldásához egyszerű algebrai, geometriai és trigonometriai ismeretek elegendőek. Az anyag egyes részei viszont túlmutatnak a középiskolai oktatás keretein, és mivel célom a fizikai ismeretek elmélyítése, ezért a szükséges mértékben tömören összefoglalom a feldolgozott módszerekre vonatkozó elméleti ismereteket. A számolásokhoz szükséges adatok nagy részét egy csokorba összegyűjtöttem, de néhány speciális esetben ezek csak a feladat megoldásakor kerülnek elő. Az egyszerűbb feladatokat alapfokon, a nehezebbeket tehetséggondozás keretében tartom feldolgozhatónak. A feladatok megoldását gyakran megjegyzésekkel egészítettem ki.

A Naprendszeren kívüli bolygók, vagy szokásos néven exobolygók keresésének leggyümölcsözőbb módszere a csillagok fényességváltozásának analízise. Az exobolygó átvonulás (tranzit) fénygörbe előállításához, vizsgálatához és a paraméterekkel való kísérletezéshez táblázatkezelő (Excel) használatával készítettem egy egyszerű szimulációs programot is, mely a CD mellékleten megtalálható (*03-HGy_Okkultacio.xlsx*).

Az anyag összeállítását az inspirálta, hogy tudomásom szerint ilyen részletekbe menő kvantitatív eredményeket is felmutató oktatási anyag a témában még nem készült.

3.2 A Naprendszeren kívüli bolygók keresésének néhány módszere

Az exobolygók keresése történhet

- közvetlen megfigyelés révén, vagy
- indirekt módszerekkel

A következőkben a teljesség igénye nélkül, csak azokkal a módszerekkel foglalkozom, amelyekre feladatokat dolgoztam ki.

3.2.1 Közvetlen megfigyelés

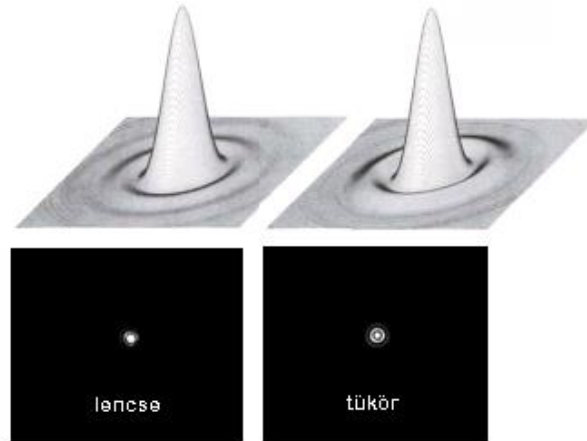
Más csillagok körüli bolygók létezésének legmeggyőzőbb bizonyítéka a közvetlen megfigyelés lenne. Az eddigi több mint háromezer katalogizált exobolygó közül azonban még egyet sem ezzel a módszerrel fedeztek fel. Nem is csoda, hiszen a bolygó több millió vagy milliárdszor is halványabb a csillaga mellett. Mintha egy több mint ötvenezer kilométer távolságból szemünkbe világító erős reflektor körül keringő szentjános bogarat szeretnénk megpillantani.

3.2.1.1 Hullámoptikai háttérismeretek

A csillagok – bár hatalmas objektumok – olyan távol vannak, hogy pontszerű fényforrásoknak tekinthetők. Valóban, néhány kivételtől eltekintve műszereink nem adnak róluk értékelhető képet. Ennek egyik oka az, hogy a fény, mint (elektromágneses) hullám, a véges méretű optikai elemeken áthaladva elhajlást szenved (diffrakció). Ennek következtében a csillagról érkező fény még tökéletes, azaz minden egyéb leképezési hibától (pl. szférikus és kromatikus aberrációtól, ... stb.) mentes optika esetében sem egy pontra, hanem egy sajátos intenzitás eloszlású tartományra, az úgynevezett Airy korongra, és a korongot körülvevő diffrakciós gyűrűkre képeződik le⁸. A 3.1 ábra az optikai tengellyel párhuzamosan érkező párhuzamos fénynyaláb lehető legjobb, úgynevezett diffrakció határolt leképezésének intenzitás-eloszlását mutatja egyszínű (monokromatikus) fényre, egy lencsés (refraktor) és egy tükrös távcső (reflektor)

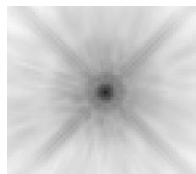
⁸ Airy eredetileg a korong láthatóságáról írt, amely a fizikai energia eloszlás mellett szemünk érzékenységét is tartalmazza. Ebből következően a halványabb csillagokat kisebb, a fényesebbeket nagyobb korongként érzékeljük. A halványabb csillagoknál a diffrakciós gyűrűket már nem is látjuk.

esetében. A reflektornál a középső csúcs kissé alacsonyabb, mint a lencsés távcsőnél, ugyanis a tükrös távcsövekben több fény jut a diffrakciós gyűrűkbe. A különbséget az optikai rendszer középső részének bizonyos mértékű kitakarása (pl. segédtükör) okozza.



3.1 ábra Lencsés és tükrös távcső diffrakció határolt leképezése.

Egy pontszerű fényforrás (csillag) diffrakciós képe ki is számolható (3.2 ábra), és a digitális képfeldolgozás során kivonható a felvételtől. Ami marad, az az esetleges kísérek létre enged következtetni. (3.20 ábra)



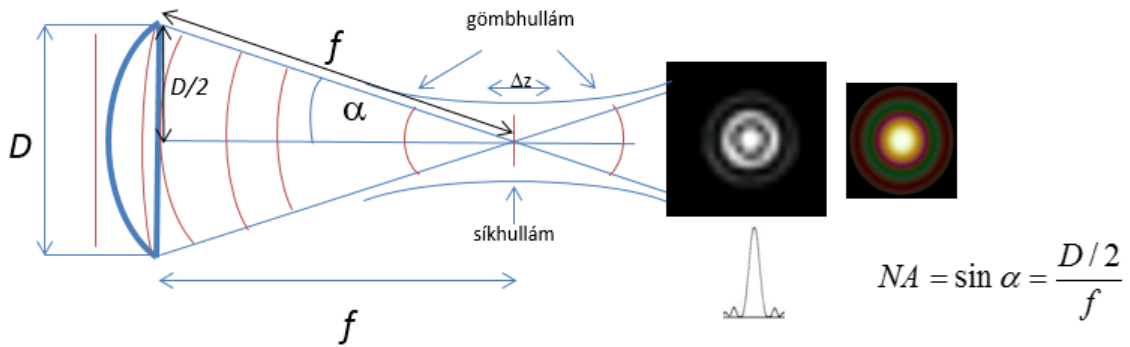
3.2 ábra A Hubble űrtávcső WFPC-2 kamerájának kiszámított diffrakciós képe $\lambda = 555$ nm-re. A kereszt alakban megjelenő sávokat a segédtüköröt tartó szerkezet okozza.

Felbontás: 1 pixel = 0,046”.

A diffrakciós korong mérete a fény hullámhosszától (λ), a képalkotó optika (lencse vagy tükör) átmérőjétől (D) és fókusz távolságától (f) függ. A középső csúcs magasságának felénél (félérték szélesség) kiterjedése $0,514f\lambda/D$ (3.3 ábra). Az első minimum gyűrű sugara:

$$r = 1,22f\lambda/D. \quad (1)$$

Ideális esetben a mintázat közepétől az első minimum gyűrűig terjedő középső részére, az Airy-korongba esik a beérkező fény mennyiségének mintegy 84%-a.



3.3 ábra A lencse szerepe a hullámoptika szempontjából. Jobbra egy csillag diffrakciós képe az intenzitás eloszlással monokromatikus, illetve fehér fényben. Mivel a valódi csillag fénye nem csak egyféle színt tartalmaz, a csillag képét az egymásra halmozott, különféle színű és méretű diffrakciós képek összessége alkotja.

Hullámoptikai szempontból a lencsének az a szerepe, hogy a bejövő síkhullámot gömbhullámmá alakítsa, vagyis a lencsét érő síkhullámfront minden pontja egyszerre érjen a fókuszba. Ez úgy következik be, hogy a lencsében a törésmutató által meghatározott mértékben a fény lassabban halad, mint a levegőben, így a hullám a lencsében megtett út hosszával arányosan lemarad. (Vegyük észre, hogy a fókusztávolság valójában a görbült hullámfront maximális sugara, tehát valójában nem a lencse közepétől, hanem a szélétől számítandó. Az eltérés persze csak kis nyílásviszony esetén lesz számottevő.) A tükrös távcsövekben is az a cél, hogy a tükröfelület különböző pontjairól visszavert fény optikai úthossza a fókuszig egyenlő legyen.⁹ A fény hullámtermészetéből adódó végső megállapítások egyaránt érvényesek mindkét távcsőtípusra.

A fókuszs előtt és a fókuszs után a hullámfront ellenkező irányban görbül. A lencsének, illetve a tükörnek ott van a fókusza, ahol a hullámfront éppen sík. Az ebbe a pozícióba helyezett ernyőn monokromatikus fényben a már ismert intenzitás eloszlású mintázatot kapjuk. Fehér fényben a különböző hullámhosszú, ebből következően a különböző

⁹ A paraboloid alakú tükör esetében a parabola definíciójából adódó tulajdonságot használják ki, azaz a parabola azon pontok mértani helye, melyek egy ponttól (a fókuszponttól) és egy egyenestől (a vezéregyenestől) egyenlő távolságra vannak. A gyakorlatban különböző okok miatt számos tükrös távcsőfajta létezik, sőt reflexiós és refrakciós elemek vegyes használata (katadioptrikus távcsövek) is, de ez már nem tárgya jelen dolgozatnak.

méretű diffrakciós képek egymásra rakódnak¹⁰. Mivel a kék fény hullámhossza kb. fele a vörösének, a vörös Airy-korong mérete kétszerese a kék korongnak.

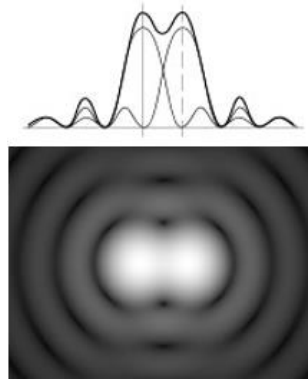
A kitakarás nélküli, tökéletes leképezéskor a beérkező fényenergia 83,9%-a jut az Airy-korongba, a maradék a diffrakciós gyűrűkbe kerül. (Az első gyűrűbe 7,1%, a másodikba 2,8% jut.) Az (1) formula szerint, ha változatlan fókusz távolság mellett az objektív átmérőjét megkétszerezzük, a négyszer annyi beérkező fényenergia fele akkora átmérőjű Airy-korongba gyűlik össze, vagyis a csillag képe 16-szor fényesebbé válik, következésképp halványabb objektumok is detektálhatók, vagy rövidebb expozíciós idő is elegendő lesz a detektáláshoz. Ha viszont változatlan átmérő mellett a fókusz távolságot csökkentjük a felére, ugyanannyi fényenergia negyed akkora felületre gyűlik össze, a kép négyszer lesz fényesebb. A nyílásviszony (D/f) növelésével azonban a rendszer egyre kényesebbé válik a fókusz pontos beállítására. Az ún. fókusz mélység, vagyis a fókuszálással szembeni tolerancia a fenti példát tekintve a negyedére csökken:

$$\Delta z = \lambda / 2NA^2. \quad (2)$$

A formulában szereplő NA jelölés a lencse numerikus apertúrája, számértékét tekintve a nyílásviszony fele ($NA = D/2f$, 3.3 ábra). A diffrakció határolt leképezéshez tehát az is szükséges, hogy a detektor az ideális fókusz helyétől (ahol a hullámfront éppen síkhullám) $\pm \Delta z/2$ -nél jobban ne térjen el.

A távcsövek talán legfontosabb paramétere, a felbontóképesség, vagyis hogy a műszerrel milyen finom részleteket figyelhetünk meg meg, vagy fényképezhetünk meg le. A felbontóképességet ívmásodpercekben szokás megadni. Minél kisebb ez az érték, a távcső felbontása annál jobb. A legegyszerűbb, az ún. Rayleigh-kritérium szerint két (azonos fényességű) pontforrás (pl. csillag) képe akkor nem mosódik össze, ha az egyik pontforrás képének maximuma a másik első minimumhelyére, vagy annál távolabb esik. (3.4 ábra)

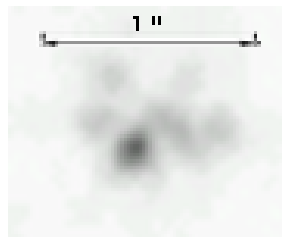
¹⁰ A kijelentés a tükrökre maradéktalanul érvényes. Lencsék esetén a helyzetet tovább bonyolítja a törésmutató hullámhossz függése (diszperzió), de ezzel az ún. színi hibával és javítási lehetőségeivel most nem foglalkozunk.



3.4 ábra A Rayleigh-kritérium szemléltetése

3.2.1.2 A földi légkör hatása

Ha a vizsgált csillagnak bolygója van, a bolygó sok nagyságrenddel halványabb képe belevész a csillag diffrakciós képébe. Amennyiben a megfigyelést a Föld felszínéről végezzük, a légköri turbulenciák miatt a csillag képe ráadásul folyton ugrál¹¹, az elvi felbontóképességnél lényegesen nagyobb, körülbelül egy ívmásodperc nagyságrendű területen elkenődik (3.5 ábra). Ennek kiküszöbölése érdekében célszerű a távcsövet a légkörön kívül üzemeltetni (pl. Hubble űrtávcső, 3.6 ábra). Az észlelési technika fejlődésével a szcintilláció hatása adaptív optika alkalmazásával ma már nagyrészt kiküszöbölhető. Sajnos a javulás tartománya egy ívpercnél kisebb sugarú tartományra korlátozódik, ami a Hubble űrtávcső 28 ívperces látómezejének csupán töredéke.



3.5 ábra A légköri szcintilláció hatása.

3.2.1.3 A Hubble űrtávcső

A konkrét számpéldákhoz többször is a Hubble űrtávcső (HST – Hubble Space Telescope) adatait fogjuk használni. A HST szerelése ún. Ritchey-Crétien Cassegrain¹²

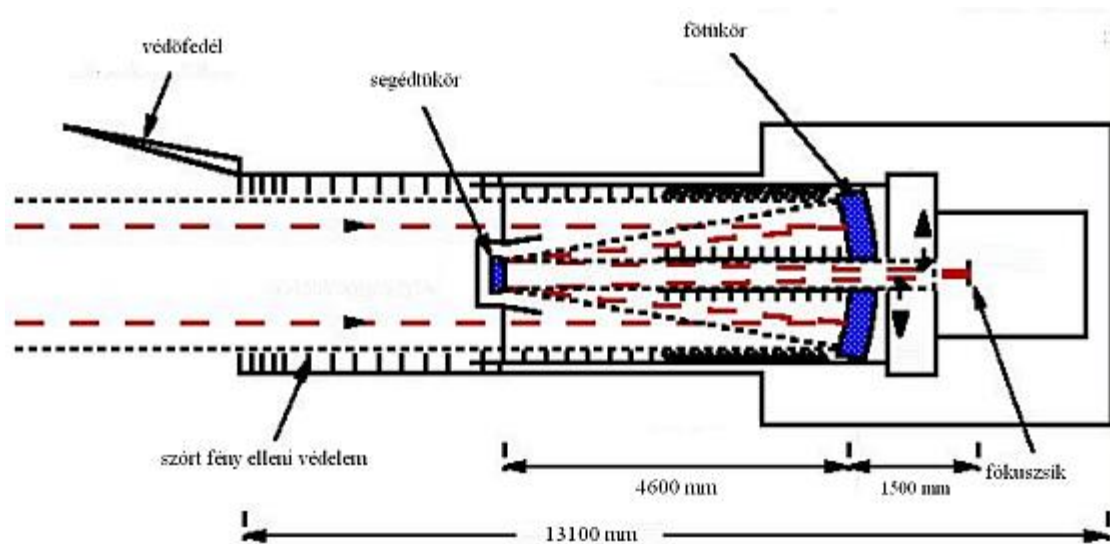
¹¹ Miközben színe és fényessége is változik (szcintilláció).

¹² Mind a főtükr, mind a segédtükr hiperboloid alakú, és a főtükr közepe ki van fúrva.

(RC) reflektor (3.7 ábra). Ez az elrendezés azért kedvező, mert így a leképezési hibák minimalizálása mellett - a fénysugarakat mintegy „összehajtogatva” - viszonylag rövid tubusban hosszú effektív gyújtótávolság érhető el.



3.6 ábra A HST a Discovery űrrepülőgépről fényképezve az 1997-es második szerviz alkalmával (forrás: NASA)



3.7 ábra A Hubble űrtávcső optikai sugármenete.

3.2.1.4 A digitális fényképezés detektorai

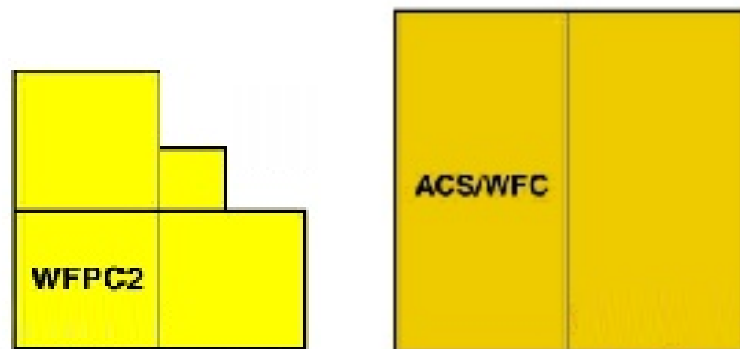
Az összegyűjtött fény detektálása manapság szinte kizárólag elektronikusan, CCD chipekkel¹³ történik. A CCD chip sok-sok, mátrixba (sorokba és oszlopokba) rendezett, egyedileg kiolvasható, pixelnek nevezett apró fénymérő detektor összessége. A

¹³ Manapság a CMOS detektorok is egyre nagyobb teret kapnak, de professzionális csillagászati célokra mégis inkább a CCD technikát használják. Mivel a gyártástechnológiák ezen a téren is gyorsan fejlődnek, a témában sok diskusszió található az Interneten (pl. NASA Tech Briefs).

pixelekből minden detektált foton egy elektront szabadít el kötött helyzetéből. A CCD egyik fontos jellemző paramétere az elektrongyűjtő kapacitás, azaz pixelenként hány szabad elektront képesek a beérkező fotonok létrehozni. Ez függ a pixel méretétől is. A nagyobb pixelben többet, a kisebbben kevesebbet. Ha a parányi detektorunk (vagyis a pixel) telítésbe ment, akkor hiába érkeznek újabb fotonok, azok már nem tudnak további szabad elektronokat kelteni. Az elektrongyűjtő képesség tehát a keletkezett kép dinamikatartományát határozza meg.

A kép elkészítéséhez az elektronika egymás után megállapítja, hogy az exponálás során pixelenként hány töltés keletkezett, és digitalizált feszültségértékként továbbítja a képfeldolgozó program felé. A pixelméret csökkentésével egy darabig nő ugyan a felbontás, de mivel az egyes detektorokat (pixeleket) egymástól el kell szigetelni, valamint a kiolvasó és vezérlő elektromos vezetékek számára is helyre van szükség, a kép nem folytonos, hanem mozaikszerű lesz. A méretcsökkentéssel nem csak az elektrongyűjtő képesség (vagyis dinamika tartomány) csökken, hanem egyre csökken a hatásos fénygyűjtő felület is. Mindezek eredményeképp egy adott pixelméret alatt nem hogy javulna, de romlik a kapott kép minősége. A gyakorlatban a kb. 4x4 mikrométeres pixelméret alá nem nagyon érdemes menni.

A HST korai, jellegzetes képmezőt adó WF/PC2 kamerája (Wide Field/Planetary Camera) négy darab 800x800 pixeles chipet tartalmazott. Ezek közül három chip 29x29 µm-es, egy pedig 12x12 µm-es pixelmérettel rendelkezett. (3.8 ábra)



3.8 ábra A HST régi (WF/PC2) és új (ACS/WFC3) kamera méretarányos detektorelrendezése.

Idővel a WF/PC2 kamerát egy korszerűbb, ACS/WFC3 kamerára (Advanced Camera for Surveys/Wide Field Camera) cserélték, ami két darab egymás mellé helyezett, egyenként 2048x4096 pixelt tartalmazó chipet tartalmaz. A pixelek mérete 14x14 μm .



3.9 ábra A 2009-ben üzembe helyezett ACS/WFC3 kamera. (NASA)

3.2.2 Közvetett módszerek

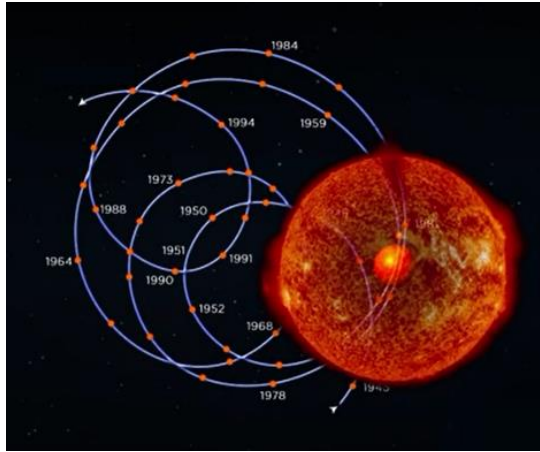
Bár napjainkban már háromezer felett van a katalogizált exobolygók száma, ezek közül egyiket sem közvetlen megfigyelés révén fedezték fel. A számos közvetett módszer közül csak azokat tekintem át, melyekre feladatokat dolgoztam ki. Ezek az alábbiak:

- asztrometriai módszer (csillagpozíció változás)
- spektroszkópai módszer (a színekvonalak Doppler-eltolódása)
- fotometriai módszer (fényintenzitás változás)

3.2.2.1 Asztrometriai módszer

Az asztrometriai módszer azon a tényen alapul, hogy miként a bolygók, úgy a központi csillag is keringő mozgást végez a rendszer tömegközéppontja körül. Ha maga a bolygó nem is látszik, a csillag pozíciójának szisztematikus megváltozásából

(imbolygásából) sötét kísérő(k)re következtethetünk. Egyetlen bolygó esetén a mozgás kör vagy ellipszis, pontosabban annak látóirányunkra eső merőleges vetülete. Több bolygó esetén a mozgás természetesen bonyolultabb, viszont következtetni lehet belőle a kísérők számára is.



3.10 ábra Ilyennek látszana távolról a Nap mozgása [6]. A Jupiter hatása egy 12 éves periódusban nyilvánul meg, amire ráakódik a többi bolygóé. A legközelebbi csillag, a Proxima Centauri távolságából (4,2 fényév) az imbolygás mértéke csupán $0,0037''$. A Hubble űrtávcső ACS kamerájának felbontása $0,05''/\text{pixel}$, vagyis a Nap elmozdulása ebből a távolságból kevesebb, mint egy tized pixelnyi lenne.

A továbbiakban csak a legegyszerűbb esettel foglalkozom, vagyis egyetlen bolygó hatását tanulmányozom. A csillag pozíciójának maximális kitérése radiánban mérve:

$$\theta = \frac{a m}{d M} \quad (3)$$

ahol a a bolygó csillagtól való távolsága¹⁴, d a csillag tőlünk való távolsága, m és M a bolygó illetve a csillag tömege.

A helyzetet tovább bonyolítja, hogy a mozgás Kepler első törvényének¹⁵ megfelelően ellipszis pályán történik, ami tükröződik a csillag elmozdulásában is. Az impulzus nyomaték megmaradás értelmében az ellipszis pályán a sebesség nem állandó, ha a két objektum közelebb kerül egymáshoz, a sebesség nagyobbá, míg ha távolabb, kisebbé válik, ami Kepler második törvényének következménye. Az egyszerűség kedvéért a

¹⁴ Az ellipszis fél nagytengelyét a -val szokás jelölni, ami körpálya esetén megegyezik a sugárral, a bolygónak a csillagtól mért távolságával.

¹⁵ Valójában a természet törvényéről van szó, amit Kepler ismert fel, csak így szokás rá hivatkozni. A többi természettörvény esetében is ez a helyzet.

továbbiakban körpályával számolunk, és feltesszük azt is, hogy a bolygó tömege elhanyagolható az anyacsillagának tömegéhez képest. Ebben az esetben Newton tömegvonzási törvényének segítségével kapjuk, hogy:

$$T^2 = a^3 \frac{4\pi^2}{GM} \quad (4)$$

ami tulajdonképpen Kepler harmadik törvénye. A formulában T a bolygó keringésideje, G a gravitációs állandó, M pedig a csillag tömege (a a korábban is használt bolygó-csillag távolság). Amennyiben a keringésidőt földi években, a távolságot csillagászati egységben (1 CsE = Nap-Föld távolság), a csillag tömegét pedig a Nap tömegével mérjük, a formula még egyszerűbbé válik:

$$T^2 = a^3 / M \quad (5)$$

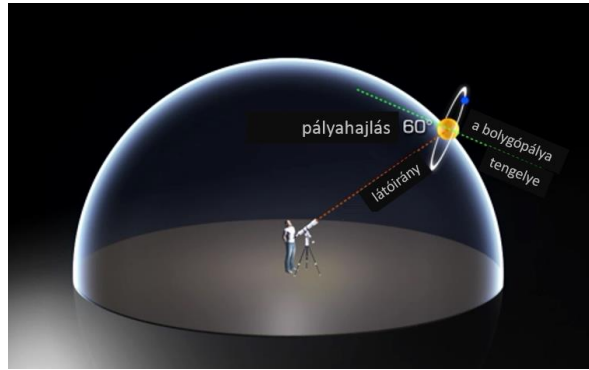
Ha a fenti képletben szereplő mennyiségek közül bármely kettőt megismerünk valamilyen módon, akkor már a harmadikat is meg tudjuk határozni. Ha tehát a periódusidőt meg tudjuk állapítani, a csillag tömegét pedig egyéb módszerrel, például a luminozítás-tömeg összefüggésből ismerjük, akkor (5)-ből megkapjuk a bolygópálya sugarát. A csillag távolságának ismeretében a pályasugarat (3)-ba beírva adódik a bolygó tömege. Az asztrometriai módszerrel tehát a bolygó figyelemre méltóan sok paraméterét megkaphatnánk, úgymint: tömegét, keringésének periódusidejét, pályájának sugarát, és a csillag imbolygásának időbeli változásából még a pálya excentricitását is.

3.2.2.2 Spektroszkópiai módszer

A spektroszkópiai módszerrel szintén a csillag mozgását, pontosabban annak látóirányunkba eső vetületét lehet kimutatni (3.11 ábra). A módszer azon alapul, hogy a csillag színekében látható sötét vonalak egy része a csillag pillanatnyi radiális, azaz látóirányunkba eső sebességével arányosan hol a hosszabb, hol a rövidebb hullámhosszak irányába periodikusan eltolódnak (3.12 ábra). A csillag mérhető (radiális) sebességét az alábbi formulával kapjuk meg:

$$v_{rad} = v \frac{m}{M} \sin(i) = \frac{2\pi a}{T} \frac{m}{M} \sin(i) \quad (6)$$

ahol i az inklináció szöge, v a bolygó sebessége. A többi jelölés megegyezik a korábbiakban használtakkal.



3.11 ábra A csillag radiális sebessége a valódi sebesség látóirányunkba eső vetülete. Ha a pálya tengelye a látóirányunkba esik, azaz hajlásszöge (inklináció) zérus, akkor a csillag mozgása a spektroszkópiai módszerrel nem mutatható ki.

A csillag sebessége az impulzus megmaradás értelmében a tömegek arányában kisebb, és annak is csak a vetületét látjuk. Ha a T keringésidőt (5)-ből kifejezve behelyettesítjük (6)-ba, az asztrometriai módszerrel (3) ellentétben azt az eredményt kapjuk, hogyha az adott tömegű bolygó csillagától való távolsága nő, a mérhető jel (7) alapján csökken.

$$v_{rad} = \frac{2\pi}{\sqrt{aM}} m \sin(i) \quad (7)$$

A csillagok színeképét megvizsgálva, abban sötét vonalak sokaságát találjuk. Maxwell vizsgálataiból tudjuk, hogy a gyorsuló töltések elektromágneses sugárzást, így többek között fényt sugároznak. A sugárzás hullámhossza, azaz színe függ a részecske energiájának megváltozásától.

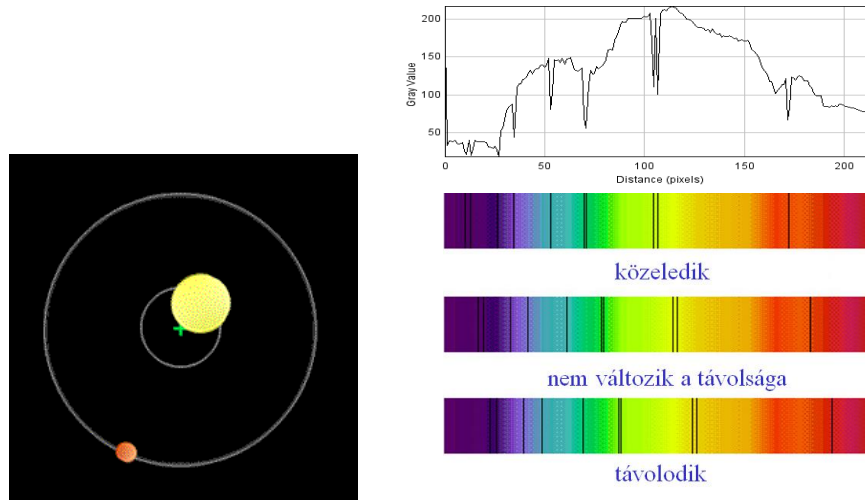
$$\lambda = \frac{hc}{\varepsilon} \quad (8)$$

A formulában λ a hullámhossz¹⁶, h az ún. Planck állandó ($h = 6,624 \cdot 10^{-34}$ Js), c a fénysebesség ($c = 300\,000$ km/s), ε pedig az energiaváltozás. A dolog fordított irányban is működik. A sugárzási térből az elektron energiát tud felvenni.

A csillag forró fotoszférájában a nagy sebességgel szabadon cikázó töltések (pl. szabad elektronok) energiája az ütközések révén bármilyen értékkel megváltozhat, vagyis a fotoszféra minden hullámhosszon sugároz. Ez a sugárzás áthalad a csillag légkörét alkotó gázokon, a csillagközi térben levő ritka, de a hatalmas távolságok miatt mégis számot tevő gázfelhőkön, valamint a Föld légkörén is. Az atommaghoz kötött

¹⁶ A látható fény hullámhossza nagyjából a 400 nm (ibolya) és 800 nm (vörös) közé esik.

elektronok energiája azonban csak szigorúan meghatározott értékkel változhat meg. Ennek következtében a hozzánk érkező fényben a gázokat alkotó atomokra jellemző hullámhosszakon lényegesen kevesebb energia érkezik. Ezeket látjuk sötét vonalakként a csillagok színeképében, mint az atomok/molekulák ujjlenyomatát (3.12 ábra).



3.12 ábra A csillag mozgása a színeképvonalak eltolódásában mutatkozik meg.

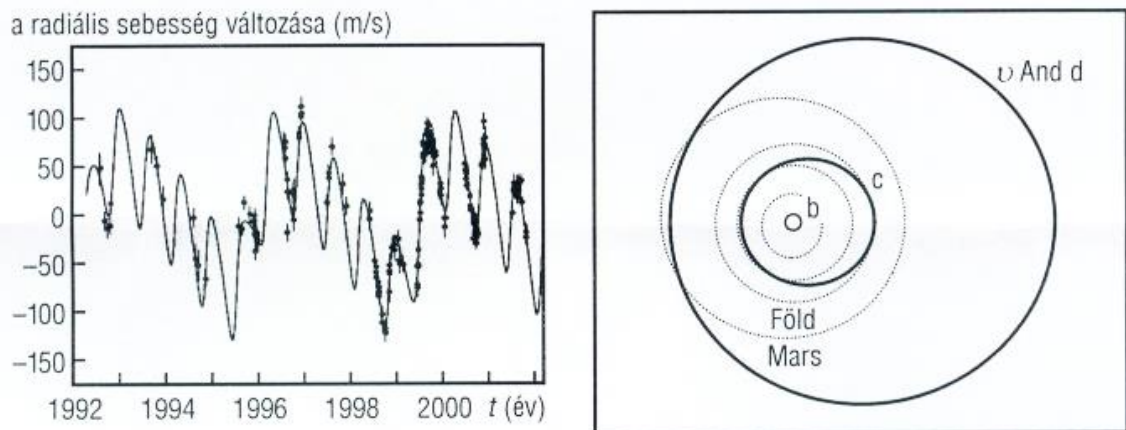
Ha a csillag mozog hozzánk képest, akkor a radiális sebességének megfelelően a légköréből származó színeképvonalak hullámhossza megváltozik (Doppler effektus, 3.12 ábra). Kis (nem relativisztikus) sebességek esetén ez az eltolódás a csillag sebességével egyenesen arányos:

$$\Delta\lambda = \frac{v_{rad}}{c} \lambda \quad (9)$$

ahol $\Delta\lambda$ a hullámhosszváltozás, λ a nyugvó esetben mérhető hullámhossz, v_{rad} a csillag radiális sebessége, c pedig a fénysebesség. A színeképvonalak eltolódásának megméréseivel a (9) formula révén meg tudjuk határozni a csillag radiális sebességét. Erre mutat egy példát a 3.13 ábra.

A módszer alkalmazását azonban nehezíti néhány körülmény. Először is, csak a radiális sebességkomponenst tudjuk mérni, az inklináció szöge ismeretlen. Ebből következően a (6) formula segítségével nem tudjuk a bolygó tömegét meghatározni, annak csak a minimális értékére következtethetünk, vagyis aminél tömege nem lehet kisebb. Továbbá, mivel a hajlásszöget nem ismerjük, nem tudjuk megmondani, hogy egy

lassú mozgást látunk oldalról, vagy gyors mozgást, de látóirányunkra majdnem merőleges síkban.



3.13 ábra A υ Andromedae radiális sebességváltozásából három kísérőre (b, c és d) lehetett következtetni. Összehasonlításként a jobb oldalon halványan a Naprendszer méretei szolgálnak.

Nehezítő körülményt jelent az is, hogy nagyon kis változást kell mérni, hiszen a csillag sebessége a fénysebességhez képest eltörpül, miközben ennél sokkal nagyobb egyéb sebességek is befolyásolják a mérést. A Naprendszer példáját tekintve a Nap mozgásában a legnagyobb hatást a Jupiter okozza, ami kb. 10 m/s. A csillag ugyanakkor forog a tengelye körül, s vele együtt a légköre is, így az egyik fele közeledik, a másik távolodik tőlünk, ami a színeképvonalak doppler-kiszélesedését okozza. A Föld 30 km/s sebességgel kering a Nap körül, valamint forog a tengelye körül is. Az ezek okozta, időben periodikusan változó, ráadásul még a megfigyelés irányától is függő doppler-eltolódás is mind-mind ráakódik a mérni kívánt picire. De ezen szisztematikus, és figyelembe vehető hatásokon túlmenően a csillag légköre sincs nyugalomban, hanem forrong, örvénylik, esetenként pulzál (felfúvódik és összehúzódik).

A színeképelemző készülék a bemenetét képező keskeny rést képezi le a detektorra, de a hullámhossztól függően más és más helyen. Amilyen hullámhossz hiányzik a résre eső fényből, az ennek megfelelő helyen a kép sötét lesz (3.12 ábra). A készülék egyik fontos jellemzője az R felbontóképesség, vagyis az adott hullámhosszon mekkora az a hullámhossz különbség, amelyre a két színeképvonal még éppen szétválasztható.

$$R = \lambda/\Delta\lambda \quad (10)$$

Az $R > 10\,000$ már nagy felbontásúnak számít. A reciprok lineáris diszperzióknak nevezett mennyiség szintén fontos paraméter, megmutatja, hogy 1 mm-re hány nm-nyi hullámhossz különbség jut ($d\lambda/dx$). Információt veszítünk ugyanis, ha a színeképelemző készülék szétbontotta ugyan a vonalakat, de azok mind ugyanarra a pixelre esnek. Mivel gyakran a színeképvonal profiljára is kíváncsiak vagyunk, célszerű a spektrográfot úgy tervezni, hogy a vonal szélessége 4-5 pixelt fedjen le.

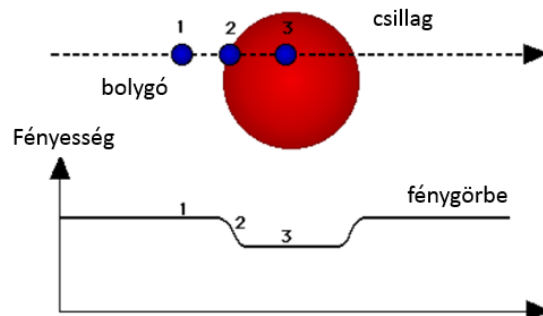
A finom változások méréséhez elengedhetetlen a pontos hullámhossz mérés. A kalibráláshoz speciális spektrállámpákat, újabban frekvenciafésűt használnak, de ezek ismertetése már messze túlmutatna a dolgozat keretein.

3.2.2.3 Fotometriai módszer

Ha a csillag felületének egy részét valami kitakarja, például elhalad előtte egy sötét bolygó, akkor a csillag fényessége arra az időre kissé lecsökken. Tulajdonképpen egy miniatűr nap-, illetve csillag fogyatkozást látunk. Mivel a bolygó mérete a csillaghoz képest kicsi, a jelenséget nem fogyatkozásnak, hanem átvonulásnak (tranzit) nevezik. A fényesség változás is kicsi, de mérhető. Értékét első közelítésben a csillag és a bolygó felületének aránya határozza meg:

$$\frac{\Delta I}{I} = \left(\frac{r}{R}\right)^2 \quad (11)$$

A formulában I a fény intenzitását, r a bolygó, R pedig a csillag sugarát jelenti. Az ismert exobolygók többségét ezzel a módszerrel sikerült felfedezni, mivel a mérhető jel kicsinyisége ellenére is nagyságrendekkel nagyobb, mint amekkorát a többi módszerrel lehet kapni.



3.14 ábra A tranzit módszer magyarázatához

Nehézségek természetesen itt is akadnak. Először is csak azokat a bolygókat tudjuk így felfedezni, amelyek pályája olyan síkban fekszik, hogy tőlünk nézve elhaladnak a csillag előtt. A többség a csillag mellett halad el, és nem okoz fényességváltozást. Másrészt hosszú idejű folyamatos észlelésre van szükség a véletlen zajok hatásának csökkentése, a felfedezés megerősítése és a keringésidő meghatározása érdekében, minél több perióduson keresztül.

Példaként ismét a legnagyobb, kb. 1%-os fényességcsökkenést okozó Jupitert tekintve a Nap előtti átvonulásának időtartama alig 30 óra, és ez a jelenség 12 évenként ismétlődik. Ha a távoli megfigyelő számára az átvonulás éppen nappalra esik, vagy borult az ég, máris elmulasztotta. Nem véletlen tehát, hogy az eddig felfedezett exobolygók többsége nagyméretű, csillagához közeli pályán, rövid periódussal kering. A módszerrel a kidolgozott feladatok között és a 3.4 fejezetben a fedési fénygörbe szimulációja kapcsán még részletesebben foglalkozom.

3.3 Kidolgozott feladatok

A számítások elvégzéséhez konkrét adatokra van szükség. Műszerként többnyire a Hubble űrtávcsövet választottam, és alapvetően földszerű exobolygók megtalálása a cél.

A Hubble űrtávcső néhány adata:

- a főtükör átmérője: $D = 2400$ mm
- a főtükör fókusztávolsága (primer fókus): $f_f = 5520$ mm
- a segédtükör fókusztávolsága: $f_s = -680$ mm
- a főtükör és segédtükör távolsága: 4600 mm
- a rendszer effektív fókusztávolsága: $f = 57600$ mm.
- központi kitakarás értéke: 33%
- látómező: $28'$
- felbontás $\lambda = 550$ nm-en:
 - radiánban: $2,8 \cdot 10^{-7}$ rad
 - fokban: $0,058''$,
 - lineáris: $16,1 \mu\text{m}$
- STIS spektrométer $\lambda = 1000$ nm-en: $R = 5900$
- ACS/WFC kamera:
 - pixelméret: $14 \times 14 \mu\text{m}$
 - látómező: $205'' \times 205''$, méret: $5,7 \text{ cm} \times 5,7 \text{ cm}$
 - felbontás: $0,05''/\text{pixel}$

A Naprendszer néhány adata:

- a Nap sugara $695\,700\text{ km}$, tengelyforgási ideje $25,4$ nap
- a Nap tömege $1,989 \cdot 10^{30}\text{ kg} = 333\,166$ földtömeg
- a Nap felszíni hőmérséklete 5780 K
- a Föld sugara $6\,400\text{ km}$
- Nap-Föld távolság 150 millió $\text{km} = 1\text{ CsE}$
- a földfelszín átlaghőmérséklete 15 C^0
- Jupiter: tömege 318 földtömeg, naptávolsága $5,2$ CsE
sugara $69\,911\text{ km}$ keringésideje $11,87$ év
- Szaturnusz: tömege 95 földtömeg, naptávolsága $9,5$ CsE
- Uránusz tömege $14,5$ földtömeg naptávolsága 19 CsE
- Neptunusz tömege 17 földtömeg naptávolsága 30 CsE

Fizikai állandók:

- fénysebesség: $c = 3 \cdot 10^8\text{ m/s}$
- Planck állandó $h = 6,626 \cdot 10^{-34}\text{ Js}$
- Boltzmann állandó $k = 1,38 \cdot 10^{-23}\text{ J/K}$

3.1 feladat: Hányszor több fényt gyűjt össze a HST tükre a sötéthez alkalmazkodott szemünkhöz képest? A pupillánkat vegyük 8 mm átmérőjűnek!

Megoldás: A HST tükre annyiszor több fényt gyűjt össze, ahányszor nagyobb az effektív fénygyűjtő területe a szemünkénél. A főtükör területének a 33% -os központi kitakarása miatt ennek csak 67% -át vehetjük figyelembe, így eredményül kapjuk, hogy

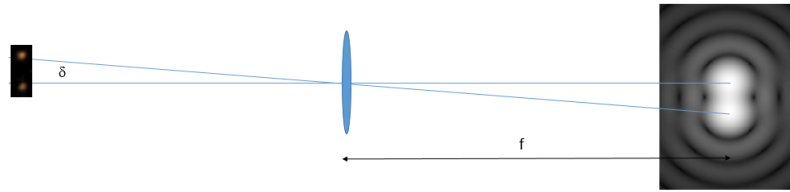
$$0,67 \left(\frac{2400}{8} \right)^2 = 60\,300\text{-szor többet.}$$

Megjegyzés: a csillagok fényességét az ún. magnitúdó skálán mérik. 100 -szoros fényességkülönbség megfelel 5 magnitúdónak (5^m). Ebből könnyen kiszámíthatjuk, hogy a fenti érték alapján (majdnem) 12^m -val halványabb csillagokat is megpillanthatnánk vele, mint szabad szemmel.

3.2 feladat: A Rayleigh-kritérium segítségével adjuk meg az objektív (lencse vagy tükör) δ felbontóképességét ívmásodpercben, az átmérő függvényében!

Megoldás: A Rayleigh-kritérium szerint két csillag képe akkor nem mosódik össze, ha az egyik csillag képének maximuma a másik első minimumhelyére, vagy annál

távolabb esik (3.15 ábra). Kis szögekről lévén szó, az objektív közepétől kiindulva a fókusz távolságában levő ív hosszát egyenlővé kell tenni az első minimum hely (1) formulával megadott sugarával, azaz $f\delta = 1,22f\lambda/D$.



3.15 ábra A felbontóképesség kiszámításához

A fókusztávolsággal egyszerűsítve kapjuk, hogy $\delta = 1,22\lambda/D$, radiánban mérve. Mivel $1'' = 2\pi/(360 \cdot 60 \cdot 60)$ radián, a $\lambda = 498 \text{ nm}$ hullámhosszra¹⁷ a felbontóképességet a $\delta = 12,5/D$ formula adja meg, ahol az objektív átmérőjét cm-ben kell megadni, az eredményt pedig ívmásodpercben kapjuk.

Megjegyzés: Egy bizonyos intenzitás szint alatt szemünk, és hasonlóképp a detektorok sem érzékelik a fényt, így a csillag képe kisebbnek tűnik a számítottnál. Ehhez igazodva a felbontóképesség kiszámításához szokásos formula¹⁸ $\delta = 11,2/D$.

3.3 feladat: Mekkora átmérőjű lesz egy csillag képe a HST főtükreinek primer fókuszában, és mekkora a rendszer effektív fókuszában, $\lambda = 550 \text{ nm}$ -es hullámhosszon?

Megoldás: A csillag fénye az Airy-korongra, valamint az azt körülvevő gyűrűkbe képeződik le. A csillag képének az első minimum gyűrűig terjedő tartományt tekintjük. Az (1) formula felhasználásával

$$d_{pf} = 2 \cdot 1,22 \cdot 5520 \text{ mm} \frac{550 \cdot 10^{-6} \text{ mm}}{2400 \text{ mm}} = 0,003 \text{ mm} = 3 \mu\text{m}$$

$$d_{ef} = 2 \cdot 1,22 \cdot 57600 \text{ mm} \frac{550 \cdot 10^{-6} \text{ mm}}{2400 \text{ mm}} = 0,032 \text{ mm} = 32 \mu\text{m}$$

Megjegyzések:

a, Mivel a HST az ultraibolyától a közeli infravörös tartományig ($\lambda = 110\text{-}1100 \text{ nm}$) működik, a csillag képe a fent kiszámoltak körülbelül az ötödétől a kétszereséig terjed, színszűrők alkalmazása nélkül koncentrikusan egymásra rakódva.

¹⁷ Gyenge fényviszonyok között szemünk erre a hullámhosszra a legérzékenyebb.

¹⁸ A formula Reverend William Rutter Dawes (1799-1868) közel azonos fényességű, 6^m-os tagokból álló kettőscsillagok megfigyelésének elemzéséből származik.

b, Bár a főtükör primer fókuszában létrejövő kisebb csillagkép kedvezőbbnek tűnik a nagyobb fényessége miatt, az alkalmazott detektálási módszer a nagyobb energiakoncentrációt nem tudná hasznosítani. (Miért nem? – vö. 3.8 ábra adataival)

3.4 feladat: Mekkora fókuszálási pontosságot követel meg a főtükör a primer, illetve az RC rendszer az effektív fókuszban, $\lambda = 550 \text{ nm}$ -es hullámhosszon?

Megoldás: A fókuszmélységet a (2) formulával számíthatjuk ki. Ezzel a főtükörre illetve az effektív fókuszra

$$\Delta z_{pf} = \frac{550 \cdot 10^{-6} \text{ mm}}{2 \left(\frac{2400 \text{ mm}/2}{5520 \text{ mm}} \right)^2} = 0,0058 \text{ mm} = 5,8 \mu\text{m}$$

$$\Delta z_{ef} = \frac{550 \cdot 10^{-6} \text{ mm}}{2 \left(\frac{2400 \text{ mm}/2}{57600 \text{ mm}} \right)^2} = 0,634 \text{ mm} = 634 \mu\text{m}$$

A fókuszálási pontosságok tehát $\pm 2,9 \mu\text{m}$, illetve $\pm 0,32 \text{ mm}$.

3.5 feladat: A fémek hőtágulási együtthatója a $10^{-5} \text{ 1}^{\circ}\text{C}$ nagyságrendbe esik. Milyen pontossággal kell a HST hőmérsékletét tartani, hogy a detektora fókuszban maradjon?

Megoldás: A 3.7 ábráról leolvasható, hogy a segédtükör és a detektor közötti távolság 6100 mm. Ez a távolság szorozva a hőtágulási együtthatóval 0,06 mm méretváltozást ad Celsius fokonként. A 3.4 feladatban a fókuszálási pontosságra $\pm 0,32 \text{ mm}$ -t kaptunk, ezért azt gondolnánk, a hőmérséklete elegendő $\pm 5 \text{ }^{\circ}\text{C}$ pontossággal állandó értéken tartani.

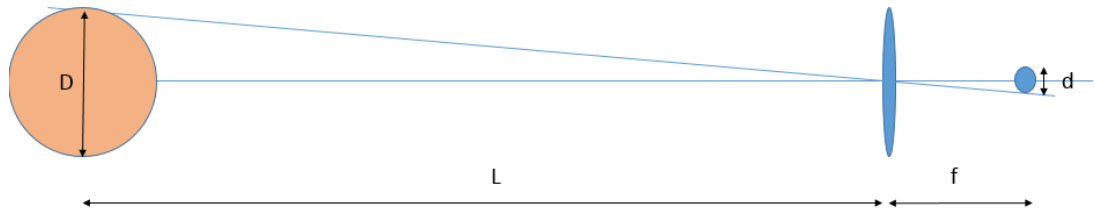
Megjegyzések:

a, A valódi helyzet ennél sajnos sokkal bonyolultabb. A fókusz távolság a segédtükör helyzetére sokkal érzékenyebb. Ha a segédtükör főtükörtől való távolsága 0,03 mm-rel megváltozik, a rendszer eredő fókusza 2 mm-rel tolódik el. Két, egymástól d távolságra elhelyezett lencse/tükör eredő fókusz távolsága: $f = \frac{f_1 f_2}{f_1 + f_2 - d}$.

b, A HST a Föld körüli keringése során hol a Föld árnyékába kerül, hol a közvetlen napsugárzás éri, ami állandó hőmérsékletingadozást, következésképp állandó méretváltozást eredményez. A szükséges korrekciók (segédtükör mozgatás) meghatározásához nem véletlenül mérnek több mint száz ponton a rendszer hőmérsékletét.

3.6 **feladat:** Milyen távolságból lenne a Nap képe a HST fókuszában a 3.3 feladatban kiszámolt $32 \mu m$ átmérőjű korong?

Megoldás: Olyan távolságból, amelyből a Nap látószöge megegyezik a fókusz távolságban levő Ayri-korong látószögével.

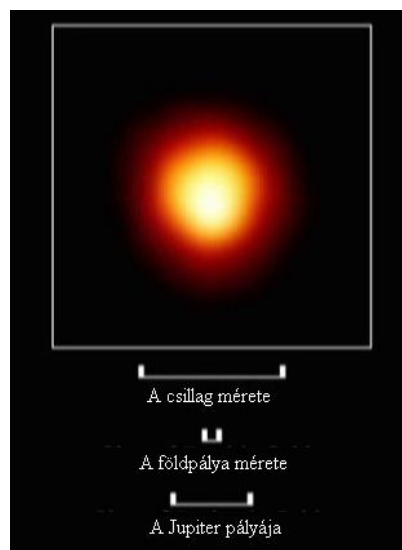


3.16 ábra A Nap látószögének kiszámításához

A hasonló háromszögek alapján felírhatjuk, hogy $L/f = D/d$, ahol L a keresett távolság, $f = 57,6 \text{ m}$ (a HST effektív fókusz távolsága), $D = 1,4 \cdot 10^9 \text{ m}$ (a Nap átmérője), valamint $d = 32 \mu m$, a kép mérete. A számértékeket behelyettesítve a keresett távolságra $L = 2,29 \cdot 10^{15} \text{ m}$ -t, azaz kb. $\frac{1}{4}$ -ed fényévet kapunk.

Megjegyzés:

A legközelebbi csillag is tőlünk több mint 4 fényévre található, tehát csak a közeli, és rendkívül nagyméretű csillagokról tudunk képet kapni.



3.17 ábra A HST-vel készült felvétel az Orion csillagkép bal vállát alkotó, a Naphnál 1200-szor nagyobb méretű Betelgeuze vörös óriásról.

3.7 feladat: A HST optikájával milyen távolságból lenne felbontható a Föld a Nap mellett, ha egyéb problémák nem lennének?

Megoldás: Legfeljebb olyan távolságból, amelyből a Nap-Föld távolság látószöge legalább akkora, mint a távcső felbontóképessége. A felbontóképesség kiszámításához a 3.2 feladathoz fűzött megjegyzésben megadott $\delta = 11,2/D$ képletbe a HST tükrének átmérőjét cm-ben behelyettesítve kapjuk, hogy

$$\delta = \frac{11,2}{240} = 0,047''$$

A kérdés ezek után az, hogy milyen távolságból látszana ekkora szög alatt a Föld-Nap távolság, amit csillagászati egységnek neveznek, és értéke 1 CsE = 150 millió km. Mivel 1'' a kör sugarának $2\pi/(360 \cdot 60 \cdot 60) = 4,848 \cdot 10^{-6}$ -od része, a keresett távolság

$$L = \frac{1,5 \cdot 10^8 \text{ km}}{0,047 \cdot 4,848 \cdot 10^{-6}} = 6,58 \cdot 10^{14} \text{ km, vagy 4,39 millió CsE, vagy 69,5 fényév}$$

Megjegyzés:

A csillagászatban elterjedten használatos távolságegység a parsec (*Pc*), ami azzal a távolsággal egyenlő, ahonnan a Nap-Föld távolság (merőleges rálátás esetén) pontosan 1'' szög alatt látszik. Ezt az egységet használva a számolás roppant leegyszerűsödik. A keresett távolság az ívmásodpercekben mért szög reciproka, vagyis esetünkben $L = 1/0,047 = 21,3 \text{ Pc}$. A parsec-et könnyen átszámíthatjuk a szokásosabb mértékegységekre: $1 \text{ Pc} = 2,06 \cdot 10^5 \text{ CsE} = 3,1 \cdot 10^{13} \text{ km} = 3,26 \text{ fényév}$.

3.8 feladat: Mekkora lenne a Nap és a Föld képének fényesség viszonya a Föld maximális kitérésekor, ha a Föld a rá eső napfénynek mintegy 40%-át veri vissza?



3.18 ábra A Föld a Nap sugárzását veri vissza

Megoldás: A Földet csak azért látnánk, mert a Nap fénye megvilágítja. Annak az arányát kell tehát meghatározni, mennyi energiát tud összegyűjteni az A fénygyűjtő felületű műszerünk a Nap közvetlen, és a Föld visszavert sugárzásából.

A Nap gömbszimmetrikusan, összesen W_{Nap} energiát sugároz ki másodpercenként. Ez az energia a Napot körülvevő gömbfelületen oszlik el. Ha mi L távolságban vagyunk, akkor műszerünkbe ebből $W_N = AW_{\text{Nap}}/4L^2\pi$ jut. A Föld ugyanolyan messze van tőlünk, mint a Nap, de csak a megvilágított oldali félgömbbe sugároz, ezért a Földről beérkező energia mennyisége $W_F = AW_{\text{Föld}}/2L^2\pi$. A Föld a $D_{\text{Nap-Föld}}$ sugarú gömb felületéről gyűjti össze a keresztmetszerével arányos energiát, aminek 40%-át veri vissza a megvilágított oldal irányú félgömbbe. Viszont maximális kitéréskor csak a fél Földet látjuk megvilágítva. Első közelítésben a Föld által visszaver összes energiának csak mintegy a tizede¹⁹ irányul felénk, tehát $W_{\text{Föld}} = 0,04\pi R_{\text{Föld}}^2 W_{\text{Nap}}/4\pi D_{\text{Nap-Föld}}^2$

A fentiek alapján beírva a kifejezéseket, egyszerűsítés után kapjuk:

$$\frac{W_N}{W_F} = 50 \left(\frac{D_{\text{Nap-Föld}}}{R_{\text{Föld}}} \right)^2 = 50 \left(\frac{150 \cdot 10^6 \text{ km}}{6,4 \cdot 10^3 \text{ km}} \right)^2 = 2,7 \cdot 10^{10}$$

elszomorító eredményre jutunk.

Megjegyzés:

a, Ezen az eredményen sajnos az sem segítene, ha nagyobb átmérőjű távcsövet alkalmaznánk. Olyan detektorra lenne tehát szükség, amelynek dinamikatartománya több milliárd, ugyanakkor a bolygó fénye nem veszne bele a diffrakciós gyűrűkbe. (Emlékeztetőül: az első diffrakciós gyűrűbe a csillag fényének 7,1%-a jut!)

b, A helyzetet rontotta, hogy a 3.18 ábrán látható helyzetben, mikor is a látószög (a csillag és a bolygó szétválása) a legnagyobb, a megvilágított bolygóról a fényenergiának csupán kb. a tizede sugárzódik a megfigyelő irányába. A helyzetet javítaná, ha minél nagyobb megvilágított felületet figyelnénk meg, ebben az esetben viszont a bolygó és a csillag egyre közelebb kerül egymáshoz.

3.9 feladat: Mekkora lenne a Nap és a Föld képének fényesség viszonya a 10 μm -es, infravörös tartományban?

Megoldás: A Nap infravörösben lényegesen kevesebb sugárzást bocsát ki, mint a látható tartományban, ugyanakkor a Föld, melynek átlaghőmérséklete 15 $^{\circ}\text{C}$ -nak vehető, aktívan „világít”, hőmérsékleti sugárzást bocsát ki. Ezen sugárzás maximuma 10 μm

¹⁹ Ezt az értéket a telihold és a félhold fényességviszonyainak mérése támasztja alá.

körül van. Ráadásul jelen esetben a Föld felénk eső teljes keresztmetszete érvényre jut. Mind a Nap, mind a Föld sugárzását első közelítésben az abszolút fekete test hőmérsékleti sugárzásaként, a Planck-formulával írhatjuk le. Az egységnyi felületről egységnyi térszögbe kisugárzott energia adott hőmérsékleten és hullámhosszon:

$$E(\lambda, T) = \frac{2hc^2}{\lambda^5} \frac{1}{e^{\frac{hc}{\lambda kT}} - 1} = \frac{C_1}{\lambda^5} \frac{1}{e^{\frac{C_2}{\lambda T}} - 1}$$

ahol $c = 3 \cdot 10^8$ m/s a fénysebesség, $h = 6,626 \cdot 10^{-34}$ Js a Planck állandó és $k = 1,38 \cdot 10^{-23}$ J/K a Boltzmann állandó, a T hőmérsékletet pedig Kelvinben kell megadni. A Planck formula használatával a következőket vizsgáljuk meg:

a, Összehasonlítjuk a Nap hőmérsékleti sugárzását a látható ($\lambda = 550$ nm) és az infravörös ($\lambda = 10$ μ m) hullámhosszon, a Nap felszíni hőmérsékletén, $T = 5780$ K-en.

$$\frac{E(\lambda_1, T)}{E(\lambda_2, T)} = \left(\frac{\lambda_2}{\lambda_1}\right)^5 \frac{e^{\frac{hc}{\lambda_2 kT}} - 1}{e^{\frac{hc}{\lambda_1 kT}} - 1} = 6121,59$$

Eredmény: Nap a $\lambda = 550$ nm -en kb. 6 ezerszer fényesebb, mint $\lambda = 10$ μ m-en, tehát infravörösben jelentősen javulnak az esélyeink.

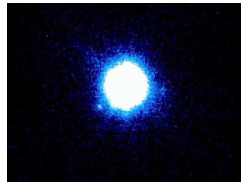
b, Összehasonlítjuk a hőmérsékleti sugárzás nagyságát a 10 μ m-es hullámhosszra a Nap $T_1 = 5780$ K és a Föld $T_2 = 288$ K hőmérsékletén,

$$\frac{E(\lambda, T_1)}{E(\lambda, T_2)} = \frac{e^{\frac{hc}{\lambda kT_2}} - 1}{e^{\frac{hc}{\lambda kT_1}} - 1} = 521,66$$

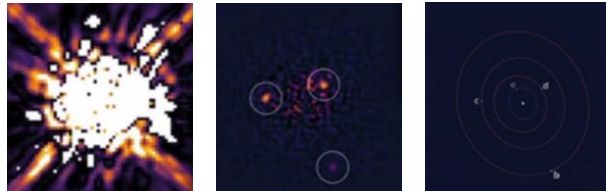
Eredmény: a Nap a $\lambda = 10$ μ m-es hullámhosszon már csak mintegy 520-szor sugároz jobban a Földnél, de mivel $\left(\frac{R_{Nap}}{R_{Föld}}\right)^2 = \left(\frac{7 \cdot 10^5 \text{ km}}{6 \cdot 400 \text{ km}}\right)^2 = 11 \cdot 962,98$, így a több mint 10 ezerszer nagyobb felülete miatt mégis $11 \cdot 962,98 \cdot 521,66 = 6 \cdot 240 \cdot 561$, azaz mintegy 6 milliószor fényesebb.

Megjegyzés:

Az eredmény biztatóbb, de földszerű exobolygók közvetlen megfigyelésének lehetősége még így is mesze meghaladja jelenlegi technikai képességeinket. Ezért a Napnál lényegesen hidegebb (pl. M típusú) csillagok és kísérőik jöhetnek szóba. Az első sikeres kép egy barna törpéről és kísérőjéről készült.



3.19 ábra Egy barna törpe és kísérője, infravörösben fényképezve.



3.20 ábra A HR 8799 csillag körül a digitális képfeldolgozással: a csillag diffrakciós képének (3.2 ábra) kivonásával három, esetleg négy kísérőre lehet következtetni. (Hubble felvétel)

3.10 **feladat:** Legfeljebb mekkora kitéréseket végezhet a Nap középpontja a körülötte keringő bolygók hatására?

Megoldás: Mivel a belső bolygók tömege viszonylag kicsi, és elég közel is vannak a Naphoz, elegendő csak az óriásbolygókkal foglalkozni. A Nap közepének a tömegközépponttól való l távolságát elemi számítással megkapjuk,

$$\sum_{\text{óriásbolygók}} \text{bolygótömeg} * \text{naptávolság} = l * \text{naptömeg}$$

Az adatok behelyettesítésével azt kapjuk, hogy a Nap középpontja maximálisan mintegy 1,5 millió km-re mozdulhat ki a rendszer tömegközéppontjától.

3.11 **feladat:** Legfeljebb milyen távolságból tudná a Hubble űrtávcső a Nap imbolygását észrevenni?

Megoldás: A Nap egy távoli megfigyelő számára - a több bolygó miatt – bonyolult, hullámzó mozgást végez, melynek legnagyobb kitérése a 3.10 feladat szerint összesen mintegy 3 millió km, a HST felbontása pedig $0,05''/\text{pixel}$. A kérdés tehát, hogy a 3 millió km milyen távolságból látszik $0,05''$ szög alatt. Az 1 CsE $1/0,05=20$ Pc távolságból lenne felbontható, a 3 millió km pedig éppen $1/50$ -ed CsE, tehát a megoldás $0,4$ Pc , azaz $1,2$ fényév.

Megjegyzés: A helyzet ennél azért szerencsésebb, bizonyos technikákkal már az is detektálható, ha a kép a pixel méretének tized, vagy akár század részével eltolódik (ld. 3.16 feladat kiegészítés). Viszont több éves vagy évtizedes homogén adatsorra van szükségünk.

3.12 feladat: Mekkora ingadozást okoz a Nap radiális sebességében a Jupiter, és mekkorát a Föld?

Megoldás: A Nap sebessége annyiszor kisebb a bolygóénál, ahányszor nagyobb a tömege, vagyis:

$$v_{Nap} = v_{Jupiter} \frac{m_{Jupiter}}{m_{Nap}} = 13 \frac{km}{s} \frac{1}{1044} = 12,4 \text{ m/s}$$

$$v_{Nap} = v_{Fold} \frac{m_{Fold}}{m_{Nap}} = 30 \frac{km}{s} \frac{1}{333166} = 9 \text{ cm/s}$$

3.13 feladat: Mekkora maximális hullámhossz eltolódást jelent a Nap színekében a Jupiter, illetve a Föld hatása $\lambda=550 \text{ nm}$ -en?

Megoldás: A (9) képlet és a 3.12 feladat eredményeinek felhasználásával

$$\Delta\lambda_{Jupiter} = \frac{\pm 12,4 \text{ m/s}}{3 \cdot 10^8 \text{ m/s}} 550 \text{ nm} = \pm 2,27 \cdot 10^{-5} \text{ nm}$$

$$\Delta\lambda_{Fold} = \frac{\pm 0,09 \text{ m/s}}{3 \cdot 10^8 \text{ m/s}} 550 \text{ nm} = \pm 1,65 \cdot 10^{-7} \text{ nm}$$

Megjegyzés: Az így kiszámított érték a „nyugalmi” állapothoz képesti eltolódás, vagyis a színekvonal azon pozíciójához, amikor a bolygó, és persze a csillag is a látóirányunkra merőlegesen mozognak. A színekvonal teljes mozgástartománya a fenti értékeknek a kétszerese. A fent említett „nyugalmi” pozíció azonban nem a laboratóriumban mérhető hullámhosszt jelenti, mert a korábbiakban említett számos tényező (pl. a csillag sajátmozgásának radiális komponense, légkörének pulzálása, a Föld csillag irányú időfüggő mozgásai, a megfigyelt csillag égbolton elfoglalt pozíciója, ... stb.) mind együttesen határozzák meg a színekvonal helyét, mely hatásoktól meg kell tisztítani a mért adatokat.

3.14 feladat: Mekkora maximális hullámhossz eltolódást okoz a Föld Nap körüli keringése, és tengely körüli forgása a $\lambda=550 \text{ nm}$ -es hullámhosszon?

Megoldás: A Föld egy év alatt kerüli meg a napot a 150 millió km sugarú pályáján, ebből kapjuk, hogy a Föld keringési sebessége $29,9 \text{ km/s}$. A Föld egy nap alatt fordul meg a tengelye körül, így az egyenlítőn a kerületi sebesség 465 m/s .

$$\Delta\lambda_{\text{keringés}} = \frac{\pm 29,9 \cdot 10^3 \text{ m/s}}{3 \cdot 10^8 \text{ m/s}} 550 \text{ nm} = \pm 5,5 \cdot 10^{-2} \text{ nm}$$

$$\Delta\lambda_{\text{forgás}} = \frac{\pm 465 \text{ m/s}}{3 \cdot 10^8 \text{ m/s}} 550 \text{ nm} = \pm 8,5 \cdot 10^{-4} \text{ nm}$$

Megjegyzés: Láthatjuk, hogy eredmények nagyságrendekkel nagyobbak, mint a kimutatni kívánt mozgás.

3.15 feladat: Az 1.4 millió km átmérőjű Nap 25,4 nap alatt fordul meg a tengelye körül. Ebből következően egyik oldala távolodik tőlünk, míg a másik közeledik hozzánk, ami a színekvonalak Doppler-kiszélesedését okozzák. Mekkora ez az érték?

Megoldás: A Nap adataiból kapjuk, hogy kerületi sebessége 2 km/s . A (9) képlet alkalmazásával megkapjuk a spektrumvonal kiszélesedését:

$$\Delta\lambda_{\text{Doppler}} = \frac{2 \cdot 2 \cdot 10^3 \text{ m/s}}{3 \cdot 10^8 \text{ m/s}} 550 \text{ nm} = 7,3 \cdot 10^{-3} \text{ nm}$$

3.16 feladat: Mekkora legyen a spektrográf felbontóképessége, hogy a Napnak a Jupiter, illetve a Föld okozta sebességét ki lehessen mutatni?

Megoldás: A (10) összefüggés és a 3.13 feladat eredményeinek felhasználásával, és a hozzá fűzött megjegyzés figyelembe vételével kapjuk, hogy:

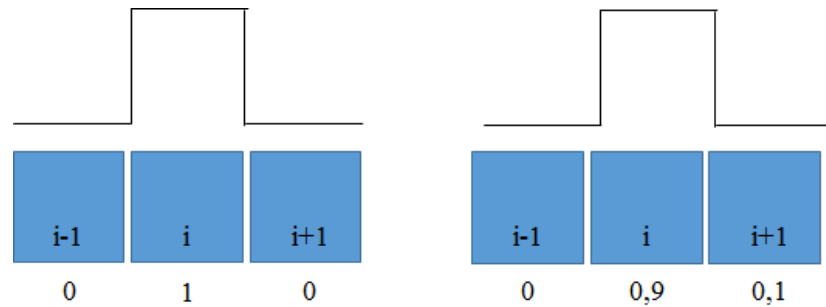
$$R_{\text{Jupiter}} = \frac{550 \text{ nm}}{2,27 \cdot 10^{-5} \text{ nm}} = 12 \ 114 \ 537$$

$$R_{\text{Föld}} = \frac{550 \text{ nm}}{2,165 \cdot 10^{-7} \text{ nm}} = 1 \ 666 \ 666 \ 667$$

Megjegyzés: Az eredmények elképesztőek, ilyen érzékeny berendezést, különösen ami a Földet illeti, mai technikával nem tudunk készíteni. Az eltolódás mértéke csupán egy-két atomnyi ($1/1000000$ pixel) lenne a detektor felületén. (A Jupiter 12 m/s -nyi hatása pedig $1/1000$ pixelnyi.) Jelenleg a néhány m/s sebességű mozgás kimutatása a

határ, a fél m/s pontosság elérése a következő cél. Az extrém pontosságú hullámhossz mérés, a műszer kalibrációja létfontosságú, jelenleg az ún. lézer fésű a legpontosabb megoldás. A stabilitás érdekében a rendszer hőmérsékletét millikelvin pontossággal kell állandó értéken tartani.

Kiegészítés: több feladat esetében azt láttuk, hogy a detektor pixel méreténél finomabb felbontásra van szükség. A csillag képe, vagy a színeképvonal szélessége ugyanakkor több pixelyire terjed ki. Ez a körülmény valójában segítségünkre van a pixelméret alatti felbontás eléréséhez, amit könnyen megérthetünk a következő egyszerűsített példán keresztül.



3.21 ábra Pixel alatti felbontás magyarázatához

Essen egy csillag képe az i -dik pixelre. A fényesség érték legyen 1, amit a görbe alatti terület jellemez. Ha csillag képe egy kicsit (esetünkben $1/10$ pixelnyit) elmozdul, akkor az i -dik pixelre kissé kevesebb energia jut (a teljes energia $0,9$ -ed része), viszont az $i+1$ -dikre átkerül $0,1$ rész. A kép kiértékelésekor képezzük a középső pixel és a szomszédjai különbségének a különbségét. Az eredmény megadja az eltolás mértékét az i -dik pixel közepéhez képest.

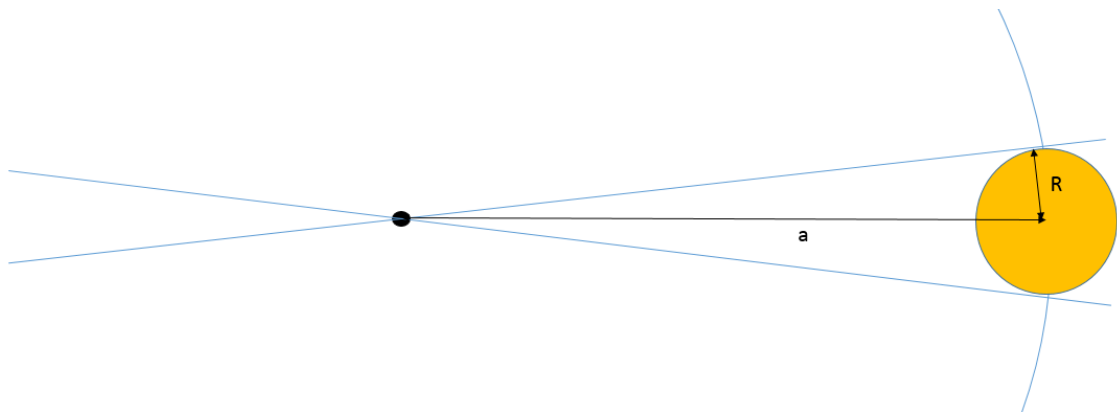
	bal oldali kép			jobb oldal – eltolt csillagkép		
	$i-1$	i	$i+1$	$i-1$	i	$i+1$
fényesség	0	1	0	0	0,9	0,1
$b=f_i-f_{i-1}$	1			0,9		
$j= f_i-f_{i+1}$	1			0,8		
$b-j$	0			0,1		

3.1 táblázat A pixel alatti felbontás magyarázatához

A módszert egy csillag képére mutattam meg, de ugyanúgy működik a színeképek abszorpciós vonalainak pozíciójának pontosabb meghatározására is. Az alapelv a fenti

egyszerűsített példán keresztül is megérthető. A valóságban, a sokkal bonyolultabb esetekben kifinomultabb módszereket, pl. a korrelációs technikát használják. Ebben az esetben a több pixelre elosztott, elméleti megfontolások alapján kiszámított intenzitás eloszlást vetik össze a ténylegesen mérttel.

3.17 **feladat:** Mekkora az esélye, hogy a véletlenszerűen elhelyezkedő bolygópálya olyan síkban álljon, hogy bolygóátvonulást figyelhessünk meg?



3.22 ábra A bolygóátvonulás megfigyelhetőségéhez

Megoldás: Hogy a bolygóátvonulást láthassuk, benne kell lennünk abban a szögtartományban, amely alatt a bolygóról a központi csillaga látszik (3.22 ábra). Ennek esélye megegyezik a csillag méretével jellemzett ívnek a bolygó-csillag távolság sugarú teljes kör kerületéhez mért arányával, tehát:

$$p = \frac{2R}{2a\pi} = \frac{R}{a\pi}$$

Megjegyzés: Az eredményből láthatjuk, hogy minél messzebb kering a bolygó a csillagától, annál kisebb az esélye, hogy átvonulást figyelhetünk meg. Nem véletlen, hogy a megfigyelt exobolygók többségében a csillaghoz nagyon közeli, pl. a Merkúrnál is közelebbi pályákon mozognak. (A Merkúrra $p = 0,0036$, mintegy 13-szor nagyobb, mint a Jupiterre $p = 0,00028$)

3.18 **feladat:** Maximálisan mekkora relatív fényességcsökkenést észlelhetne a távoli megfigyelő, ha a Nap előtt elvonulna a Jupiter, illetve a Föld?

Megoldás: A relatív fényességcsökkenés megegyezik a bolygó és a csillag keresztmetszetének az arányával.

$$\frac{\Delta I}{I} = \frac{\pi R_{Jupiter}^2}{\pi R_{Nap}^2} = \left(\frac{69\,911\text{ km}}{695\,700\text{ km}} \right)^2 = 0,01$$

$$\frac{\Delta I}{I} = \frac{\pi R_{Föld}^2}{\pi R_{Nap}^2} = \left(\frac{6\,400\text{ km}}{695\,700\text{ km}} \right)^2 = 8,5 \cdot 10^{-5}$$

Megjegyzés: Bár a fényességváltozás - különösen a Föld esetében - kicsinek tűnik, az effektus a korábbi módszerekhez viszonyítva mégis óriási. Ez az oka annak, hogy a legtöbb exobolygót a fedési módszerrel fedezték fel.

3.19 feladat: Maximálisan mennyi ideig tarthatna a távoli megfigyelő számára, a Jupiter, illetve a Föld Nap előtti átvonulása?

Megoldás: A leghosszabb ideig akkor tartana az átvonulás, ha a bolygó pont a Nap közepe előtt haladna el. Az átvonulás addig tartana, ameddig a bolygó a pálya menti sebességével megteszi a Nap átmérőnyi távolságot.

$$t_{Jupiter} = \frac{D_{Nap}}{v_{Jupiter}} = \frac{2 \cdot 695\,700\text{ km}}{13\text{ km/s}} = 107\,030\text{ s} = 29,7\text{ ó}$$

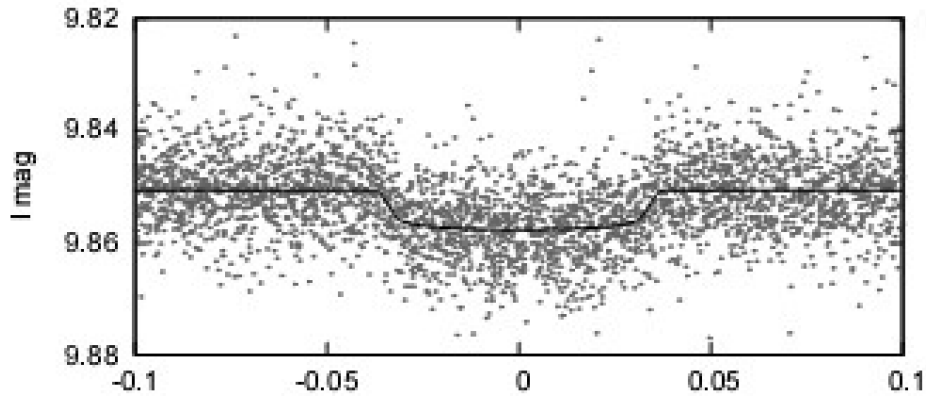
$$t_{Föld} = \frac{D_{Nap}}{v_{Föld}} = \frac{2 \cdot 695\,700\text{ km}}{30\text{ km/s}} = 46\,380\text{ s} = 12,9\text{ ó}$$

Megjegyzés: Ha az átvonulás nem közepén történik, minél inkább a 3.17 feladatban megvizsgált szögtartomány széle fele haladunk, az átmérőnél esetleg sokkal rövidebb húr menten a fedés időtartama egyre rövidebb lesz. A Jupiter esetében 11,87 évenként, a Föld esetében évenként ismétlődik az esemény. A biztonságos felfedezéshez folyamatos megfigyelés szükséges, és több periódust kell észlelni, hogy kizárjuk a véletlen mérési hiba lehetőségét. (Ez az oka annak, hogy a legtöbb felfedezett exobolygó nagyon rövid keringésű, következésképp sokkal közelebb kering a csillagához, mint a Föld.)

3.20 feladat: A 3.23 ábra a HAT-P-7b fedési görbét mutatja. A fedés periódusa 2,2 nap. A HAT-P-7 fedési görbét a KEPLER űrszonda is megmérte²⁰, a földi légkör

²⁰ Az objektum másik elnevezése ezért KEPLER-2b.

zavaró hatásai nélkül (3.24 ábra). A görbék elemzése alapján állapítsunk meg a rendszer lehetőleg minél több paraméterét.



3.23 ábra A HAT-P-7b fedési görbéje a HAT-Net²¹ mérései alapján. A vízszintes tengelyen az átmenet közepétől számított idő látható a 2,2 napos keringési időre vonatkoztatva, a függőleges tengelyen a fényesség magnitúdóban. A folytonos vonal a mérések átlagolt értékét jelzi.

Feladatok: a 3.23. ábra alapján határozzuk meg a fedés időtartamának hosszát és a bolygó átmérőjét a csillag átmérőjéhez viszonyítva!

Megoldás: Az ábráról a fedés időtartamára kb. 0,075 egységet, azaz $0,075 \cdot 2,2 \text{ nap} = 0,165 \text{ nap}$ -ot, azaz 238 percet kapunk. (A hivatalos érték 242 perc.)

Az intenzitás változás a csillag teljes felületének a kitakart felülethez viszonyított arányára jellemző:

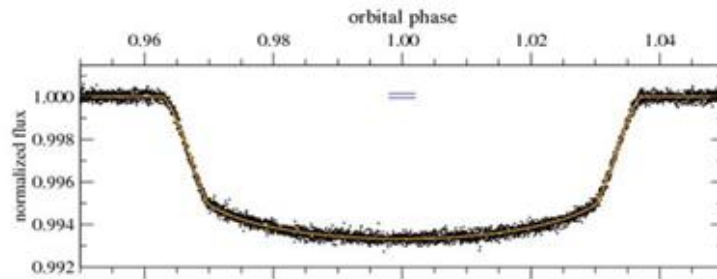
$$\frac{I_1}{I_2} = \frac{A_{csillag}}{A_{csillag} - A_{bolygó}} = \frac{1}{1 - \frac{A_{bolygó}}{A_{csillag}}}$$

Az átmérők aránya a felületek arányának négyzetgyöke, vagyis átalakítás után:

$$\frac{R_{csillag}}{R_{bolygó}} = \sqrt{\frac{A_{csillag}}{A_{bolygó}}} = \frac{1}{\sqrt{\left(1 - \frac{I_2}{I_1}\right)}}$$

²¹ HAT-Net = Hungarian Automated Telescope Network

A 3.23 ábráról leolvassva a fényességváltozás $\Delta m = 0,007$ magnitúdó. A magnitúdó változás az intenzitás változással logaritmikus viszonyban áll²², $\Delta m = 2,5 \cdot \log(I_1/I_2)$. Az ábráról magnitúdóban leolvasott fényességváltozásból az intenzitások arányára kapjuk, hogy $\frac{I_2}{I_1} = 10^{-\frac{0,007}{2,51}} = 0,9936$. Ezt az értéket a fenti képletbe beírva az adódik, hogy a csillag sugara 12,5-szer nagyobb, mint a bolygójáé, ami a hivatalos értékhez (13,1) elég közel van.



3.24 ábra A HAT-P-7b = KPLER-2b fedési görbéje a KEPLER űrszonda mérései alapján. Az ábrán a vízszintes tengely a fázisszöveget mutatja, vagyis egy teljes körnek, azaz 360 foknak az 1 felel meg, ami időtartamban 2,2 nap, a függőleges tengelyről pedig közvetlenül a fluxus változást olvashatjuk le.

Feladatok: a 3.24. ábra alapján

- a, Határozzuk meg a fedés időtartamának hosszát és
- b, a bolygó átmérőjét a csillag átmérőjéhez viszonyítva!
- c, Indokoljuk meg, hogy miért ívelt a fénygörbe alja!
- d, Milyen távol kering a bolygó a csillagtól?
- e, Mit állapíthatunk meg a bolygópálya alakjára vonatkozóan?
- f, Mit állapíthatunk meg a bolygó pályasíkjára vonatkozóan?
- g, Milyen módon lehetne következtetni arra, hogy van-e a bolygónak holdja?
- h, Hogy lehetne megállapítani, hogy a bolygó a csillag tengelyforgási irányával megegyező (direkt), vagy ellenkező (retrográd) irányban kering?

Megoldás:

a, Az ábráról a következő időadatok olvashatók le: $t_1=0,9603$, $t_2=0,97$, $t_3=1,031$ és $t_4=1,037$. A fedési fázis tartama: $t_4-t_1=0,0767$, ami időre átszámítva $0,0767 \cdot 2,2 \cdot 24 \cdot 60 = 243$ perc, jó egyezésben a hivatalos értékkel.

²² Emlékeztetőül: 100-szoros intenzitásváltozás megfelel 5 magnitúdó fényességkülönbségnek.

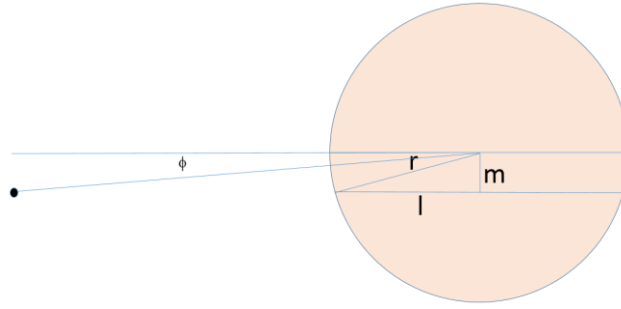
b, A relatív fluxusváltozás ($1-0,9935=0,0065$) közvetlenül a felületek arányát adja, az átmérők viszonya ennek négyzetgyöke, így az átmérők arányára 12,4-et kapunk. A hivatalos érték ennél kicsit nagyobb, 13,1, amit akkor kapunk, ha nem a maximális fluxusváltozást használjuk, hanem „kiegyenesítjük” a görbületet, és 0,994-el számolunk.

c, A fénygörbe alja azért ívelt, mert a csillagkorong felületi fényessége nem egyenletes, hanem a Nap esetében is jól ismert szélsőtétedést mutatja (ld. 3.4 fejezet). A görbület jól közelíthető egy parabolával.

d, Tétélezzük fel, hogy a bolygó egyenletes sebességgel körpályán kering a csillag körül. Jelöljük a csillag sugarát „ r ”-el, a bolygópálya sugarát pedig „ R ”-el! Ebben az esetben a bolygó a fedés időtartama alatt megteszi a csillag átmérőjének megfelelő távolságot: $2r = v(t_4-t_1)$, míg a teljes kör a 3.24 ábra alapján fázisban 1-nek felel meg ($K=2R\pi = v \cdot 1$). A két formula összehasonlításából kapjuk, hogy $R/r = 1/0,00767\pi = 4,15$, vagyis a bolygó a csillag sugarának négy és félszeres távolságában kering, ami jól közelíti a hivatalos 4,35 értéket. Ha a csillag méretét egyéb (pl. spektroszkópiai) mérésekkel meg lehet határozni, akkor abszolút értéket is tudunk mondani, és közvetlenül összehasonlíthatjuk a Naprendszerrel.

e, Mivel a fénygörbe lefutónak tekintett (bal oldali) ága lankásabb, mint a felfutó (jobb oldal), a bolygó sebessége nem állandó, tehát ellipszis pályán kering, vagyis a **d,** pontban feltételezett körpálya nem volt teljesen helytálló. Ha a fénygörbe szimmetrikus lenne, akkor a pálya vagy kör alakú, vagy a pálya nagy tengelye egybeesik látóirányunkkal.

f, A fénygörbe le- illetve felfutási időtartamának és az okkultáció időtartamának összehasonlításával megkaphatjuk a húr és a bolygó átmérőjének arányát. Esetünkben az átlagokat véve a félérték szélesség $0,5[(t_4 - t_1) + (t_3 - t_2)] = 0,06885$ és a bolygó $0,5[(t_2 - t_1) + (t_4 - t_3)] = 0,00785$ átlagolt méretének a hányadosa, ami 8,77. Ez kisebb, mint a **b,** pontban a fluxusváltozásból kapott 12,4 arány, vagyis a bolygó nem a csillagkorong közepén halad keresztül. Az átmérő a húr $k=12,4/8,77=1,41$ -szerese. Egyszerű geometriai megfontolással (Püthagorasz tétel, és figyelembe vesszük, hogy $r=kl$, 3.25 ábra) megkaphatjuk, hogy az átvonulás az átmérőtől $m = r \sqrt{1 - \frac{1}{k^2}} = 0,7r$ távolságban következett be

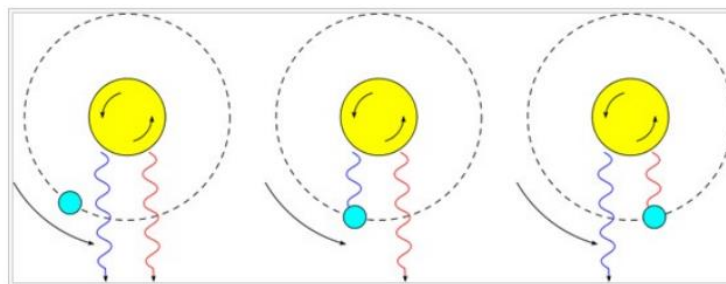


3.25 ábra A pályahajlás (inklináció) értelmezéséhez

Mivel a pálya sugarát már korábban megkaptuk, egy derékszögű háromszögből egyszerűen megkapjuk a bolygópálya síkjának a látóirányunkkal bezárt hajlásszögét. $\sin(\phi)=0,7r/4,15r=0,17$, amiből a pálya hajlásszögére kapjuk, hogy $\phi=9,8$ fok. A hivatalos eredmény ennek kevesebb, mint a fele, 4,3 fok.

g, Amennyiben az exobolygó körül hold(ak) kering(enek), azok mozgása fedési fénygörbe enyhe modulációját okozhatják. Nagyon sok eset lehetséges – a holdak száma, mérete, keringési iránya, pályahajlása, excentricitása, keringési ideje, melyek számbavételére itt nincs lehetőség, de megfelelően érzékeny eszközökkel hatásuk kimutatható.

h, Ha a csillag forog a tengelye körül, és nem a forgástengely irányából nézünk rá, egyik széle közeledik, míg a másik távolodik tőlünk, amely a Doppler-effektus révén a színekvonalak kiszélesedését okozza. A bolygóátvonulás során, a bolygó a csillagfény egy részét kitakarva megváltoztatja a színekvonal profilját. Ha a bolygó keringési iránya megegyezik a csillag tengelyforgási irányával, akkor az átvonulás (okkultáció) elején a rövidebb hullámhosszú komponensből kevesebb fény érkezik a megfigyelőhöz, ezért egy enyhe vöröseltolódás következik be, míg az okkultáció végén kék-eltolódás (Rossiter-McLaughlin effektus, ld. 3.26. ábra). Ha a keringés és a forgásirány ellenkező, először következik be a kék-eltolódás, s a kilépés környékén a vörös.



3.26. ábra Rossiter-McLaughlin effektus

3.4 Exobolygó átvonulás fénygörbe szimulációja táblázatkezelővel²³

3.4.1 A szimuláció alap gondolata

Amennyiben egy bolygó elhalad a csillaga előtt, a csillag fényessége a kitakart rész fényességével csökken. A szimulációban felteszem, hogy a csillag és a bolygó gömb alakú, a bolygókorong teljesen sötét, és amennyiben lenne is légköre, annak az észlelt fényesség-változásra vonatkozóan nincs hatása, és a csillag nem foltos. Felteszem továbbá, hogy a bolygó a csillag méreténél lényegesen nagyobb távolságban halad át, így a pályája csillag előtti szakasza egyenesnek tekinthető. Ha pl. a Nap-Föld viszonyokat célozzuk meg, a Nap 1,4 millió km átmérője és a Nap-Föld távolság 150 millió km-es értékét tekintve a feltétel kiválóan teljesül. (Ha a bolygó csak néhányszoros csillag-átmérőnyire halad át, akkor, ha nem a pályasíkban vagyunk, a pálya növekvő inklináció-szögével a bolygókorong útja ívelté válik.).

A szimulációs program alap gondolata és működése a következő: egy „négyzet alakú” cellatartományba generálok egy csillagkorongot, azaz minden cellába beírom a csillag adott területének felületi fényességét, majd a csillag előtt elhaladó bolygó által kitakart rész fényességét kivonom a csillag összfényességéből, az eredményt pedig grafikusán ábrázolom. A funkciók megvalósításához makrókat használok. Megjegyzendő, hogy a grafikon a bolygó csillagkorong előtti pozíciójához viszonyított fényességváltozást ábrázolja, míg a valódi mérés során a fényesség időbeli változását tudjuk mérni. Azonban ha a bolygó átvonulási sebességét egyenletesnek vehetjük, ami a legtöbb esetben megtehető, az idő-fényesség és a pozíció-fényesség grafikon jól megfelel egymásnak.

A valóság hű fénygörbe előállítására érdekében tudni kell, hogy a csillagkorong felületi fényessége középtől a perem fele haladva fokozatosan csökken. Ez az úgynevezett szél- vagy peremsötétedés. A szélsötétedés (amely ráadásul még a hullámhossztól is függ) leírására számos csillaglégkör modell létezik. Céljainkra tökéletesen megfelel az alábbi egyszerű, a Nap esetében 550 nm-re vonatkozóan a tapasztalattal jól megegyező fényességeloszlást leíró formula²⁴:

²³ A program megtalálható a mellékelt CD-n: 03-HGy_Okkultacio.xlsm.

²⁴ https://en.wikipedia.org/wiki/Limb_darkening

$$I(\psi) = [1 - 0,47(1 - \cos\psi) - 0,23(1 - \cos\psi)^2]I_0$$

ahol I_0 a korong közepének fényessége (vagyis a maximális fényesség), ψ pedig a középponttól mért szög.

3.4.2 A program használata

A program indítása előtt a megfelelő cellákba be kell állítani néhány paramétert, nevezetesen a csillag sugarát, a bolygó sugarát, valamint a bolygó középpontjának a csillag középpontjától mért átvonulási magasságát (3.27. ábra). A bolygó sugarának maximális értéke a csillag sugara, minimális értéke 0, ami egy pixelnyi bolygóméretet jelöl.

Az érdekesség kedvéért a szélsőtétedés figyelembe vétele kikapcsolható, és így tanulmányozható, milyen különbséget okozna ez a fénygörbében. (A kapcsoló változtatása után a csillagot természetesen újra kell generálni!) Az „Arányos” kapcsoló „1” értékénél az 1-re normált fényességgörbét rajzolom ki, míg a kikapcsolt értéke, vagyis „0” esetén a fényességváltozást kinagyítva látjuk. A harmadik kapcsoló segítségével véletlenszerű zajt tudunk a kiszámított értékekre ültetni, ami még valóság hűbbé teszi a görbét.

A fentiek szerinti beállítások elvégzése után a gombokra való kattintással futtathatók a makrók. Első lépésben tehát a „Start” gomb megnyomásával egy „négyzet alakú”

cellatartományba egy csillagkorongot generál a program.

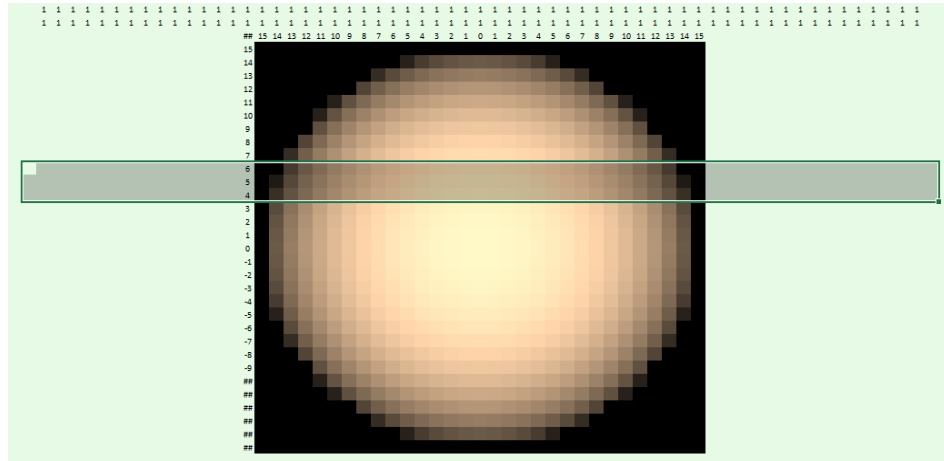
(A további gombok működtetéséhez szükséges változók is ekkor kapnak értéket.) A korongot alkotó minden egyes cella hátterét a fényességgel arányosan kiszínezem, valamint az adott cellába beírom annak fényességét a saját háttér színével, hogy a számok ne legyenek zavaróak (3.28 ábra).

A csillagot tartalmazó négyzet bal oldalsó és felső peremére a könnyebb tájékozódás érdekében felírom a középtől való távolságot, valamint a csillag 1-re normált összfényességével kitöltöm a még feljebb látható két sort. A felsőt majd a kiszámított, az

3		
4	Csillag sugár	15
5	Bolygó sugár	3
6	Átvonulási magasság	0
7		
8		
9	Szélsőtétedés be/ki (1/0)	1
10	Arányos (1 - igen/0 - nagyt)	0
11	Zaj amplitudó ezrelékben	5
12		
13		
14		
15	START	
16	Új átvonulás	
17	Új mérés	
18		
19	Átvonulási sáv kijelölés	
20		
21	Mérési adatsor kijelölése	
22		
23	Zaj nélküli adatsor kijelölése	
24		
25	Kijelölt adatsor grafikonja	
26		
27	Szélsőtétedés grafikon	
28		
29		
30	Rajzterület törlés	
31		

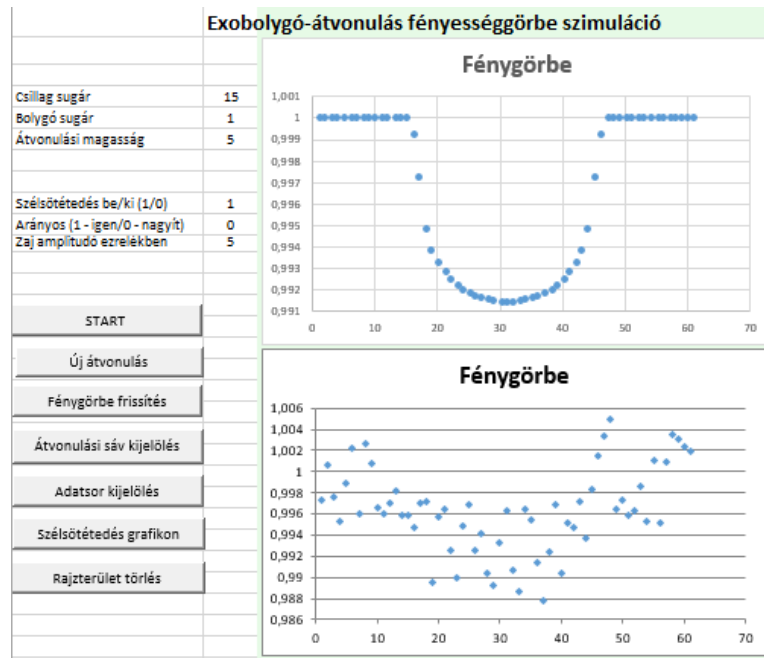
3.27 ábra A program vezérlő felülete

alsót pedig a zajjal terhelt fényességek számára. Ez után a bolygót csillagsugár távolságról balról elindítom, és a bolygókorong közepe feletti fényességet tartalmazó cellába beírom a korong kitakarásával csökkentett fényességet, majd felrajzolom a grafikont (3.29 ábra). Tanulságos a különböző méretű és különböző helyeken áthaladó bolygó fedési fényességgörbéinek előállítás és összehasonlítása (3.30 ábra).

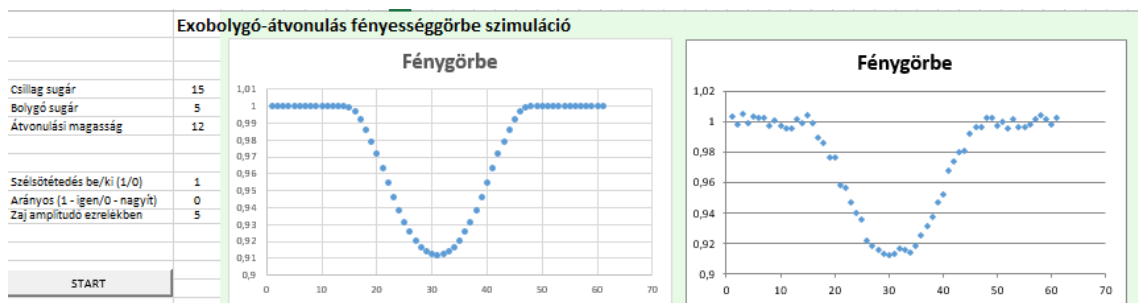


3.28 ábra A bolygó áthaladási sávját a kijelölt cellák jelzik.

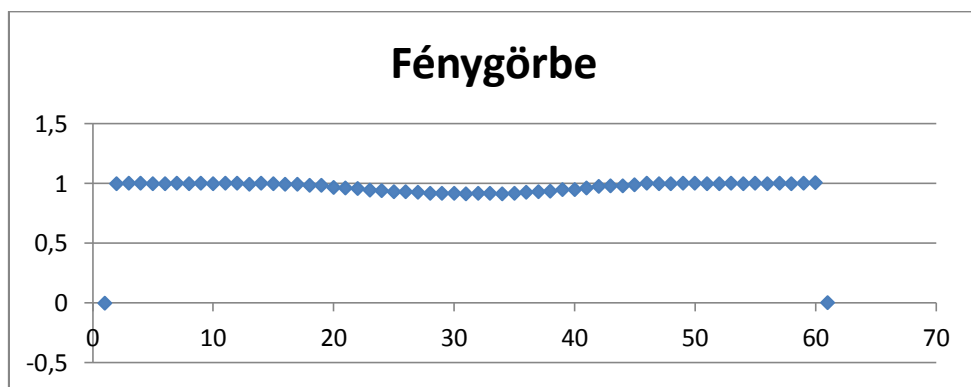
A grafikon kirajzolásához megadható, hogy az abszolút fényességarányokat szeretnénk-e látni (3.31 ábra), vagy csak a fényesség változását. Mivel a valódi méréseket mindig mérési hiba, zaj terheli, lehetőség van a mérési bizonytalanságnak megfelelő zaj hozzáadásához is. Az „Új mérés” gomb minden egyes megnyomása egy másként zajosított görbét generál a korábban kiszámított értékekből. A zaj amplitúdó is változtatható, nem szükséges új átvonulást generálni, csak ha az első négy paraméter valamelyikén változtattunk. Az így kapott adatsor fordított irányban is használható, a felrajzolt fényességgörbe alapján a diákok megpróbálhatnak visszakövetkeztetni a csillagfedés paramétereire, ahogy azt a 3.20 feladat esetében részletesen bemutattam. Végül a tanulság kedvéért ismét megemlítem, hogy a szélsőtétedés kikapcsolható, ami által szembeötlővé válik a fénygörbékben mutatkozó különbség. (Ehhez természetesen előbb újra kell generálni a csillagot.)



3.29 ábra Egy futtatás eredménye, felül zaj nélkül, alul ugyanaz, véletlenszerű zaj hozzáadásával.



3.30 ábra Egy nagyobb bolygó elhaladása a csillag pereme közelében



3.31 ábra Az abszolút fényességváltozás grafikon a 3.30 ábra beállításai szerint

A 3. számú fejezet jelenti a 3. számú téziscsoport háttérét.

Források

- [1] Feynman R. P., Leighton R. B. és Sands M.: Mai fizika, 3. kötet, Műszaki könyvkiadó, Budapest, 1969.
- [2] R.A.Phillips A. Nussbaum: Modern optika - mérnököknek és kutatóknak, Műszaki könyvkiadó, Budapest, 1982.
- [3] Ábrahám György (szerk.): Optika, Panem - McGraw-Hill Inc, Budapest, 1998.
- [4] Bernolák Kálmán: A Fény. Műszaki Könyvkiadó, Budapest, 1981.
- [5] Vinkó József: Spektroszkópok jellemzői,
<http://titan.physx.u-szeged.hu/~vinko/general.pdf>
- [6] New Frontiers: Modern Perspectives on Our Solar System - Professor Frank Summers, Space Telescope Science Institute Ph.D., University of California at Berkeley, 2008. The Teaching Company
- [7] Alan French: Slightly Out of Focus: Star-Testing Your Telescope, Sky & Telescope, 2014. júl. pp. 69.
- [8] The Search for Exoplanets: What Astronomers Know – Joshua N. Winn, PhD, Massachusetts Institute of Technology, 2015. The Teaching Company
- [9] Point Spread Function, ASTR 511/O’Connell Lec 13
<http://www.astro.virginia.edu/class/oconnell/astr511/lec13-f03.pdf>
- [10] Experience with the Hubble Space Telescope: Twenty Years of an Archetype, Matthew D. Lallo, Space Telescope Science Institute, 2011.
<http://arxiv.org/ftp/arxiv/papers/1203/1203.0002.pdf>
- [11] Observatory Support, HST Focus & PSF Resources
<http://www.stsci.edu/hst/observatory/focus>
- [12] ETD - Exoplanet Transit Database, <http://var2.astro.cz/ETD>
- [13] The Extrasolar Planets Encyclopaedia, <http://exoplanet.eu/>
- [14] NASA Exoplanet Archive, <http://exoplanetarchive.ipac.caltech.edu>
- [15] Exoplanet Data Explorer, <http://exoplanets.org/>
- [16] <http://hatnet.org>
- [17] Neckel, H.; Labs, D. (1994). "Solar Limb Darkening 1986-1990". Solar Physics 153 (1-2): 91–114.

„Az energia nem vész el, csak átalakul...”

4. Az energiafogalom felmérése az egyetemi hallgatók körében

Az Eötvös Loránd Tudományegyetemen a Fizika Tanítása Doktori Iskola keretében 2011-ben történt egy felmérés, amely azt volt hivatott megvizsgálni, hogy mennyire eredményes a természettudományos energia-fogalom tanítása a középiskolában. A felmérés egy 15 feleletválasztós tesztkérdés és egy rövid, szöveges választ kívánó feladat révén történt, amely eredményéről készült beszámolót az [1] irodalom tartalmazza. Ezen felmérés és eredménye inspirált arra, hogy megvizsgáljam az Óbudai Egyetem Alba Regia Műszaki Karán tanuló hallgatók energia-fogalmát. A 15 kérdést tartalmazó kérdőívet több éven keresztül minden félév legelső hetében kitölttettem három szakon, a fizika kurzust épp akkor kezdő hallgatóimmal. A fejlődés ellenőrzése érdekében a félév végén, a vizsga előtt is megismételtem a felmérést. Összehasonlításként a tesztet egy 20 évvel korábban végzett hallgatói csoporttal is sikerült kitöltetnem. A vizsgálataim során összesen 327 darab, műszaki pályát választott egyetemista által kitöltött tesztlapot dolgoztam fel.

4.1 A felmérő lap ismertetése

Az alábbiakban az [1] irodalom alapján összefoglalom a teszt kidolgozói részéről vizsgálni kívánt ismereteket, bemutatom a teszt felépítését, és magát, az általam használt, papír alapúra átalakított a tesztlapot (4.1 – 4.3 ábrák). (Az eredeti html alapú tesztlap a CD mellékleten található - *04-HGy_Energiateszt.htm*.)

A teszt 15 feleletválasztós tesztkérdést és egy önállóan fogalmazott, rövid szöveges választ kívánó feladatot tartalmazott, melyek más-más oldalról közelítettek az energia problémaköréhez. Hat olyan feladat szerepelt a felmérésben, ahol a teszt mennyiségi eredmény felismerését várta. Ez a tanult fizikai alapösszefüggések alkalmazását, egyszerű számítások, logikai megfontolások, illetve nagyságrendi becslések elvégzését kívánta. (A diákok használhattak kalkulátort, vagy akár papíron is elvégezheték a szükséges számításokat.) Kilenc feladat kvalitatív választ kívánt. Több kérdés foglalkozott az energiafajtákkal és az energia-megmaradás törvényének ismeretével, négy kérdés igényelt interdiszciplináris ismereteket. Négy kérdés vizsgálta a fizikában

tanultak mindennapi, gyakorlati alkalmazását. Sajátosan fizikai szemléletet és tudásanyagot öt feladat kívánt. Két kérdés tesztelte a tudományos kijelentések és az áltudományos állítások megkülönböztetésének képességét.

Név:.....

Neptun kód:.....

Dátum: A V
Akti

ENERGIA teszt

1. Egy autó 50km/h sebességről, blokkoló fékkel 20 m úton áll meg. Mekkora a fékút, ha a gépkocsi sebessége 100km/h?

x, Nem tudom a választ. a, Változatlanul 20 m. b, Kb. 40 m. c, Kevesebb, mint 40 m.	d, 50 m. e, Biztosan több, mint 100m. f, 80 m.
--	--

2. A legtöbb mai óráat apró gomb-clem energiája működteti. Milyen formában tárolja az energiát a gomb-clem?

x, Nem tudom a választ. a, Elektromos energia. b, Mechanikai energia. c, Mágneses energia.	d, Kémiai energia. e, Termikus energia. f, Mag-energia.
---	---

3. Az óra hosszú idő alatt felemésztí az elem energiáját. - Hova tűnt a gomb-clem energiája, miután az óra végleg megállt?

x, Nem tudom a választ. a, Elektromos energiává alakul. b, Kémiai energiává alakul. c, Hővé alakul.	d, Az alkatrészek mozgási energiájává alakul. e, Mechanikai energiává alakul. f, Elektromágneses sugárzási energia lesz.
--	--

4. Melyik állítás igaz az alábbiak közül?

x, Nem tudom a választ. a, Az energia a testek körül aurát képez. b, A negatív energia kötött állapotot jelent, melynek 'feltépéséhez' munkát kell végezni. c, Az energia ún. csakraon keresztül áramlik.	d, A pozitív energia életbarát ('vis vitalis') jellegű. e, Meditációval negatív energiából pozitív energiát nyerhetünk. f, Az energiamérés módszere az ún. radiesztezia.
--	--

5. A bemutatott gázzsámlán néhány tétel elmosódott. A számla látható adatai alapján mekkora a befizetendő összeg? Segítség: a befizetendő összeg a bruttó számlaérték; a netto érték a fogyasztás és az alapdíj összege.)

Információk: Mérőleolvasás tervezett időpontja: 2008.09.12. Utolsó leolvasás időpontja: 2007.09.14. Utolsó leolvasott mérőállás: 24 533 m ³		Számla ÁFA összesítője: Nettó számlaérték: 3,000 ÁFA %: 20 ÁFA összege: 600,000 Bruttó számlaérték: 3,600,000																																																	
Időszaki elszámolás összesen: Bruttó számlaérték: 3,600,000 Támogatás, túlfizetés: 0 Késedelemi kamat: 0 Fizetendő összesen: HUF 3,600,000																																																			
Nettó szám. vérték:	<table border="1"> <thead> <tr> <th>Nettó érték (Ft)</th> <th>ÁFA kulcs</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td>3,600,000</td> <td>20%</td> </tr> <tr> <td>399,000</td> <td>20%</td> </tr> <tr> <td>3,999,000</td> <td></td> </tr> </tbody> </table>	Nettó érték (Ft)	ÁFA kulcs	3,600,000	20%	399,000	20%	3,999,000																																											
Nettó érték (Ft)	ÁFA kulcs																																																		
3,600,000	20%																																																		
399,000	20%																																																		
3,999,000																																																			
<table border="1"> <thead> <tr> <th>Információk</th> <th>Szolgáltatás megnevezése</th> <th>Szolgáltatási időszak -tól -ig</th> <th>Mennyiség (m³)</th> <th>Korrekció tényező</th> <th>Korrigált menny. (m³)</th> <th>Főtérfék (MJ/m³)</th> <th>Elszámolt mennyiség</th> <th>M.e.</th> <th>Egységár (Ft/M.e.)</th> <th>Nettó érték (Ft)</th> <th>ÁFA kulcs</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td>Fogyasztás</td> <td>Alapdíj</td> <td>2008.02.15-2008.03.14</td> <td>371</td> <td>1</td> <td>371</td> <td>34,10</td> <td>1 Hónap</td> <td>MJ</td> <td>2,513</td> <td>3,999,000</td> <td>20%</td> </tr> <tr> <td></td> <td></td> <td>2008.03.-2008.03. hó</td> <td></td> <td></td> <td></td> <td></td> <td></td> <td>Év/12</td> <td>4 788,000</td> <td>399,000</td> <td>20%</td> </tr> <tr> <td colspan="10">Nettó szám. vérték:</td> <td>3,999,000</td> <td></td> </tr> </tbody> </table>				Információk	Szolgáltatás megnevezése	Szolgáltatási időszak -tól -ig	Mennyiség (m ³)	Korrekció tényező	Korrigált menny. (m ³)	Főtérfék (MJ/m ³)	Elszámolt mennyiség	M.e.	Egységár (Ft/M.e.)	Nettó érték (Ft)	ÁFA kulcs	Fogyasztás	Alapdíj	2008.02.15-2008.03.14	371	1	371	34,10	1 Hónap	MJ	2,513	3,999,000	20%			2008.03.-2008.03. hó						Év/12	4 788,000	399,000	20%	Nettó szám. vérték:										3,999,000	
Információk	Szolgáltatás megnevezése	Szolgáltatási időszak -tól -ig	Mennyiség (m ³)	Korrekció tényező	Korrigált menny. (m ³)	Főtérfék (MJ/m ³)	Elszámolt mennyiség	M.e.	Egységár (Ft/M.e.)	Nettó érték (Ft)	ÁFA kulcs																																								
Fogyasztás	Alapdíj	2008.02.15-2008.03.14	371	1	371	34,10	1 Hónap	MJ	2,513	3,999,000	20%																																								
		2008.03.-2008.03. hó						Év/12	4 788,000	399,000	20%																																								
Nettó szám. vérték:										3,999,000																																									

x, Nem tudom a választ. a, 4788,000 Ft. b, 932,323 Ft. c, 311,548 Ft.	d, 7131,000 Ft. e, 38629,000 FT. f, 47288,000 Ft.
--	---

4.1 ábra A papír alapúra átalakított Energiateszt, 1–5. kérdés.

Név:.....

Neptun kód:.....

Dátum:

6. Egy nagy széntüzelésű erőműben naponta 12000 t szenet égetnek el. Már ez az egyetlen adat is sokat elárul az erőmű működéséről. - Mennyi az erőmű hasznos teljesítménye?
(Az okoskodásnál feltételezhetjük, hogy a fűtőanyag teljes mennyiségében vegytiszta szén. A szén égésekor a következő oxidációs reakció történik: $C + O_2 = CO_2$. A folyamat reakcióhője 392 kJ/mol, azaz $6 \cdot 10^{23}$ db szénatom oxidálásakor 392 kJ energia szabadul fel. A szén relatív atomtömege 12.)

x, Nem tudom a választ. a, 4,5 MWh. b, GW nagyságrendű, de biztosan kevesebb mint 4,5 GW. c, Több, mint 5 GW.	d, 392 MWh. e, Kevesebb, mint 392 MW. f, Több, mint 50 GW.
--	--

7. Mennyire becsülhető az előző kérdésben szereplő erőmű napi széndioxid-kibocsátása?

x, Nem tudom a választ. a, Kb. 4,5 t. b, 1000 kg. c, Kevesebb, mint 440 t.	d, 1000 t. e, Kevesebb, mint 1000 t. f, 44 000 t.
---	---

8. A vízi erőmű elektromos energiát termel. - Miből származik a nyert villamos energia?

x, Nem tudom a választ. a, A gáttal felduzzasztott víz helyzeti energiájából. b, A duzzasztott víz termikus energiájából. c, A nagy sebességgel a turbinákra zúduló víz belső súrlódásából.	d, A Napból származó kémiai energiából. e, A víz kémiai energiájából. f, A folyó sebességéből adódó mozgási energiából.
--	---

9. Milyen fizikai törvényen alapul az erőmű elektromos energiát előállító generátorainak működése?

x, Nem tudom a választ. a, Newton gravitációs törvényén. b, Pascal törvényén. c, Coulomb törvényén.	d, A Faraday-féle indukciós törvényen. e, A Boyle-Mariotte törvényen. f, Planck törvényén.
--	--

10. Einstein híres relativitás-elmélete sok meglepő állítás mellett azt mondja, hogy a tömeg és az energia lényegileg ekvivalens mennyiségek. A tömeg és az energia összefüggését a közismert $E=mc^2$ formula adja meg. - Van-e kísérleti bizonyíték a fenti állításra?

x, Nem tudom a választ. a, Nincs kísérleti bizonyíték, a formula bonyolult levezetés eredménye. b, Kísérleti igazolás nincs és nem is várható addig, amíg a technika fejlődése nem teszi lehetővé a fénysebesség megközelítését. c, Einstein a speciális relativitáselmélet kidolgozásakor magától értetődően feltételezte a fenti tétel igazságát és azóta sem gondolkoznak a fizikusok a kísérleti igazoláson.	d, Einstein állítását a Föld körül geostacionárius pályán keringő műholdakon végzett kísérletek igazolták. e, A tétel igazságát kísérletileg igazolja az energia-fel szabadulással járó magreakciók esetén kimutatott tömegdefektus. f, Einstein összefüggése átlagos kémiai reakciók alapján végzett mérésekkel igazolható.
---	--

11. Az alábbi felsorolásban mi az, amit nem sorolhatunk az ún. alternatív energiaforrások közé?

x, Nem tudom a választ. a, Biomassa. b, Árapály energia. c, Zérusponyi-energia.	d, Napenergia. e, Hőszivattyú. f, Geotermikus energia.
--	--

12. A téli nap az ablaküvegen keresztül besüt a szobába. Bár az üveg hőmérséklete nem változik, az üveg mögött álló sötét színű fémtárgy hőmérséklete $12\text{ }^\circ\text{C}$ -ot emelkedik a szobahőmérséklet fölé. - Mi okozza a tárgy felmelegedését?

x, Nem tudom a választ. a, Az ablak üvegházhatása. b, A sötét fémtárgy elnyeli a napsugárzást, ami áthatol az ablak üvegén. c, A fém elnyeli az ultraibolya fotonokat és ezek gerjesztik a fém elektronjait.	d, Az üveg nem engedi át az ultraibolya sugárzást, ezért a sugárzási egyensúly megbomlik. e, Az ablak anyaga elnyeli a napsugárzás infravörös tartományát. f, Az ablak mögötti szobalevegő áramlása.
---	--

4.2 ábra A papír alapúra átalakított Energiateszt, 6–12. kérdés.

Név:.....

Neptun kód:.....

Dátum:

13. Mivel magyarázható, hogy az előző feladatban a melegedés értéke maximált (példánkban 12 °C) és nem nő tovább folyamatosan?

<p>x, Nem tudom a választ. a, Folyamatos melegedés esetén a fém tárgy elolvadna. b, A magasabb hőmérsékleten a fém már nem nyeli el az energiát. c, Az üveg nem enged át több energiát.</p>	<p>d, Minden test mindig hőforrásként is viselkedik. Esetünkben a 12 °C- kal felmelegedett fém tárgy ugyanannyi energiát ad le a környezetének, mint amekkora energiát felvesz a Nap sugárzásából. e, A fém fajhője nem lineáris. f, A napsugárzás energiája 12 °C hőmérsékletemelés után a Planck-féle foton-hipotézisnek megfelelően megváltoztatja a fém elektronszerkezetét.</p>
--	--

14. A Nap energiáját magfúziós folyamatok biztosítják. A Nap másodpercenként $4 \cdot 10^{26}$ J energiát sugároz szét a világűrbe. - Mennyit változik egy nap alatt a sugárzás következtében a Nap tömege?

<p>x, Nem tudom a választ. a, A Nap tömege nem változik, hiszen a kibocsátott sugárzásnak nincs tömege. b, A Nap a csillagfejlődés során a 'vörös óriás' állapot felé halad, így a méretével együtt tömege is nő. c, A Nap relativisztikus tömegnövekedése napi 31,5 kg.</p>	<p>d, A Nap tömege az Einstein által megfogalmazott energia-tömeg ekvivalencia értelmében napi $4 \cdot 10^{14}$ kg -mal csökken. e, A Nap sugárzása a magas hőmérsékletének következménye és semmi kapcsolatban nem áll a Nap tömegével, ezért a Nap tömege napról napra biztosan nem változik. f, Az anyagmegmaradás elve értelmében Nap tömege a csak a 'nap-szél' következtében csökken, de ennek kiszámítása a megadottak alapján nem lehetséges.</p>
---	---

15. Egy 10 W fénytjeljesítményű, pontszerű fényforrás monokromatikus 500 nm hullámhosszúságú zöld fényt sugároz, gömb-szimmetrikusan a tér minden irányába. Hány zöld foton jut a fényforrással koncentrikus, 100 m sugarú gömb egységnyi felületére két másodperc alatt?

<p>x, Nem tudom a választ. a, $3,0 \cdot 10^8$. b, $4,0 \cdot 10^{14}$. c, $3,14 \cdot 10^9$.</p>	<p>d, $2,5 \cdot 10^{19}$. e, $6,0 \cdot 10^{23}$. f, $4,0 \cdot 10^{19}$.</p>
---	---

16. A sajtóban gyakran olvashatunk arról, hogy elfogynek energiakészleteink, ugyanakkor fizikaórán az energia-megmaradásról tanulunk, (azaz, hogy energia nem keletkezik és nem fogy el, az energia megmarad). - Néhány mondatos válaszban oldd fel az ellentmondást!

4.3 ábra A papír alapúra átalakított Energiateszt, 13–16. kérdés.

Mint a fenti ábrákról látható, a teszt első 15 feladatában a kérdés megfogalmazása után a diákoknak a felkínált 7 lehetőség közül lehetett megjelölni az egyetlen jó választ. Minden esetben lehetséges volt a tájékozatlanság őszinte beismerése, a válaszadás előli menekülést jelentő: „x Nem tudom a választ” opció. A 16. feladatban a diák saját, önállóan megfogalmazott gondolatit írhatta le. Az ide írt válasz az értékelés során nem jelentett pontot.

4.2 A középiskolai felmérés összefoglalása

Az [1] beszámoló alapján az alábbiakban röviden összefoglalom a középiskolai tanulók körében történt felmérés körülményeit és eredményét. A felmérésben 16 középiskola, összesen 374 végzős diákja vett részt. A tesztet elektronikus formában, az iskolai számítógépeken dolgozva töltötték ki a tanulók. A kérdésekhez az interneten keresztül – jelszóval védett oldalon lehetett hozzáférni, tanári felügyelet mellett.

A diákok a megírásukkor tisztában voltak a kérdések értékelésének módjával. A teszt kiértékelésekor a jó válasz megjelölése +P pontot ért, a rossz válasz -P/5 pontot, míg a tájékozatlanság őszinte beismerése nulla pontot (így teljesült, hogy a véletlenszerűen megjelölt válaszok esetén a kapott pontok várható értéke nulla legyen). Ezen kívül a diákok tudták azt is, hogy az egyes tesztkérdések P pontszáma eltérő. A számításokat igénylő kérdések esetén a jó válasz 2-3 pontot ért, a kvalitatív megoldások 1 pontot értek. Így tökéletes megoldás esetén 22 pontot lehetett szerezni, míg minden kérdésre rossz választ jelölve -4,4 pont adódott.

Az eredmények statisztikai értékelése a pedagógiai méréseknél elterjedten használt SPSS programmal és a műszaki-természettudományi tudományterületeken népszerűbb Excel-ben történt. Az eredmények alapján a végzős középiskolások átlagos teljesítménye alig 20-30 %-nak adódott.

4.3 Az egyetemi hallgatók között történt felmérés ismertetése

Az összehasonlíthatóság kedvéért, az egyetemi hallgatók is ugyanazokat a kérdéseket és válaszadási lehetőségeket kapták, mint a középiskolások. A felmérés módja azonban kissé módosult. Az egyik változatban a középiskolai mintát (esztétikus kinézet, motiváló képek) igyekeztem hűen követni, és a felmérést az egyetem e-learning rendszerén keresztül elvégezni. Hamarosan kiderült azonban, hogy ez a módszer nem ad objektív eredményt. A hallgatók nehéznek találták a tesztet, és bevallották, hogy közben még „googliztak” is. Ezért áttértem a sokkal egyszerűbb, papír alapú tesztlap használatára. A számítógépes tesztkitöltés nagy előnye, hogy az eredmények mindjárt a számítógépbe

kerülnek, és a feldolgozás egyszerűsödik. A papír alapú objektívebb, viszont a kiértékelése, az összes adat számítógépbe vitele sokkal nagyobb munkát okozott.

4.3.1 Az értékelés módja és szempontjai

Az eredmények kiértékelési módján is változtattam, egyszerűsítettem. A 4.2 részben leírt kifinomult értékelési módszer helyett csupán az egyszerűbb, helyes = 1 pont, hibás = 0 pont megkülönböztetést tettem. A statisztikai elemzést EXCEL-el végeztem. A módszerem alkalmaztam az középiskolai felmérés adataira is, és gyakorlatilag ugyanazt az eredményt kaptam, mint amit a bonyolultabb eljárást használó [1] dolgozat szerzői. Ez meggyőzött arról, hogy az egyetemisták közötti felmérés összehasonlítható a középiskolások eredményeivel.

Az értékelést több szempont szerint is elvégeztem. Az egyik szempont az volt, hogy az egyes kérdésekre összesen hány helyes válasz érkezett. A másik szempont szerint azt vizsgáltam, hogy az egyes tesztlapokon hány válasz volt helyes. A harmadik értékelési szempontom az volt, hogyan aránylanak egymáshoz a tárgyi tudást (9,10,11), a szemléletet (1,2,3,4,8,12,13,14) és a számolási készséget (5,6,7,15) igénylő helyes válaszok.

Tárgyi tudásnak azt tekintettem, ha pusztán lexikális ismeretekkel megoldható a feladat. Tehát ezeket a kérdéseket az is sikerrel megválaszolhatja, aki a fizikának még az alapelveit sem ismeri, de - akár az összefüggések átlátása nélkül - emlékszik egyes információ morzsákra. (Ezért a szemlélet csoportba tartozó kérdésre adott helyes válasz értékesebbnek tekinthető.) A számolást igénylő feladatokkal kapcsolatban megjegyzem, hogy ezek gyakorlatilag nem igényelnek számottevő matematikai ismeretet, mindegyikük a négy alpművelet alkalmazásával megoldható. Ezért az ebben a kategóriában elért rossz eredmény nem a matematikai tudás hiányosságának tudható be. (Tapasztalatom szerint a legtöbben meg sem próbálkoztak a számolással.)

Mivel minden kérdés tartalmaz egy válaszadás előli menekülési lehetőséget: „x Nem tudom a választ”, a kérdésekre ténylegesen 6 lehetőség közül lehet kiválasztani a helyesnek vélt megoldást. A véletlen kitöltés valószínűsége így $1/6$, azaz kb. 16%. A 6

lehetőség közül általában legalább kettő (bár néha még több is) annyira blőd, hogy valójában a megfontolásra érdemes választási lehetőségek száma 4-re csökken, következésképp a véletlen kitöltés valószínűségét 25%-nak tekintettem. Pár százaléknyi biztonsági rést alkalmazva a 20% alatti teljesítményt szisztematikus „nemtudás”-ként, a 30% fölöttit pozitív tudásként értékeltem. A véletlen elnézés lehetőségét megadva biztos tudásról valójában 90% felett beszélhetnék.

4.3.2 Célcsoportok

A vizsgálat célcsoportjai: az Óbudai Egyetem Alba Regia Műszaki Karának a fizika kurzusokat felvett diákjai, konkrétan:

- elsős informatikus hallgatók – első félév, szeptemberi kezdés
- elsős menedzser hallgatók – második félév, februári kezdés
- másod éves villamosmérnök hallgatók, harmadik félév, szeptemberi kezdéssel. (Sajnos ez a minta elég kevés, ugyanis a villamosmérnök hallgatóknak közben megszűnt a számolási gyakorlat.)

A felmérést a lehetőségekhez mérten igyekeztem a félév legelején elvégezni, majd a félév végén, a fizika kurzus befejeztével ellenőrzésként megismételni, hogy kiderítsem, tapasztalható-e valami hatása a fizika tanulmányoknak. A félév folyamán az előadásaimon és a számolási gyakorlatokon ügyeltem arra, hogy olyan formában ne kerüljenek elő kérdések és válaszok, melyek a felmérő lapon szerepelnek.

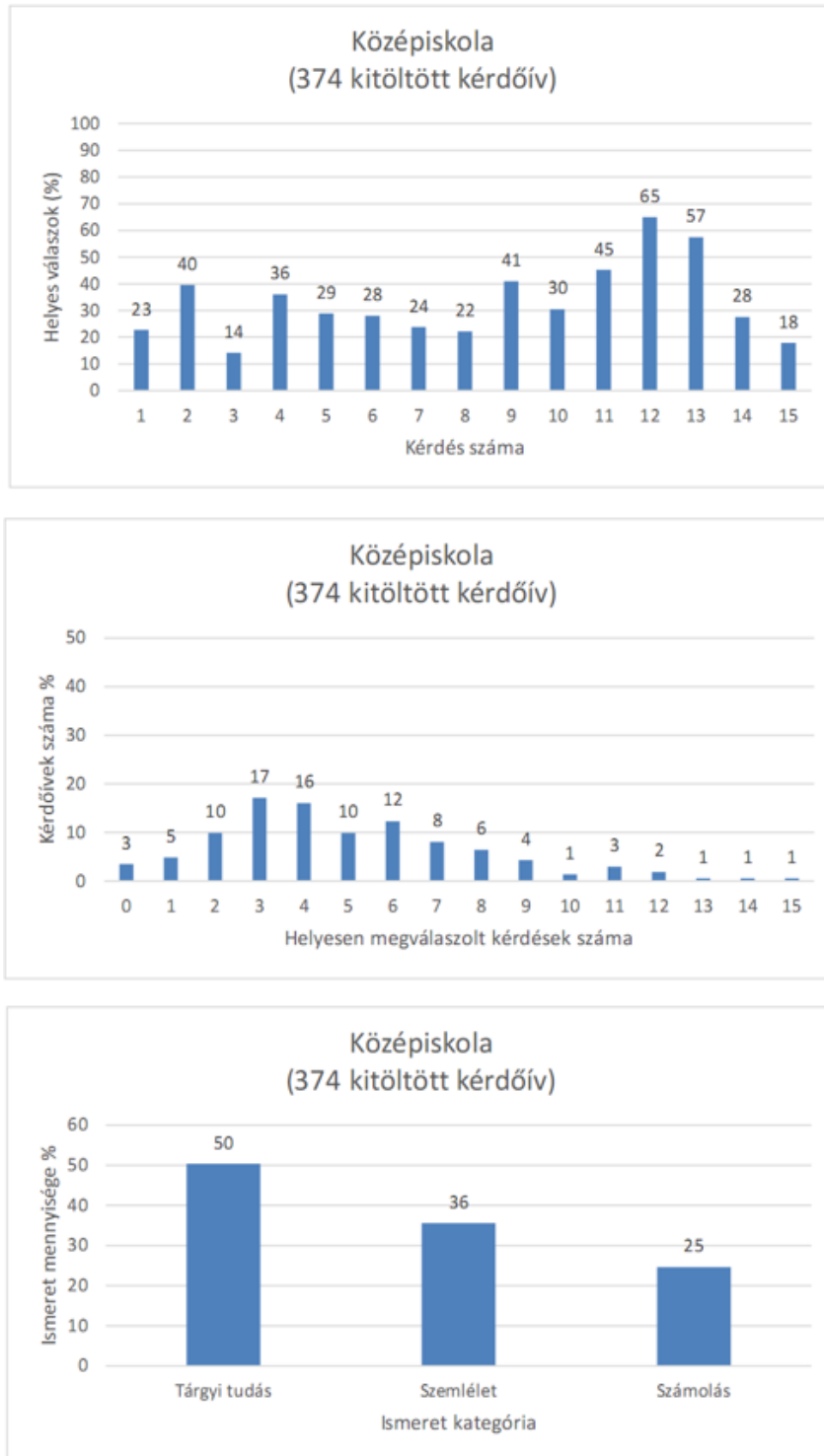
2014 őszén egy 20 éves évfolyam-találkozóra összegyűlt volt villamosmérnök szakos hallgatóimmal is sikerült kitöltetni az energiatesztet, mely bevallásuk szerint nagymértékben színesítette a találkozó programját.

4.4 Az eredmények áttekintő értékelése

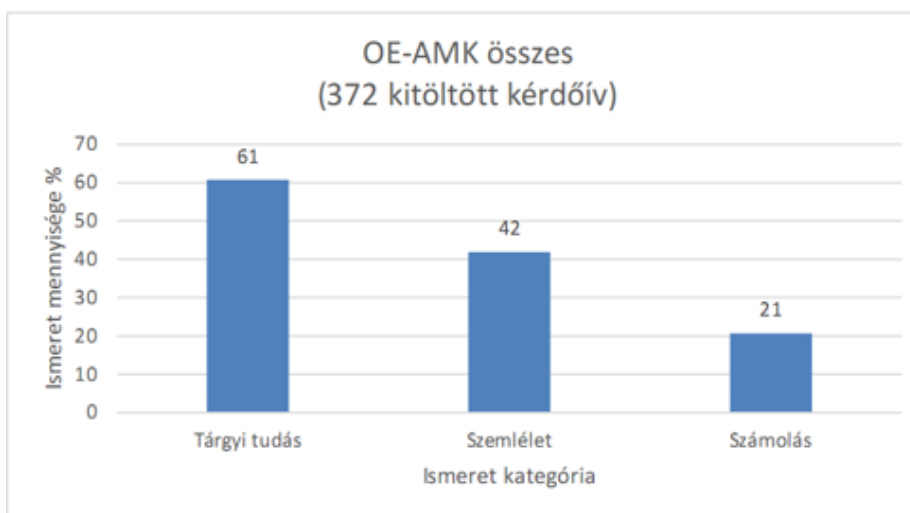
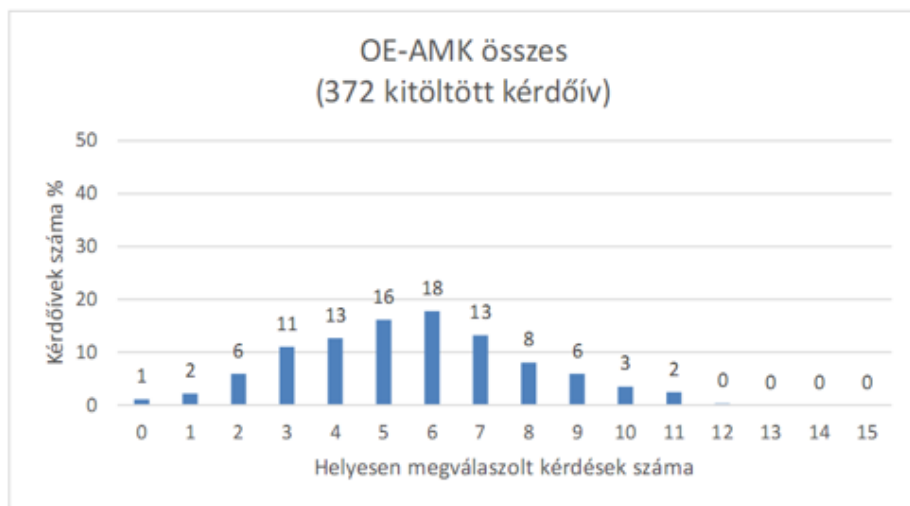
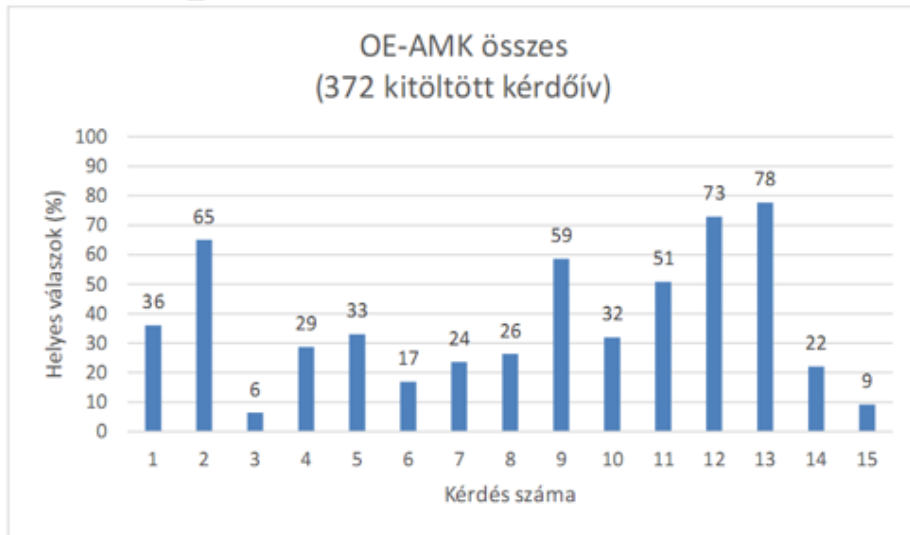
Az eredmények gyors áttekintését és összehasonlítását szolgálja a középiskolai felmérés eredményét mutató 4.4, és az egyetemi hallgatók eredményeit mutató 4.5 ábra²⁵. A kismértékű különbségét az okozza, hogy az egyetemisták esetében a félév végi, kissé jobb eredmények is szerepelnek. Ha csak a félév kezdésekor megírt tesztek

²⁵ A részletesen lebontott grafikonokat a CD melléklet (*05-HGy_EnergiatesztErtekeles.pdf*) tartalmazza.

tekintjük, a két csoport eredményei szinte teljesen megegyeznek. Ebből arra lehet következtetni, hogy a műszaki pályára, az egyetemre való felvételnél a fizika tudás nem játszott szerepet. A statisztikai elemzés [2] a ferdeségre +0,47-et adott az egyetemistákra, ami arra utal, hogy a teszt túlságosan nehéz volt a vizsgált csoport számára. A középiskolásoknak (+0,78) viszont még nehezebb volt.



4.4 ábra Az országos középiskolai felmérés eredménye



4.5 ábra Az egyetemi hallgatók összesített eredménye.

A félév kezdési és a félév végi eredmények összehasonlítását a legnagyobb számosságú (informatikus, 2011. évfolyam) csoporton végeztem el. Az eredményt az alábbi táblázat foglalja össze:

induló létszám	79 fő
első tesztet írt	56 fő
mindkét tesztet megírta	30 fő
javult	18 fő
változatlan	8 fő
romlott	4 fő
helyes válaszok száma félév kezdetkor	123 db
helyes válaszok száma félév végén	155 db
javulás	$155/123=1,26$, azaz 26%

4.1 táblázat A félév kezdési és félév végi eredmények összehasonlítása a 2011. évi informatikus évfolyam esetében

A fentiek alapján észrevehető, mintegy 26%-os javulás történt, de a hallgatók tudásszintje még így is lényegesen elmarad az elvárhatótól. Megjegyzendő, ha csak a kurzust eredményesen elvégzett, a mindkét tesztet kitöltött hallgatókat tekintjük, a javulás még jelentősebb.

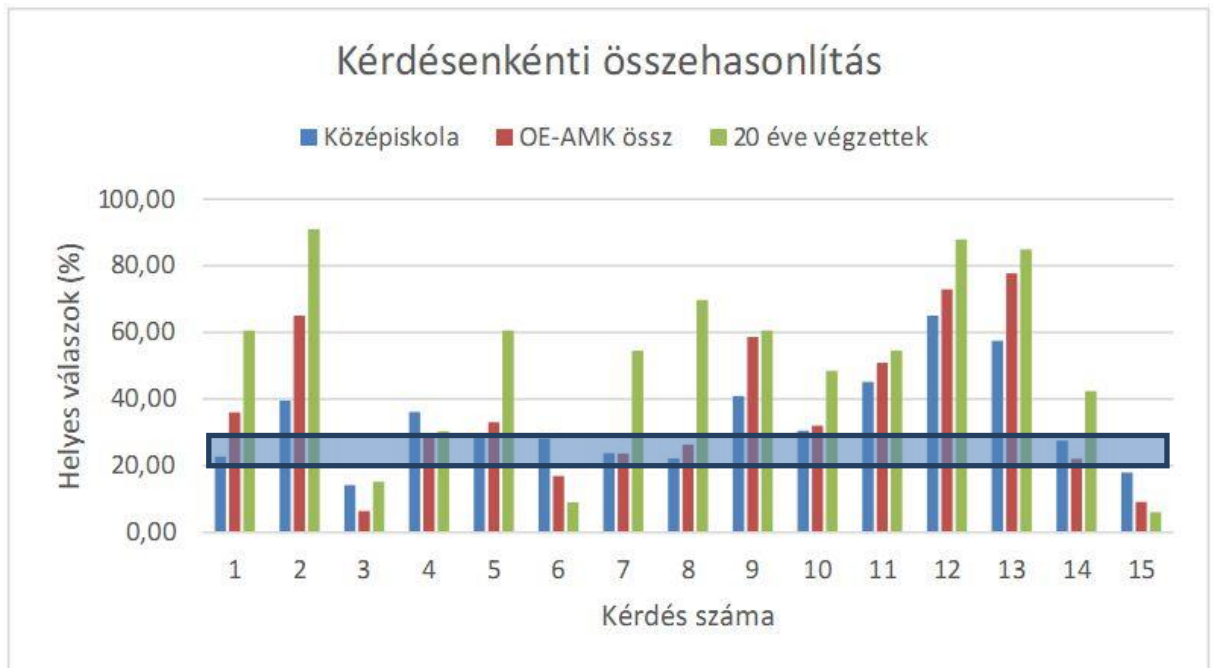
Az alábbiakban összehasonlítom az országos középiskolai felmérés (Középiskola), az Óbudai egyetem hallgatóinak (OE-AMK össz.), valamint annak előd-intézményében 1994-ben (20 évvel korábban) végzettek körében történt felmérés eredményeit. Az egyes csoportokban feldolgozott kérdőívek száma:

Középiskola	374 db kérdőív
OE-AMK össz.	372 db kérdőív
20 éve végzettek	33 db kérdőív

4.2 táblázat A feldolgozott kérdőívek száma

A 4.6 ábrán feltüntettem a véletlen kitöltésnek tekinthető sávot is, mivel jelen esetben a számok megjelenítése azt túlzásúfoltta, áttekinthetlenné tette volna. Mint korábban említettem, a 20% alatti teljesítményt szisztematikus nemtudásnak, a 30% fölöttit

pozitív tudásnak véltem, biztos tudásról (100%) a véletlen elnézés lehetőségét is figyelembe véve 90% felett beszélhetnénk.

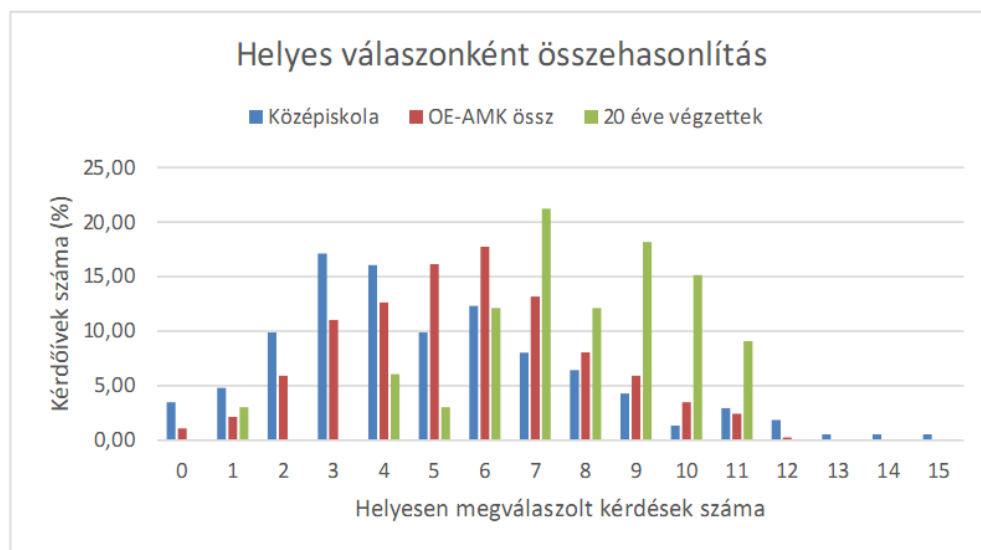


4.6 ábra A három csoport kérdésenkénti összehasonlítása

Az egyes kérdésekre adott helyes válaszok számarányát tekintve az látszik, hogy mindhárom csoport nagyjából hasonlóan teljesített. Hasonlóképp voltak járatosabbak illetve tájékozatlanabbak az egyes témakörökben. Az Óbudai egyetem hallgatóinak eredményei az esetek kétharmad részében kissé jobbak a középiskolai átlagnál. A 3-as, 6-os és 15-ös kérdések esetében szisztematikus nemtudásról beszélhetünk. A 3-as kérdés esetében (Hova tűnt a gombem energiája, miután az óra végleg megállt?) értelmezési zavarról, vagy szemléleti problémáról lehet szó. A másik két kérdés (melyre tipikusan az iskolai oktatásból adható meg a válasz) kvantitatív számolást igényel, ami a másik bontásból (4.4 és 4.5 ábra) is egyértelműen látszik, hogy nagy problémát jelent.

A 2-es (gombem energiátárolási módja), a 9-es (a generátor működési elve), a 11-es (alternatív energiaforrások), a 12-es és az azzal összefüggő 13-as (üvegház-hatás) kérdések esetében valamelyes mértékben biztosabb tudásra enged következtetni az ábra. Ez utóbbi kérdéskörrel a média szinte napi szinten foglalkozik (a globális felmelegedés kapcsán, de az épületek hőszigetelése is a témakörrel rokonítható). A többi - az összes kérdésnek mintegy fele - nagyon közel esik az általam véletlen ráhibázásként megjelölt sávhoz.

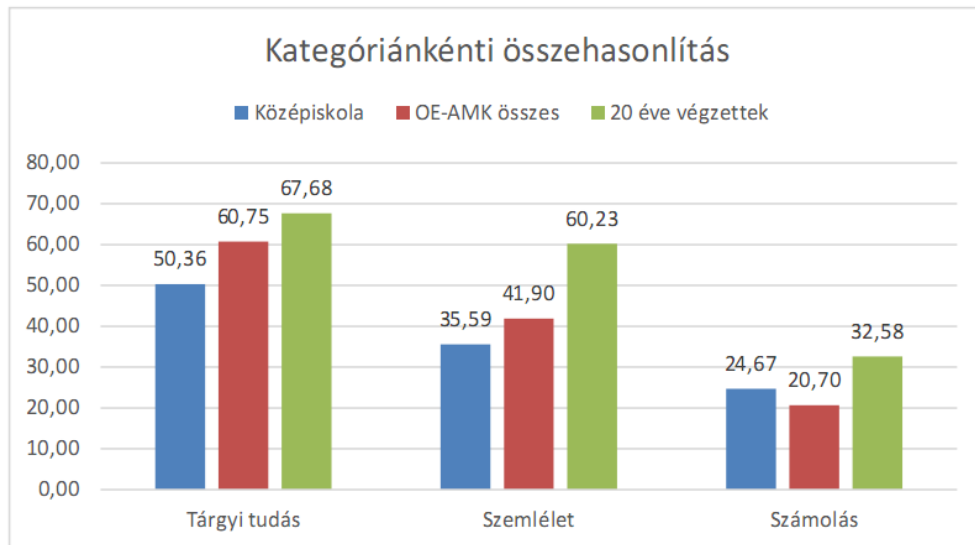
A 20 éve végzeteknél néhány esetben kiugróan magas százalékokkal találkozhatunk. Ezt okozhatja esetleg egy alaposabb képzettség (saját tapasztalatomból mondhatom, hogy a mai hallgatóknak fel sem merek adni olyan feladatokat, amit a 20 évvel ezelőttiek, ha nem is kapásból ugyan, de azért valahogy megoldottak), vagy akár a nagyobb élettapasztalat, de valószínűleg a kettő kombinációjáról van szó. Az 5-ös feladat, a gázszámla értelmezése a maga 60%-ával egyértelműen a pozitív tartományban van, míg a másik két csoport a véletlen kitöltés sávjába esik. A kvantitatív számolást igénylő 6-os feladat (széntüzelésű erőmű) viszont katasztrofális eredményt ad, míg a következő két kérdésre, a széndioxid kibocsátás mennyiségére és a vízi erőmű működésére kimagaslóan jobb találatot értek el. Ez inkább az élettapasztalattal és a média hatásával magyarázható.



4.7 ábra A három csoport tesztlaponkénti helyes válaszainak összehasonlítása

Az egyes csoportok élesen elkülönülnek egymástól, ha azt vizsgáljuk, tesztlaponként átlagosan hány kérdésre született jó válasz. A középiskolások esetében a csúcs valahol a 3 és 4 környékére, az egyetemisták esetében 5 és 6 körül, míg a 20 éve végzeteknél átlagosan 7-re esik. Ez utóbbi a lényegesen kevesebb kérdőív miatt ugyan nem rajzolódik ki olyan szépen, de határozottan nagyobb értéket mutat, mint a másik két csoport.

A statisztikák elemzése azt mutatja, hogy a helyes válaszok aránya az országos középiskolai felmérésben 33,3%, az Óbudai Egyetemen mindent összesítve 37,3%, míg a 20 éve végzettek esetében 51,7%.



4.8 ábra A tárgyi tudás, szemlélet és számolási készség összehasonlítása

A tárgyi tudást, szemléletet és kvantitatív eredményt váró kérdések jellegükben itt is hasonlóan alakulnak mindhárom csoport esetében. Jellemzően a számolás mindenkinél nagyon gyenge pont. A 20 éve végzettek esetében a kissé jobb eredmény a gázszámla értelmezésének tudható be. A 6-os és a 15-ös kérdésre adott válaszaik ugyanis még a másik két csoportnál is rosszabbak. Ezt figyelembe véve ebben a tekintetben ők is inkább a találgatás kategóriájába sorolhatók. Tárgyi tudásuk valószínűleg a nagyobb élettapasztalat, szemléletük az alaposabb iskolai képzés javára írható. Az egyetemisták esetében a szemlélet és tárgyi tudás tekintetében jobban teljesítettek a középiskolásoknál, de ebben benne van a fél éves fizika kurzus teljesítésének hatása is. A számolási készséget tekintve viszont a középiskolások felé billen a mérleg nyelve. Ebben az egyetemen a nagyobb hallgatói szabadság, a kevés, alkalmasint hiányzó számolási gyakorlatok hatása köszön vissza.

4.5 Megjegyzések, javaslatok

Az egyetem elvileg értelmiségi elitképző, az értelmiségi pályára készít fel. Hogy a műszaki felsőoktatásban, és abból kikerülve eredményes legyen a hallgató, az energiával

kapcsolatos fogalmainak megalapozottnak és stabilnak kell lennie. Az energiafogalom megalapozása a középiskolában történik, ezért megvizsgáltam a kérdést, mit tudnak, milyen energiaképpel érkeznek a középiskolából hozzánk került hallgatók, valamint ezt a képet mennyire lehet befolyásolni.

Megállapítottam, hogy a hallgatók szemlélete alapvetően a középiskolás korban alakul ki. Bár a fél éves alapozó fizika kurzus elvégzése után kimutatható volt némi fejlődés, a középiskolás korban kialakult képet a későbbi tanulmányok már alig-alig befolyásolják, ami a középiskolai képzés óriási felelősségét húzza alá. Ezen speciális eseten szerzett tapasztalatot általánosítva gyanítom, hogy más témakörben (természettudományos vagy akár humán tárgyak esetén) is hasonló eredményre lehetne jutni, amit természetesen az adott tárgykörre kidolgozott felméréssel lehetne finomítani, igazolni, vagy cáfolni.

4.5.1 Egy, az energiateszt 4-es kérdésével kapcsolatos megjegyzés

Véleményem szerint az iskolai oktatás feladata a tudományos ismeretek átadása, és a tudományos gondolkodásra való nevelés. Az áltudományok elleni fellépésnek nem az iskolában van a helye. Arra a megfelelő civil szervezetek, mint pl. a Szkeptikus Társaság, a Tudományos Ismeretterjesztő Társulat (TIT), vagy más, pl. a Terkán Lajos Ismeretterjesztő Alapítvány egyes rendezvényei szolgálnak. Erre a legfőbb indokom az, hogy a kontextus idővel elveszik, s a diákok csak arra emlékeznek, hogy „ezt az iskolában hallottam”, tehát biztos igaz. Ennek fényében a 4-es kérdésnek a tesztben való szereplését nem tartom szerencsésnek. Az akadémiai oktatásnak olyan szilárd alapokat kell nyújtani, hogy az ott megszerzett tudás tegye nyilvánvalóvá, vagy legalább is gyanússá az áltudományos kijelentéseket.

4.5.2 Az energia fogalom kialakítása

Az energia fogalmának szokásos bevezetése az erő munkáján keresztül történik: energia = munkavégző képesség (pl. [4]). Az erő munkája a test mozgási, illetve helyzeti energiájában őrződik meg, s e vonatkozásban osztályozzuk az erőket (és az erőtereket) is konzervatív és disszipatív erőkre, erőterekre. A későbbiekben természetesen előjönnek

más energiafajták is, mint forgási, rugalmas, gravitációs, elektromos, kémiai, hőenergia, magenergia, ... stb. Ezek után azt várjuk, hogy az elszórt mozaikokból a diákokban magától kialakuljon egy helyes kép, egy (absztrakt) fogalom az energiáról.

A gyakorlatban azonban a legtöbben úgy tekintenek az energiára, mint valami kimérhető, fizikailag megtestesülő, valamiből kivonható mennyiségre: „Tessék, itt egy zacskó energia, használd egészséggel!” Vagyis keveredik az energia fogalma az energia hordozóéval. Ezt a hibás képet sugallja továbbá a fejezet mottójául választott szokásos szlogen is, ami a tesztlap 16. feladatából is többször visszaköszönt: „Az energia nem vész el, csak átalakul”, vagy „energia nem teremthető és nem semmisíthető meg” jelmondat is. (Ennek persze ellentmond a médiában gyakran elhangzó energiatermelés kifejezés, de ez senkit nem szokott zavarni.) Elvértve még azzal az - egyébként helyes - megjegyzéssel is találkozhatunk, hogy a mozgási energia vonatkoztatási rendszer függő ([4] 124. oldal), vagy a helyzeti energia 0-pontját önkényesen/célszerűen választhatjuk meg.

Véleményem szerint az energia fogalmának ez a történelmi, az absztrakt energia fogalom kialakulását, felismerési folyamatát követő megközelítése alkalmatlan a ma helyesnek elfogadott kép kialakításához. Az energiateszt eredménye ezt világosan mutatja. A 16. feladatra kapott válasz, miszerint „energia nem vész el, csak átalakul”, csupán egy jelmondat, és nem egy helyesen értelmezett és alkalmazott energiafogalmat tükröző kijelentés. A többi kérdésre adott válasz alapján egyértelmű, hogy az energia fogalmi szinten nem épült be a tesztlapot kitöltők gondolkodását, világgépét formáló tudatába.

Azt is tudjuk, hogy az energia a csatolt rendszerek között „sétálni” tud, melyre Sas Elemér oktató videói szemléletes bizonyítékkal szolgálnak (pl. csatolt ingák). Feynmann [3] erre vonatkozóan azt a példát említi, hogyha mondjuk az Androméda galaxisból épp a mi galaxisunkba csatolódna át energia, akkor megfelelően érzékeny kísérletekkel az energia növekedés tételét állapíthatnánk meg. Bár az energia megmaradás tételének kimondása egy hosszú és rögzös, sok-sok tapasztalaton alapuló felismerési folyamat eredménye²⁶, azt is lényeges, és fontos látni, hogy nem szükségszerű, hogy közvetlen, lokális kísérleti tapasztalatok révén bizonyítható legyen.

²⁶ Az energiafogalom fejlődését alaposan tárgyalja Simonyi Károly nagyszerű műve, A fizika kultúrtörténete 4.5 fejezete [5].

Azt is célszerűnek tartom tudatosítani, hogy a Föld – eltekintve a globális felmelegedéstől – energetikailag egyensúlyban van. Amennyi energiát a Naptól kap (a légkörön kívülről négyzetméterenként és másodpercenként mintegy 1,4 KJ-t), pontosan ugyanannyit vissza is sugároz az űrbe, különben vagy megsülnénk, vagy megfagynánk. Könnyen kiszámolható, hogy ez iszonyatos energiamennyiség, vagyis nem energiából van hiány, hanem annak hasznosíthatóságával van a gond.

4.5.3 Javaslat az energia fogalmának a hagyományostól eltérő kialakítására

Az energiafogalom kialakításához sokkal célravezetőbbnek tartom Feynmann meséjét az energiáról ([3], 50.o.), melyben az anyuka tudván, hogy hány játékkockája van a kisfiának, az esti rendrakáskor szisztematikusan addig kutat, amíg elő nem kerül mindegyik valahonnan, vagy alkalmasint közvetett módszert dolgoz ki a számbavételükhöz.

Összegezve a fentieket, azon a véleményen vagyok, hogy egy helyes energiafogalom kialakításához a hagyományostól eltérő módon kellene tárgyalni az energia tárgykörét. Az első pillanattól kezdve tudatosítani kellene, hogy az energia egy elvonatkoztatás, és nem egy zacskóba kitorciózható, fizikailag megnyilvánuló konkrét mennyiség, hanem egy igen hasznos absztrakt fogalom. Az energia megmaradás tétele pedig a gondolkodásunkat irányító, azt kordában tartó elvi kijelentés.

A konzervatív és disszipatív folyamatok megkülönböztetését sem tartom szükségesnek ebből a perspektívából, sőt, inkább zavaró tényező, hiszen az energia megmaradást pont elvi szinten mondjuk ki. Ma már mindenki természetesnek tartja az atomok létezését, s az, hogy a testek energiája az atomok egy irányba rendezett (szokásos elnevezéssel mozgási energia) vagy azok rendezetlen mozgásának (hő) összegeként adódik, nem jelent elvi különbséget. Ezen szemlélet hozadékeként az entrópia fogalma is szemléletessé, könnyen érthetővé válik²⁷.

Az energia fogalmát természetesen megfelelő körültekintéssel kell alkalmazni. Az energia nem abszolút mennyiség, sőt egy adott folyamat során az energia megváltozása sem, hanem vonatkoztatási rendszer függő. Ennek bemutatására kidolgoztam az alábbi példát:

²⁷ Az energia és entrópia szerepét részletesen tárgyalja Roger Penrose A császár új elméje című könyve [6] hetedik fejezete.

A vizsgálatot inercia-rendszerben végezzük. Az nyilvánvaló, hogy például álló helyzetből ($v_1 = 0 \frac{m}{s}$) felgyorsítani egy testet mondjuk $v_2 = 10 \frac{m}{s}$ -ra, kevesebb energiát igényel, mint egy már eleve 10 m/s-al mozgó testet felgyorsítani 20 m/s-ra. A mozgási energia megváltozását a jól ismert, $\Delta E = \frac{1}{2}m(v_2^2 - v_1^2)$ összefüggés adja, ahol ΔE a mozgási energia változás, m a test tömege, v_1 a test kezdő, v_2 a végsebessége. A sebességváltozás a két esetben ugyanaz, de a test mozgási energiájának megváltozása nem. Hasonlóan, a 10 m/s-mal mozgó test álló helyzetre való lefékezéséhez kevesebb energia (azaz kevesebb munkavégzés) szükséges, mint 10 m/s-ról 20 m/s-ra való felgyorsításához. Nézzük most ezen utóbbi eseményt a 10 m/s-mal mozgó testtel együtt haladó inerciarendszerből! (Képzeltethetjük például, hogy egy vasúti kocsiban végezik a kísérletet.) Ebben az esetben a test nyugszik, és akár a vasúti kocsi haladási irányával megegyező, akár az ellenkező irányba történik a test 10 m/s-ra való felgyorsítása (a külső megfigyelő számára álló helyzetre való lefékezése), a kocsiból nézve ugyanakkora munkavégzés szükséges. Ami első pillanatban meglepő, ugyanaz a fizikai folyamat a mozgási energia változás tekintetében az egyik inerciarendszerből nézve szimmetrikus, a másiktól nem az, nem csak egy additív konstansban különböznek.

A 4. számú fejezet jelenti a 4. számú téziscsoport háttérét.

Hivatkozások

- [1] Juhász András, Nagy Péter: Mit tudnak a középiskolások az energiáról? – egy felmérés eredményei, *Természettudomány tanítása korszerűen és vonzóan*, ELTE TTK, 2011., pp. 354-363.
- [2] Bevezetés a pedagógiai kutatás módszereibe, szerk. Falus István, Műszaki Könyvkiadó, Budapest, 2000. pp. 341-492.
- [3] Feynmann, R.P. 1968. Mai fizika. Budapest : Műszaki könyvkiadó, 1968.
- [4] Holics, László. 2011. Fizika. Budapest : Akadémiai kiadó, 2011.
- [5] Simonyi Károly: A fizika kultúrtörténete, Gondolat kiadó, Bp. 1978.
- [6] Roger Penrose: A császár új elméje, Akadémiai Kiadó, Bp. 1993.

Összefoglalás

Doktori dolgozatomban a fizika oktatás jelenlegi helyzetének bemutatása után a több évtizeden keresztül folytatott oktató és pedagógiai kutató munkámról, annak tapasztalatairól és eredményeiről – pontosabban mindezek egy részéről számoltam be. Bemutattam, hogy alapvető céljaim, vagyis a fizika iránti érdeklődés, felkeltése és fenntartása projekt vezetéssel (HUNVEYOR projekt), újfajta szemléltetési lehetőségekkel, iskolán kívüli oktatással, ismeretterjesztő rendezvények révén elérhetők. Egyes esetekben a tudásszint vizsgálata, illetve annak változása különböző felmérések és kérdőívek eredményeinek elemzésével történt, melyeket a dolgozatban szintén bemutattam.

A saját eredményeimet tartalmazó rész négy fejezetből áll, melyek lefedik az alpontra bontott doktori téziseim és bemutatják azt az általam kidolgozott és az elmúlt évtizedekben követett programot, ami irányította és tartalommal töltötte meg az egyetemi valamint az iskolán kívüli fizikaoktatói és ismeretterjesztő munkám.

A HUNVEYOR-4 projekt keretében a szonda építése a tervezéstől a megvalósulásig a projekt módszer elvei szerint történik. A különböző képességű hallgatók a számukra legérdekesebb, egyéniségükhöz, érdeklődésükhöz és felkészültségükhöz legjobban illő feladat megoldásán dolgoznak. A fizikai ismeretek elsajátítása és elmélyítése a gyakorlati munka során, indirekt módon valósul meg.

Az órai előadások életszerűbbé, színesebbé, s nem utolsó sorban emlékezetesebbé tételére kidolgozott demonstrációs kísérleteim révén a diákok az absztrakt fizikai fogalmakat konkrét tapasztalatokhoz tudják kötni. A dolgozatban ezek közül kettőt mutattam be. Az egyik a különböző, stabil és instabil mágnes-golyó konfigurációk vizsgálata volt, a mágneses tér síkmetszeteit láthatóvá tevő eszköz, a mágnesfilm használatával, a másik pedig a radioaktivitás, illetve részecske sugárzás újszerű szemléltetése hangfelvétel számítógépes feldolgozása révén, mely egyidejűleg, egymást kölcsönösen támogató és megerősítő módon három módszert kombinál: hallhatóvá tesz, vizuálisan bemutat és kvalitatív értékelésre is lehetőséget nyújt.

Az iskolán kívüli oktatás, csillagász szakköri foglalkozások számára kidolgoztam egy oktatási programot, melynek keretében a Naprendszeren kívüli Föld-szerű bolygók detektálásának néhány módszerét, és a kutatás nehézségeit vettem górcső alá konkrét,

számszerű értékeket szolgáltató feladatokon, valamint egy egyszerű szimulációs programon keresztül.

Az utolsó fejezet az Óbudai Egyetem Alba Regia Műszaki Karán tanuló, illetve az intézményben, vagy annak jogelődjében végzett hallgatók természettudományos energiafogalmának több évet, több szakot és több évfolyamot átívelő vizsgálatát mutatja be. Ezen munkám során összesen 327 darab műszaki pályát választott egyetemista által kitöltött tesztlapot dolgoztam fel. Az eredményeket grafikusán ábrázoltam, és szöveges értékelést is adtam hozzájuk. Az eredmények alapján javaslatokat tettem a modern energiafogalom kialakításának jobbá tételére.

Oktatói, ismeretterjesztői és szervező tevékenységem a megszerzett tapasztalatok figyelembe vételével kívánom folytatni. Nagy hangsúlyt fektetek az ismeretterjesztő, felvilágosító munkára, de különösen az egyetemi hallgatók fizika oktatására, további projekt témák felkínálására. A fizika oktatás szemléletesebbé tételére egyik tervem egy Foucault-inga létesítése, és mozgásának detektálása, számítógépes feldolgozásra alkalmas módon. Tervezem továbbá a hőmérsékleti sugárzás, különös tekintettel a Wien-féle eltolódási törvény kimutatását CCD kamera segítségével, és számítógépes feldolgozással.

Függelék

Az Óbudai Egyetemen a HUNVEYOR-4 projekt keretében készült dolgozatok

- Kerese Péter: A HUNVEYOR-4 gyakorló űrszonda távoli vezérlő software rendszere, BMF KKVFK SzGTI 2003. XXXVII-NV-33/1999
- Kiss Szabolcs: Távvezérelt űnjáró egység a HUNVEYOR-4 gyakorló űrszondához, BMF KKVFK SzGTI, 2003. XXXVII-NV-39/1999
- Véninger Gábor: Léptetőmotoros kamera forgató berendezés, BMF KVKK SzGTI, 2003. XXXVII-NV-86/1999
- Tobai László: USB portra illesztett mérésadat-gyűjtő berendezés, BMF KKVFK SzGTI, 2003. TÁV-148/1999
- Sáfár Attila: CAN-buszra épülő mérési adatgyűjtő rendszer a HUNVEYOR-4 gyakorló űrszondához, BMF KVK-S-NV-89, 2004.
- Balogh Zoltán: Kommunikációs modul tervezése és megvalósítása a Hunveyor űrszondához (Veszprémi Egyetem, Információs Rendszerek Tanszék, műszaki informatika szak), 2006.
- Nagy Attila: Az USB sín és alkalmazása a Hunveyor-4 projektben, BMF KVK-S-NV-02-73, 2006.
- Samu Norbert: Webes kezelői felület készítése a Hunveyor-4 űrszondához, BMF - KVK-S-NV-02-115, 2006.
- Senyei Rita: Mérésadatgyűjtő kártya és webkamera mozgató elektronika a Hunveyor-4 projekthez, BMF KVK-S-NV-02-080, 2006.
- Szrenkó Zoltán: HUNVEYOR-4 kommunikációs rendszerének továbbfejlesztése, BMF ROIK - KVK-S-TV-03-067, 2008.
- Abermann Dániel Leo: Automatika környezeti monitoring állomás megvalósítása Bitt gamma szondával, BMF KVK 2008.
- Benkő Zoltán Ede: Komplex mérőrendszer megvalósítása a Hunveyor-4 rendszerben, KVK-S-NBV-06-006, 2009.
- Adorján Attila, Salamon Gábor: Rendszertervezés a Hunveyor 4 projektben, BMF-ROIK, TDK dolgozat, 43 oldal. 2009.

- Salamon Gábor, Simon Gergely Tamás: Eszközkezelés a Hunveyor-4 rendszerben párhuzamos port multiplikátorral, TDK dolgozat, BMF-ROIK, 2009.
- Simon Gergely Tamás: Vezeték nélküli "Mote" szenzorok tervezése és megvalósítása, OE-KVK T000071/F38878/S-K, 2011.
- Salamon Gábor: Komplex adatgyűjtő rendszer kivitelezése szenzor hálózatokhoz, OE-NIK T000032/FI388/S-N, 2011.
- Polyák Zoltán, Nádasi Csaba: NAPENERGIA HASZNOSÍTÁSA HELYI ÉS MOBIL RENDSZEREKBEN (TDK dolgozat)
- Horváth Miklós: Hunveyor-4 űrszonda intelligens tápegységének tervezése T000032/FI38878/S-K, 2011.
- Molnár Miklós: Rádió kommunikációs mobil adatgyűjtő egység a HUNVEYOR-4-hez OE-AMK 000548/FI12904/K-S, 2015.
- Oláh Balázs: Hunveyor-4c mérési adatgyűjtő szonda hardver felépítésének fejlesztése és webes vezérlő felület kialakítása OE-KVK, T000558/FI12904/K-S, 2015.
- Varsányi Péter: A Hunveyor-4 mérési adatgyűjtő szonda funkcionalitásának megvalósítása Raspberry-PI alapon, T000312/FI38878/S-K, O2V96V, 2016.

Köszönetnyilvánítás

Munkám során számos segítséget kaptam. Mindenkit felsorolni nem is lehetne, e helyett csak néhányukat emelek ki, azzal a megjegyzéssel, hogy aki kimaradt a listából, semmiképp se érezze úgy, mintha kevésbé értékelném a hozzájárulását. Egyszerűen a hely és memóriám véges kapacitása határt szab.

Családom után első helyen említtem témavezetőm, Dr. Bérczi Szaniszló nevét, aki a téma javaslatával, folyamatos konzultációval és hosszú éveken keresztül történt kitartó segítségével, támogatásával és buzdításával járult hozzá a sikerhez.

Köszönetem fejezem ki az ELTE TTK Fizika Doktori Iskola Fizika Tanítása Doktori Program vezetőjének, Dr. Tél Tamásnak, aki értékes tanácsokkal segítette munkámat. Hasonló módon köszönöm a segítségét Dr. Juhász Andrásnak a Fizika Tanítása Doktori Iskola létrehozásáért, szervezéséért és működtetéséért, aki hasznos tanácsaival segített a dolgozat kialakításában.

Köszönöm a megértő támogatást a hallgatóimnak, akik részt vettek a projektmunkában, valamint azoknak is, akik a tesztlapok kitöltését komolyan véve lehetővé tették a vizsgálataim. Köszönöm továbbá a Csillagász szakkör tagjainak, kiemelten Kiss Attilának az oktató anyag kidolgozásában és az adatok feldolgozásában nyújtott segítségéért.

Végül, de nem utolsó sorban köszönet illeti az Óbudai Egyetem Alba Regia Egyetemi karát, mindenképp előtt a kar dékánját, Dr. Györök Györgyöt, hogy lehetővé tette, sőt buzdította kutató munkám.

A tézisek alapjául szolgáló publikációk

[1] Hudoba, Gy.: A HUNVEYOR-4 gyakorló űrszonda építése, *Természettudomány tanítása korszerűen és vonzóan*, ELTE TTK, 2011., pp. 336-340.

[2] Hegyi S., Bérczi Sz., Cech V., Császár-Cs. P., Hudoba Gy., Varga T.: A Hunveyor-Husar modellépítést támogató elektronikus tanulási környezet, *"Lehetőségek és alternatívák a Kárpát-medencében" (modszertani tanulmányok)*, Könyvrészlet, pp. 512-519, 2011.

[3] Hudoba, Gy.: The HUNVEYOR Project, an integrated science education program, *Physics Competitions Vol. 14 No 2 (2012) pp. 66-74.*

[4] Hudoba, Gy.: Építsünk űrszondát! - fizikatanítás érdekesen, *A Fizika, matematika és művészet találkozása az oktatásban, kutatásban*, Marosvásárhely, 2012. augusztus 15-18., pp. 229-234. ELTE, TTK, Bp. 2013.

[5] Hudoba, Gy.: Űrszondamodell-építés - út a fizikához, *Fizikai Szemle, LXIV. évf. 2014. május*, pp. 169-170.

<http://wwwold.kfki.hu/fszemle/archivum/fsz1405/HudobaGy.pdf>

[6] Hudoba, Gy.: Amazing magnetic balls, *IOP Science, Physics Education Volume 48 (2013) Number 4, (Front line section)*, pp. 424-425.

http://iopscience.iop.org/0031-9120/48/4/F02/pdf/0031-9120_48_4_F02.pdf

Video Abstract: <http://iopscience.iop.org/0031-9120/48/4/F02>

[7] Hudoba, Gy.: Csodálatos mágnesgolyók, *Acta Carolus Robertus, 2013.* (Károly Róbert Főiskola), pp. 89-95.

[8] Hudoba György: A Novel and Expressive Way of Detection and Evaluation of Particle Radiation in Physics Education, *Kitekintees - Perspective (magyar-román-szlovák periodika)*, Szent István Egyetem Gazdasági Kar, Békéscsaba 2011., pp. 223-229.

Summary

In my dissertation, after showing the situation of the physics education in Hungary, I gave an account of my pedagogical work performed in teaching physics – more precisely at least a part of it. I conducted this research over several decades.

I reported, that my fundamental goals, namely rising and keeping the interest about physics among my students high can be achieved by

- conducting a project (i.e. the HUNVEYOR project),
- doing some new kind of experiments demonstrated during lectures,
- extra-curricular education.

In some cases, I conducted pedagogical measurements, which results were also presented.

My dissertation is structured to four chapters, according to the four groups of my doctoral theses. Chapter one introduces the project method, and explains, how I applied it in engineering and building an educational space probe model, in the HUNVEYOR-4 project. Although the project is not a formal physics course, the student's knowledge about physics widened and deepened during the design and construction of the probe.

In chapter two, I bring forward two of my newly developed demonstrations, I put on classroom lectures. In one of them we experimenting with magnetic balls, which is fun, improves creativity, and help visualizing of the magnetic patterns of the created 2D and 3D structures by magnet-film. It is a useful way for better understanding of magnetism. In the other experiment, I demonstrate the nature of the radioactivity and cosmic radiation using a free audio processing program. The frequency of the ticks of a GM-tube can easily be visualized, and students can compare of different radiation sources visually.

Chapter three deals with my extra-curricular education. I have developed a training program to study some methods exploring extrasolar planets. I showed the extreme difficulties of detecting Earth-like ones through numerical examples. Furthermore, I presented my program written in EXCEL about producing the light-curve of occultation, The program let you experiment with different parameters, including noise.

The final chapter presents the results of my educational measurement that took place at Óbuda University Alba Regia University Centre, Faculty of Engineering. I was interested about the energy concept of the students. The test sheet contained 15 questions, what I used for several years and for several majors (i.e. electric engineers, managers and informatics). I processed 327 tests, represented graphically, and analyzed the results.

A CD melléklet tartalma

01-HGy_Tezisfuzet.pdf

02-HGy_Dolgozat.pdf

03-HGy_Okkultacio.xlsm

04-HGy_Energiateszt.htm

05-HGy_EnergiatesztErtekeles.pdf