

POUILLET NYOMÁBAN

A barometrikus magasságformula, valamint a napneutrínó-fluxus mérése

Fraller Csaba

Hévízi Bibó István Gimnázium és Kollégium

Az Eötvös Loránd Fizikai Társulat és a National Instruments Hungary Kft. a 2018/2019-es tanévben is írt ki pályázatot fizikatanároknak. A munkába immár negyedik éve diákokat is be kellett vonni. A pályázat a LabVIEW programozási felülettel támogatott, kifejezetten oktatási célokra kifejlesztett myDAQ adatgyűjtő eszközre szabott mérési eljárások kidolgozását követte meg.

A Hévízi Bibó István Gimnázium és Kollégium fizikatanáraként harmadszor vettem részt ezen a megmérettetésen. Legutóbb 2015/2016-ban neveztem. Az akkor kialakított munkamódszert alkalmaztam idén is, azaz tartottam magam a jól bevált *bármás* szabályhoz. Egy mérést kimondottan önálló tanári, egyet tanári irányítás mellett, de már együttműködésen alapuló mérési eljárásként, egyet pedig már nagyfokú önállóságot felmutatva, diákok által kidolgozott munkaként kívántunk bemutatni. Sajnos ez utóbbi célt nem sikerült maradéktalanul megvalósítani; ennek okairól a tapasztalatok ismertetésekor bővebben is beszámolok.

Jelen cikk nyelvezete igazodik az elvégzett munka mögött álló közreműködők számához: egyes szám első személyben akkor fogalmaztam, amikor önálló tanári munkáról vagy tanári megjegyzésről volt szó. A közös munkákat bemutató fejezetek többes szám első személyben íródtak.

A csapat diáktagjai

A részt vevő diákokat az előttünk álló várható nehézségek és a korábbi tanórai tapasztalataim alapján választottam ki. Felkérésemre azonnal igent mondtak, örömmel és nagy igyekezettel láttak neki a szabadide-

A cikk a 2018–2019. évi ELFT–NI myDAQ pályázaton I. díjjal jutalmazott munka alapján készült.



Fraller Csaba a Hévízi Bibó István Gimnázium és Kollégium matematika-fizika szakos tanára. Öt éve foglalkozik behatóbban a digitális méréseszközök tanórai alkalmazásának lehetőségével. A myDAQ-LabVIEW rendszerre alkalmazott ötleteivel többször vett részt pályázatokon, fesztiválokon. Különösen fontosnak tartja a modern természettudományos eredmények modellező mérésekkel történő bemutatását. Kiemelt érdeklődési területe a csillagászat.



A háromfős csapatunk két oszlopos tagja, a mindenes Vörös Balázs és programozásban kiváló Lutár Krisztián.

jüket alaposan igénybe vevő feladatoknak. A pályázat írásakor mindketten tizenegyedik évfolyamosok voltak, a fizikát attól az évtől kezdve emelt óraszámban tanulták. *Lutár Krisztiánt* inkább az informatika világa érdekli. Programozói tapasztalatai voltak korábban a C++ és C# nyelvekkel, valamint az Unreal Engine fejlesztői környezettel. *Vörös Balázs* inkább „mindenevő”. Nagyon érdekli az elektronika, szívesen bütyköl, forraszt, ugyanakkor a programozásba is belevetett: a C nyelvet, valamint az Arduino IDE fejlesztői környezetet is használta már. A közös munka során bebizonyosodott, hogy Krisztián kiváló kódoló, hamar átlátja az összetettebb programstruktúrákat is, és jó problémamegoldó. Balászról hamar kiderült, hogy nálam jártasabb az elektronika gyakorlati részében. A mérés elvéül szolgáló formulákat magabiztosan, jól ültette át a LabVIEW grafikus felületére. Mindketten nagy segítségemre voltak a mérésekről készített, később videómosztó oldalakon is elérhető felvételek készítésében is.

Már szeptember elejétől előre egyeztetett munkarend szerint heti egy alkalommal találkoztunk, jellemzően a „nulladik” órákban. Decembertől az egyre sűrűsödő feladatok miatt ezek az alkalmak heti kettőre emelkedtek.

Az alábbiakban a pályázatunkban is szereplő mérés rövid leírását ismertetem [1]. A második és harmadik mérés szoros egységet képez; részben didaktikai, részben kényelmi okokból döntöttem szétválasztásuk mellett.

A barometrikus magasságformula vizsgálata

Önálló tanári munka. Ezzel a méréssel kísérletet tettem arra, hogy a myDAQ-LabVIEW rendszerben rejlő lehetőségek közül minél többet megmutassak egyetlen *virtuális mérőműszerbe* (Virtual Instrument – VI) zsúfolva. Célom egy teljes mértékig automatizált eljárás kidolgozása volt, ami egy, a szertárunkban már régóta megtalálható demonstrációs eszközt változtatott át mérőeszközzé.

A kinetikus gázelmélet szemléltetésére használt kétdimenziós „rázógép” függőleges síkban rezget kicsiny csapágygolyókat (1. ábra). Ha a rezgés amplitúdója nem túl nagy, szemmel is látható, hogy a részecskék a tartály alján sűrűbben helyezkednek el, mint feljebb. Kíváncsi voltam, hogy az eloszlás mennyire felel meg a barometrikus magasságformulának.



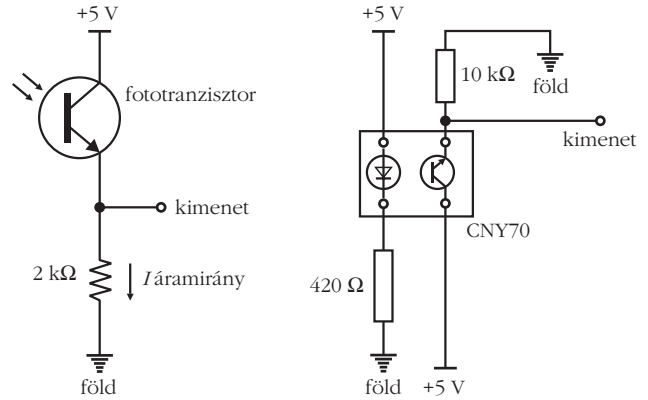
1. ábra. A 2-dimenziós gáztartály.

Elsősorban egy régi asztali számítógép alkatrészeinek, két saját készítésű szenzor, valamint egy kereskedelmi forgalomban kapható léptetőmotor-vezérlő egység és relék felhasználásával épített hardver segít megszámlálni az optikai szenzor látóterébe időegység alatt érkező részecskéket. Az eljárás teljesen automatizált: a szenzor alaphelyzetbe állítását, a háttérvilágítás kompenzálását, a szenzor mozgatását, a részecskék számlálását, a mért adatok kiértékelését, majd a megfelelő görbe illesztését – egyfajta mérőrobotként – ugyanaz a VI végzi. A VI egyszerre használja az analóg és digitális csatornákat, mint ahogy vezérlési és szabályozási folyamatok is találhatóak benne. Ez a mérés inkább a hatékonyságra helyezi a hangsúlyt, kevésbé a didaktikára, ugyanakkor talán közelebb áll az ipari alkalmazásokhoz, azaz alkalmasabb arra, hogy a mérnöki hivatás szépségeit és esetleges buktatóit bemutassa.

Amennyiben a léghőmérsékletű, M moláris tömegű ideális gázként közelítjük, úgy p nyomása a felszín feletti méterben mért h magasság függvényében az alábbi jól ismert exponenciális formula szerint változik (p_0 a felszíni nyomás, R az univerzális gázállandó, g pedig az állandónak tekintett nehézségi gyorsulás):

$$p(h) = p_0 \exp\left(-\frac{Mg}{RT} h\right). \quad (1)$$

Léteznek ugyan ennél összetettebb, például a hőmérsékleti gradienst is figyelembe vevő leírások, de a középiskolában is vizsgálható (1)-es összefüggés munkahipotézisnek továbbra is elfogadható. Ennek egyszerű következménye, hogy az egységnyi térfogat-



2. ábra. Az alkalmazott szenzorok kapcsolási rajzai.

ban található részecskeszám hasonló exponenciálisan csökkenő függvény szerint változik:

$$N(h) = N_0 \exp\left(-\frac{Mg}{RT} h\right). \quad (2)$$

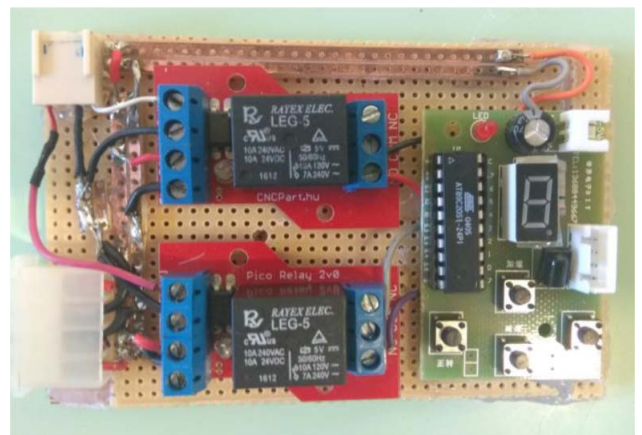
Kérdés, hogy illeszthető-e a (2)-höz hasonló függvény az eszköz tartályában található csapágygolyó-gáz részecskeszám-magasság tapasztalati görbéjére?

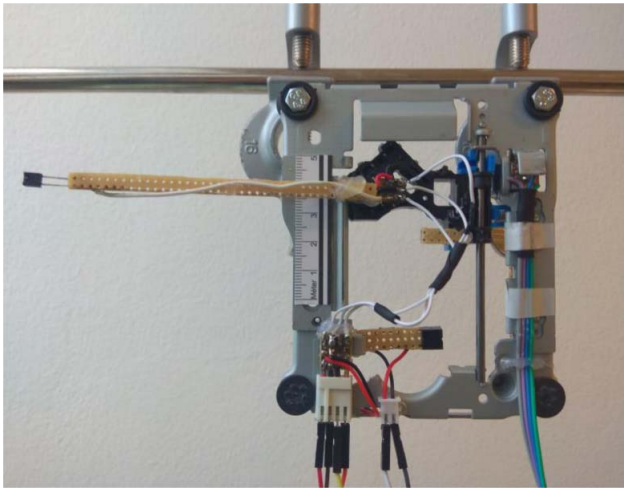
A számlálóberendezésnek elsősorban megfelelő szenzorokra volt szüksége. A mérőrobot „szeme” egy fényérzékelő szenzor (QSE113 fototranzisztor), ami az előtte elhaladó részecskéket érzékeli. Még egy közelség-szenzort is alkalmaztam (CNY70), ami a fény-szenzor alaphelyzetbe állításának szabályozási folyamatát tette lehetővé – ez biztosította, hogy minden egyes mérés azonos magasságban értelmezte a nulla szintet (2. ábra).

A megfelelő érzékelők kiválasztását követően a szenzorok mozgatását és az alkalmazott léptetőmotor vezérlését kellett megoldanom. A léptetőmotor vezérlését reléken keresztül a myDAQ, közvetlenül azonban egy módosított léptetőmotor-vezérlő kártya oldja meg (3. ábra). A fény-szenzor mozgatását egy kiöregedett DVD-meghajtó stabil, pontos mozgatót lehetővé tevő mechanikájára bízom (4. ábra).

A mérés menete így foglalható össze: a megfelelő frekvenciával és amplitúdóval rezgésbe hozott, és külső fényforrással megvilágított gázmodell csapágy-

3. ábra. A módosított vezérlőkártya.





4. ábra. DVD-mechanika a szenzorokkal.

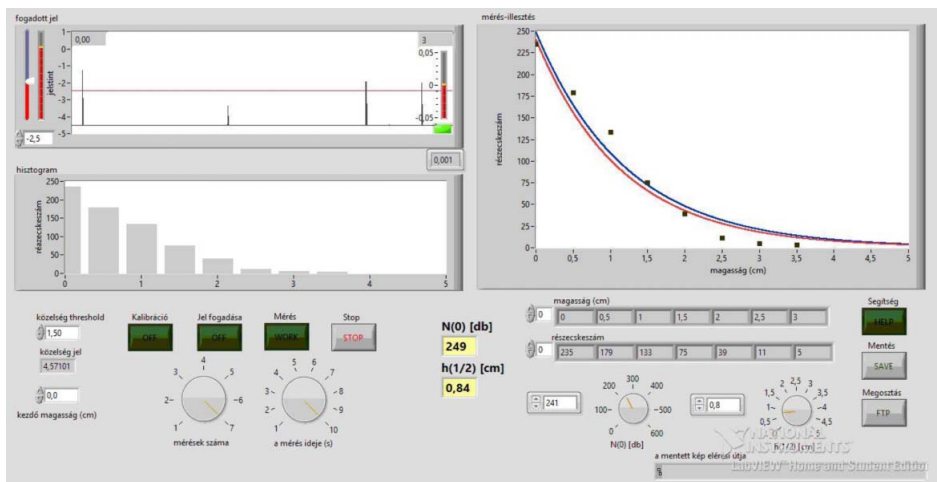
golyói a fény szenzor előtt elhaladva kicsiny fogyatkozási jelenséget, mérhető jelcsökkenést okoznak. A mérés kezdetekor a fototranzisztor elfoglalja a közelség szenzor által kijelölt helyét. A VI ebben a helyzetben néhány másodpercig számolja az elhaladásokat, majd adott értékkel (x cm) feljebb mozgatja a szenzort, ott újra végrehajt egy számlálóciklust és így tovább. A VI összegyűjti, ábrázolja és önállóan elemzi a beérkező adatokat, amelyekre a gimnazistáknak (2)-nél érthetőbb, a bomlási törvényhez hasonló

$$N(x) = N_0 2^{-\frac{x}{h(1/2)}} \quad (2.b)$$

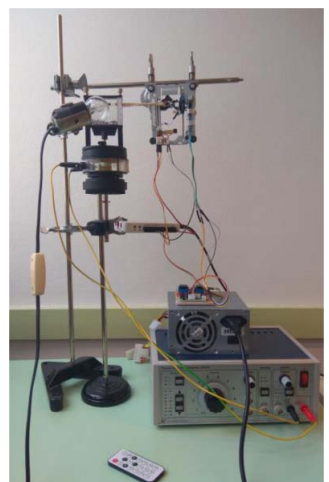
alakban görbét is illeszt. Ez esetben $h(1/2)$ paraméter a cm-ben mért „felezési magasság”. Az 5. ábrán a VI kezelőfelülete, valamint a mérési adatokra illesztett görbe tanulmányozható.

A mérőrendszer kialakítása (6. ábra) nagy kihívást jelentett, de a VI megírása is tartogatott nehézségeket. Elsősorban a léptetőmotorok vezérlése, illetve a nagyon éles, rövid csúcsok szisztematikus hibától mentes számlálása okozott gondot, mivel a tartály alsóbb régióiban másodpercenként akár 20-25 elhaladást is kellett regisztrálni.

5. ábra. A mérés kezelőfelülete és a mérési adatokra illesztett exponenciális görbe.



6. ábra. Az összeszerelt mérés.



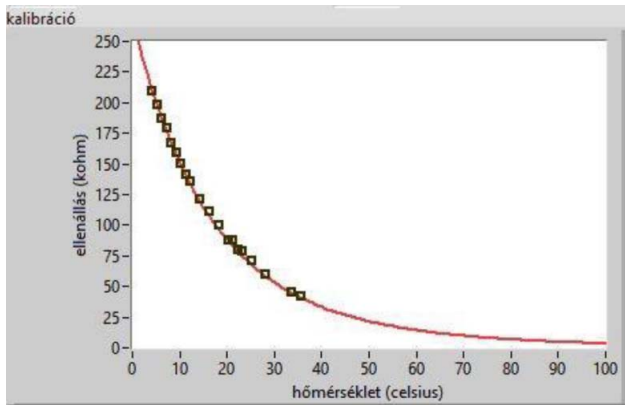
A tapasztalat azt mutatja, hogy a gázmodell részecskeeloszlása tűrhetően megfelel a barometrikus magasságformulának. Akkor sem lettem volna nagyon csalódott, ha a mért értékekre sokkal gyengébben illeszkednének a (2.b)-nek megfelelő exponenciálisan csökkenő görbék. Azt, hogy az illesztés általában elfogadható eredményt ad, ajándéknak tekintem. A mérés legfeljebb 3-4 percet vesz igénybe. Tökéletesen alkalmas arra, hogy tanórán vagy szakköri keretekben bemutassuk.

Termisztorhőmérő kalibrálása

Tanári irányítással végzett, de már együttműködésen alapuló munka. A hőmérséklet mérése a legtöbb elérhető, myDAQ-kal kapcsolatos segédanyag részét képezi. Valóban: ha elfogadjuk a termisztor gyártója által közölt paramétereket és a LabVIEW-ba beépített segédprogramokat, akkor nem nagy kihívás a hőmérséklet megjeleníteni, csak éppen az eredmény nem lesz elég pontos. Szerencsére nem kellett messzire nyúlnunk megfelelő támpontért.

Az emelt szintű szóbeli érettségi mérések között több éve szerepel a termisztorhőmérő vizsgálata [2]. Felismertük, hogy ennek digitalizálása közelebb visz távolabbi céljainkhoz. A programkód kidolgozásakor törekedtünk arra, hogy az teljes egészében megfelelően a vizsga mérési utasításának. Ezzel a lépéssel középiskolában szokatlanul hosszadalmas és kényelmetlen procedúrára vállalkoztunk: megpróbáltunk „saját kézzel” kalibrált termisztor hőmérőket készíteni. Részben a pontosságot tartottuk szem előtt, részben pedig szerettük volna mélyebben is megismerni azt a rendszerint automatizált műveletsort, ami egy egyszerű feszültségmérésből számtalan lépésben a hőmérséklet kijelzéséig vezet.

Ismert, hogy egy NTC termisztor R_T ellenállása a hőmérséklet növekedésével szigorúan monoton csökken. A pontos összefüggést a Steinhart–Hart-egyenlet írja le [3]. Ennek gyakorlatban elterjedt alakja a következő:



7. ábra. Egy végrehajtott kalibráció; $B = 4463 \text{ K}$.

$$R_T = r_\infty \exp\left(\frac{B}{T}\right), \text{ ahol } r_\infty = R_0 \exp\left(\frac{-B}{T_0}\right). \quad (3)$$

A kifejezésben R_0 a termisztor ismert hőmérsékleti ponthoz, jellemzően $T_0 = 298,15 \text{ K}$ -hez tartozó ellenállása, r_∞ határátmenetben a termisztor végtelen nagy hőmérsékletre tartozó (elméleti) ellenállása, ami jellemzően nagyon kicsi. A gyártók általában az R_0 és a B paramétereket tüntetik fel termékeiken. Az általunk használt termisztorokra például $B = 4450 \text{ K}$ és $R_0 = 68 \text{ k}\Omega$.

A termisztorral való hőmérsékletméréshez (3) inverzéből kell kiindulni:

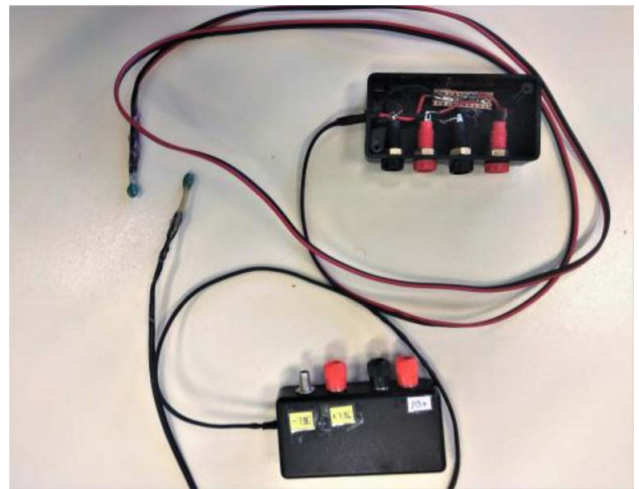
$$T = \frac{B}{\ln R_T - \ln r_\infty}. \quad (4)$$

A hőmérséklet meghatározásához tehát három mennyiséget, R_T , R_0 és a B értékeket kell ismerni. Az ellenállások kellően precíz mérése nem okoz gondot, a pontosságot a B paraméter bizonytalansága korlátozza. A gyári adat csak közelítő jellegű, és a termisztor öregedésével változhat is. Következésképpen mérésel, amit kalibrációnak nevezünk, kell meghatározni.

Ennek során egy referenciaként kezelt folyadék hőmérőt felhasználva minél több összetartozó $R_T - T_{ref}$ értékpárt mértünk ki, majd ehhez a karakterisztikához a lehető legjobban illeszkedő és a (3)-nak megfelelő görbét rendeltük hozzá (7. ábra).

Ettől kezdve az illesztett görbe B paraméterét fogadtuk el a termisztor tényleges paraméterének. Az eljárást többször megismételtük, és az így kapott értékeket átlagolva tettük pontosabbá mérésünket. A görbe illesztését a LabVIEW-ra bíztuk, statisztikai eszköztára kiválóan megoldotta a feladatot.

Az eljárás kulcsa, hogy a karakterisztika felvételéhez mérnünk kell a termisztor



8. ábra. Az elkészült hőmérők.

pillanatnyi ellenállását. A termisztor és egy vele sorba kötött $R = 4,73 \text{ k}\Omega$ ellenállásra $U_0 = 5 \text{ V}$ feszültséget kapcsolunk. Ez utóbbin mért U feszültség függvényében a termisztor ellenállása az alábbi kifejezéssel egyenlő:

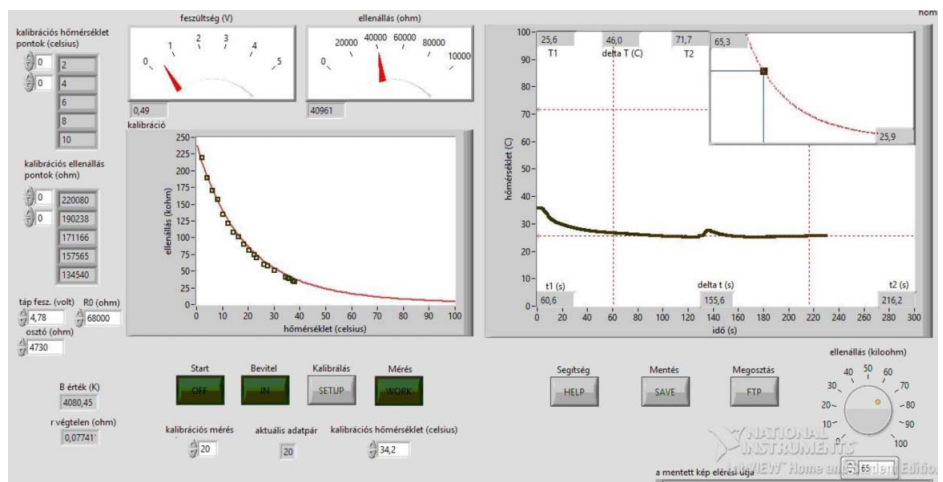
$$R_T = \frac{U_0 - U}{U} R. \quad (5)$$

Ezzel feszültségmérésre sikerült visszavezetni R_T , végző soron pedig a hőmérséklet mérést. Megjegyzendő, hogy a feszültségjel a myDAQ egyik analóg bemenete; míg a referencia-hőmérsékletet manuálisan kell a programba beírni.

Két teljesen egyforma szerkezetű hőmérőt készítettünk. A termisztorokat nagyjából 1-1,5 m hosszú két-eres vezeték végére forrasztottuk, majd zsugorcső, illetve szigetelő epoxigyanta alkalmazásával védőbevonatot, egyfajta tokot kaptak. A védőellenállást a banándugóaljzatokkal együtt dobozba építettük (8. ábra).

Igyekezünk nagy gondossággal eljárni. Hőmérőnként 4-4 illesztést végeztünk, alkalmanként 12-20 adatpárral vettük fel a karakterisztikákat. Az alábbi

9. ábra. A kalibrációt végző VI kezelőfelülete.



eredményre jutottunk. Az 1. (később csak „pirosként” emlegetett) hőmérőre: $B_1 \approx 4489 \pm 24$ K, a 2. („kék”) hőmérőre: $B_2 \approx 4471 \pm 36$ K. Csak emlékeztetőül: a gyári érték mindkettőre 4450 K.

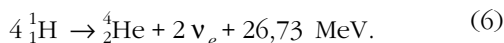
Ekkor már látszott, hogy a két hőmérő azonos körülmények között sem fog hajszálra megegyező értéket mutatni. A termisztorok szobahőmérséklet környékén egymáshoz képest például $\approx 0,2$ °C eltéréssel működtek. A tökéletes egyezésre nem számíthattunk, de arra igen, hogy ugyanakkora referenciahőmérséklet-változásra nagy pontossággal a termisztor hőmérők is ugyanakkora változással reagáljanak. Későbbi céljaink szempontjából másra nem is volt szükségünk.

A kidolgozott VI. elsődleges feladata tehát a kalibráció, azaz B meghatározása volt (9. ábra). Ugyanakkor a programot azzal a képességgel is felruháztuk, hogy a kalibrált értékkel a környezet hőmérsékletét azonnal meg tudja mérni. Ezt a programrészletet később a neutrínóprojektünk kódjába is beépítettük és alkalmaztuk.

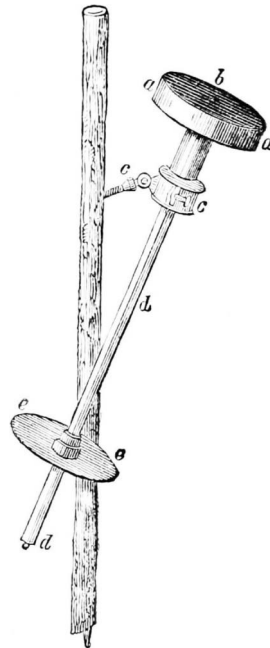
Napneutrínó-fluxus becslése a napállandó mérése alapján

Az elején célszerű tisztázni, hogy mi a kapcsolat a napállandó és a napneutrínók fluxusa között. A Nap fizikáját a standard napmodell írja le. A napmodellből következik a napneutrínók fluxusának várható értéke is. E szerint a földpálya távolságában a fluxus nagyjából $7 \cdot 10^{10} \text{ cm}^{-2} \text{ s}^{-1}$.

A Nap magjában szóba jöhető fúziós folyamatok 98,3%-át a pp-ciklus, a maradék mintegy 1,7%-át a CNO-ciklus teszi ki. A hidrogénfúzió összesített reakcióegyenlete (a γ -fotonokat nem feltüntetve) mindkét ciklus valamennyi csatornájára együttesen az alábbi:



Szerencsés tény, hogy minden csatornán ciklusonként 2-2 elektronneutrínó keletkezik, más leptoncsaládba tartozó nem. Már csak az a kérdés, hogy a keletkező energia mekkora hányada alakul át sugárzási energiává. Bármilyen furcsa, nem az összes. Éppen a hagyományos anyaggal nem szívesen kölcsönható neutrínók azok, amelyek a felszabaduló energia egy részét elvezetik a Nap energia-háztartásából. Mivel számottevően csak a gyenge kölcsönhatásban vesznek részt, gyakorlatilag energiavesztés nélkül tudják elhagyni a Napot. Kiderül, hogy mindkét ciklus összes csatornájára vetítve a neutrínók átlagosan mintegy 0,63 MeV energiával rendelkeznek, azaz ciklusonként a (6)-ban feltüntetett-hez képest ennyivel kevesebb, körülbelül $\varepsilon \approx 26,1$ MeV energia vesz részt a termikus egyensúly kialakításában, és alakul át végül hőmérsékleti sugárzássá [4, 5]. Ha elfogadjuk, hogy a Nap állandó luminozitású, akkor kezünkben van a recept: a légkörön túl minden egyes 26,1 MeV elnyelt sugárzási energiára 2-2 neutrínó jut. (A részecskefizika történetének egyik érdekfeszítő fejezete, a *napneutrínó-probléma* éppen abból eredt, hogy



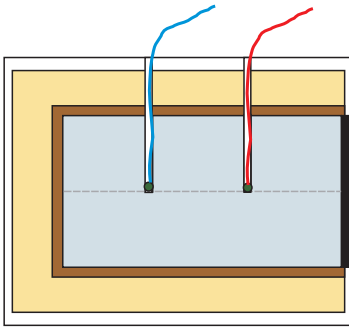
10. ábra. Pouillet pirheliométere (forrás: https://en.wikipedia.org/wiki/Claude_Pouillet).

1837–38-ban saját tervezésű eszközével, az úgynevezett pirheliométerrel [6]. Ebben egy korong alakú fémtartály kormozott felületén elnyelt hő melegíti a benne lévő folyadékot (10. ábra). Az eszköz lényegében kaloriméterként működik. Gondosan kivitelezett mérése meglepő pontossággal adta vissza a ma elfogadott középértéket. Pouillet szerint a napállandó nagyjából 1228 W/m^2 , ami alig 10%-os relatív hibát jelent. Kitűzött célunk az volt, hogy saját pirheliométer készítésével ismételjük meg ezt az úttörő mérést, és ha lehetséges, megközelítsük méréseinek pontosságát.

Csapatunk folyadék helyett szilárd anyagot, tömör alumíniumhengert alkalmazott. A henger egyik alapját matt fekete hóálló zománcal befestettük, és ezt tettük ki a Nap sugárzásának. Az A felületen t idő alatt felvett hőből számítható a mért direkt, azaz a felületre merőlegesen érkező sugárzási teljesítmény:

$$P_{d, \text{mért}} = \frac{c m \Delta T}{A t}. \quad (7)$$

Ez egy alapvetően hőtani mérés, kulcsa a hőmérséklet-változás meghatározása. A pontosság kedvéért két termisztorhőmérőt alkalmaztunk, azokat a henger hossz tengelyének harmadolópontjaiba helyeztük (11. ábra). Feltételeztük, hogy állandó besugárzás esetén a hossz tengely mentén lineáris lesz a hőmérséklet-eloszlás. A furatok bejáratát a hőszigetelés miatt parafa- és szivacsdarabokkal betöltöttük. Az alumínium-tömböt több rétegben (parafa, purhab, PVC-cső) vastagon szigeteltük, rögzítettük, és a szigetelt felületekre kívülről tükörfóliát ragasztottunk (12. ábra). A „somagolásból” csak a fekete felület látszik ki, amit mérés közben állandóan a napkorong felé fordítva tartottunk.



11. ábra. A kaloriméter tengelymet-szete.

Mivel a két hőmérő még azonos körülmények között sem mutatott egyenlő értékeket, a mérés elején külön-külön kellett definiálnunk a kezdeti hőmérsékleteket (T_{10} és T_{20}). A teljes alumíniumtömbre vonatkozó pillanatnyi hőmérséklet-változást az alábbi módon vettük figyelembe.

$$\Delta T = \frac{T_1 - T_{10} + T_2 - T_{20}}{2}. \quad (8)$$

A hőmérsékletek és az eltelt idő mérésével a felszínen mérhető, a felületre merőlegesen érkező sugárzás (7) alapján már számíthatóvá vált.

Sajnos ez még nem a napállandó, így értelemszerűen nem elegendő a neutrínófluxus becsléséhez sem. Szükség volt a légkör hatásának kiküszöbölésére. Nyilvánvaló, hogy a legfontosabb tényező a nap-sugarak légkörben megtett útja. A Nap ϑ zenittávolságtól függ, hogy a sugárzásnak a légkör y vastagságának hány-szorosát kellene megtennie (s). A szakirodalom ezt a viszonyszámot „air mass”-nek nevezi (AM). Könnyű beegondolni, hogy ez miért fontos: vastagabb légkörben a sugárzásnak több ideje van szóródni, elnyelődni. Meghatározása alapvető fontosságú. Ha a Föld görbületétől eltekintünk, akkor egyszerű a helyzet:

$$AM = \frac{s}{y} = \frac{1}{\cos \vartheta}. \quad (9)$$

Megjegyzem, hogy a görbületet is figyelembe vevő képlet sem túlságosan bonyolult. Mi megelégedtünk az egyszerűbbel, mert még alacsony napállás, például 60° -os zenittávolság esetén is csak 1,5%-kal lett volna pontosabb a fenti definíciónál. Ezen kívül a légkör por- és páratartalma, a felhőzettség azok a tényezők, amelyek befolyásolják a sugárzást. Elméleti megalapozottsággal mindezeket figyelembe venni képzetelenség. Tapasztalati törvények szerencsére léteznek. A Meinel-modell szerint a légkör direkt sugárzásra vonatkozó áteresztőképessége felhőtlen égbolt esetén [7]:



12. ábra. Az alumínium kaloriméter készítésének lépései.

$$t_d = 0,7^{(AM^{0,678})}. \quad (10)$$

A fentiekkel összhangban már meghatározhatóvá válik a mért napállandó és a neutrínófluxus értéke:

$$P_{0, \text{mért}} = \frac{P_{d, \text{mért}}}{t_d} \quad (11)$$

és

$$\Phi_{v, \text{mért}} = 2 \frac{P_{0, \text{mért}}}{\varepsilon}. \quad (12)$$

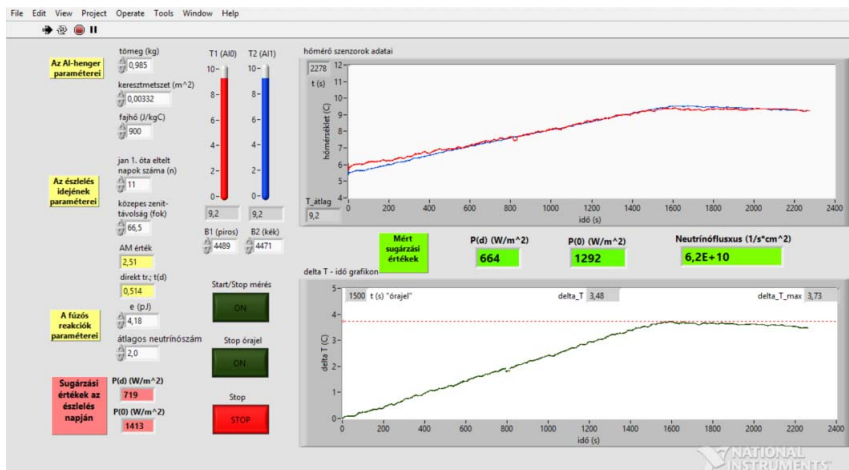
Érdeemes leltárt készíteni. A kaloriméter geometriai adatain, valamint fizikai állandókon kívül a következő mennyiségek mérendők: T_1 , T_{10} , T_2 , T_{20} hőmérsékletek, a hőfelvétel t ideje. Ezeket a VIa myDAQ segítségével megoldja. Manuálisan beírandó változó az észlelés pontos időpontjától függő ϑ zenittávolság. Ezt egy ingyenes planetáriumalkalmazásból, a *Stellarium-ból* nyertük.

A mérés végrehajtásának lényeges eleme, hogy a kormozott felületet mindig merőlegesen érje a sugárzás. Pírheliométerünket ezért egy óraművel rendelkező távcsőállványra illesztettük, ami sikerrel kompenzálta a Föld forgását (13. ábra).

A VI rengeteg adatot jelenít meg, ezek közül a legfontosabb a hőmérsékletváltozás-grafikon és annak maximuma. A függvény menetének vannak érdekességei, például, hogy a kaloriméter anyaga egy rövid ideig még a közvetlen sugárzás megszűnése után is

13. ábra. A pírheliométer mérés közben.





14. ábra. A napállandó méréséhez készült VI kezelőfelülete a január 11-i méréskor. Olyan volt nekünk, mint egy megkészt, de azért megkapott karácsonyi ajándék.

tovább melegszik. A maximumérték keresésénél ezt a ténytet is figyelembe kellett vennünk. Kiegészítésként megjegyzem, hogy a VI kezelt még egy további bemenő adatot is, a dátumot, pontosabban a január 1. óta eltelt napok számát. A napállandó ugyanis a földpálya ellipszis alakja miatt szezonális változást is mutat. Az ingadozás nem elhanyagolható, az $1367 \pm 45 \text{ W/m}^2$ a két szélsőérték között csaknem 7%-os eltérést jelent. Számunkra csak annyiban volt jelentősége, hogy figyelembevételével reálisabban tudtuk megbecsülni mérésünk pontosságát.

Legzavartalanabb mérésünk január 11-én, a helyi delelést követő percekben történt. A környezet hőmérséklete $5 \text{ }^\circ\text{C}$ körüli volt. A kalorimétert 25 percig tettük ki sugárzásnak, további körülbelül 2 percig tartott a melegedési szakasz, ami összesen $3,7$ fokos hőmérséklet-változást jelentett (14. ábra). Az általunk mért mennyiségek a következőképpen alakultak.

$$P_{0, \text{mért}} \approx 1292 \frac{\text{W}}{\text{m}^2} \text{ és } \Phi_{\nu, \text{mért}} \approx 6,2 \cdot 10^{10} \frac{1}{\text{s cm}^2}.$$

Aznapra a napállandó értéke a szezonális változásokot is figyelembe véve

$$P_0 \approx 1413 \frac{\text{W}}{\text{m}^2}$$

volt. Alacsony napállás, 2,5-et meghaladó AM érték mellett is sikerült elérnünk Pouillet mérésének pontosságát.

Tisztában vagyunk azzal, hogy számtalan tényezőt nem vettünk figyelembe, másokat csak feltételeztünk. Ezek olyan eltérő irányú szisztematikus hibákat is okozhattak, hogy azok összességében nullához közeli eltérést eredményezzenek. Lehetett szerencsénk is. Ettől függetlenül felemelő érzés volt saját bőrünkön tapasztalni, hogy a fizika és a matematika ennyire összetett problémában is működik. A Home-stake, Sudbury és a Super-Kamiokande obszervatóriumok fizikusai erről biztosan bővebben is tudnának mesélni.

Záró gondolatok

Több mint tucatnyi lépésben így alakítottuk át a feszültségjelet neutrínófluxussá.

Alapvetően működött a bevezetőben megfogalmazott elképzelésem, a kezdetben önállóan tervezett utolsó mérés kivitelezése azonban érthető okokból akadózott. Rá kellett jönnöm, hogy a neutrínóprojekt elméleti háttere még a 11. évfolyamos emelt óraszámában fizikát tanuló diákoknak is megterhelő volt, és ezen nem sokat segített a VI blokkdiagramjának viszonylagos egyszerűsége sem. Kénytelen voltam stratégiát

váltani: egy idő után nem törődtem azzal, hogy késznek tekinthető programrészeket kérjek tőlük, kizárólag arra figyeltem, hogy a megfelelő struktúrákkal megismerkedjenek, azokat felismerjék és produktívan tudják használni.

Így már működött, észrevehetően felgyorsultak az események. A mérés kidolgozását tanári irányítással, tanár-diák együttműködésben végeztük el. Ezúton is köszönöm tanítványaimnak kitartó, áldozatos munkájukat.

Végül álljon itt néhány idézet diákmunkatársaimtól: „... elsőnek nagy harapás volt a napneutrínók mérése”, „... a projektfeladat elkészítését abszolút pozitívan éltem meg”, „... talán elindított egy olyan pályán, amin végighaladva ott találhatom magam egy jó egyetem mérnöki karán”. Megérte a fáradságot.

Irodalom

1. Fraller Cs., Lutár K., Vörös B.: *Pouillet nyomában*. Pályázati dolgozat, 2019. <http://sukjaro.eu/ELFT-NI-palyazat/2018-19/PMunkak/index.html>
2. http://dload.oktatas.educatio.hu/erettsegi/nyilvános_anyagok_2019tavasz/fizika_emelt_szobeli_meresek_2019maj.pdf
3. https://en.wikipedia.org/wiki/Thermistor#Steinhart%E2%80%93Hart_equation
4. https://en.wikipedia.org/wiki/Proton%E2%80%93proton_chain_reaction
5. https://en.wikipedia.org/wiki/CNO_cycle
6. Richard T.: *Scientific Memoirs, Selected from the Transactions of Foreign Academies of Science and Learned Societies, and from Foreign Journals*. London (1846) 44–90., https://books.google.hu/books?id=Qcc-AAAAYAAJ&pg=PA44&redir_esc=y#v=onepage&q&f=false
7. https://www.researchgate.net/publication/254994320_Global_horizontal_irradiance_clear_sky_models_implementation_and_analysis

A méréseink kezelőfelületeiről készített videók elérhetősége:

Barometrikus magasságformula vizsgálata: <https://youtu.be/QpZzqQuVwDE>

Neutrínófluxus mérése: <https://youtu.be/IB4G-QtEHhA>

Az NI Hungary Kft. és az ELFT megbízásából készített videó elérhetősége:

https://drive.google.com/file/d/1taeNmM_Ct07F29VgY4omn59-zhTCmn8/view