

AZ ATOMMAG CSEPPMODELLJE

1. Bevezetés

A világ bonyolult sokszínűsége hogyan vezethető vissza egyszerű alkotórészekre, ez nagy filozófiai kérdés volt már az ókori görögök számára is. Mik a világ végső építőkövei, többek között ezzel foglalkozott *Thalész, Platón, Arisztotelész, Anaximandrosz, Anaximenész, Empedoklész*, de a mai atomfogalomhoz talán *Démokritosz* (i.e. 460-370) jutott el a legközelebb. Maga az „atom” szó is görög eredetű, a végső oszthatatlant jelenti. Az ókori természettudományfilozófiát és az atom fogalmának kialakulását élvezetesen tárgyalja *Simonyi Károly* sikerkönyve [1]. Az atomfogalom újkori reneszánsza már igazi tudományos alapokra épülve, de rögzös utakon született meg. Az átütő eredmények érthetően először a kémia területén jelentkeztek. Itt csak utalunk a nagy nevekre: *Proust* (1799), *Dalton* (1803), *Avogadro* törvénye (1811), *Brown*-mozgás (1827), kinetikus gázelmélet (*Krönig, Boltzmann*). Az elektromosság atomi szerkezetét igazolták 1837-ben *M. Faraday* (1791-1867) elektrolízisre vonatkozó megfigyelései. *D. I. Mengyelejev* (1834-1907) periódusos rendszere (1869) a kémiai elemek hasonlóságán alapult, és amelyet atomi szinten végül *W. Pauli* (1900-1958) *kizárási elve* alapján sikerült végleges formában értelmezni. A kizárási elv azt jelenti, hogy az atomi elektronehéjakon lévő elektronok mindegyike csak egymástól eltérő kvantumállapotokban lehetnek, azaz kizárt, hogy két elektron azonos kvantumállapotban legyen.

A valóságot első, elfogadhatóan megközelítő atomkép: a *Bohr-féle atommodell* megszületéséhez már nem volt elegendő a kémia, beléptek a fizikusok. A legfontosabb események időrendbeli sorrendben a következők voltak: 1885-ben a svájci *J. Balmernek* sikerült a hidrogén spektruskópiái vonalas színeképre képletet találni. 1907-ben *J. J. Thomson* a katódsugárzásról megállapítja (melynek kutatásában számos fizikus szerzett érdemeket, többek között a magyar származású *Lénárd Fülöp* is), hogy a sugárzás kis tömegű, negatív töltésű részecskékből áll, ezzel megszületett az *elektron* fogalma. 1909-ben *Millikan* egy szellemes kísérlettel meghatározza az elektron töltését. A huszadik század elején a már említett *J. J. Thomson* és kortársai kialakítottak egy szemléletes modellt a *Z rendszámú* atomról. A „szilváspuding modell” szerint a semleges atomban *Z* nagyságú pozitív töltés egy kb. 10^{-10} méter átmérőjű homogén gömböt egyenletesen tölt ki, és a *Z*-számú negatív töltésű elektron a gömbön belül szabálytalanul száguldozik, kompenzálva a gömb pozitív töltését.

A Thomson-féle atommodell nem tetszett *E. Rutherford*-nak (1871-1937), aki zseniális kísérletező volt. Ellenvetése szerint a rendezetlen elektronmozgás nem eredményezhet szabályos vonalas színeképet az atomok spektrumában. Az elméleti spekuláció helyett egy ötletes kísérletet eszelt ki: nagyon vékony aranyfüst lemezt bombázott *alfa-részecskékkel*. Az alfa-részecske a hélium atom magja, kétszeres pozitív töltésű, és képes áthatolni vékony fémrétegeken. Az alfasugárzást bizonyos radioaktív anyagok bocsátják ki. Az arany atomokon az alfa-részek szóródtak, jelentős részük áthatolt az aranylemezen, kisebb részük „hátraszóródott”. A kísérlet matematikai elemzése arra az eredményre vezetett, hogy az arany atomok pozitív töltésű része nagyon kis térfogatban összpontosul, az atomátmérőnek kb. tizedes részében. Megszületett az atommag fogalma. Kiderült, hogy az atom magjában koncentrálódik az atom tömegének több, mint 99 százaléka és a pozitív töltés 100 százaléka. Az elektronok a jóval nagyobb átmérőjű atom felületén helyezkednek el, tehát az atom olyan, mintha egy *mini-Naprendszer* lenne. Mindez 1911-ben történt Angliában. Fellépett azonban egy nagy ellentmondás is: ha az elektronok a középponti mag körül keringenek, nagyon rövid időn belül lefékeződnének, és a magba esnének, ugyanis a keringő elektronok folyamatosan elektromágneses hullámokat bocsátanak ki. A Naprendszerünkben ez azért nem következik be, mivel a semleges tömeg nem sugároz elektromágnesesen, így nem lép fel energiavesztés sem (gravitációsan azonban elhanyagolható mértékben sugároz). Ugyanis Einstein általános relati-

táslmélete szerint a semleges testek is gyengén sugároznak energiát a testek gyorsulásakor, de ez nem elektromágneses sugárzás, hanem gravitációs sugárzás (gravitációs hullám). A Föld gravitációs sugárzási teljesítménye 200 W nagyságrendű, ez természetesen olyan kismértékű, hogy a Földet gyakorlatilag nem fékezi.

A Rutherford-féle atommodell ellentmondását egy fiatal dán fizikus, Niels Bohr oldotta fel. Az új gondolatokhoz bizony fiatalok kellenek, akiket nem tartanak vissza a múlt megszokott berögződései. Két forradalmi posztulátumot állított fel, melyek alapján sikerült a Rutherford-féle atommodellbe életet önteni, a sugárzási problémát *kvantumfeltétellel* megszüntetni. Számításai igazolták a hidrogénatom spektrumát, amelyet korábban Balmer öntött egyszerű matematikai formába. A Bohr-féle atommodell részleteibe itt nem megyünk bele, mivel a legtöbb fizika-tankönyv tárgyalja. Azt viszont tudnunk kell, hogy Bohr atommodellje csak az első, de rendkívül fontos lépés volt az atom megismerésében. Az atomfizika tudományának egzakt kiteljesedése csak 1925 után, a kvantummechanika kialakulása nyomán történt meg.

A jelen dolgozat célja az atom fogalmának egy általánosabb értelmezése, amely szerint az atom egy egységes fizikai objektum, az atomot a maga teljes egészében kell fizikailag értelmeznünk. Ugyanis történelmileg az atomot csak a fizika lépcsőzetes fejlődése bontotta szét. A jelen kép szerint az atom három szintre bontható, az első szint az atomháj fizikája, mely a legrégebbi keletű. A második szint az atommag fizikája, a végül a legújabb szint az atommagon belüli erőhatások forrása, ez a *kvarkok* szintje. Vannak-e még további alsó szintek? Erre nem adható biztos válasz, de a fizikusok ma erősen reménykednek abban, hogy a kvarkok valóban az *anyag végső építőkövei*.

Az egyetemi éveim során sokat forgattam a fiatalon tragikusan elhunyt *Györgyi Géza* elméleti magfizikai „könyvecskéjét” [2], amelyet mindenkinek nagyon tudok ajánlani, akinek a középfokú matematikánál magasabb felkészültsége van. Egyszerűbb matematikát használ, de kiváló magfizikai könyv még az orosz *Muhin* Kísérleti magfizika című munkája [3].

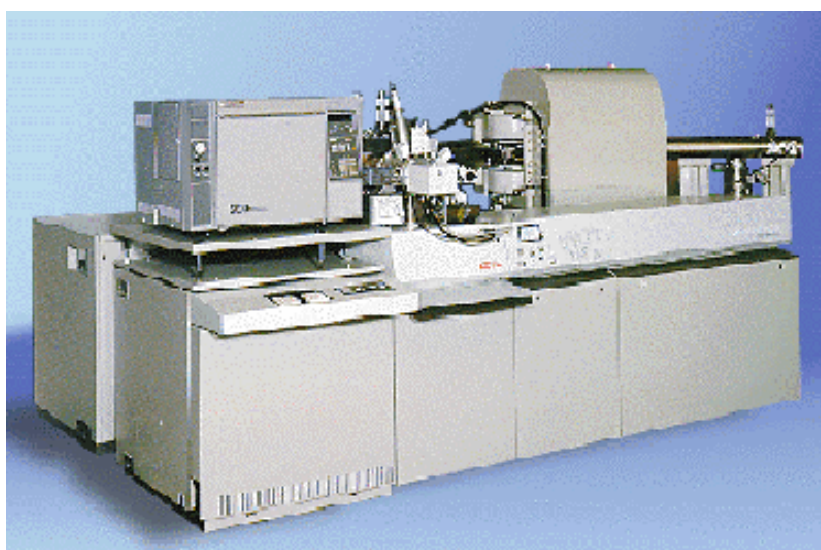
A továbbiakban „bemelegítésként” a magfizika egy viszonylag régebbi, de nagyon sikeres modelljével, az atommag *cseppmodelljével* foglalkozunk. A cseppmodell, egyszerűsége ellenére meglepően pontos és szemléletes képet ad az atommagról. Jelentőségét kiemeli az a tény, hogy meghatározó módon hozzájárult az atomenergia felszabadításához.

A dolgozat végén, a Függelék részben megadom a cseppmodellt illesztő számítógépes program (Power Basic) listáját is, így egyszerűen bárki maga is végezhet számításokat.

2. Az atommag cseppmodellje

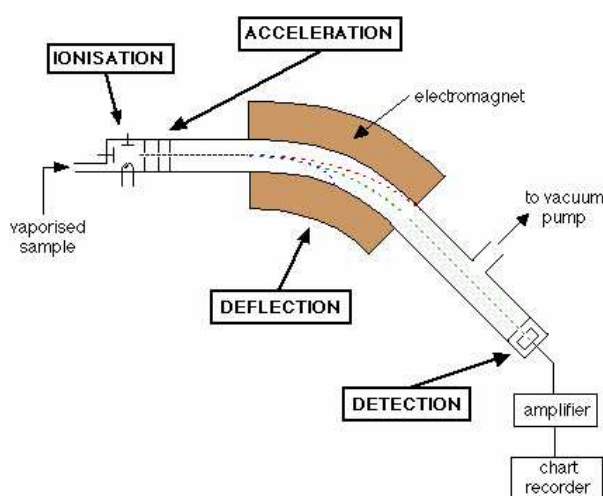
Az atommag fizikája a fizika többi területeihez hasonlóan rohamos fejlődésnek indult az 1900-as évek elején. Az elindulás a magfizikában a radioaktivitás tanulmányozásával kezdődött. 1896-ban Franciaországban *Becquerel* felfedezi az urán radioaktivitását, rá két évre, ugyancsak Franciaországban a *Curie* házaspár felfedezi az addig ismeretlen elemet, a sugárzó *rádiumot*. A jelenség háttere néhány évig tisztázatlan marad, amíg meg nem születik Rutherford atommodellje, és ennek alapján az a feltevés, hogy a viszonylag nagy energiájú radioaktív sugárzás csak az atommagból eredhet. A radioaktivitásnak az atommagok átalakulásával kell járnia, és ezzel megcsillant az *aranycsináló alkimisták* évezredes vágyának beteljesülési lehetősége, az elemek átalakíthatósága. Megmaradt ebből a korból Rutherfordnak egy elhíresült mondása is, miszerint aki az atomenergia felszabadításáról gondolkozik, a Holdban él. Pedig éppen Rutherford úttörő kísérleti munkásságának köszönhetjük, hogy ma az atomerőművek léteznek és a jövő energiájának egyetlen reményteli kulcsa a nukleáris energia. Viszonylag későn, 1932-ben fedezi fel *Chadwick* a neutront Angliában, és azóta tudjuk, hogy az atommagok protonokból és neutronokból állnak. Már 1919-ben, ugyancsak Angliában *Aston* kidolgozta a *tömegspektrometriát*, amely lehetővé tette az atomok, és ezen keresztül az atommagok tömegének pontos kimérését. Einstein híres $E = mc^2$ képlete alapján lehetővé vált

az egyes atommagok *kötési energiájának* meghatározása, mely szokatlanul nagyak adódtak. Egy modern *tömegspektrométer* fényképe látható a 2.1. ábrán:



2.1. ábra: Egy modern tömegspektrométer

A fényképről nem derül ki a tömegspektrométer egyszerű működési elve, a 2.2 ábra viszont ad némi tájékoztatást az atomi tömeg mérésének elvéről:

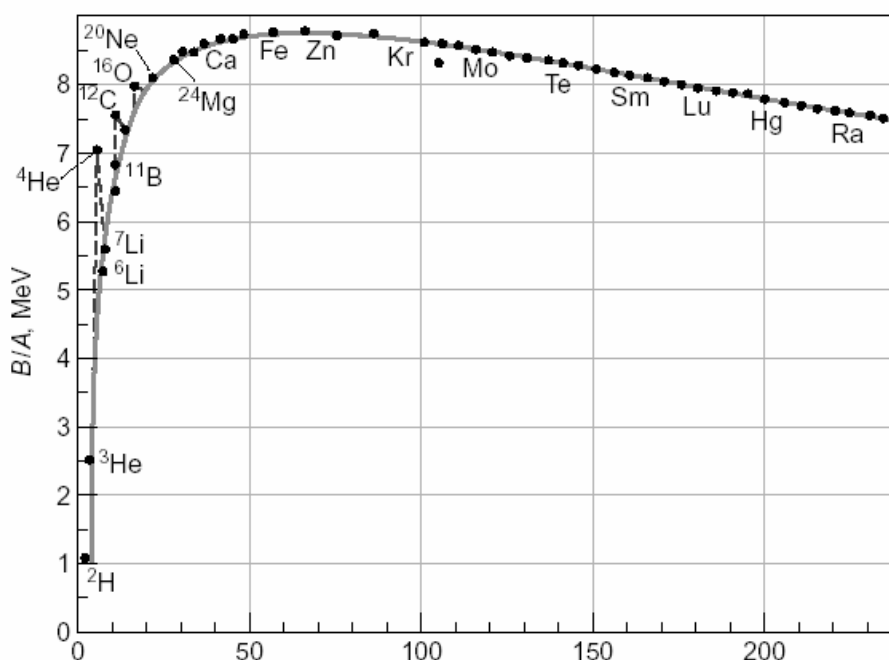


2.2. ábra: A tömegspektrométer működési elve

Nem lehet itt célunk a tömegspektrométer működésének ismertetése, nekünk most a végeredmény a fontos: hogyan határozhatjuk meg az atommagok kötési energiáját. A mai elképzelés szerint az atommag Z számú protonból és N számú neutronból áll, ahol Z és N egész számok. A protonok és neutronok tömege közel egyenlő, a protonok tömege kb. egy ezreléssel kisebb a neutronok tömegénél. A neutron elektromosan semleges részecske, míg a proton egységnyi pozitív töltésű. Például a hidrogén atom magja csak egy protonból áll, de van két izotópja is: a *deutérium* és a *trícium*. A deutérium magja egy protonból és egy neutronból áll, míg a trícium egy protonból és két neutronból áll. Ezek a hidrogén atom izotópjai. Az elemet a Z protonszám (és ezzel együtt Z elektronszám) határozza meg, az elem izotópjai különböző neutronszámmal jellemezhetők. Tetszőleges Z rendszámú elem semleges atomjának a tömegét a következő alakban írhatjuk fel:

$$M(Z, N) = Z(m_e + M_p) + NM_n + E_c / c^2; \quad (E_c < 0), \quad (2.1)$$

ahol m_e az elektron tömege, M_p a proton, M_n a neutron tömege. Az E_c negatív értékű szám az atom kötési energiája. Az $A = Z + N$ számot *tömegszámnak* nevezzük. Az atom tömege közelítőleg a tömegszámmal arányos. A proton és a neutron közös neve *nukleon*, tehát egy A tömegszámú atom A számú nukleont tartalmaz. Az atomok tömegét régóta rendszeresen mérik, amelyeket időnként publikálják. A legmegbízhatóbb atomtömeg adatokat a [4] publikációban találjuk meg, a mérési adatok frissítését az Interneten is megtalálhatjuk. Az atomok E_c kötési energiáját elosztjuk a tömegszámmal, akkor megkapjuk az *egy nukleonra eső kötési energiát*. Az egy nukleonra eső kötési energia negatívját, az ún. *szeperációs energiákat* láthatjuk a 2.3. ábrán a tömegszám függvényében:



2.3. ábra: Az egy nukleonra eső szeperációs energia a tömegszám függvényében

A kötési energia mértékegysége az ábrán a MeV (megaelektronvolt), mely egy millió elektronvoltot jelent. Egy elektronvolt (eV) az az energia, amelyet az elektron *1 Voltos* potenciálkülönbség befutása során mozgási energiaként felvesz (vagy elveszít). Összehasonlításképpen a hidrogén atomban az elektron kötési energiája mindössze $-13.5 eV$. Ebből látszik, hogy a nukleonok kötési energiája majdnem milliószorosa az elektronok kötési energiájának. A kémiai kötésekben az elektronok játszanak szerepet elektronvolt nagyságú energiákkal, a nukleáris folyamatokban ennek milliószorosa jelentkezik. Ez az oka annak, hogy az atombombában, illetve az atomreaktorokban viszonylag kevés „hasadó anyagból” hatalmas energiát lehet felszabadítani. A 2.3. ábrából többek között kiderül, hogy a vas (Fe) izotópjaiban a nukleonok kötése a legerősebb. A kötési energia görbét úgy kapjuk meg, hogy a 2.3. ábrát a tömegszám tengelyre lefelé tükrözzük, ekkor a vas izotópjai a görbe alján helyezkednek el, ezt nevezik „vasgödörnek”. Az ábrán a pontok jelölik az egyes kiválasztott elemeket, a folyamatos vonal egy illesztett görbe. A görbe illesztését először Németországban, *von Weizsäcker* végezte el 1935-ben [5], szemléletes fizikai megfontolások alapján. A tőle származó, híres Weizsäcker-féle „szemiempirikus” formula segítségével írhatjuk fel az atomok közelítő tömegképletét:

$$M(Z, N) = Z(m_e + M_p) + NM_n - C_V A + C_F A^{2/3} + C_C Z^2 / A^{1/3} + C_A (A/2 - Z)^2 / A - C_S \delta(Z, N) / A^{1/2} \quad (2.2)$$

A képletben szereplő C állandók illesztési paraméterek, számuk összesen öt darab. A negatív előjelű tagok csökkentik az atom tömegét, ezek biztosítják az atom nukleonjainak kötését.

A képlet fizikai háttére feltételezi, hogy az atom, pontosabban a kötési energiát meghatározó atommag egy folyadékcsepphez hasonló. Innen ered az elnevezés: az *atommag cseppmodellje*. Nézzük meg részletesen az egyes tagok fizikai jelentését. Az első két tag az atom kölcsönhatásmentes össztömegét jelöli. Ez egyenlő a kötés előtti szabad protonok, szabad neutronok és szabad elektronok tömegének összegével. A kötési energia jó közelítésben a tömegszámmal arányos, ezt fejezi ki a harmadik tag, értéke minden esetben negatív. A harmadik tag szokásos elnevezése *térfogati energia*. A negyedik tag elnevezése *felületi energia*. Az atommagot ugyanis gömb alakú folyadékcseppnek képzeljük el, melynek térfogata a magsugár harmadik hatványával arányos. A magfolyadék sűrűségét állandónak tekintve, a mag tömege arányos a térfogatával. A mag tömege pedig a tömegszámmal arányos. Mindezek alapján az atommag sugara a tömegszám köbgyökével, az atommag felszíne pedig a magsugár négyzetével arányos. Az atommag felszíne ennek megfelelően arányos a tömegszám $2/3$ -ik hatványával. A felületi energia pozitív előjelű, azaz lazítja a magot, növeli az atommag tömegét. Ennek egyszerű fizikai oka van, a felületen lévő nukleonok vonzó hatása csak az atommag belsejébe hat, kifelé már nem tud hatni. A felületi nukleonok kötési hatása tehát kisebb, mint a mag belsejében lévő nukleonok kötése.

A képlet ötödik tagja az ún. *Coulomb-energia* tag, mely a magban lévő protonok taszító hatását fejezi ki, ami lazítja az atommag kötését. Értéke tehát mindig pozitív. A Coulomb energia a klasszikus elektromosságban szerint arányos a kölcsönható töltések szorzatával és fordítottan arányos a távolságukkal. A töltések átlagos távolsága nyilván a magsugárral arányos, mely a tömegszám köbgyökével fejezhető ki.

A képlet hatodik tagja az *aszimmetria* tag. A megfigyelések azt mutatták, hogy a túl sok protont, illetve túl sok neutronot tartalmazó atommagok nem stabilak, illetve nem is léteznek. A protonszám – neutronszám aszimmetria tehát lazító hatású, ezt a hatást fejezi ki az aszimmetria tag, mely speciálisan egyenlő számú proton és neutron esetén zérus.

A képlet hetedik tagja az előzővel ellentétes elnevezésű *szimmetria* tag. Ezt a tankönyvek általában *kvantummechanikai eredetű* tagnak is nevezik, mivel a *nukleonok spinjével* kapcsolatosak. A proton és nukleon spinje egyaránt feles értékű, a nukleonok tehát ún. *fermionok*. Két ellentétes spinű proton, vagy két ellentétes spinű neutron jelenléte erősíti az atommag kötését. Ha a magban páros számú proton, illetve páros számú neutron van, ezek együtt jelentősen megerősítik az atommag kötését. Ha viszont mind a protonok, mind a neutronok száma páratlan, az atommag kötése gyengül. Ennek megfelelően a hetedik tag negatív értékű páros-páros számú protont, illetve neutronot tartalmazó magoknál, pozitív értékű, ha páratlan-páratlan számú a protonok, illetve neutronok száma. Végül a hetedik tag értéke zérus a páros-páratlan esetekben. A képletben a „delta-függvény” ezt a szabályt jelöli:

$$\delta(Z, N) = \begin{cases} 1 & (Z = \text{páros}, N = \text{páros}) \\ 0 & (Z + N = \text{páratlan}) \\ -1 & (Z = \text{páratlan}, N = \text{páratlan}) \end{cases} \quad (2.3)$$

A cseppmodell képlet illesztési paraméterei a szakirodalom többségében megtalálhatók, és ugyancsak található a témához kapcsolódó oktatási anyagok az Interneten is. A tapasztalat azt mutatja, hogy a publikált illesztési paraméterek pontatlanok, sok esetben tévesek

is lehetnek. Ezért szántam el magamat, hogy elvégezzek egy saját illesztési számítást. A számításához mintegy kétezer semleges atom tömegének kísérleti adatát használtam fel a [4] publikációból. A (2.2) képlet illesztésének eredménye a következő:

$$\begin{aligned}
 C_V &= 14.32461762592902 \text{ MeV} \\
 C_F &= 14.79229051328715 \text{ MeV} \\
 C_C &= 0.5984147430997666 \text{ MeV} \\
 C_A &= 52.04876116332366 \text{ MeV} \\
 C_S &= 2.522357534793016 \text{ MeV}
 \end{aligned}
 \tag{2.4}$$

A számításnál a proton és az elektron tömegének összegét a hidrogén atom tömegével helyettesítettem. A folyadékcsepp modellben összesen hét konstans szerepel, ha a hidrogén atom tömegét és a neutron tömegét is illesztési paraméternek tekintjük.

A CSEPPMODEL PONTOSSÁGA

A cseppmodell pontosságát a legegyszerűbben a kötési energiák számított értékeinek és kísérleti értékeinek összehasonlításával, a relatív hibákkal lehet értékelni. A relatív hiba számításának konvencionális módja a magfizikában:

$$\delta(A, Z) = \frac{M_{\text{számított}} - M_{\text{kísérlet}}}{Z \times M_H + (A - 2Z) \times M_n - M_{\text{kísérlet}}}
 \tag{2.5}$$

$M_H = a$ hidrogén atom tömege; $M_n = a$ neutron tömege

A modell pontosságát a relatív hibák szórása jellemzi:

$$\sigma = \sqrt{\frac{\sum \delta^2(A, Z)}{n+1}} = 3.924...10^{-2}
 \tag{2.6}$$

ahol n az illesztett atomok száma.

A folyadékcsepp modell jelentőségét az is mutatja, hogy miután *Hahn* és *Strassman* 1939-ben felfedezte az uránium hasadását, *Bohr* és *Wheeler* az USA-ban éppen a folyadékcsepp modell alapján tudták elméleti úton értelmezni a maghasadást. Innen már nem sok idő telt el az első atomreaktor megvalósításáig.

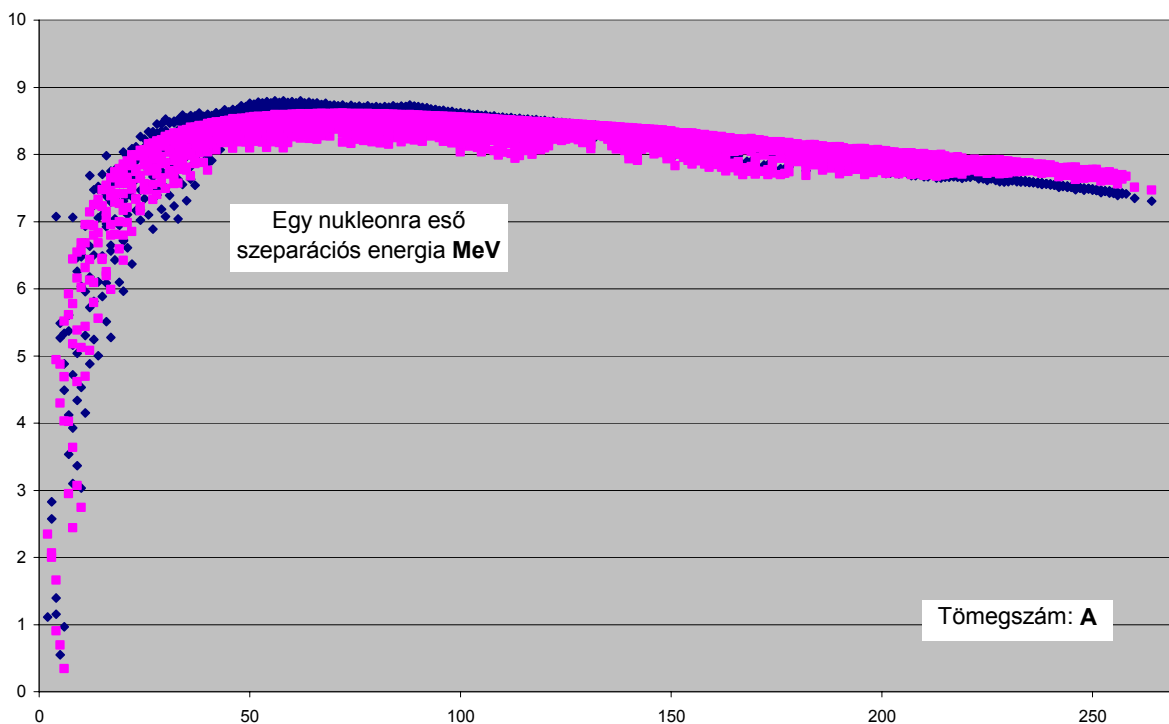
A cseppmodell klasszikus fizikai elképzelésekre épült, de a magfizika fejlődése már a cseppmodell megszületésekor bizonyította, hogy az atommagra is érvényesek a kvantummechanika törvényei, melyek eltérnek a klasszikus fizikától. A cseppmodell sikere tehát nem vezethetett az atommag mélyebb megismeréséhez, mivel számos fontos kérdésre nem adott választ, többek között a radioaktivitás jelenségére, a nukleonok közötti erőkre (ún. *erős kölcsönhatásra*), a különböző *nukleáris szórás kísérletekre*, stb. A másik zavaró tény, hogy a cseppmodell végső soron hét illesztési paramétert tartalmaz, amelyből kettőt szerencsére a kísérletekből ismerünk (a hidrogén atom és a neutron tömegét).

A semleges atomok tömegét meghatározó, alternatív fizikai megfontolásokon alapuló, saját fejlesztésű számítási modelletem a honlapom egy másik dolgozatában ismertetem:

<http://www.geocities.com/fhunman/atom9.pdf>

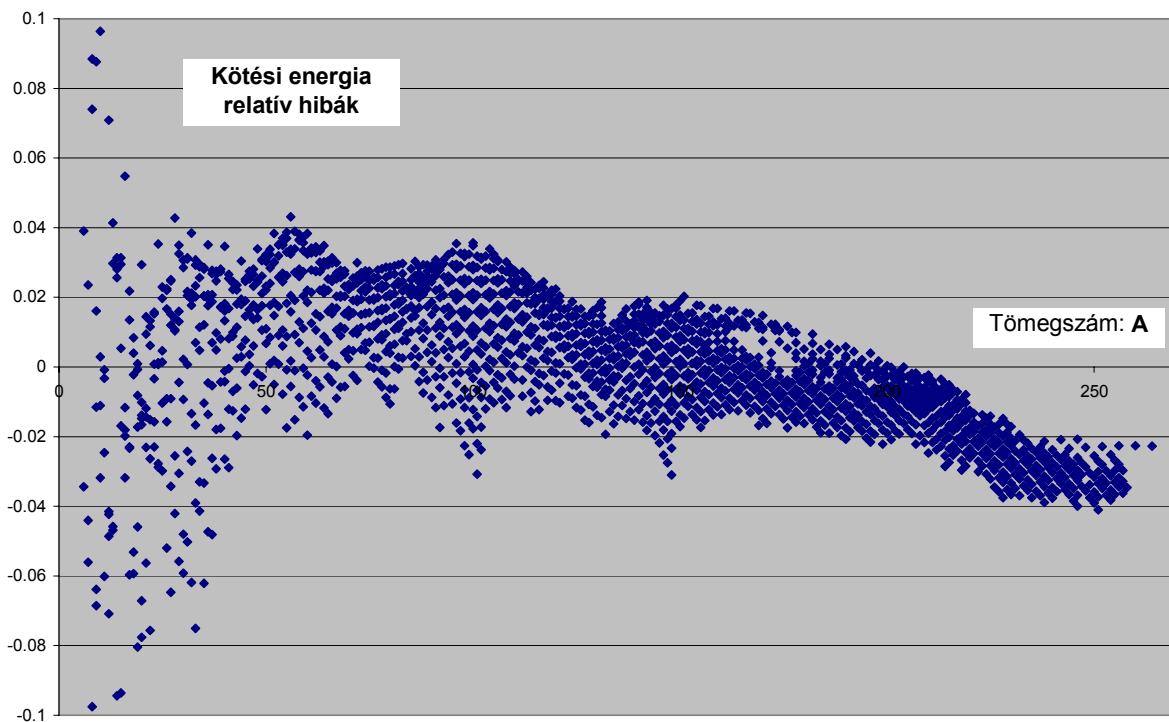
3. Függelék

Az alábbi ábra a cseppmodell illesztését szemlélteti. Az ábrázolt pontok az egy nukleonra eső szeparációs energiákat ábrázolják. A kék pontok a méréseket jelölik, a lila pontok a cseppmodellből számított értékeket mutatják:



4.1. ábra: A cseppmodell illesztése: kék mérés, lila számítás

A cseppmodell alapján számított kötési energiák szórását szemlélteti a 4.2. grafikon a tömegszámok függvényében:



4.2. ábra: A cseppmodell szórása

SZÁMÍTÓGÉPES ILLESZTÉS:

A cseppmodell illesztési programja: **DROPH.BAS** (PowerBasic)

A program Monte-Carlo módszerrel keresi meg az optimális illesztési paramétereket, a legkisebb négyzetek módszerével. A program 1962 számú izotópra végzi a cseppmodell illesztést, az $A = 3$ tömegszámú tríciumot és He3-at is figyelembe véve. A program izotóp adatbázisa: **atomdata.txt** file, amit bekér a program:

<http://www.geocities.com/fhunman/atomdata.txt>

A PowerBasic program listája:

```
REM DROPH.BAS 2009. APRILIS SARKADI DEZSO
REM SEMLEGES ATOMTOMEGEK SZAMITASA
REM PONTOSITOTT CSEPPMODEL
A$ = "==== DROPH.BAS ====="
DEFDBL A-Z: DEFINT I, J, K, A, Z, N, P
DIM A(2000), Z(2000), PP(2000)
DIM MK(2000), MK0(2000), MB0(2000)
DIM RH(2000), RS(2000), SS$(2000)
REM INTERNET PARAMETEREK (MEV):
REM CV = 15.76012#      VOLUME
REM CF = 17.81052#      SURFACE
REM CC = 0.71112#       COULOMB
REM CA = 94.83110#      ASIMMETRY
REM CS = 12.11600#      SPIN
REM =====
REM INTERNET PARAMETEREK (A.U.):
REM CV = 1.691E-2#      VOLUME
REM CF = 1.911E-2#      SURFACE
REM CC = 7.63E-4#       COULOMB
REM CA = 1.0175E-1#     ASIMMETRY
REM CS = 1.3E-2#        SPIN
REM =====
REM ATOMDATA INPUT:
OPEN "ATOMDATA.TXT" FOR INPUT AS #1
KS = 0: DO WHILE NOT EOF(1): K = K + 1
INPUT#1, X1$, X2$, X3$, X4$, X5$, X6$
MK(K) = VAL(X1$): A(K) = VAL(X2$)
Z(K) = VAL(X3$): SS$(K) = X5$
LOOP: CLOSE #1: KS = K
REM PARITAS =====
FOR K = 3 TO KS: Z = Z(K): N = A(K) - Z: DZ = Z / 2 - FIX(Z / 2)
IF DZ > .3 THEN PZ = - 1 ELSE PZ = 1: DN = N / 2 - FIX(N / 2)
IF DN > .3 THEN PN = - 1 ELSE PN = 1
IF PZ > 0 AND PN > 0 THEN PP(K) = 1
IF PZ < 0 AND PN < 0 THEN PP(K) = -1
IF PZ * PN < 0 THEN PP(K) = 0
NEXT
REM INPUT =====
MH = 1.007825      REM HIDROGEN ATOM TOMEG
MN = 1.008665      REM NEUTRON TOMEG
AU = 931.5#       REM 1 AU = C12 / 12 = 931.5 MeV
REM ILLESZTESI PARAMETEREK:
CV0 = 1.536976140121139E-2
```



```

CF0 = 1.587155634472871E-2
CC0 = 6.420759046134837E-4
CA0 = 5.584631026107691E-2
CS0 = 2.706392204713538E-3
REM MAIN =====
KMIN = 3: KMAX = KS
DD = 1E-15#
SW = 1: FK = 0: RSM = 1D15
100 IF INKEY$ = CHR$(83) THEN SW = -1: GOTO 260
J = 0: HS = 0: DX = DD * RND
RANDOMIZE TIMER: KK = KK + 1
IF KK > 500 THEN KK = 0: PRINT 0;
CV = CV0 * (1 + (RND - .5) * DX)
CF = CF0 * (1 + (RND - .5) * DX)
CC = CC0 * (1 + (RND - .5) * DX)
CA = CA0 * (1 + (RND - .5) * DX)
CS = CS0 * (1 + (RND - .5) * DX)
REM =====
FOR K = KMIN TO KMAX
A = A(K): Z = Z(K): N = A - Z
M0 = Z * MH + N * MN
MK = MK(K): MK0 = M0 - MK
EV = - CV * A
EF = CF * A ^ (2 / 3)
EC = CC * Z ^ 2 / A ^ (1 / 3)
EA = CA * (A / 2 - Z) ^ 2 / A
ES = - CS * PP(K) / SQR(A)
MB = M0 + EV + EF + EC + EA + ES
REM HIBASZAMITAS =====
H = (MB - MK) / MK0: RH(K) = ABS(H)
RS(K) = H: MK0(K) = MK0: MB0(K) = M0 - MB
HS = HS + H^2: J = J + 1
NEXT K
JM = J: RS = SQR(HS / (JM + 1))
IF RS >= RSM AND SW > 0 THEN 100
CV0 = CV: CF0 = CF
CC0 = CC: CA0 = CA: CS0 = CS
RSM = RS: FK = FK + 1
REM =====
260 HS = 0: HMAX = 0: HMIN = 1E15#
FOR K = 3 TO KS
IF RH(K) > HMAX THEN HMAX = RH(K): KH = K
IF RH(K) < HMIN THEN HMIN = RH(K): KL = K
NEXT K
AH = A(KH): ZH = Z(KH): NH = AH - ZH
AL = A(KL): ZL = Z(KL): NL = AL - ZL
REM =====
CLS : PRINT : PRINT A$: PRINT
PRINT "R.SZORAS ="; RSM
PRINT "FRISSITES ="; FK
PRINT "R.HIBA MAX ="; HMAX
PRINT "A ="; AH, "Z ="; ZH, "N ="; NH
PRINT "R.HIBA MIN ="; HMIN
PRINT "A ="; AL, "Z ="; ZL, "N ="; NL
PRINT

```

```

PRINT "CV0 ="; CV0
PRINT "CF0 ="; CF0
PRINT "CC0 ="; CC0
PRINT "CA0 ="; CA0
PRINT "CS0 ="; CS0
PRINT
PRINT "DD ="; DD
PRINT "KMIN ="; KMIN; "KMAX ="; KMAX
PRINT "SIKER-ADAT JM ="; JM
PRINT "OSSZ-ADAT KS ="; KS
PRINT "LEALLITAS: SHIFT + S": PRINT
IF SW < 0 THEN 300 ELSE 100
REM =====
300 INPUT"TOVABB? (Yes/No/Adatmentes/Print)";X$
IF UCASE$(X$) = "Y" THEN SW = 1: GOTO 100
IF UCASE$(X$) = "A" THEN 400
IF UCASE$(X$) = "N" THEN 320
IF UCASE$(X$) = "P" THEN 500
320 CLS: PRINT: PRINT: PRINT "***** END *****": END
REM =====
400 OPEN "DROPH.TXT" FOR OUTPUT AS#1
PRINT#1, A$: PRINT #1,
PRINT#1, "R.SZORAS ="; RSM
PRINT#1, "R.HIBA MAX ="; HMAX
PRINT#1, "A ="; AH, "Z ="; ZH, "N ="; NH
PRINT#1, "R.HIBA MIN ="; HMIN
PRINT#1, "A ="; AL, "Z ="; ZL, "N ="; NL
PRINT#1,
PRINT#1, "A.U. PARAMETEREK: ="
PRINT#1,
PRINT#1, "CV0 ="; CV0
PRINT#1, "CF0 ="; CF0
PRINT#1, "CC0 ="; CC0
PRINT#1, "CA0 ="; CA0
PRINT#1, "CS0 ="; CS0
PRINT#1,
PRINT#1, "MeV PARAMETEREK: ="
PRINT#1,
PRINT#1, "CV0 ="; AU * CV0
PRINT#1, "CF0 ="; AU * CF0
PRINT#1, "CC0 ="; AU * CC0
PRINT#1, "CA0 ="; AU * CA0
PRINT#1, "CS0 ="; AU * CS0
PRINT#1,
PRINT#1, "DD ="; DD
PRINT#1, "KMIN ="; KMIN; "KMAX ="; KMAX
PRINT#1, "SIKER-ADAT JM ="; JM
PRINT#1, "OSSZ-ADAT KS ="; KS
CLOSE#1: GOTO 300
500 OPEN "DROPH.PPP" FOR OUTPUT AS#1
FOR K = KMIN TO KMAX
A = A(K): MK0 = AU * MK0(K): MB0 = AU * MB0(K)
PRINT#1, SS$(K), Z(K), A, MK0 / A, MB0 / A, RS(K)
NEXT
CLOSE#1: GOTO 300

```

EREDMÉNYEK:

```
===== DROPH.BAS =====  
R.SZORAS = 3.924601823998651E-2  
R.HIBA MAX = 1.108422743452885  
A = 2      Z = 1      N = 1  
R.HIBA MIN = 2.703198303245972E-7  
A = 204    Z = 88     N = 116  
A.U. PARAMETEREK: =  
CV0 = 1.536976140121139E-2  
CF0 = .0158715563447287  
CC0 = 6.420759046134835E-4  
CA0 = 5.584631026107689E-2  
CS0 = 2.706392204713536E-3  
MeV PARAMETEREK: =  
CV0 = 14.32461762592902  
CF0 = 14.79229051328715  
CC0 = .5984147430997666  
CA0 = 52.04876116332366  
CS0 = 2.522357534793016  
DD = .0000000000000001  
KMIN = 3 KMAX = 1964  
SIKER-ADAT JM = 1962  
OSSZ-ADAT KS = 1964
```

Irodalom

- [1] Simonyi Károly: A fizika kultúrtörténete. *Gondolat*, 1986.
- [2] Györgyi Géza: Elméleti magfizika. *Műszaki Könyvkiadó*, 1965.
- [3] K. N. Muhin: Kísérleti magfizika I. II. *Tankönyvkiadó*, 1985.
- [4] G. Audi, A.H. Wapstra: *Nuclear Physics*, **A595**, vol.4, p. 409-480, 1995.
- [5] C. F. von Weizsäcker *Z. Phys.* **96**, p.431, (1935)