

# Előszó

## *MOTTÓ:*

– Olvasd föl – parancsolta a Király a fehér Nyuszinak.

A fehér Nyuszi feltette pápaszemét.

– Hol kezdjem, felség? – kérdezte.

– Kezdd a kezdetén – mondta a Király –, és leghelyesebb, ha a végén végzed.

*Lewis Carroll: Alice Csodaországban  
(Kosztolányi Dezső fordítása)*

A Természet tanulmányozásának egyik alapvető módszere az anyag szerkezetének egyre mélyebb, azaz egyre kisebb részletekre terjedő tanulmányozása, ami egyre kisebb méretű dolgok vizsgálatát jelenti. A természettudományok történetében egyre újabb részecskék jelentek meg, amelyeket *elemi*-nek gondoltunk: Anaximenesz és Demokritosz négy *atomja* (*a-tom: oszthatatlan*), *atomok/elemek* Daltonnál és Mengyelejevnél, Rutherford *atommagja*, majd a sok, fokozatosan felfedezett „elemi” részecske, amelyek közül a legismertebb az elektron, a proton, a neutron és a neutrínók. 1930 és 1960 között sok száz ilyen részecskét fedeztek fel, tehát az *elemi részecske* új, mélyebb szintjére volt szükség, és megszületett a kvarkmodell. Látni fogjuk, hogy a klasszikus részecskéink közül az elektron és a neutrínók valóban elemiek, de a proton és a neutron összetett részecske. Ezt a fejlődést a standard modell (SM) megszületése zárta le a hatvanas évek végén, és máig valamennyi kísérleti adat igazolni látszik.

Tankönyvünkben összegezzük a részecskefizika jelenlegi állását bevezető szinten, fizikushallgatók számára. Az első három részt (legnagyobb részt Horváth Dezső műve) haladó BSc- és kezdő MSc-hallgatóknak szánjuk, amíg a negyedik, elméleti rész (Trócsányi Zoltán tollából) részecskefizikára szakosodó haladó MSC- és kezdő PhD-hallgatóknak szól, megkísérelve a bevezetést a meglehetősen bonyolult matematikai formalizmusba. A kétlépcsős megközelítésben ugyanazoknak a jelenségeknek egyre mélyebb megértését kínáljuk. Célunk az, hogy átfogó és remélhetőleg felfogható képet nyújtsunk a témáról olyan szinten, amelyet heti 10 órában egy akadémiai év alatt el lehet sajátítani. Ha az olvasónak helyenként olyan érzése támad, hogy nem teljes az adott információ, az nem az elmélet, hanem a szerzők hibája. Az elmélet egészen pontos, és előrejelzéseit minden konkrét kísérleti adat a legnagyobb pontossággal igazolja. A kísérleteket átfogóan összeg-

zi az évente megújított és kétévente újra publikált *Particle Physics Review* [Patrignani et al., 2016]; a mélyebben érdeklődő hallgatónak elméleti bevezetesként Halzen és Martin [Halzen and Martin, 1984], Collins, Martin és Squires [Collins et al., 1989], valamint Perkins [Perkins, 1982] könyveit ajánljuk. Az utóbbi szemlélteti a klasszikus alapvető kísérleteket is.

A kísérleti részecskefizikát nagyenergiás fizikának is szokták hívni, mert a nagy energiájú részecskék ütköztetése a kísérletek alapvető módszere. Az energiát *elektronvolt*, *eV* egységben mérjük: erre tesz szert egy elektron 1 V feszültségen való áthaladásakor. Az anyag finomszerkezetének kutatása az optikai mikroszkóppal kezdődött; annak térbeli felbontását az  $\sim 1$  eV energiájú látható fény  $10^{-5}$  m-es hullámhossza korlátozta a baktériumok méretére. Kisebb részletek megismeréséhez rövidebb hullámhossz szükséges: az atomok ( $10^{-10}$  m) vizsgálatára röntgen- vagy elektronnaláb keV energiával (1 keV = 1000 eV), az atommagára ( $10^{-14}$  m) már MeV ( $10^6$  eV) és GeV ( $10^9$  eV) közöttiekre, amíg az eddig megismert legkisebb összetevőkére, a pontszerűnek feltételezett, de  $10^{-18}$  m-nél kisebb kvarkokéra már TeV ( $10^{12}$  eV) felettire. Nagyobb energia rövidebb hullámhosszt, azaz kisebb részletekre való érzékenységet jelent, az anyag szerkezetének finomabb tanulmányozását. Jelen tudásunk szerint az anyag legkisebb alkatrészei, a standard modell alapvető részecskéi valóban elemiek: pontszerűek és belső szerkezet nélküliek.

Mennyiség	MKS	részecskefizika	természetes egység	$\hbar = 1$ $c = 1$
Energia	1 J	$6,24 \cdot 10^9$ GeV	GeV	GeV
Lendület	1 kg m/s	$5,61 \cdot 10^{26}$ GeV/c	GeV/c	GeV
Tömeg	1 kg	$5,61 \cdot 10^{26}$ GeV	GeV/c <sup>2</sup>	GeV
Távolság	1 m	$5,07 \cdot 10^{15}$ GeV <sup>-1</sup>	$\hbar c$ /GeV	1/GeV
Idő	1 s	$1,52 \cdot 10^{24}$ GeV <sup>-1</sup>	$\hbar$ /GeV	1/GeV
Elektron-töltés	$1,6 \cdot 10^{-19}$ C	$\sqrt{4\pi\epsilon_0\alpha\hbar c}$	$\sqrt{4\pi\epsilon_0\hbar c\alpha}$	$\sqrt{4\pi\epsilon_0\alpha}$

1. táblázat. A részecskefizika természetes egységei:  $\alpha \sim 1/137$  a finomszerkezeti állandó és  $\epsilon_0 = 8,8 \cdot 10^{-12}$  F/m a vákuum elektromos permeabilitása. Az utolsó oszlopban csak energiaegységek jelennek meg, ami lehetővé teszi, hogy *tömeg*egységeket használjunk, a hosszúság egysége például GeV<sup>-1</sup>

Könyvünkben a részecskefizika *természetes* egységrendszerét<sup>1</sup> alkalmazzuk, amelyben a vákuumbeli fénysebesség és a redukált Planck-állandó egységnyi:  $c = 1$ ,  $\hbar = h/(2\pi) = 1$ ; ebben a rendszerben a távolság és az idő

<sup>1</sup> Egy tudományág természetes egységei más tudományágak művelői számára egészen bizarrak lehetnek!

egysége egyaránt inverz energia, a részecskefizikában meghonosodott rendszerben  $\text{GeV}^{-1}$  (1. táblázat).

Az 1. táblázat egységeit használjuk tehát két kivétellel. Az első a lendület, amelyet ugyan energiaegységben, például  $\text{GeV}$ -ben mérnénk, de a félreértés elkerülése végett  $\text{GeV}/c$ -ben írjuk ki. A másik az elektromos töltés, amelyre többnyire csak a hagyományos,  $\sqrt{4\pi\alpha}$  jelölést tekintjük, azaz  $\epsilon_0 = 1$ -et használunk, de ezek egyike sem okozhat zavart a tárgyalásban.

Tankönyv lévén, nem monográfia, csupán a tudománytörténeti szempontból kiemelt jelentőségű eredeti publikációkra hivatkozunk. Az olvasó, érdeklődési szintjének megfelelően, minden kérdésére választ talál a világhálón, bár elsősorban angol nyelven. Egyszerű magyarázatokat a Wikipédia (<http://en.wikipedia.org/> vagy <https://hu.wikipedia.org/wiki/>), a Hyperphysics (<http://hyperphysics.phy-astr.gsu.edu/hbase/hph.html>) és a Google Scholar (<http://scholar.google.com/>) kínál, az inSpire (<http://inspirehep.net/>) viszont a részecskefizika teljes publikációs adatbázisát tartalmazza könnyen kereshető formában. A már korábban emlegetett *Particle Physics Review* [Patrignani et al., 2016] is kitűnő – és főleg megbízható – áttekintő cikket tartalmaz. A részecskefizikában a megbízhatóság különösen fontos, hiszen a fizikai kutatás nemzetközi élvonalát képviseli, tehát tele van spekulációval, ellenőrizetlen ötlettel és nem megerősített (többnyire később meg is cáfolt) kísérleti eredménnyel.

A szerzők kutatómunkájuk és a jelen könyv kiadásának támogatásáért köszönettel tartoznak az Országos Tudományos Kutatási Alapprogramoknak (OTKA K101482, K103917, K109703 pályázatok), az új Széchenyi-tervnek (TÁMOP 412D) és a Magyar Tudományos Akadémiának.