

AZ ATOMENERGIA ALKALMAZÁSÁRÓL

– NEM MŰSZAKI SZEMMEL

Trampus Péter
Debreceni Egyetem Műszaki Kar

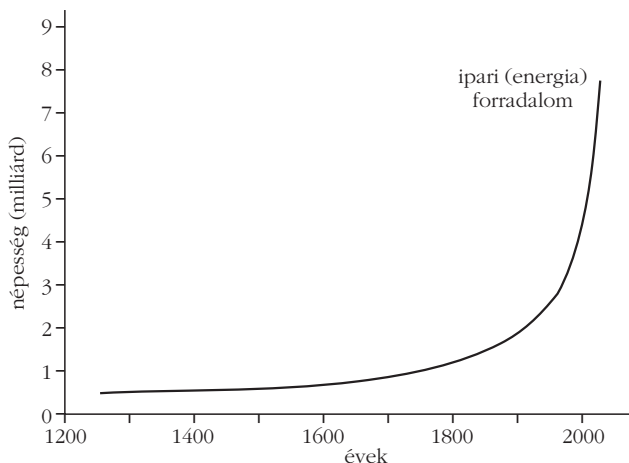
Az atomerőművek azon nyilvánvaló adottságuk eredményeként, hogy működésük közben nem bocsátanak ki üvegházhatású gázokat, hozzájárulnak a globális éghajlatváltozás ütemének lassításához. Abhoz, hogy hozzájárulásuk a jelenleginél hatékonyabb legyen, az atomerőművek alkalmazásával kapcsolatosan olyan akadályokat is le kell győznie az emberiségnek, amelyek elsősorban nem műszaki, gazdasági, hanem más természetű – etikai, pszichológiai, szociális, kulturális – okokra vezethetők vissza. Az atomenergia alkalmazásának ezek a szempontjai gyakran nem kapnak akkora figyelmet, mint a tisztán műszaki, gazdasági vagy éppen proliferációs szempontok. A cikkben – elsősorban a nemzetközi fórumokon elhangzottak, valamint vezető folyóiratokban publikáltak alapján – sorra vesszük és röviden elemezzük ezeket a szempontokat, majd következtetéseket vonunk le az atomenergia jövőbeni alkalmazására nézve.



Az emberi társadalom működése – hasonlóan más, dinamikus folyamatokból felépülő rendszerekhez – külső energiát igényel. Egészen a 19. század kezdetéig a külső energia forrása – közvetlen vagy közvetett formában – a Nap volt. A 19. század kezdetén váltak tömegesen elérhetővé a fosszilis primerenergia-hordozók, ami megváltoztatta az életet, és jelentős mértékben hozzájárult – egyebek mellett – a népesség exponenciális növekedésének elindulásához, 1. ábra.

Ma az emberiség energiaellátással kapcsolatos problémája (divatos kifejezéssel élve: kihívása) kettős. Az egyik problémát a világ népességének és a fejlődő országok életszínvonalának folyamatos növekedésével együtt járó energiaigény kielégítése jelenti. A másik probléma a globális éghajlatváltozás kezelése. A cikk általánosságban az energiaproblémán, és kifejezetten az atomenergia-alkalmazás műszaki-gazdasági szempontjain túlmutató kérdéseket kísérli meg összefoglalni.

1. ábra. A világ népességének növekedése a 13. századtól



A népesség növekedésének kérdése

Az emberiségnek a Földre gyakorolt hosszú távú hatását a népesség és az életmód határozza meg. Ha elfogadjuk azt, hogy az „ökológiai lábnyom” jól definiálja azt a területet (földet, vizet, keletkező hulladék elhelyezését stb.), amely egy ember életéhez szükséges, akkor kijelenthető, hogy csaknem három Föld nagyságú bolygó kellene ahhoz, hogy a 2050-re prognosztizált népesség a jelenlegi életmód és fogyasztási szokások megtartásával folytathassa életét. Ezzel szemben abban az esetben, ha az emberiség alapvetően megváltoztatná életmódját és fogyasztási szokásait, akkor akár 10 milliárd ember is élhetne a Földön. Ennek az lenne a feltétele, hogy lakásaik nem lennének nagyobbak, mint a japán miniatűr hotelek (*capsule hotels*), rizs-alapú vegetáriánus diétán élnének, nem vagy ritkán utaznának, a világhálón kommunikálnának, pihenési és szórakozási szükségleteiket a virtuális valósággal elégítenék ki és így tovább. A felvázolt tendencia egyébként illeszkedik a jelenlegi környezetbarát fejlődési tendenciához (miniatűrízálás, információs technológia), megvalósulása mégis erősen kétséges [1]. Ezért az emberiségnek szembe kell néznie a népességnövekedés problémájával. Amennyiben feltételezzük, hogy a fejlett országok energiaigénye nem növekszik jelentős mértékben, ez akkor is a jelenlegi energiaigény megkétszereződését-megháromszorozódását jelentheti az évszázad közepére.

Annak ellenére, hogy az energiaprobléma egyik oka a népesség növekedése (ami a világ különböző országaiban egymástól jelentős mértékben eltérő tendenciát mutat), ritka annak a következtetésnek a hangoztatása a tudósok körében, hogy magát ezt az okot kellene kiküszöbölni. A népesség stabilizálásának kérdéséről általában nem beszélnek, aminek érthető politikai, humanitárius és egyéb okai lehetnek, de a hallgatás talán azzal is magyarázható, hogy az érintett tudósok (fizikusok, mérnökök) nem szívesen lépnek tudományterületük határain túlra. Nem beszélni a kérdésről ebben a megközelítésben viszont annyit jelent, mint amikor az orvos aszpirint ír fel rákbetegnek, mondta *Bartlett*, egy amerikai fizikus, aki a jelenséget a tudósok csendes hazugságának nevezte [2]. Bartlett javaslata, hogy amennyiben elfogadjuk azt, hogy a probléma gyökere valóban a népesség növekedése (amit ő meggyőződéssel állít), akkor a legfontosabb megvitatandó kérdés az, hogy mi ad jobb általános megoldást: a népesség stabilizálásán dolgozni, vagy a folyamatosan szűkülő forrásokat a folyamatosan növekvő népesség között elosztani? Ebben a kérdésben felelőssége van a fizikustársadalomnak. A kérdés ilyenén felvetése természetesen a legszükségesebb reakciókat váltotta ki, lásd a *Physics Today* 2004. évfolyamának későbbi olvasói leveleit.

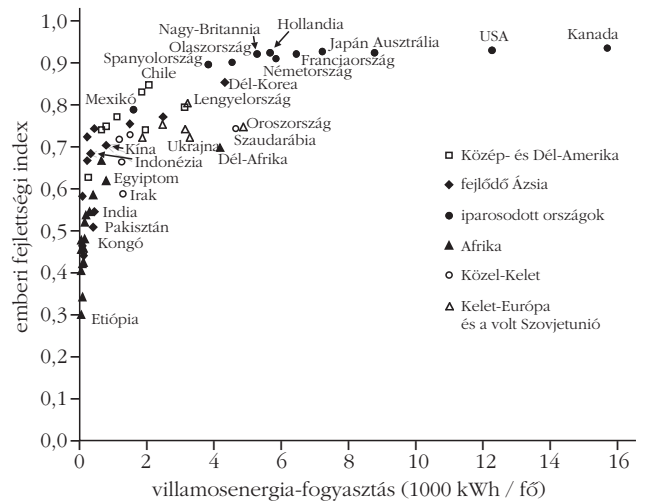
Az emberi fejlettség és a villamos energia

Azt gondolhatnánk, hogy több energia felhasználása nagyobb jóléttel párosul, ami azonban csak általánosságban igaz. Ha egy ország lakossága növekszik, a többletenergiát a nagyobb népesség azonos (vagy csökkenő) életszínvonalon tartására is fel lehet használni. Az életszínvonal növelésére csak abban az esetben lehet esély, ha a többletenergia előállítása és felhasználása hatékonyabb a jelenleginél. Az ENSZ a tagországai statisztikai mutatóiból létrehozta az „emberi fejlettségi” indexet (*Human Development Index, HDI*) [3]. A HDI egy ország átlagos eredményeit az emberi fejlődés következő területeinek helyzetét szintetizálva fejezi ki: hosszú és egészséges élet, tudás és tisztességes életszínvonal. A 2. ábra a világ 60 legnépesebb országának HDI-jét mutatja a villamosenergia-felhasználásuk függvényében (az ábrán olyan országok szerepelnek, amelyekre létezik HDI). Az ábrából látható, hogy a HDI körülbelül 4000 kWh éves fogyasztás felett egy állandósult magas értéket mutat. Annak ellenére, hogy minden ország helyzete egyedileg kezelendő, ez a korreláció évtizedekre visszamenőleg érvényesnek tűnik. Mind ebből az a következtetés vonható le, hogy a szegény országok jólétének növelése jelentősen nagyobb energiafogyasztást fog igényelni a jelenlegi előrejelzéseknél [4].

Az éghajlatváltozás globális természete és hatása mára megkérdőjelezhetetlen. Azt is látni kell azonban, hogy a világ országai az ok kiváltásában nem egyformán vettek részt, ugyanis a gazdag (OECD) országok bocsátották ki az üvegházhatású gázok többségét. A szegény országok érintettsége viszont fokozottabb, amit földrajzi helyzetük, a mezőgazdaságtól való erősebb függésük és – természeti erőforrásaik hiányában – sebezhetőségük magyaráz. Ez a helyzet kettős egyenlőtlenségre mutat rá: egyrészt a gazdag országok felelősségére a jelenlegi helyzet miatt, másrészt, hogy a következmények erősebben érintik a szegény országokat [5]. Ennek az egyenlőtlenségnek a kezelése nem nélkülözheti az etikai megközelítést.

Az energiaigények kielégítésének hierarchiája

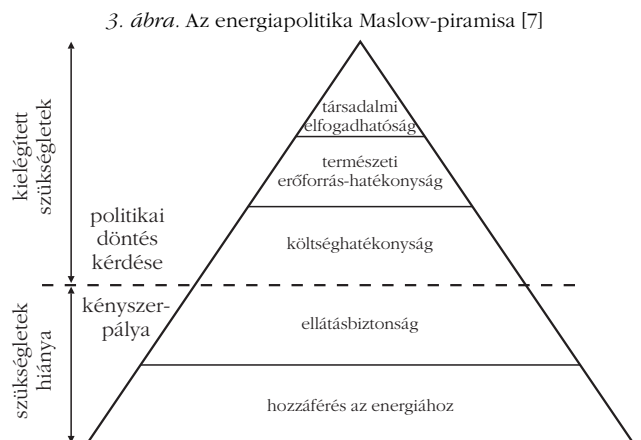
Maslow, egy amerikai pszichológus a múlt század közepén alkotta meg elméletét az emberi igények motívációs szerkezetéről. Az igényeket csoportokba rendezte és definiálta ezek hierarchiáját, amit vizuálisan a róla elnevezett Maslow-piramis szemléltet [6]. Ennek lényege, hogy az ember csak a fizikai és szellemi jóléttel kapcsolatos alacsonyabb rendű igényei kielégítését követően törődik személyisége fejlődésének magasabb rendű igényeivel. Visszatekintve az egyes nemzetek energiapolitikájának kialakulásra és fejlődésére, megállapítható, hogy a piramismoddal alkalmazható az energiapolitikára is. Csak miután az energiához való hozzáférés biztosított volt, került át a hangsúly az ellátás biztonságára, majd csak ezt köve-



2. ábra. Emberi fejlettségi index a villamosenergia-fogyasztás függvényében [4]

tően vették figyelembe az egyes országok a költségek hatékonyságát. Az iparilag fejlett országok az 1970-es évek végétől kezdtek figyelni a természeti erőforrásaik hatékonyságának kérdésére, és csak ezután a társadalmi elfogadhatóságra. A 3. ábra az energiapolitika Maslow-piramisát mutatja be [7]. Amennyiben érvényesnek tekintjük az emberi igények hierarchiájával való analógiát, akkor nyilvánvaló, hogy az egyes prioritások közötti egyensúly kialakítása politikailag korlátozottan, és kizárólag a magasabb rendű társadalmi igények biztosítása esetében lehetséges.

Az előzőekből következik, hogy ameddig az ellátásbiztonság dominál (vagy jelen van) a nemzetközi energiapolitika színpadán, addig erősen kétséges a nemzetközi megegyezés a magasabb rendű igények kérdésében (*Kyoto-jegyzőkönyv*). Tény, hogy világszerte még mindig körülbelül másfél milliárd ember nem jut villamos energiához. Fontos kérdés az ellátásbiztonság fogalmának helyes értelmezése. A közvélemény ellátásbiztonsággal kapcsolatos felfogása ugyanis nemcsak tényeken nyugodhat, hanem bizonyos mértékben érzelmi alapokon is. Mindaddig, amíg az ellátásbiztonság megfelelő szintjében nincs egyetértés, addig a magasabb rendű igények tükrében megkérdőjelezhető érdekcsoportok a „félelem takti-



3. ábra. Az energiapolitika Maslow-piramisa [7]

káját” alkalmazva azt sugallhatják, hogy az ellátásbiztonság adott szintje nem megfelelő, és a figyelmet a magasabb rendű igényekről áterelhetik pusztán az ellátásbiztonság kérdéseire.

Szendioxid-kibocsátás nélküli technológiák

Évente 18 000 TWh villamos energiát állítanak elő, ami gigatonnában mérhető mennyiségű szén-dioxid kibocsátásával jár. A széndioxid-kibocsátás nélküli technológiák közül a vízerőművek, az atomerőművek és a szélerőművek sorolhatók az érett technológiák közé. A képet a biomassa, a geotermikus energia, továbbá a Nap és az óceán energiája teszi teljessé. Nyilvánvaló, hogy a növekvő energiaigény kielégítésére és a globális éghajlatváltozásra adandó „globális” válasznak ezekre a technológiákra kell építenie. Részigazságot tartalmaz, és az atomenergiával szembeni előítéllettel terhelt az a megfogalmazás, amelyik a globális éghajlatváltozás válaszát a megújuló energiaforrásokban látja.

A széndioxid-kibocsátás nélküli technológiák értékelése több szempontból lehetséges és szükséges. Ilyen szempontok például: a primerenergia-hordozó, valamint a technológia rendelkezésre állása, a létesítés és üzemeltetés költsége, az energiaátalakítás hatásfoka, környezeti, biztonsági, elfogadási szempontok stb. Erről számtalan értékelést, rangsorolást lehet olvasni, akár magyar nyelven is – például [8, 9] –, amelyeket azonban befolyásolhatnak a különböző érdekcsoportok (utalunk itt az előző pontban írottakra). A közelmúlt egyik tárgyilagos elemzése olvasható a [10] hivatkozásban. Meggyőződésünk, hogy az atomenergia magában hordozza annak lehetőségét, hogy tartósan részt vállaljon az energiaprobléma alapvető kérdéseinek megoldásában.

Az atomenergia alkalmazásának ellenzése

Az atomenergia békés alkalmazását kezdettől fogva árnyak kísérik, ami kihat a technológia alkalmazása jövőjének a megítélésére. Az alkalmazásra a legsötétebb árnyékot a Hirosimára és Nagaszakira ledobott bombák vetik. Ennek eredményeként az atomenergiát a világ kezdettől fogva nem a tudomány egyedülálló vívmányának tekintette, mert az emberekben az atomenergia fogalmával való találkozás elsősorban az atomháborútól való félelmet asszociálta. Ezt az asszociációt csak erősítette a múlt század közepén a hidegháború atomfegyverkezési versenye, majd megkoronázta az atomenergia-ellenes mozgalmak megjelenése a nyugati demokráciákban. Ez utóbbiaknak sokkal inkább társadalmi mozgatórugói voltak, mint az atomenergia békés alkalmazásának tényleges elutasítása. A mozgalmak az Amerikai Egyesült Államokban a kormány külpolitikáját ellenző mozgalmakból nőttek ki, Nagy-Britanniában a szociálpolitikai problémák adtak lendületet nekik, és szinte mindenütt a pop-kultúra részeivé váltak. Mind-

ezeket kiegészítették a 90-es évek energiaipari liberalizálási és privatizálási folyamatai, amelyeket úgy lehet röviden jellemezni, hogy a közgazdász gondolkodás úrrá lett a mérnöki gondolkodáson [11]. Az atomerőmű-építkezések világméretű megtorpanásához tehát több különböző tényező hozzájárulása kellett, amelyek együttes hatása lényegesen jelentősebb volt, mint például a TMI atomerőmű balesete, ami egyébként ugyan ebben az időszakban történt.

Az atomenergia ellentmondásos megítéléshez az előző – elsősorban érzelmileg és politikailag motivált – okokon túl több, a társadalom szemében irracionális elem is hozzájárul. Ezek a tudománynak (elsősorban a fizikának) a huszadik század első felében lezajlott azon jelentős szemléletváltásával hozhatók összefüggésbe, amely nélkül a nukleáris energia sem katonai, sem polgári alkalmazást nem nyert volna. A viszonylag egyszerűen befogadható newtoni mechanika mellett megjelent a hétköznapi ember szemében misztikus einsteini relativitáselmélet és a kvantummechanika. Az érthető determinisztikus szemlélet mellett megjelent a jelenségek valószínűségi szemlélete és az ennek törvényszerűségeit leíró elmélet. Az ellentmondásos megítéléshez jelentős mértékben hozzájárul az is, hogy a nukleáris technológia olyan technológia, amelyhez hozzátartozik a radioaktív sugárzás. Megjelent tehát egy olyan veszélyforrás, amit az emberi érzékszervek nem észlelnek. A példaként említett jelenségek a tudósok számára érthetőek, de a hétköznapi emberek döntő többsége számára felfoghatatlanok, ezért gondolkodásukban zűrzavart okoznak. A zűrzavar mesterségesen fokozható, lásd az előző bekezdésben írottakat. Ennek a zűrzavarnak a társadalmi gondolkodásban való tartós uralkodása szorosán összefügg az ismeretek hiányával, ami felhívja a figyelmet – a természettudományos) oktatás jelentősége mellett – a korrekt és mindenki számára érthető tájékoztatás szükségességére. Az előzőek alapján talán érthető, hogy egy ilyen komplex kérdésben nehezen képzelhető el társadalmi méretű egyetértés. A társadalmi egyetértés hiányát pótolhatja politikai akarat, ami viszont megoszthatja a társadalom eltérő módon gondolkodó csoportjait.

Érdeemes elgondolkodni azon, hogy a nyugati világban megtorpan (jelenleg újraéledésének jeleit mutató) atomenergia-felhasználás miért nem vesztette el hitelét Ázsiában. Különösen érdekes a kérdés felvetése Japán esetében, amely elszenvedte az egyetlen atomcsapást. Ugyan eltérő berendezkedésű országokról van szó, ha Indiát, Kínát, Koreát vagy Japánt tekintjük, de nem hagyható figyelmen kívül az a hatalmas kulturális örökség, amely ezen országokra jellemző. Indiai tudósok szerint az energiaprobléma megoldásának záloga a keleti és nyugati filozófia alappilléreinek együttes, előítélet-mentes és kiegyensúlyozott figyelembe vétele lehet [12], ami hozzájárulhat egy valódi paradigmaváltáshoz. Itt energia, élelem, ivóvíz, föld, egészség komplex módon kezelendő, ami az etikai, ökológiai, emberi jogi kérdések együttes figyelembe vételével jár. A kérdés ilyen megközelítésének

igényét alátámasztja, hogy érzékelhetők a jelei annak, hogy ahogyan a 20. század műszaki fejlődésének gyökerei Európában voltak, úgy a 21. század fejlődését Ázsiában fogják írni.

Következtetések

Az energiaprobléma megoldása és ezen belül az atomerőművek hosszú távú szerepének megszilárdítása jelentős erőfeszítéseket igényel az emberiségtől. Az erőfeszítéseket több síkon kell kifejteni. Egyrészt az energiaprobléma nem kezelhető más globális problémáktól elszigetelve, másrészt nem szűkíthető le egyszerű műszaki vagy gazdasági kérdésekre. Egyre többször találjuk magunkat szembe a kérdés etikai vonatkozásaival, amelyek kezelése nélkül a megnyugtató megoldás nehezen képzelhető el. Úgyszintén megkerülhetetlenek azok a filozófiai vonatkozások, amelyek a keleti és nyugati kultúra egymástól eltérő gyökerein alapulnak. Az atomenergiától való indokoltan félelem eloszlatására előrelépés szükséges az oktatásban és a tárgyilagossá információs szolgáltatásban. A probléma sikeres megoldásához, egyúttal az atomenergia jövőjéhez az egész világra kiterjedő (globális)

együttgondolkodásra van szükség. A globális együttgondolkodás feltétele egy „fejlett” civilizáció, és a fejlett jelzőt itt nem gazdasági vagy ipari, hanem annál lényegesen szélesebb értelemben kell érteni.

Irodalom

1. M. Rees: *Our Final Century*. William Heinemann, London, 2003.
2. A. A. Bartlett: Thoughts on Long-Term Energy Supplies: Scientists and the Silent Lie. *Physics Today*, July 2004, 53–55.
3. <http://hdr.undp.org/en/statistics/>
4. S. G. Benka: The Energy Challenge. *Physics Today*, April 2002, 38–39.
5. *The Economics of Climate Change: The Stern Review*. Cambridge University Press, 2007.
6. A. Maslow: A theory of human motivation. *Psychological Review* (1943) 370–396.
7. C. W. Frei: The Kyoto protocol – a victim of supply security? or: if Maslow were in energy politics. *Energy Policy* 32 (2004) 1253–1256.
8. Vajda Gy.: *Kockázat és biztonság*. Akadémiai Kiadó, Budapest, 1998.
9. Fazekas A. I.: *Villamosenergia-termelési technológiák jellemzői*. Magyar Atomforum Egyesület, Budapest, 2005.
10. Q. Schiermeier, et al: Electricity without Carbon. *Nature*, 14 August 2008, 816–823.
11. W. J. Nuttall: *Nuclear Renaissance: Technologies and Policies for the Future of Nuclear Power*. Institute of Physics Publishing, London, 2005.
12. B. Raj: *Ethics, Equity and Energy*. Presentation to Academia NDT International, Shanghai, China, 26 October 2008.

IGAZÁBÓL MI VAN AZ LHC-VEL?

Horváth Dezső
MTA KFKI RMKI, Budapest
és ATOMKI, Debrecen

Felfedezés és pontosság

A protonütköztetőknek óriási a felfedezési potenciálja. A CERN Nagy hadron-ütköztetője (Large Hadron Collider, LHC) hamarosan protonokat fog ütköztetni 7 TeV¹ energián. A protonban úszó alkatrészek, a kvarkok és a kölcsönhatásukat közvetítő gluonok sokféle energiával ütközhetnek, ezért rengeteg információt adnak az elérhető energiatartományban lehetséges folyamatokról. A gyenge kölcsönhatást közvetítő W[±] és Z⁰ bozont a CERN proton-antiproton ütköztetőjénél fedezték fel 1983-ban, és komoly reményeket fűzünk a Higgs-bozon és egyéb új fizika felfedezéséhez az LHC-nél.²

Habár erről több cikkben is írtam már [1], a továbbiak jobb megértéséhez célszerű felidézni a CERN mostani gyorsítórendszerét (1. ábra).

A Standard modell diadalmenetét a két elektron-pozitron ütköztetőnek köszönhetjük, a CERN LEP és a stanfordi SLC gyorsítóknak. Valamennyi komoly ré-

szecskefizikai kísérlet több ezer adata igen jól, statisztikus szóráson belül illeszthető a Standard modell 19 paraméterével (a neutrínók tömegét ilyenkor el szoktuk hanyagolni, annyira kicsik). A modell valamennyi elemi részecskéjét, a leptonokat, kvarkokat és a kölcsönhatásokat közvetítő bozonokat sikerült kísérletileg megfigyelni és azonosítani. A Higgs-bozon az egyetlen még nem megfigyelt alkotóelem, de az is egészen jól behatárolt: a Standard modell legújabb illesztése [2] szerint tömege nagy valószínűséggel 114 és 160 GeV között van.

De miért van szükségünk még nagyobb gyorsítókra (és egyáltalán részecskefizikusokra :-), ha egyszer a Standard modell olyan csodálatosan leírja a Természetet?

Amint azt a Standard modellről szóló cikkemben [3] jómagam és sokan mások leírták, az elméletnek van egy sereg elvi problémája. Hogy csak néhányat említsünk: nincs meg a Higgs-bozon és sokmindent nem értünk: nem tudni, miért van éppen három fermion-család, mi alkotja a Világegyetem sötét anyagát, hova lett az ősrobbanás után az antianyag és mitől van a gyenge kölcsönhatás bal-jobb aszimmetriája [4]. Rendkívül zavaró az úgynevezett hierarchia-probléma: a Higgs-bozon tömegének 100 GeV nagyságrendű értékét természetellenesen nagy, 10 nagyságrenddel nagyobb értékek különbségeként kapjuk meg.

¹ 1 eV (elektron-volt) energiát nyer egy elektron 1 V feszültség hatására. Az atomfizikai folyamatok (röntgensugárzás) energiája kilo-eV (1 keV = 10³ eV) körüli, a részecskefizikusok giga-eV-ban (1 GeV = 10⁹ eV) gondolkodnak, a legújabb nagy részecskegyorsítók (az amerikai Tevatron és a CERN LHC-je) tera-eV (1 TeV = 10¹² eV) energiát érnek el.

² Csoportunk tevékenységét a CMS-kísérletben az NK67947. számú NKTH–OTKA pályázat támogatja.