

# ANYAG ÉS ANTIANYAG (AVAGY ANGYALOK ÉS DÉMONOK?)

– egy hollywoodi film aláfestése

Horváth Dezső

RMKI, Budapest és ATOMKI, Debrecen

*Dan Brown Angyalok és démonok* című regényéből film készült Tom Hanks főszereplésével. Mivel a könyv részben a CERN (nemlétező) titkos földalatti laboratóriumában játszódik, ahonnan terroristák antianyagot lopnak a Vatikán felrobbantására, a CERN felajánlotta, hogy a film megfelelő részeit a laboratóriumban forgassák, és CERN-i fizikusok a bemutatóhoz kapcsolódóan előadásokat szerveztek az antianyag-ról. A CERN már a könyvnek is honlapot szentelt, a filmnek viszont a honlapon kívül még egy tudományos ismeretterjesztő kiállítást is.

## Antianyag és CPT-invariancia

Amikor Dirac felírta híres egyenletét a fermionok (feles perdületű részecskék, mint például az elektron) mozgásáról, kétféle megoldást kapott, pozitív és negatív energiájút. Habár ez a 20. század legfontosabb fizikai felfedezéseihez tartozik, Diracot valamilyen értelemben szépészeti megfontolások vezették: relativisztikusan invariáns, azaz a teret és időt egységesen kezelő, lineáris egyenletet keresett és talált. Részecske és antirészecskeje, a töltés előjelen kívül, minden mérhető tulajdonságában egyezik. Dirac a negatív energiájú megoldásokat a pozitívak hiányának értelmezte, feltételezve, hogy a negatív energiájú állapotok a természetben eleve betöltöttek, de ha kiemelünk az egyikből egy részecskét, a keletkező lyuk lesz az antirészecske. Ezt az értelmezést, amely hasonlít a félvezetők sokkal később felfedezett vezetési mechanizmusához, a fizika fejlődése meghaladta.

Nem sokkal Dirac elméletének közlése után, 1932-ben Anderson kozmikus sugarakban kimutatta a pozitront, az elektron antirészecskéjét; 1933-ban Dirac (*Schrödingerrel* együtt), majd 1936-ban Anderson is megkapta a fizikai Nobel-díjat. Számos tudománytörténeti összefoglalót találunk *Vértes Attila* könyvében [1].

Az évek során a *Fizikai Szemle* számos cikkben foglalkozott az anyag és antianyag teljes ekvivalenciáját kimondó CPT-invariancia elvével [2–4]. Arra, hogy ismét ilyesmivel kössem le a tisztelt Olvasót, az *Angyalok és démonok* című, májusban kijött film ad talán elegendő indokot.

A CPT-invariancia elve szerint, ha tükrözzük egy szabad részecske töltését (C, mint *charge*), vala-

mint ellentétes előjelűre fordítjuk a térkoordinátáit (P, mint *paritás*) és az idő irányát (T, mint *time*), akkor annak mérhető tulajdonságai – a töltés-jellegű kvantumszámok előjelen és a perdület irányán kívül – nem változhatnak meg. Mivel a töltéstükrözés során a részecske antirészecskévé változik, ez azt jelenti, hogy a szabad antirészecskék úgy kezelhetők, mint időben és térben ellenkező irányban mozgó részecskék.

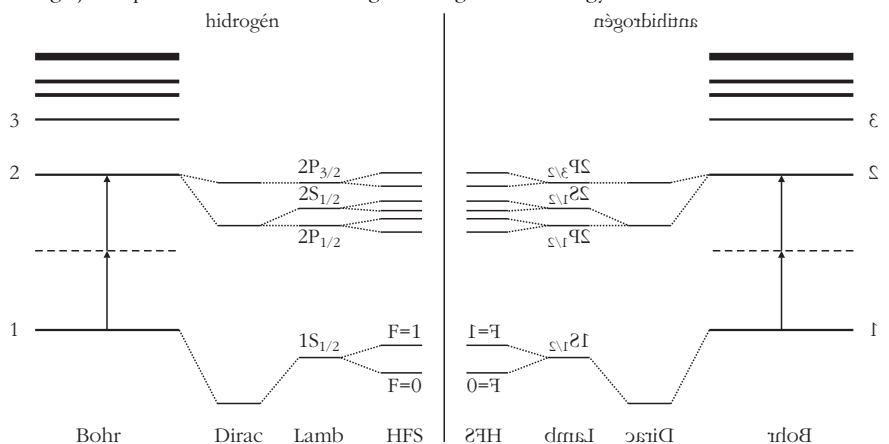
Részecske és antirészecske kölcsönhatása kölcsönös szétsugárzáshoz, annihilációhoz vezet. A pozitron két-fotonos annihilációját elektronon, például, úgy írjuk le, mintha a képbe bejönne egy elektron, az annihiláció térbeli pontjában és idejében kibocsátana két gamma-fotont, majd térben és időben kihátrálna a képből.

## A CPT-invariancia kísérleti ellenőrzése

A CPT-szimmetriát napjainkig minden kísérleti megfigyelés messzemenően alátámasztja, és szerepe annyira alapvető a térelméletben, hogy sokak szerint nem is lehet kísérletileg vizsgálni; látszólagos kis eltérések megfigyelése esetén inkább hihetünk valamelyik megmaradási törvény kicsiny sérülésében, mint a CPT-szimmetriáiban. Ugyanakkor a fizika nagy rejtélye, miért nem látunk antianyag-galaxisokat, miért képződött az ősrobbanás után egy billiomod résszel több anyag, mint antianyag, hogy itt maradjon Világegyetemünk anyagául.

A szimmetriasértés nem idegen a részecskefizikától [5]. Mint tudjuk, a gyenge kölcsönhatás maximálisan sérti a paritás-megmaradást eredményező tükrörszimmetriát, és kis mértékben sérti a töltés- és tértükrözéssel szembeni CP-invarianciát is. A standard modellbe be kell vezetnünk a Higgs-mezőt [6, 7], amely sérti a

1. ábra. Hidrogén és antihidrogén energiaszintjei [9]. A kísérletek célja a kétfotonos átmenet energiájának pontos mérése a közönséges hidrogénatommal egybevetve.





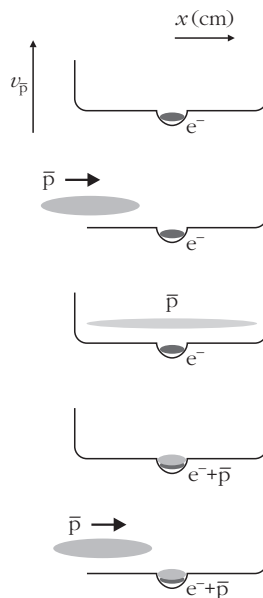
2. ábra. Antiproton keltése, ahogyan az Antiproton-lassítónál történik. A Proton-szinkrotron nagyenergiájú protonjai balról beleütkeznek a kúp alakú céltárgyba, a keletkező antiprotonokat a középső mágneses kürt gyűjti össze és a jobbra elhelyezkedő kvadrupólmágnes fókuszálja. (A CERN *Angyalok és Démonok* kiállításáról.)

gyenge kölcsönhatást létrehozó lokális szimmetriát, hogy az elemi részecskék abban mozogva tömeget nyerjenek. Végül az elmélet bizonyos nehézségei arra ösztönöznek, hogy megoldásul bevezessük a szuper-szimmetriát [8], amely eleve sérül alacsony energián.

Mindezek miatt (vagy mindezek ellenére) komoly kísérleti erőfeszítés irányul a CPT-invariancia ellenőrzésére. A CPT-szimmetria legfontosabb bizonyítéka a feltételezésével végzett számítások bámulatosan pontos egyezése a kísérleti adatokkal, a közvetlen kísérleti ellenőrzéséhez azonban csak össze kell hasonlítanunk egy részecske és antirészecske tulajdonságait. Legpontosabb tesztje a semleges K-mezon és antirészecskeje relatív tömegkülönbsége, amely a mérések szerint  $<10^{-18}$ . A CERN-ben 1999 végén megépült *Antiproton-lassító* (Antiproton Decelerator, AD) berendezés [10] fő célja *antihidrogén*-atom (antiproton és pozitron között állapota) előállítása, hogy a hidrogénatoméval összehasonlítva a CPT-szimmetriát ellenőrizzék (1. ábra).

## Antianyag előállítása

Az első antihidrogén-atomokat a CERN Alacsonyenergiás antiproton-gyűrűjénél (LEAR) állították elő 1996-ban, a LEAR működtetésének utolsó évében [11]. A gyűrű gyors antiprotonjait keresztették egy xenon atomnyalábbal, a xenonatomok elektromágneses terében az antiprotonok elektron-pozitron (részecske-antirészecske) párokat keltettek, és a relativisztikus antiproton bizonyos (igen kis) valószínűséggel *felcsípte* a pozitront, antihidrogént képezve. A tárológyűrű elektromágneses tere a semleges antihidrogén-atomot már nem hajlította körbe, az egy egyenes nya-



3. ábra. Antiproton csapdázása. A csapdában elektronok vagy pozitronok vannak, amelyek szinkrotron-sugárzással energiát veszítve hűtik magukat. A protonok sokszor átszelve őket, szintén lehűlnek, ekkor a csapdát megnyithatjuk a következő protoncsomagnak.

lábvezetéken kirepült, ahol azután egy fóliával elválasztották az antiprotonot és a pozitront, és külön-külön annihiláltatták őket. 12 eseményt észleltek, és a szimulációval becsült háttérrel 3 eseményre becsülték, tehát 9-et tulajdoníthattak antianyagnak.

Az energiaszintek meghatározásához (spektroszkópiához) lassú antihidrogén-atomok kellenek. A CERN az antiprotonok előállításához 25 GeV energiájú protonokat ütköztet irídium-céltárggyal, ahol proton-antiproton párok keletkeznek GeV fölötti energiával.<sup>1</sup> Az antiprotonokat mágneses térrel összegyűjtik (2. ábra), majd állandó hűtés (azaz az egymáshoz képesti relatív sebességük fogyasztása) mellett, több lépésben lelassítják az AD 5,8 MeV-es energiájára.

Lassú antihidrogén előállításához az antiprotonokat elektromágneses csapdában kell egészen alacsony energiára szorítanunk, hűtenünk (3. ábra). Mivel az Antiproton-lassító antiproton-csomagja 100 ns ( $10^{-7}$  s) méretű és a csapda mintegy 1 m hosszú, 0,4 keV alá le kell lassítanunk az eredetileg 5,8 MeV energiájú antiprotonnyalábot, hogy a csapda nyitása és csukása között a legtöbb antiproton a csapdába kerüljön. Az ASACUSA együttműködés [12, 13] erre a célra épített egy ellenkező irányba kapcsolt gyorsító-rezonátoron alapuló utólassítót, a másik két kísérlet szabályozható vastagságú anyaggal lassít. Ez utóbbi egy nagyságrenddel kisebb határfokú, de a spektroszkópiai méréshez nem kell sok antihidrogén atom, azonosítás céljából valószínűleg egyenként fogjuk tanulmányozni őket.

Hideg antihidrogén-atomokat elsőként az ATHENA [14, 15] (most felváltotta az ALPHA [16]) és az ATRAP [17, 18] kísérletek állították elő a CERN Antiproton-lassító

<sup>1</sup> Az energia részecskefizikai egysége általában a GeV =  $10^9$  eV, 1 eV (elektronvolt) energiára tesz szert egységnyi töltésű részecske (pl. elektron vagy proton) 1 V feszültség átszelésekor.

tójánál elektromágneses csapdában. Nagy sűrűségű antiproton- és pozitron-plazmát vegyítettek; a rekombináció (az antiproton és a pozitron antiatomban egyesülése) után a semleges antihidrogén-atomok a csapda közepét elhagyva az edény falán annihiláltak. Az ATRAP és ALPHA kísérletek célja, antihidrogén-spektroszkópia, még messze van; jelenleg a magasan gerjesztett állapotban keletkező antihidrogén alapállapotra hozását, és a semleges atomok mágneses térben való helyben tartását kell megoldani. Az újonnan alakult AEGIS együttműködés az antihidrogén gravitációs tömegét tervezi 1% pontossággal megmérni. Azt, hogy a proton és az antiproton a Föld gravitációs terével azonosan hat kölcsön, nem a CPT-szimmetria, hanem az Einstein-féle gyenge ekvivalencia elve állítja.

Az ATRAP és ATHENA kísérletében az antihidrogén-atomok antiproton–pozitron–pozitron hármas ütközésben keletkeztek: szükség van egy harmadik szereplőre, hogy teljesülhessen az energia és az impulzus megmaradása, és a fotonkibocsátással járó sugárzásos rekombináció valószínűsége kicsi. Gondosan tanulmányozták a keletkezési mechanizmust és több érdekességet fedeztek fel. Ha például túlhűtik az antiprotonokat, teljesen szétválnak a pozitronfelhőtől és csökken a rekombináció esélye, ha viszont gerjesztéssel növelik az energiájukat, akkor is kevesebb lesz az antihidrogén, mert az ütközések szétverik az igen magasan gerjesztett állapotban keletkező, tehát kis kötési energiájú (anti)atomokat.

## Antianyag a mindennapi gyakorlatban?

### Antianyag a gyógyászatban

A világ részecskegyorsítóinak több mint felét, mintegy 9000-et, az orvostudomány használja, a maradék legnagyobb részét pedig az anyagtudomány. A gyógyászat gyorsítói túlnyomórészt diagnosztikai célokat szolgálnak, de például a kibekéssel operálnak, és használnak gyorsítót tumorok operációs eltávolítása közbeni besugárzásra, hogy az esetleg ottmaradó rákos sejteket elpusztítsa.

Antianyag alkalmazásaként széleskörűen használják a pozitronemissziós tomográfiát, Magyarországon is több helyen. Pozitronemisszióval bomló izotópot juttatnak a vizsgált szövetbe, ahol a kibocsátott pozitron elektronokkal annihilál. A kibocsátott fotonok kirajzolják a szövet alakját és aktivitását.

Az ACE kísérlet [20] az antiprotonok terápiás alkalmazhatóságát vizsgálja, hogy mennyire roncsolják a rákos sejteket a bennük megálló antiprotonok. A első eredmények biztatóak [21], az antiproton hatása a protonénak mintegy négyszerese, de a valódi alkalmazhatósághoz az ára nagyon magas.

### Antianyag, mint üzemanyag?

A legegyszerűbb antianyag, antihidrogén előállításához nagyenergiájú részecskeütközésben kell előállítanunk pozitront és antiprotonot, lelassítani őket, a plaz-



4. ábra. Tom Hanks, az *Angyalok és démonok* főszereplője a Nagy Hadronütköztető ATLAS detektoránál.

mákat csapdában hűteni és összenyomni, és mindezek után az antihidrogént mágneses térben vagy lézercsapdában tárolni. Mindegyik lépés lényegesen több energiát igényel, mint amennyit az antianyag majd hordoz, még ha az előállítás hatásfoka 100%-os volna (mint ahogy persze sokkal kevesebb), a végső különbség mintegy 10 nagyságrendnyi. Durva becslés szerint a CERN-nek 1 gramm antihidrogén előállítása a jelenlegi ütemben egymilliárd évig tartana, és az összes antianyag, amit a CERN idáig előállított, annyi energiát hordoz, amellyel pár percig lehetne csak működtetni egy villanykörtét.

A NASA (Amerikai Űrkutatási Hivatal) mindezek ellenére komolyan finanszírozott kutatásokat ebben az irányban, mert az antianyag valóban kiváló energiaakkumulátor lenne, ha sikerülne építeni kis, hordozható antiproton-csapdát [22].

### Antianyag bomba?

Az antianyag, mint robbanóanyag kérdése, Dan Brown *Angyalok és démonok* című regényével került napirendre [23]. Főszereplője (akárcsak *A Da Vinci kód* című regényéé) egy Robert Langdon nevű kutató a Harvard Egyetemről, aki az Illuminátusok nevű titkos társaság után nyomozva megakadályozza a Vatikán felrobbantását egy kiló antianyaggal, amelyet a CERN titkos, föld alatti laboratóriumából loptak el.

A könyv megjelenésekor a CERN honlapot nyitott a következő információval:

- A CERN valóban létezik, és megépítette a világ legnagyobb részecskegyorsítóját egy száz méterrel a föld alatt levő, 27 km hosszú, kör alakú alagútban.
- A CERN viszont teljesen nyitott intézmény, nincsenek titkos laboratóriumai és semmi baja a Vatikánnal.
- A CERN valóban előállít antianyagot, de nem az LHC-nál, hanem az Antiproton-lassítónál, mikroszkopikus mennyiségben, amely nem hordozható és nem alkalmas bombakészítésre.



5. ábra. Balra: A CERN Globe kiállítóterme: órási gömb fából. Jobbra: A CERN *Angyalok és démonok* kiállítása a Globe-ban.

- Az antianyag kutatása tisztán tudományos, a Világegyetem keletkezésével összefüggő kérdésekre keres választ.

Hozzá kell tennem, hogy bármely antihidrogénnél nehezebb antianyag előállításához lassú antineutronokra lenne szükség, amelyet ugyanúgy nagy energián állítanánk elő, mint az antiprotont, de lelassítani nem tudnánk, mert semleges lévén nem lép elektromágneses kölcsönhatásba. Az antineutron anyagban az atommagokon szóródik, nem az elektronok terén, mint az antiproton, ráadásul ütközéskor az annihiláció valószínűsége az energia csökkenésével egyre növekszik.

A lap a ténylegesen folyó antianyag-vizsgálatok céljain és technikai hátterén kívül sok értékes információt tartalmazott a részecskefizikai kutatásokról általában és a CERN-i irányokról, módszerekről.

Később, amikor újságírókban felmerült, hogy a Nagy Hadronütköztető (Large Hadron Collider) esetleg olyan fekete lyukakat kelt majd, amelyek elnyelhetik a Földet, a CERN előadás-sorozatokat szervezett a félreértések tisztázása és a közvélemény megnyugtatása érdekében.

## Angyalok és antiangyalok

Egy kutató sok mindenre képes, hogy kutatásaihoz pénzt szerezzen. Pályázatokat ír és kilincsel különböző pénzosztó alapítványoknál, igyekszik bebizonyítani, hogy kutatásai fontosabbak, eredményei jelentősebbek, mint versenytársaié. Az országos kutató intézmények vezetői még nehezebb helyzetben vannak, nekik ugyanis nem hozzáértő kollégákat, hanem politikusokat kell meggyőzniük ugyanerről. A legnehezebb azonban az olyan nemzetközi intézeteké, mint a CERN, akiknek az összes tagország főbb politikusait kell állandóan biztosítaniuk az intézmény fenntartásának szükségességéről. Idén igen nagy izgalmat váltott ki, amikor Ausztria tudományügyi minisztere bejelentette, hogy kezdeményezik Ausztria kilépését a CERN-ből; végül az osztrák kancellárt sikerült meggyőzni róla, hogy ne tegyék.

Megtudván, hogy film készül az *Angyalok és démonok*ból, a CERN felajánlotta, hogy a CERN-ben játszódó jeleneteket (mintegy 5 perc a film elején) a Laboratórium területén vegyék fel. Ez aztán nem így történt, *Ron Howard* és Tom Hanks, a film rendezője és főszereplője járt ugyan a CERN-ben (4. ábra) és a stáb

6. ábra. Balra a filmben szereplő antianyag-csapda az *Angyalok és démonok* kiállításon, jobbra a valószínűleg antianyag-tároló a CERN ASACUSA kísérletéhez.



készített néhány háttérfelvételt ott, de a forgatás Los Angelesben történt, díszletek között (ahogyan azt a hozzáértő azonnal látja). A film ugyan nem lett sokkal tudományosabb, mint a könyv, de olyan részleteket azért elhagytak belőle, mint a CERN főigazgatójának saját szolgálati repülőgépe.

A filmet 2009 májusában mutatták be. A CERN megingt honlapot [24] szentelt a filmnek, a Chicago melletti Fermilab viszont előadás-sorozatot szervezett róla, amellyel bejárták az Egyesült Államokat és Kanadát, és felszólították európai kollégáikat, kövessék a példát. A Sony Pictures természetesen hozzájárult a dologhoz, csak arra kérte az előadókat, ne hangsúlyozzák a bemutató előtt, mekkora badarság a film antianyagra vonatkozó része. Mi, magyar részecskefizikusok nem lelkesedtünk az akcióért: jónak látjuk, ha felkészülünk antianyaggal kapcsolatos kérdésekre, de célzott sajtókonferenciát és előadókörutot szervezni nem fogunk. A felhívásra való reagálásokból hasonló hozzáállást érezni más európai országokból is.

## A kiállítás

Ami igazán jónak tűnik, az a kiállítás, amelyet a CERN a filmnek szentel. *Angyalok és démonok* a címe, és a Globe-ban található, a svájci kormány által a CERN-nek ajándékozott óriási fagömbben (5. ábra). Belépve a látogatót hatalmas tábla fogadja a kiállítás felépítéséről, majd egy konzolon megnézhetjük a film CERN-re vonatkozó perceit.

A kiállítás szervezői párhuzamot vonnak tudomány és képzelet között. Szerepel a film antianyag-csapdája (6. ábra) és egy valódi Penning-csapda belső része. Felmerül a kérdés, vajon hogyan lehet azt a roppant erős mágneses teret úgy előállítani, hogy ne legyen fém a rendszerben, azaz a repülőter fémdektora ne érezlje. Nagyon jó ötlet volt a kiállítás vége felé a ha-

talmas tabló a Világegyetem azon rejtélyeiről, amelyeket várakozásunk szerint az LHC meg fog válaszolni a eljövendő években (7. ábra).

## Köszönetnyilvánítás

A szerző köszönettel tartozik kollégáinak, a PS-205 és ASACUSA kísérlet résztvevőinek, főleg a Tokiói Egyetemnek, a csaknem húszéves kellemes és eredményes együttműködésért, és amiért a legkülönbözőbb OTKA- és TÉT-pályázatok (jelenleg OTKA NK67974 és K72172, valamint TÉT-JP-21/2006) támogatásával együtt is igen szegény magyarokat befogadták és anyagilag támogatták.

## Irodalom

1. Vértes Attila (szerk.): *Fejezetek a nukleáris tudomány történetéből*. Akadémiai Kiadó, 2008.
2. Horváth Dezső: Szimmetriák az elemi részecskék világában. *Fizikai Szemle* 53/4 (2003) 122. <http://www.kfki.hu/fszemle/fsz0304/hd0304.html>
3. Horváth Dezső: Antianyag-vizsgálatok a CERN-ben. *Fizikai Szemle* 54/3 (2004) 90.
4. Horváth Dezső: Szimmetriák és sértésük a részecskék világában – a paritásértés 50 éve. *Fizikai Szemle* 57/2 (2007) 47.
5. Trócsányi Zoltán: Az eltűnt szimmetria nyomában – a 2008. évi fizikai Nobel-díj. *Fizikai Szemle* 58/12 (2008) 417.
6. Trócsányi Zoltán: A Standard modell Higgs-bozonja nyomában az LHC-nál. *Fizikai Szemle* 57/8 (2007) 253.
7. Horváth Dezső: A részecskefizika anyagelmélete: a Standard modell. *Fizikai Szemle* 58/8 (2008) 246.
8. Horváth Dezső: Szuperszimmetrikus részecskék keresése a CERN-ben. *Magyar Tudomány* (2006/5) 550.
9. M. Charlton, J. Eades, D. Horváth, R. J. Hughes, C. Zimmermann: Antihydrogen physics. *Physics Reports* 241 (1994) 65.
10. Az Antiproton-lassító (Antiproton Decelerator, AD) honlapja, <http://www.cern.ch/PSdoc/acc/ad/index.html>
11. G. Baur et al., *Phys. Lett. B* 368 (1996) 251–258.
12. ASACUSA kísérlet, *Atomic Spectroscopy And Collisions Using Slow Antiprotons*, <http://www.cern.ch/ASACUSA>
13. R. S. Hayano, M. Hori, D. Horváth, E. Widmann: Antiprotonic Helium and CPT Invariance. *Reports on Progress in Physics* 70 (2007) 1995–2065.
14. ATHENA kísérlet, *ApparaTus for High precision Experiments on Neutral Antimatter*, <http://athena.web.cern.ch/ATHENA>
15. M. Amoretti et al.: Production and detection of cold anti-hydrogen atoms. *Nature* 419 (2002) 456.
16. ALPHA kísérlet, *Antihydrogen Laser Physics Apparatus*, <http://alpha.web.cern.ch/alpha>
17. ATRAP kísérlet, *Antimatter TRAP*, <http://atrap.web.cern.ch/ATRAP>
18. G. Gabrielse et al.: Background-free observation of cold antihydrogen with field-ionization analysis of its states. *Phys. Rev. Lett.* 89 (2002) 213401.
19. AEGIS kísérlet, *Antihydrogen Experiment: Gravity, Interferometry, Spectroscopy*, <http://aegis.web.cern.ch/aegis/home.html>
20. ACE kísérlet, *Antiproton Cell Experiment*, <http://www.phy.au.dk/~hk/introduction.html>
21. N. Bassler et al.: Antiproton radiotherapy. *Radiotherapy and Oncology* 86 (2008) 14–19.
22. G. Gaidos, R. A. Lewis, G. A. Smith, B. Dundore, S. Chakrabarti: Antiproton-catalyzed microfusion/fusion propulsion systems for exploration of the outer solar system and beyond. In: *Antimatter Space Propulsion at Penn State University*. <http://www.engr.psu.edu/antimatter>
23. D. Brown: *Angels and demons*. Pocket Books, 2000.
24. *Angels & Demons, the science behind the story*, <http://angelsanddemons.cern.ch>

7. ábra. Az LHC megoldandó rejtélyei az *Angyalok és démonok* kiállításon.

