

KOZMIKUS SUGÁRZÁS EXTRÉM ENERGIÁKON – II. RÉSZ

Kövesi-Domokos Zsuzsa

Department of Physics and Astronomy
The Johns Hopkins University
Baltimore, USA

A cikk első része¹ leírta az extrém energiájú kiterjedt légizáporok alapvető tulajdonságait és a detektálás két fontos módszerét felszíni zápor- és fluoreszcens detektorokkal. A fluoreszcens detektorok és a hibrid (kombinált felszíni zápor- és fluoreszcens) detektorok jelentősek mind a primér részecske azonosításában, mind az energiabecslés javításában. Hangsúlyoztuk az extrém energiájú kozmikus sugárzás jelentőségét a részecskefizikai kutatásban, minthogy ez az energiatartomány még a legnagyobb működő gyorsítóval (LHC) sem érhető el.

Anomális záporok és fizika a Standard Modellen túl

A múlt század kilencvenes éveiben, az extrém energiatartományban a fluxusadatok legnagyobb részét az AGASA-detektor adta. A spektrum legmeglepőbb két tulajdonsága az volt, hogy nem mutatta a várt *GZK-levágást* és még $E > 10^{20}$ eV fölött is 11 záport figyeltek meg. A Fly's Eye korai adatai további 5 eseménnyel támogatják. Ezeket nevezzük anomális záporoknak. A *GZK-levágás* fizikájához (pion fotokeltés) semmilyen kétség sem fért, minthogy ezt a folyamatot a múlt század ötvenes éve óta laboratóriumi kontrollált körülmények között sokszor kimérték. Ebből következett, hogy vagy a *GZK-gömbön* belül keletkeznek a protonok, vagy a záport kezdeményező részecske akadálytalanul keresztülutazik a mikrohullámú háttérsugárzáson, de a levegőmaggal – a protonhoz hasonlóan – erősen hat kölcsön. Minthogy a csillagászok kifogytak a nagy fluxusú vagy nagy számú „extrém” forrásokból, a részecskefizikusok léptek akcióba. Két csoportba sorolhatjuk az elméleti elgondolásokat: csak a Standard Modellt használó és az azon lényegesen túllépő magyarázatokat.

Z-robbanás

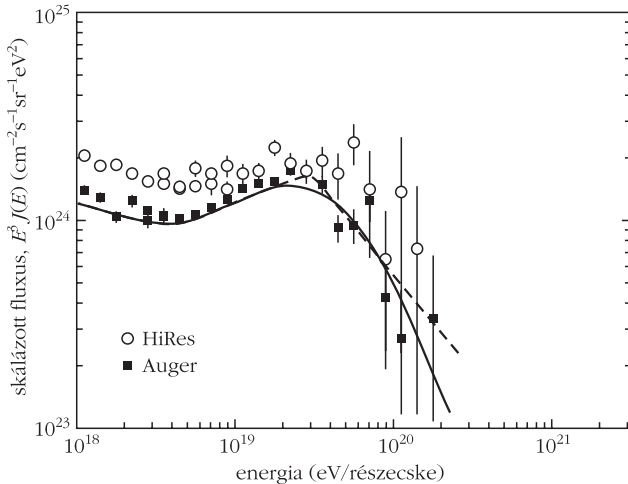
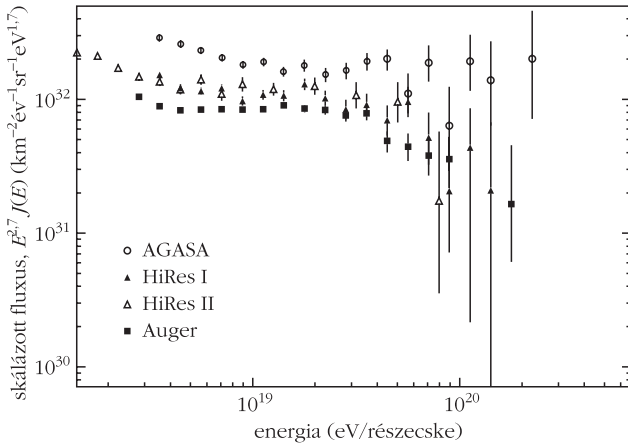
A Standard Modellen túl csak azt kell feltenni, hogy a neutrínók tömeggel rendelkeznek, ami kísérletileg jól

igazolt tény. A Világmindenség bármely részéről érkező extrém, $E \approx 10^{23}$ – 10^{24} eV (!) energiájú neutrínók rezonanciában keltenek egy semleges, gyenge bozont a Z^0 -t, amikor a neutrínó-háttérsugárzás egy neutrínójával ütköznek a *GZK-gömbön* belül. A Z^0 bomlásból átlagosan csak 2 nukleon, de körülbelül 20 gamma-foton (több extrém energiájú is) és nagyon sok lepton keletkezik. A bomlásból származó protonok keltik az „anomális” záporokat. Ez a modell, bár nagyon takarékos az alapvető kölcsönhatási modellben, de minden másban a praktikusnak elfogadott lehetőségek határán kívüli körülményeket követel. Természetesen a döntő szót itt is csak a kísérleti-megfigyelési eredmények adhatják. Két kísérlet is sikerrel adott felső korlátot ezen rendkívüli energiájú neutrínók fluxusára. Ezek a korlátok már szinte kizárták a Z-robbanást, mint az anomális záporok forrását. Az Auger Observatórium és a Teleszkóprendszer eredményeiből rövidesen láthatjuk, hogy ez a folyamat lényegében nem adhat járulékot az extrém energiájú fluxushoz.

Topológiai defektusok és szupernehéz sötét anyag

A *Nagy Egyesítés Elméletek* (Grand Unified Theory vagy GUT) a Standard Modell háromféle mértékinvariáns kölcsönhatását (gyenge, elektromágneses és erős) és a sokféle kvarkot, leptont próbálják egy egységes elméletté összehozni. (Emlékezzünk, hogy az első ilyenfajta egyesítés a 19. század végén az elektromos és mágneses jelenségek összekapcsolása volt *Maxwell* egyenleteiben. A Standard Modellen az elektromágneses és gyenge kölcsönhatások egyesültek és a részecskék is családokba rendeződtek.) Közvetlenül az Ősrobbanás után a Világegyetem a GUT alapján működött: minden kölcsönhatás erőssége egyforma volt. Ahogy a Világegyetem hűlni kezdett, a kölcsönhatások erőssége szétvált. Ez az átmenet nem egyformán folyt le mindenütt és úgynevezett topológiai hibahelyek keletkeztek, amelyek metastabilak, de élettartamuk akár a Világegyetem mai korához (körülbelül 13 milliárd év) hasonlítható. A korai GUT-korszakból hasonló élettartamú nehéz marad-

¹ *Fizikai Szemle* 62/7–8 (2012) 234–239.



1. ábra. A felső ábra a skálázott energiaeloszlás 2009-es eredményeit mutatja. Az AGASA-adatok nem mutatják a GZK-levágást, de a HiRes- és Auger-pontok már igen. Az alsó ábra a 2011-ig látott új eseményeket is tartalmazza. A szaggatott vonal hatványfüggvényeket, a fekete vonal pedig hatványfüggvényeket és sima függvényeket illet az Auger-eloszláshoz.

ványrészek ($mc^2 \approx 10^{24}$ eV) is keletkezhetnek, amelyek játszhatják egy szupernehéz sötét anyag szerepét is. Mind a topológiai defektusok eredményeként, mind a szupernehéz sötét anyag bomlásakor végül stabil részecskék keletkeznek: protonok, gamma-fotonok, elektronok, pozitronok és neutrínók. Fontos megemlíteni, hogy csak körülbelül 5% a protonok száma és nagyon sok extrém és nagy energiájú gamma-részecske keletkezik. Természetesen az így keletkező protonok felelősek az „anomális” záporokért. Az új fluoreszcens- és hibriddetektor-megfigyelések nagymértékben korlátozzák a topológiai defektusok és a szupernehéz sötét anyag jelenlétét.

Erősen kölcsönható neutrínók

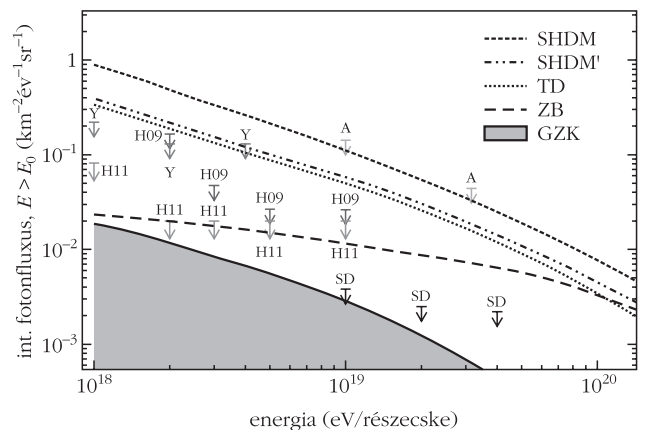
Az egyesített modellek még ambiciózusabb formája a gravitációt is magukba foglaló húrelméletek. Itt a részecskék szerepét egy kicsi rezgő húr játssza. Az egyesítés céljából szóba jöhet a húrelméletek 10 vagy 11 dimenzióban definiálhatók (egy idő- és a többi térdimenzió a szokásos három helyett). Ezen kívül az energiaskála, ahol a teljes egyesítés megvalósul, a

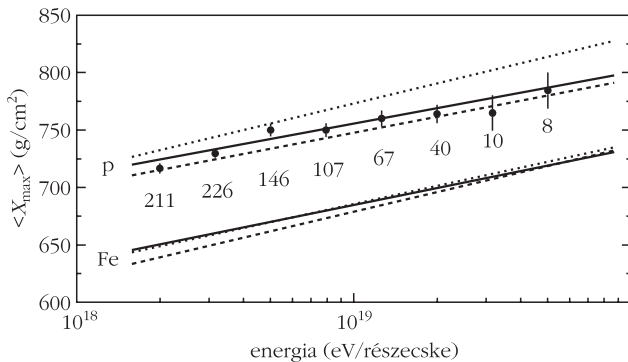
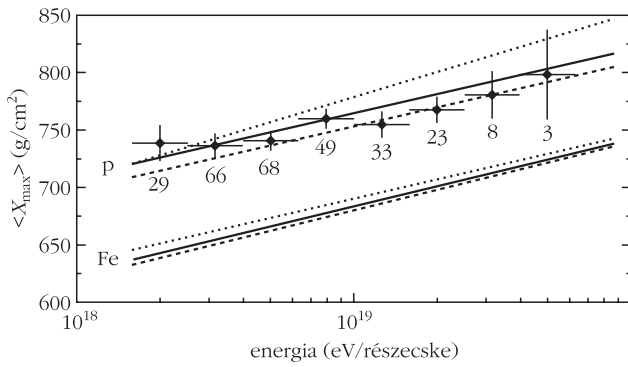
gravitációval kapcsolatos Planck-energiánál van: $\approx 10^{28}$ eV. Az 1990-es évek közepén bebizonyosodott, hogy ebben a sokdimenziós univerzumban a kölcsönhatások egyesítése sokkal alacsonyabb energián is bekövetkezhet, ha az 5 vagy 6 extra dimenzió csak véges méretű. (Például, ha van egy hosszú hengerünk, amely mondjuk a z -tengellyel párhuzamos és a keresztmetszet sugara egy fix r hossz, akkor ezt a felületet hengerkoordinátákban leírhatjuk a z -koordinátával, amely a $(-\infty, +\infty)$ intervallumban változik és az azimutális szöggel, amely csak 0-tól 2π -ig terjed.) Egy ilyen húrelméletben az új fizika már $(5-10) \cdot 10^{13}$ eV energián is beköszönhet. Többek között a neutrínók kölcsönhatása is olyan erőssé válik, mint a kvarkoké. Így az extrém energiás neutrínók a látható Univerzumból akárhonnán elérhetik a Földet, mert a háttérsugárzással való kölcsönhatás tömegközépponti energiája messze az alacsony húrskála alatt van, a Standard Modell érvényes. A legegő-atommal való ütközésnél azonban meghaladhatja az új fizika energiaküszöbét és akkor lényegében egy erősen kölcsönható részecskéhez, mondjuk protonhoz hasonló légitárhoz indít. Pillanatnyilag, még az új Auger- és a Teleszkóprendszer-adatokat is figyelembe véve sincs elegendő esemény a GZK-levágás környékén ahhoz, hogy a relatíve alacsony energián esetleg megjelenő új fizika létét megfigyelhessük.

Az Auger Observatórium, HiRes és a Teleszkóprendszer eredményei

Mára meggyőzően bebizonyosodott, hogy $E = 5 \cdot 10^{19}$ eV-nál a bejövő részecskék száma jelentősen csökken (*1. ábra*). Ez a GZK-levágás jelenlétét kétségtelenül alátámasztja. (Természetesen mindig fennáll az az értelmezési lehetőség, hogy az asztrofizikai gyorsítók „kifulladás”, azaz gyorsító képességük energetikai határához érkeztek.) A GZK-levágás felett a fluxus alaposan csökken, de nem nulla. Ezt az alacsony fluxust csupán asztrofizikai forrásokkal sem lehet-

2. ábra. A különböző részecskefizikai hipotézisek jóslatai az integrált fotonfluxusra és a megfigyelési korlátok (M. Settimo ICRC 2011).

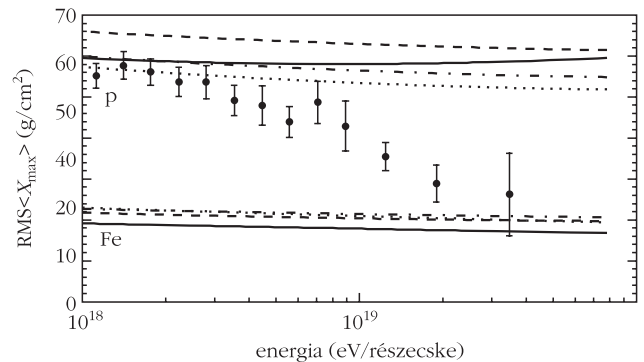
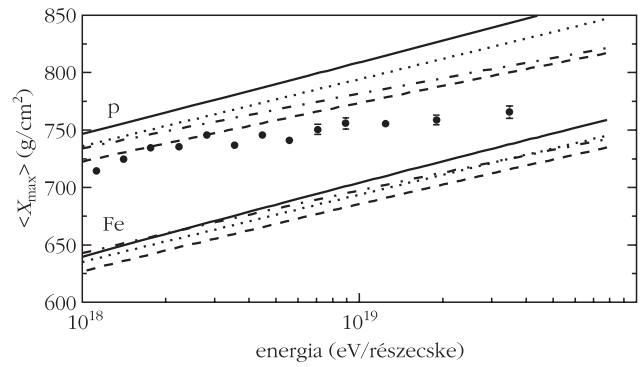




3. ábra. A felső ábrán a Teleszkóprendszer, az alsón a HiRes méréseit látjuk. Az egyenesvonal-csoportok a különböző hadronmodellekkel készült szimulációk eredményét mutatják.

len megmagyarázni. Ezekon az energiákon a galaktikus és extragalaktikus rendezett és kaotikus mágneses terek sem a protonok sem az atommagok terjedési irányát nem tudják lényegesen befolyásolni. Így a töltött részek is visszamutatnak a forrásukhoz. Minthogy csak kis számú forrás tud extrém energiákra gyorsítani, a részecskék beesési irányeloszlásának lényeges anizotrópiát kell mutatnia. Érdekes módon a topológiai defektusok (TD), szupernehéz sötét anyag (super heavy dark matter, SHDM) és a már úgy is gyengélkedő Z-robbanás (Z-burst, ZB) hipotézisnek nem a transz-GZK események redukált száma adta meg a kegyelemdőfést. Az Auger Observatórium szigorú felső korlátot ad a primér gamma-fluxusra. Mindezek az elméletek a protonok mellett elkerülhetetlenül nagyszámú energetikus fotont is adnának, ellentmondva a megfigyelt felső korlátnak (2. ábra).

A legfontosabb megoldatlan rejtély a primér összetételével kapcsolatos. Elvben protontól vasig bármi lehet. A fluoreszcens detektorok módot adnak a zápor $X_{\max}(E)$ maximumának és $\Delta X_{\max}(E)$ szórásának meghatározására (3. és 4. ábra). Ezekből az ábrákból elég világos, hogy az Auger Observatórium mérései a proton dominanciájáról fokozatosan a vasra történő áttérést részesítik előnyben, míg nem a HiRes és Teleszkóprendszer úgy látja, hogy többségben protonok jönnek a mért energiatarományban. Az LHC új adataival javított hadronmodellek valamivel markánsabbá teszik az Auger összetétel-változást az energia függvényében. Talán csak az okozza a különbséget, hogy az egyik detektor a déli, a másik kettő az északi féltekén



4. ábra. Az Auger-mérések, amelyek szórási adatokat is tartalmaznak ($\text{RMS}\langle X_{\max} \rangle = \Delta X_{\max}$).

gyűjtötte az adatokat. Egy másik érdekes, egyelőre megoldatlan kérdés, hogy a szimuláló programok miért nem képesek a müionszámot helyesen megadni. Az LHC kísérleti eredményeit pontosan leíró hadronmodellek fontos segítséget adnak az extrém energiájú tartományban szükséges analízisre. A nagy, új kozmikusdetektor-rendszerek még csak rövid ideje működnek, így további adatokra kell várni, hogy a felvetett problémákra és esetleges újabbakra magyarázatot adhassunk. Fontos kérdés, hogy a GZK-energia környéken és felette – az LHC-energia feletti ismeretlen tartományban – a várható nagyobb statisztika mutató-e valami új anomáliát, amely segítené egy még nem ismert, a Standard Modellel túlmenő fizika felfedezésében. A részecskefizikusok abban reménykednek, hogy a kis számú asztrofizikai gyorsító nem „fullad ki” az új fizika küszöbe alatt.

Irodalom

- T. Stanev: *High Energy Cosmic Rays*. Springer, 2004. – A kozmikus sugarak gyorsításával és terjedésével kapcsolatos fizikát tárgyaló modern könyv.
 A. Letessier-Selvon, T. Stanev: Ultrahigh energy cosmic rays. *Rev. Mod. Phys.* 83 (2011) 907–942. – Legfontosabb új eredményeket is tárgyaló összefoglaló cikk.



Kövesi-Domokos Zsuzsát, a baltimore-i Johns Hopkins Egyetem emerita professzorát az Eötvös Loránd Fizikai Társulat 2011. májusi Küldöttközgyűlésén tiszteletbeli tagjává választotta. Társulati székfoglaló előadását 2012. január 19-én rendkívüli Ortway-kollokvium keretében tartotta. A *Fizikai Szemle* az előadás két részese, írott változatával köszöntötte a kitüntetettet.