

Részecskebombák a világűrben

„1991-ben egy rendkívüli sebességű objektum sistergett lefelé az atmoszférán keresztül a sivatagos Utah államban (USA) egy felhőtlen éjszakán, amikor még a Hold sem világított. Ez volt a legnagyobb sebességű anyagi részecske, amit ember valaha látott. Sebessége a fénysebesség 99,999 999 999 999 999 999 999 százaléka volt. (A fénysebesség a maximális sebesség, amit egy anyagi test elérhet.) A részecske a Föld légkörén kívüli világból – a kozmoszból – jött, így kozmikus részecskének vagy sokszor kozmikus sugárnak nevezzük. Ennek a megdöbbentően hatalmas energiájú kozmikus sugárnak ma sem ismerjük sem az eredetét, sem pedig pontos anyagi tulajdonságait. Azt azonban jól tudjuk, hogy kozmikus részecskék milliói bombázzák az atmoszférát minden pillanatban, ám bár legnagyobb részük sokkal kisebb energiájú.”¹

A világűrben jövő részecskék tanulmányozása lassan egy évszázada tart. Hagyományosan a kozmikus sugarak fizikája a Naprendszerünkön túlról érkező részecskék iránt érdeklődik². Ezek jöhetnek a mi Tejútrendszerünkben, vagy a helyi galaxis-csoportból (lokális csoportból), amelynek az Androméda-köd és a Tejút a legnagyobb galaxisa. Ezen túl a világűrben bármielyen távoli részéből is eredhetnek. Így könnyű megérteni, hogy a csillagászok számára a kozmikus sugárzás vizsgálata mindig fontos volt.

Emlékezzünk arra, hogy a csillagászat alapvető elméleteinek lerakását a világűrben jövő elektromágneses sugarak megfigyelése tette lehetővé. Ma már majdnem a teljes elektromágneses hullámhossztartományra kiterjednek a megfigyelések. Elsőnek a látható fényt említjük (hullámhossz λ): $10^{-6} > \lambda > 3 \cdot 10^{-7}$ méter, az E foton energia eV nagyságrendű³. Évszázadokig a távcsövek voltak az egyedüli hírhozői a földünkön kívüli világ eseményeinek. Jelentőségük ma is óriási, elegendő az atmoszféra fölött „elhelyezett” Hubble-űrtávcső lélegzetelátlítóan éles képeire gondolni ütköző galaxisokkal, forró gázok felhőjében levő „csillagbölcsődékkel”. Azonban a távoli csillagvilágból felénk tartó látható fény sokféle abszorbenzen (poron, csillagközi gázokon, plazmán) lelheti halálát. Ahhoz, hogy koherens és konzisztens képünk legyen a világegyetem történetéről, a csillagokban lejátszódó folyamatokról, a betlehemi csillagtól (nóváktól, szupernóváktól) a fehér törpékig másfajta megfigyelési adatok is szükségesek. Az utóbbi ötven-hatvan évben önálló kutatási területté vált a rádió- ($100 > \lambda > 10^{-3}$ méter), ultraibolya- ($3 \cdot 10^{-7} > \lambda > 10^{-8}$ méter, ~ 4 eV $< E < 120$ eV), röntgen- ($10^{-8} > \lambda > 10^{-11}$ méter, $\sim 0,1 < E < 100$ keV)⁴ és gamma-sugár- ($\lambda < 10^{-11}$ méter, $E > 100$ keV) asztronómia. A különböző hullámhosszakon történő megfigyelések igazolták vagy radikálisan megváltoztatták a világegyetemről alkotott elképzeléseinket; például a rádióasztronómia megjelenése lehetőséget teremtett az ősrobbanás-elméletből következő, minket mindenhol körülölelő mikrohullámú „suttogás”⁵ lehallgatására.

A részecskék fizikájában és a csillagászatban is egy sokszor bizonyított általános szabály, hogy a legérdekesebb és legmegdöbbentőbb felfedezéseket olyan kísérleti berendezésekkel (gyorsítókkal, detektorokkal) érték el, amik új energiatartományba léptek, vagy amikkel egy újabb tulajdonságot (polarizációt, szögeloszlást) lehetett mérni. Az atmoszférát bombázó energetikus elemi részecskék (protonok, atommagok) a „levegőatomokkal”⁶ ütközve addig ismeretlen új elemi részecskék egész sorát keltették, mint a pozitront (az elektron anti-részecske partnerét), a müont és erősen kölcsönható részecskéket (pozitív, negatív és semleges pionokat, K-mezonokat, stb.). A 1930-as évektől egészen az ötvenes évek elejéig a részecskefizika meglepő kísérleti eredményeit szinte kivétel nélkül a nagy magasságokon elhelyezett, kozmikus sugárzást mérő detektorok szolgáltatták. Ami az elemi részecskék fizikáját illeti, 1953-ban fordult a kocka és a kiszámíthatatlan tulajdonságú kozmikus sugárnyaláb helyett a gyorsítók építése garantálta a kontrollált laboratóriumi kísérleti munkát.

Egészen az 1990-es évekig a kozmikus sugárzás mérési eredményei igazán csak a csillagászokat izgatták. Ha az ember csak egy fontos eredményt akar idézni, akkor biztosan az 1. ábrán látható energiaspektrumot kell megmutatni. A beérkező elemi részecskék (főleg protonok és könnyű atommagok) száma m^2 -ként, másodpercenként és 1 GeV-s energia-intervallumokként $n(E)$ nagyon gyorsan csökken az E energia növekedésével. Az energiaspektrum részletei jobban élvezhetők, ha „mesterségesen” enyhítjük a függvény meredekségét és $[E^{2.5} \cdot n(E)]$ -t ábrázoljuk, illetve ennek a logaritmusát a $\log E$ függvényében. Az embernek a lélegzete is eláll, amikor észreveszi, hogy a detektorok által mért adatok lényegében két egyenes vonallal írható le, annak ellenére, hogy az energia legalább tíz nagyságrendet növekedett. Ez az ábra tehát azt mondja, hogy az első energiatartományban ($E < 10^{15}$ eV) $n(E)$ úgy csökken növekvő energiával, mint $E^{-2.65}$ és a második tartományban (kb. $10^{15.5} < E < kb. 10^{18}$ eV) pedig úgy, mint E^{-3} , azaz kicsit gyorsabban, mint alacsonyabb energián. A két különböző hatványviselkedés közötti átmeneti tartományt ($10^{15.5}$ eV környéke) a fizikusok „térdenek” becézik. $E > 10^{18}$ eV felett megint bonyolódik a helyzet, ezt a régiót egyszerűen „bokaként” tartják számon. A két „egyenes szakasz” – pontosabban mondván a beérkező kozmikus részecskék számának változása egy hatványfüggvény szerint – arra utal, hogy a fizikai folyamat, ami a részecskék gyorsításáért felelős, alapjaiban hasonló erre az egész energia tartományra. Manapság egyre valószínűbbnek tartjuk, hogy a kozmoszban nagyon gyakori és sokféle lökeshullám segítségével történő gyorsítás felelős a spektrum hatványviselkedéséért. Egy relativisztikus energiájú részecske a lökeshullám fronton való minden áthaladáspárnál (oda és vissza) egy kevés energiát nyer. Ahhoz, hogy jelentős legyen az energianyereség, az

¹ Szabadon idézve a Cosmic Bullets (R. Clay and B. Dawson) című könyv előszavából. Az előző szerzője P. Davies.

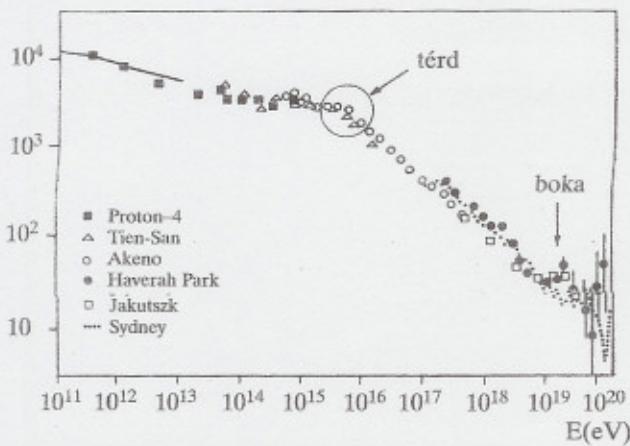
² Ebben a felosztásban beszélhetünk napfizikáról és kozmikus sugarak fizikájáról.

³ A kvantumelmélet szerint egy adott λ hullámhosszú foton (ami az elektromágneses sugárzás tovább oszthatatlan kvantumja) energiája $E = hc/\lambda$, ahol h a Planck-állandó és c a fénysebesség. Az energia elektronvolt (eV) egysége az atom- és részecskefizikában használatos. 1 eV az az energia, amit egy elektron nyer, amikor 1 volt potenciálkülönbségen megy át (1 eV = $1,6 \cdot 10^{-19}$ Joule).

⁴ 1 keV = 10^{-3} eV, továbbá gyakran használatos 1 MeV = 10^6 eV, 1 GeV = 10^9 eV, 1 TeV = 10^{12} eV, 1 PeV = 10^{15} eV, 1 EeV = 10^{18} eV = 0,16 Joule(1).

⁵ Mikrohullámú háttérsugárzás; 1965-ben fedezte fel A. Penzias és R. Wilson. Mikrohullámú antennájukban nem tudtak megszabadulni egy minden irányból érkező alappajtól, annak ellenére, hogy a galambok által az antenna táányrjában hagyott „fehéres-szürke dielektrikumot” is eltávolították.

⁶ A levegőben lévő nitrogén- vagy oxigénatommagok közösen használt neve.



1. ábra. Primer kozmikus részecskék energiaspektruma. Az ordinátán $\log [E^{2.5} \cdot n(E)]$ -t ábrázoltunk. $N[E]$ a bejövő intenzitás ($m^{-2} \cdot s^{-1} \cdot sr^{-1} \cdot GeV^{-1}$) a primer részecske energiájának, $E(GeV)$ a függvényében

is szükséges, hogy a lökéshullámfelület mindkét oldalán a részecske sokszor szóródjék rugalmasan, és így a frontot gyakran újra átlépje.

A legnagyobb energiájú kozmikus sugarak

Minket végeredményben a „boka” környéke érdekel majd, több okból is. Először is azért, mert ott olyan óriási energiával ütközik a bejövő részecske a fent említett levegő atommagokkal, amit ember által tervezett és épített gyorsító még nagyon sokáig nem fog elérni. A Superconducting Super Collider (SSC) alig tíz éve törölte a költségvetésből az amerikai kongresszus. 20 TeV-es protonnyaláb ütközött volna frontálisan 20 TeV-es antiprotonokkal. Ha ugyanezt a kísérletet úgy akarjuk végrehajtani, hogy – mondjuk – a protonok (a céltárgyak) állnak és csak az antiprotonokat gyorsítjuk, akkor az antiproton energiája $\sim 10^6$ TeV = 10^{18} eV kell, hogy legyen. Tehát még ez a megfúszult, legnagyobb energiára tervezett gyorsító sem lett volna igazi versenytársa a „boka” környéki energetikus részecskének a világűrben. Napjainkban a Tevatron (Fermilab, USA) a legnagyobb energiájú ütközőnyalábos gyorsító, fixált céltárgymódban a gyorsított részecskék energiája $2 \cdot 10^{15}$ eV. A következő ütközőnyalábos gyorsítót az Európai Részecskefizikai Laboratóriumban (CERN) építik majd. 2005-re készül el az LHC⁷, amelynél az ekvivalens energia fixált céltárgymódban kb. 10^{17} eV. A gyorsítókkal már ellenőrzött energiákon az alapvető kölcsönhatások és részecskék (leptonok, kvarkok) elmélete, a Standard Modell⁸, meglepően, majdhogynem jesszűn jól működik annak ellenére, hogy kicsit összetakolt, és rengeteg paramétert kell rögzíteni ahhoz, hogy a modellt teljesen definiáljuk. Kevés dologban biztosabbak a részecskefizikusok, mint abban, hogy a Standard Modell nem az utolsó szó egy alapvetőbb elmélet megtalálásában. Útbaigazítást azonban leginkább nagyobb energián végzett kísérletek adhatnak. Az a remény, hogy a természet jóindulatú, és már a következő ütközőnyalábos gyorsító (LHC) energiája elegendő lesz arra, hogy felismerjük egy általánosabb elmélet körvonalait. (Ez az általánosabb elmélet határozatként a jelenleg feltérképezett energiatartományban, természetesen, vissza kell, hogy adja a Standard Modell jóslatait.) A „boka” energiatartomány tehát nagyon is fontos lehet a részecskefizika szempontjából. Sajnos a kísérleti körülmények nagyon bonyolultak. Fogalmunk sincs sem arról, hogy milyen részecske érkezett (talán valamilyen atommag, ta-

lán egy óriási energiájú foton, talán egy neutrínó), sem arról, hogy mi az energiája. Egyébként is, az ismeretlen égi gyorsító által szolgáltatott nyaláb kétségbeejtően kevés részecskét produkál a mi légkörünk tetején. A nagy hírű orosz fizikus, Zeldovics ezt így mondta: „A világegyetem a szegény ember gyorsítója.” Manapság ezeknek a rendkívüli relativisztikus részecskének a vizsgálatánál mindnyájan csak az „égi gyorsítók” rendetlen részecskenyalábjaira számíthatunk.

A másik fontos ok arra, hogy a legmagasabb energiatartományt tüntessük ki figyelmünkkel az, hogy egyre nehezebb elképzelni olyan folyamatokat és olyan helyeket találni a világűrben, ahol ilyen kivételes energiára lehet a részecskéket gyorsítani. Michael Hillas (Leeds, Anglia) tanulmányozta azokat a feltételeket, amik ahhoz szükségesek, hogy egy töltött részecskét, protont vagy egy nehezebb atommagot adott energiára fel lehessen gyorsítani. Azt találta, hogy csak olyan galaxisok, amelyek aktív centrális maggal rendelkeznek (lásd a színes borítón) – különösen az aktív, erős jettel rendelkező rádiógalaxisok – jöhetnek számításba. Ilyenek azonban a mi közvetlen szomszédságunkban (kb. 150 millió fényév sugarú gömbben a Tejútrendszer körül)⁹ ritkán találhatók. Hozzá kell tennünk, hogy a részecskegyorsítás részleteiről nincsenek megbízható elképzeléseink az aktív galaktikus magok esetében sem, de alapvető, sokszor ellenőrzött gyorsítási feltételeknek legalább eleget tesznek. Ezek a kozmikus sugarak tehát a világegyetem valószínűleg legszélsőségesebb folyamatainak és környezetének a hírnökei.

Említésre méltó még egy tulajdonsága azoknak a kozmikus részecskének, amelyek $5 \cdot 10^{19}$ eV energiánál nagyobb energiával hasítanak bele a légkörbe. Rossi és társai 1930-ban ismerték fel, hogy a kozmikus sugárzás legnagyobb része nem fotonokból, hanem töltött részecskékből, atommagokból áll. Mindjárt ki is kiáltották, hogy „új asztronómia” született. Ez egy kicsit elhamarkodott általánosítás volt, ugyanis mind a mi galaxisunk, mind pedig az intergalaktikus tér gyenge, de szinte mindenütt jelenlevő rendezett és kaotikus mágneses teret tartalmaz, amelyek a töltött részecskét eltérítik egyenes pályájuktól. Az eltérítés mértéke csökken, ahogy a részecske energiája növekszik. Az előbb említett energia fölött mind a galaktikus, mind a jóval kisebbnek feltételezett intergalaktikus mágneses tér által okozott eltérítés olyan kicsi, hogy a részecske beesési iránya jó közelítéssel visszamatat a részecske forrására.

A kozmikus konspiráció: Greisen, Zatsepin és Kuzmin felismerése

Miért is olyan nagy probléma, hogy a lehetséges „mennyei gyorsítók” olyan messze vannak?

Alighogy Penzias és Wilson bejelentette a mikrohullámú háttérsugárzás felfedezését, Greisen a Cornell Egyetemről, valamint Zatsepin és Kuzmin a moszkvai egyetemről egymástól függetlenül rendkívül meglepő következtetésre jutott. A mikrohullámú háttérsugárzást képzeljük most el úgy, mint egy fotongázt, ami az egész világmindenséget betölti. A fotonok energiája átlagosan 10^{-4} eV körül van, azaz elég kicsi, és a gáz elég ritka, hiszen kb. 500-ra tehető az egy köbcéntiméterben levő fotonok száma¹⁰. Ebben a fotongázban egy proton háborítatlanul közlekedhet, akármilyen nagy távolságot tehet meg, mintha a fotonok ott sem lennének, ha az energiája kisebb, mint kb. $6 \cdot 10^{19}$ eV. Ennél nagyobb energiánál azonban katasztrofális

⁸ Horváth Dezső: A Standard Modell, Természet Világa különszám

⁹ Egy fényév az a távolság, amit a fény tesz meg egy naptári esztendő alatt. Emlékeztünk, hogy a fényév ebben a csillagászatban használt értelemben egy távolság egység. A mi otthonunknak, a Tejútrendszernek kb. 100 000 fényév az átmérője. A Tejútrendszer fényes csillagai egy lényegében elég lapos korong alakú formátumot alkotnak, a galaxis centruma környékén kisebb „kuduroddással”. Ennek a korongnak az átmérőjéről beszéltünk az imént. Naprendszerünk kb. 30 000 fényévre van a centrumtól, tehát a Tejútrendszer külső harmadában lakunk.

⁷ Large Hadron Collider (Nagy Hadron Ütköztető)

ütközést szenvedhet a mikrohullámú fotonokkal és minden ütközésnél energiájának egy jelentős részét (~20-25% százalékát) elveszti, mert egy másik elemi részecske, egy pion, keletkezik. Átlagosan 20 millió fényévnyi távolság beutazása alatt következik be egy ilyen ütközés. Így a proton néhány ütközés után elveszíti rendkívüli energiáját, és energiája $6 \cdot 10^{19}$ eV alá esik. A konklúzió napnál is világosabb: ha az égi gyorsítók, amelyek $6 \cdot 10^{19}$ eV fölé tudják gyorsítani a protonokat, messzebb vannak, mint mondjuk 100–150 millió fényév, akkor mi sosem (vagy meglehetősen ritkán) láthatunk kozmikus sugarakat $6 \cdot 10^{19}$ eV-nál nagyobb energiával. Ezt az energiát nevezik a Greisen–Zatsepin–Kuzmin(GZK)-levágásnak.

Márpedig a cikk legelején említett hihetetlenül gyors részecskeenergiáját $30 \cdot 10^{19}$ eV-nak mérte a Légyszem¹¹ detektor. 150 millió fényév nagyon nagy távolságnak tűnik, de a világmindenség skáláján meglehetősen kicsi; például sok, rendkívül nagy energiát kisugárzó kvazár¹² figyeltek meg 5-10 milliárd fényév távolságban. Tehát, ha a részecske, ami ezzel az óriási energiával rendelkezett egy proton volt vagy egy atommag¹³, akkor nem érkezhett nagyon messziről. Egyetlen aránylag közeli, minden kívánságot kielégítő rádiógalaxisról tudunk. Ez a Virgo-halmazban elhelyezkedő M87, amely kb. 60 millió fényév távolságra van.

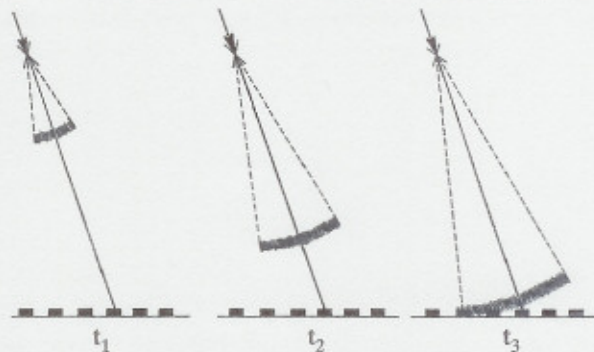
Tegyük most egy kis kitérőt a fontosabb mérési módszerek megismerése felé.

Felszíni kiterjedt légizápor-detektorok és a Légyszem

Az 1. ábrán látható energiaspektrumból kis számolgtatás után a következő eredmények kaphatóak a légkör tetejére érkező részecskék számára¹⁴:

E (energia) (eV)	Részecskeszám E-nél nagyobb energiával
10^{14}	~ 10 négyzetméterenként és naponként
10^{15}	~ 0,1 négyzetméterenként és naponként
10^{16}	~ 1 négyzetméterenként és évenként
10^{18}	~100 négyzetkilométerenként és évenként
10^{19}	~ 1 négyzetkilométerenként és évenként

Jó tudni, hogy a Föld légköre megvéd bennünket ezektől a részecskéktől. Már egészen magasan összeütköznek a levegő oxigén- és nitrogénmolekuláival. Egy energetikus foton elektron–pozitron-párt kelt, és megosztja közöttük az energiáját. Az elektron és a pozitron is kölcsönhat a levegőben, és energetikus fotonokat kelt, a fotonok megint elektron–pozitron-párt keltenek, és amíg nem csökken túlságosan az energia, a sorozatos kölcsönhatások következtében exponenciálisan nő a fotonok, elektronok és pozitronok száma. Egy ún. elektromágneses légizápor jött létre. Ha egy proton vagy más atommag érkezett, az első kölcsönhatásnál sok erősen kölcsönható részecske, főleg pion keletkezik. A semleges pionok azonnal két fotonra bomlanak, amelyek egy-egy, az imént megismert elektromágneses légizáport indítanak. A töltött pionok lassabban bomlanak (töltött müonra és neutrínokra), így van esélyük újabb erős kölcsönhatásra. Újabb semleges pionokból fotonok indítanak újabb elektromágneses légizáport. A részecskék száma gyorsan nő és végeredményben itt is nagy számú foton, elektron és pozitron rohan lefelé az atmoszférán keresztül. (Az atommagból



2. ábra. Kiterjedt légizápor. Sematikus ábra a foton–elektron–pozitron komponens terjedéséről az atmoszférában, $t_1 < t_2 < t_3$. A fekete téglalapok jelölik a detektorokat, amelyek mintát vesznek a felszínre érkező részecskék eloszlásából.

induló zápor persze még aránylag könnyen detektálható müonokat is tartalmaz.) Mind egy fotonnal, mind pedig egy manggal kezdődő zápor végül olyan, mint egy „elektromágneses palacsinta” (azaz nagyszámú foton, elektron és pozitron), nem nagyon vastag, de lassan növekvő átmérőjű, amint söpör lefelé lényegében fénysebességgel (2. ábra). Ha a légizáport indító részecske energiája kb. 10^{14} eV fölött van, akkor a kiterjedt légizápor eléri a Föld felszínét és detektorokkal mérhető a részecskék száma. Ebből a primer részecske energiája kielégítő pontossággal megállapítható. A bonyodalmak nagy részét ezzel szépen a szőnyeg alá söpörtük. Az első kölcsönhatásnak a Föld felszínétől mért magasságában és úgy általában a záporfejlődésben, óriási fluktuációk lehetségesek. Ahhoz, hogy az átlagos viselkedésre elegendő információt gyűjthessünk, sok-sok kiterjedt légizáport kell megfigyelni.

Alacsonyabb energiákon a detektort felküldik nagy magasságba – műholdon, repülőn vagy léggömbön elhelyezve –, így az első kölcsönhatás magában a detektorban történik. A beérkező részecske tulajdonságai elég pontosan megállapíthatók. Ahogy azonban a beeső részecskék száma esik az energia növekedésével, az előbb említett direkt mérési módszer nem alkalmazható. A táblázat számai éppen azt tanácsolják, hogy nagyobb felületet figyelő berendezést kell tervezni a nagyobb energiák tanulmányozásához. A jó hír az, hogy ahogy a direkt módszereket a nagyon vérszegény bejövő intenzitással elveszítjük, ugyanazokon az energiákon a kiterjedt légizáporok eléri a föld felszínét. A rossz hírt is tudomásul kell vennünk: direkt mérésből egy nagyon is indirekt mérési módszerre kell áttérni.

3. ábra. Légifelvétel a CASA-MIA felszíni detektorról. A fehér pontok a detektorok, a közvetlen szomszédok távolsága 15 m.



¹⁰ Összehasonlításképpen: a levegőben tengerszinten kb. 10^{20} oxigén- és nitrogénmolekula van minden cm^3 -ben.

¹¹ Fly's Eye detektor

¹² A kvazárok is az aktív galaktikus magok társaságának illusztris tagjai: a mag egy szupernehéz fekete lyuk.

¹³ Nagy energiájú atommagok a csillagfény fotonjaival ütközve szétesnek kisebb energiájú töredékmagokra átlagosan még rövidebb távolságon, mint a 20 millió fényév, amit a pion fotonkeltésénél említettünk.

¹⁴ Ezeket a számokat azzal a hallgatóságos feltevéssel kaptuk, hogy a legnagyobb energiák tartományában is folytatódik a hatványviselkedés.

A felszíni kiterjedt légizápor-detektorok voltak az első és mindmáig rendkívül fontos szerepet játszó berendezések arra, hogy a kozmikus sugárzás tulajdonságait felderítsük. Nagy területen helyeznek el detektorokat, amelyek így mintát vesznek a beérkező részecskeszám-csozlásból. Nanoszekundumos (10^{-9} sec) pontossággal mérik az időkülönbséget a detektorok megszólalása között, ami lehetővé teszi a beérkezés irányának pontos mérését¹⁵. A 3. ábrán egy felszíni kiterjedt légizápor-detektorról készült légifelvétel mutatunk. Minél nagyobb energiákat akarunk tanulmányozni, annál nagyobb területre kell szétosztani a mintát vevő detektorainkat, hogy ellensúlyozzuk az egyre kisebb beérkező primer részecskeszámot. A jelenleg üzemelő felszíni zápor-detektorok közül az AGASA (Akeno Giant Air Shower Array, Akeno, Japán) a legnagyobb. Közel 100 km² területen 111, egyenként 2,2 m² felületű detektort helyeztek el kb. 1 km távolsággal a közvetlen szomszédok között.

A levegő fluoreszcencia egy másik módszert ad a légizáporok tanulmányozására. A sebesen száguldó töltött részecskék gerjesztik a nitrogénmolekulákat, majd azok a közeli ultraibolyahullámhossz-tartományban izotróp kisugárzott fényrel térnek vissza az alapállapotukba. A fényt nagy konvex tükrökkel gyűjtik és érzékeny fotoelektron-sokszorozó csövekre fókuszálják. Ez a fajta nitrogén fluoreszcencia sajnos nagyon kis hozamú folyamat. Így csak a legmagasabb energiákon produkál elegendő fényt, amikor a zápor maximuma körül milliárdnyi (10^9) töltött részecske gerjeszt a nitrogénmolekulákat. A légszem-detektor volt az első, amelyik a nitrogén fluoreszcenciát használta a kiterjedt légizáporok megfigyelésére.

A 4. ábrára ránézve az ember azt hinné, hogy néhány összevissza dobált, rozsdásodó olajoshordót lát (lásd a színes borítódalon is).

Ezeknek a hordóknak az alján azonban gyűjtőtükrök voltak elhelyezve, úgy beállítva, hogy minden egyes hordó a tükrével az ég egy másik foltjáról gyűjtötte a fényt. A tükrök a fényt több mint 10 fotoelektron-sokszorozóra fókuszálták, ezzel még kisebb, hatszög alakú foltokra bontották fel a megfigyelt égdarabot. Az egész berendezés összesen 880 fotoelektron-sokszorozót használt az ég félgömbjének leképezésére (5. ábra). A zápor egész fejlődése nyomon követhető ezzel a detektorral, ami egy újfajta információval segíti a primer részecske tulajdonságainak meghatározását. Ez a detektor észlelte az eddig legnagyobb energiás kozmikus részecskét $3 \cdot 10^{20}$ eV energiával. Ez ember meglepődése csak fokozódik, amikor észreveszi, hogy egy mikroszkopikus részecske makroszkopikus energiát birtokolt; $3 \cdot 10^{20}$ eV = 48 Joule energiával rendelkezik például egy teniszlabda nagyon gyors szerva esetén, ami jól meg tudja csapni az embert. Ma már egy új, jóval nagyobb fel-

4. ábra. Az eredeti Légszem-detektor, Utah, Egyesült Államok. Összesen 67, egyenként 1,5 m átmérőjű tükör képezi le az eget.



bontóképességű légszem típusú detektor működik az eredeti helyen, neve nagyfelbontású légszem (High Resolution Fly's Eye) röviden az angol névből összerakva a HiRes detektor. Két légszem sztereomódban nézi az eget, természetesen csak felhőtlen és holdtalan éjszakán, ami kb. 10 százaléka annak az időnek, amit az állandóan, szélben, esőben, éjjel-nappal működő felszíni zápor-detektorok képesek használni. Ezt ellensúlyozza a sokkal nagyobb terület, amit HiRes belát és az hogy a záporfejlődést egész hosszában lehet megfigyelni. HiRes 1997-ben kezdte a méréseket, és azóta hét részecske érkezett 10^{20} eV-nál nagyobb energiával, közöttük a második legnagyobb energiájú kozmikus részecske. Ennek energiáját $2,8 \cdot 10^{20}$ eV-ra becsülték. A GZK-levágás ($6 \cdot 10^{19}$ eV) feletti összesen 20 részecskét detektáltak.

A tervezőasztalon van még két légszem jellegű detektor: az amerikai OWL (Orbiting Wide-angle Light-collector, azaz „űr-pályára helyezett széles látószögű fénygyűjtő”)¹⁶ és az európai AirWatch („légköri figyelő”). Mindkét projekt műholdakon elhelyezett légszem-detektorokkal felülről akarja regisztrálni a kiterjedt légizáporokat.

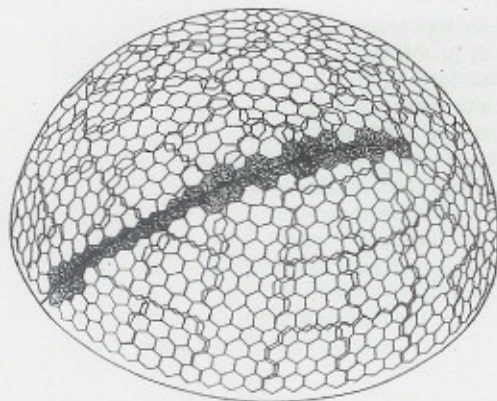
Auger Observatórium. A megépítéshez legközelebb álló új kiterjedt légizápor-detektor a francia fizikus, Pierre Auger nevet viseli. (Auger gondolt először a kiterjedt légizáporok létezésére és vizsgálta tulajdonságait.) Tulajdonképpen két hibrid detektorról van szó: az egyik a déli féltekén, Argentínában épül, a másik helyéül az amerikai Utah államtól tervei a jelentős számú fizikust foglalkoztató nemzetközi tervezőgárdára. Így a két detektorral a teljes éggömböt megfigyelhetjük. A tervezett detektort hibridnek neveztük, ugyanis két komponense van: egy felszíni légizápor-detektor és három légszem. A felszíni kiterjedt légizápor-detektor 1600 „mintavevő” detektort tartalmaz egy hexagonális rács metszéspontjaiban elhelyezve 10^4 km² területen (6. ábra). A három légszem „látja” az egész felszíni detektort. Az idő kb. 10 százalékaiban (felhőtlen, holdtalan éjszakán) mindkét komponens működik és a keresztkalibrálás pontosabb energiabecslést tesz lehetővé (7. ábra). A felszíni detektor prototípusát a 8. ábra mutatja.

Mielőtt áttérünk a spekulációk ismertetésére, foglaljuk össze a kísérleti eredményeket az $E > 10^{20}$ eV tartományra. Az első részecskét kb. 10^{20} eV energiával 1963-ban találták a Volcano Ranch detektorral (USA). A nagyobb területet lefedő Haverah Park (Anglia), Jakutsk (Oroszország), az eredeti légszem és a jelenleg is adatokat szolgáltató fent említett AGASA összesen 14 részecskét látott. Ehhez jön hozzá a hét HiRes-esemény. Nemcsak egyre növekszik a „tilos” tartományba tartozó részecskék száma, de a beérkezési irányuk közel izotróp. (Ezek a mérések csak az északi félgömböt látják. Ezért is fontos az Argentínába tervezett Auger Observatórium.) A beérkezési irány izotrópiáját legalább olyan nehéz megmagyarázni, mint a GZK-levágás teljes figyelmen kívül hagyását. A legerősebb magyarázat persze az, hogy még ezeken a rendkívüli energiákon is sok lehetséges forrása van a részecskének, amelyek aránylag egyenletes sűrűségben borítják be az eget.

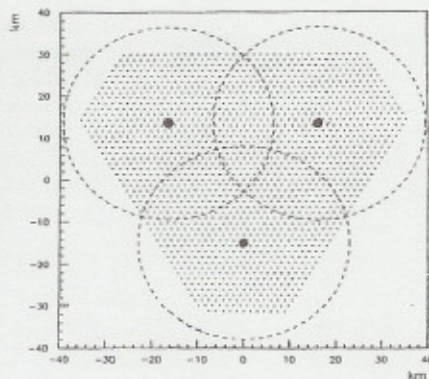
Mi a magyarázat?

Be kell vallanunk, hogy semmilyen biztos magyarázatot sem tudunk adni a GZK-levágásnál nagyobb energiával érkező kozmikus sugarak eredetére vagy természetére. Éppen ez teszi a jelenlétüket érdekessé.

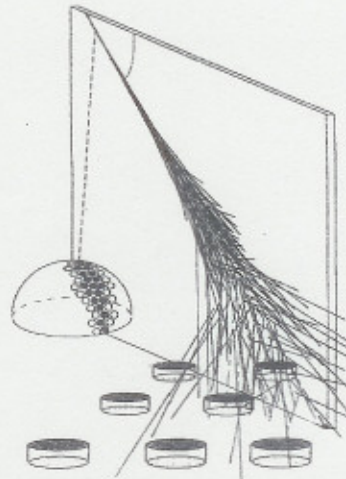
Több fizikus még ma is vitatja, hogy valamilyen új jelenséggel állnánk szemben. Azzal érvelnek, hogy minden mérésnek van hibája; lehet, hogy valamilyen statisztikus ingadozás következtében az energiát a mérőberendezés nagyobbra mutat, mint a GZK-levágás, bár az valójában kisebb volt, mint a „váráslatos” $6 \cdot 10^{19}$ eV. Ez a magyarázat elfogadható lenne, ha



5. ábra. A légszem így képezi le az eget. Jól látható az egy-egy tűkör által leképezett folt, és benne a kis hatszögek az egy fotonokszorozó által „látott” foltot adják. A besötétített csík mutatja, ahogy egy kiterjedt légszámó által kisugárzott fény megszólaltatja a fotonokszorozókat.



6. ábra. A kicsiny fekete pontok a felszíni detektorok, a szomszédos detektorok távolsága 1,5 km; a három nagyobb fekete pont jelzi a légszem-detektorokat, a nagy körök mutatják a detektor által belátott területet



7. ábra. Illusztráció a kiterjedt légszámó mérésére hibrid módszerrel

csak két vagy három eseményről lenne szó. Azonban az „abnormális” események száma egyre szaporodik. Egyre nehezebben hihető, hogy mindezek az események csak statisztikus ingadozások következményei lennének.

Lehetséges-e, hogy a GZK-levágást kijátszó részecske nem proton, hanem egy foton? A jelenlegi mérőberendezések nem tudnak közvetlenül különbséget tenni protonok és fotonok által keltett kiterjedt légszámók között. Egy foton ki tudja játszani a GZK-levágást, annak ellenére, hogy a kérdéses energiatartományban nem csak a mikrohullámú háttér kis energiájú fotonjaival ütközve kelthet elektron-pozitron párt. A rádióháttér fotonjaival is végbemegy ez a folyamat és 10^{20} eV körül, ez a fontosabb. Minden ésszerű modell a rádió háttérsugárzásra azt adja, hogy a nagy energiás foton messzebbre jut el ütközés nélkül, mint egy proton. Ugyanakkor egy fotonnak nem kell elérnie az atmoszférá ahhoz, hogy egy kiterjedt légszámót keltsen: a Föld mágneses terével kölcsönhatva kelt egy elektron-pozitron-párt és elindítja a számót, még mielőtt bejut az atmoszférába. Azonban Todor Stanev (Delaware Egyetem) és munkatársai kihasználták, hogy a légszem-detektor követni tudja egy kiterjedt légszámó fejlődését az atmoszférában. Analizálták a légszem által megfigyelt, máig is rekordot tartó eseményben a számó fejlődését. Azt találták, hogy a számó az atmoszférában keletkezett és minden tekintetben hasonlít egy proton által keltett számóhoz.

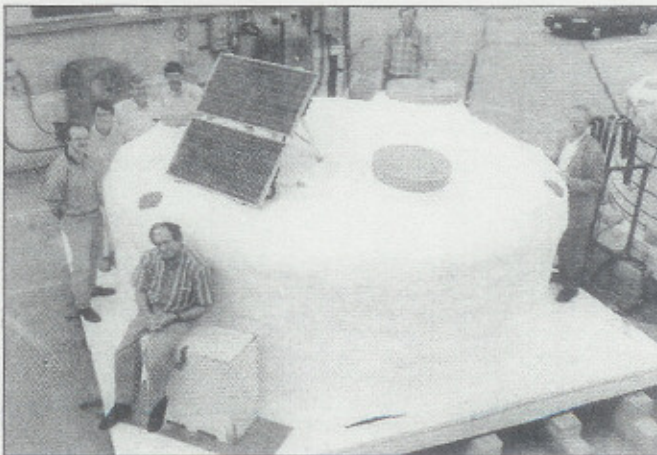
Természetesen, az elméleti fizikusok sok magyarázatot találtak ki az „abnormális” események értelmezésére. A legtöbb magyarázat azonban olyan feltevéseket volt kénytelen tenni az elemi részecskék kölcsönhatásait illetően, amelyeknek kisebb energiákon is mérhető következményei voltak.

Időrendben az egyik első magyarázatot David Schramm és Chris Hill javasolta a nyolcvanas évek közepe táján. Akkoriban sokan azt gondolták, hogy az összes kölcsönhatás (erős, gyenge, elektromágneses) hasonló erősségűvé válik az GUT („Grand Unified Theory” azaz nagy egyesített elmélet) jellemző energiáján, amit akkoriban kb. 10^{15} GeV-ra becsültek. Ezeknek az elméleteknek egyik következménye az volt, hogy

az univerzum korai fejlődése során *topológiai defektusok* keletkeznek. Ezek gyakorlatilag minden tekintetben úgy viselkednek, mint a megszokott, instabil részecskék, pl. egy pion vagy egy radioaktív atommag. A feltételezett bomlástermékek közt egy nagyenergiás proton is szerepelt, amely elindította volna a „házunk táján” a GZK-levágást kijátszó légszámót. Ray Protheroe (Adelaide Egyetem) mutatott rá, hogy a topológiai defektusok elbomlása más részecskéket is produkál. Többek közt a keletkező elektronok és fotonok elindítanak egy számót a mikrohullámú háttér sugárzással kölcsönhatva. Végeredményben, néhány MeV energiájú fotonokat kellene látnunk akármilyen irányból érkező. A Compton Gamma Ray Observatory (GRO) alkalmas az ilyen energiatartományba eső fotonok megfigyelésére. A mérési adatok meghatároznak egy felső korlátot az izotróp beeső gamma sugár háttér intenzitására. Ez összeférhetetlen a topológiai defektusok bomlásából származó fotonokkal.

Hasonló sorsra jutott több más javasolt magyarázat is, amelyek mindegyike különböző, néhány éve népszerűnek tartott elméletet használt ki. Az időközben elvégzett mérések a különböző gyorsítókkal kapcsolatos berendezéseken (CERN, Fermi Nemzeti Laboratórium) ezeket a feltevéseket egyértelműen megcáfolták. Akármilyen szép is egy feltevés, ha ellentmond a

8. ábra. Az Anger Observatórium felszíni detektorának prototípusa



¹⁵ Ha a részecske függőleges irányban érkezett, akkor az „elektromágneses palacsinta” minden része lényegében egyszerre ér földet és szólaltatja meg a detektorokat. Ha a részecske sebessége nullától különböző szöget zár be a függőlegessel, akkor a „palacsinta” különböző részei más-más időben érik el a detektorokat.

¹⁶ Az OWL akronim, amely magyarul baglyot jelent, azért találó, mert a bagoly is egy magasan levő faágról lefelé nézve figyelí prédáját az éj sötétjében.

mérési eredményeknek, akkor elfogadhatatlan. (Valaki egyszer azt írta, hogy „az elméleti fizika temetője tele van gyönyörű elméletekkel”.)

Hogyan tovább?

Két magyarázat maradt mindmáig a porondon cáfolat nélkül, mindkettő a neutrínókat tekintve a távoli forrásból érkező részecskéknél. Az egyiket Tom Weiler (Vanderbilt Egyetem) javasolta, a másikat ennek a cikknek a szerzői.

Weiler hipotézisének megértéséhez tudnunk kell, hogy a mikrohullámú fotonháttér mellett lennie kell egy neutrínóháttérnek is. Az utóbbit sokkal nehezebb kimérni, mint a fotonháttérrel, mert a neutrínók kölcsönhatása sokkal gyengébb, mint a fotonoké. Azonban a mikrohullámú fotonháttér létezését ma már több kísérlet bizonyítja. Egyszerűen nem lehet elképzelni olyan kozmológiai elméletet, amelyben a mikrohullámú fotonháttérrel ne kísérne egy hasonló hőmérsékletű neutrínóháttér. A továbbiakban Weiler felteszi, hogy valahonnan keletkeznek nagyon nagy energiás neutrínók. Ezek akadálytalanul átjutnak a mikrohullámú fotongázon, mert a kölcsönhatás a fotonok és neutrínók között rendkívül gyenge. (Gondoljuk meg, hogy egy neutrínó elektromosan semleges, és mágneses dipólmomentuma elhanyagolható, legalábbis a Standard Modell keretein belül.) Weiler szerint egy nagyon nagy energiás neutrínó a közvetlen szomszédságunkban (azaz közelebb, mint kb. 150 millió fényév) kölcsönhat egy antineutrínóval a neutrínóháttérből. A kölcsönhatásban keletkezik egy Z-bozon, ami azonnal elbomlik, főleg kvarkokra és antikvarkokra. Az erős kölcsönhatások dinamikája gondoskodik arról, hogy a kvark „felöltözzék” egy protonná és volál, megtaláljuk a protonot, amelyik a GZK-levegás feletti záporokat okozza! Weiler hipotézisének erőssége, hogy csak a Standard Modell bevált fizikáját használja.

Lehet-e baj ezzel?

Az egyik probléma energetikai. Aránylag egyszerű számítással, megint csak a Standard Modelltől jól ismert fizikát kihasználva, meggyőzhetjük magunkat, hogy egy kb. 10^{20} eV energiával rendelkező proton keltéséhez a Weiler által javasolt mechanizmus által legalább 10^{24} – 10^{25} eV energiájú protonokra van szükség a forrásnál, akármilyen is az (pl. egy aktív galaktikus mag). Asztrofizikusok szerint elég nehéz megérteni egy kb. 10^{20} eV proton keltését akármilyen ismert asztrofizikai környezetben. Ennél nagyobb energiájú protonok keltése majdnem elképzelhetetlen. Egy másik lehetséges probléma kozmológiai jellegű. Ha összegyűjtjük a máig ismert, a GZK-levegás feletti energiával rendelkező kozmikus sugarakat, akkor kaphatunk valamilyen képet arról, hogy mekkora neutrínóintenzitásra van szükségünk ahhoz, hogy a megfigyelt fluxust produkáljuk. Megint csak egy egyszerű (és ezért megbízható) számítás szerint, a szükséges intenzitás olyan nagy, hogy a keltett neutrínók gravitációs kölcsönhatása a ma ismert univerzumot az asztrológiai megfigyelésekkel valószínűleg összeférhetetlenül kicsi sugarú objektummá

húzná össze. Weiler hipotézisét jelenleg nem tudjuk kizárni, de kétségkívül komoly problémákkal kell megbirkóznia.

Mint hogy a Standard Modell keretein belül a GZK-levegás feletti események értelmezése nagyon nehéz (talán lehetetlen is?), próbáljuk meg a Standard Modellt módosítását. Az elmúlt néhány évben, több fizikus (többek közt Keith Dienes, Joseph Lykken, Savas Dimopoulos) rámutatott arra, hogy az úgynevezett univerzális hűlélméletek keretein belül teljesen lehetséges, hogy a sokféle kölcsönhatás egyesítése aránylag kis tömegközépponti energián (mondjuk, 30 TeV körül) következzen be. Ez a feltevés semmilyen jelenleg ismert mérési adattal sincs ellentmondásban. Következésményei azonban a GZK-levegás feletti eseményekkel kapcsolatban nagyon fontosak lehetnek.

Röviden arról van szó, hogy ha a kölcsönhatások egyesítése már ilyen alacsony energiákon bekövetkezik, akkor csak arra van szükség, hogy egy neutrínónak egy kissé nagyobb energiája legyen, mint a GZK-levegási energia. Ekkora energiákon a neutrínó akadálytalanul átjut a kozmikus mikrohullámháttérrel és a neutrínóháttérrel is: kölcsönhatása a mikrohullámú foton- vagy neutrínógázzal elhanyagolható. Mielőtt azonban a neutrínó ütközik egy nitrogén- vagy oxigénatom magjával az atmoszférában, a tömegközépponti energia elegendő ahhoz, hogy a neutrínó „észrevegye” a kölcsönhatások egyesülését. Ennek következtében egy proton vagy egy neutrínó kölcsönhatása az atmoszférában nagyon hasonló egymáshoz: a neutrínók is el tudnak indítani egy kiterjedt légizáporot, akárcsak a protonok. Meg tudtuk mutatni, hogy a neutrínók által keltett légizáporok átlagos viselkedése alig tér el a protonok által keltett záporokétól. Ez azért bátorító, mert, mint láttuk, Stanev és munkatársai analízise szerint az „abnormális” események viselkedése nem különbözik nagyon a protonok által keltett záporokétól. A záporok részletes vizsgálata azt mutatja, hogy a statisztikus ingadozások természete nagyon is különbözik a protonok által keltett záporokétól. Ennek az a fontos következménye, hogy ez az elméleti javaslat a GZK-levegás feletti események interpretációjára megcáfolható¹⁷.

Megtaláltuk hát a GZK-levegás feletti események magyarázatával a kulcsot, amely segítségével hozzáférhetünk a Standard Modellen túlmutató fizikához? Akármilyen válasz túlságosan korai lenne: a ma rendelkezésre álló megfigyelési adatok mindössze egy maroknyi eseményt tartalmaznak, amelyekben a záporok fejlődését a detektorok nyomon tudták követni. Új detektorok (OWL, Air Watch, Auger Observatórium) lépnek színre a közeljövőben; a HiRes már működik is. Új adataink lesznek tehát, amelyek lehetővé teszik a rejtély jobb megközelítését.

¹⁷ A filozófus Thomas Kuhn (aki különben pályafutását fizikusként kezdte) fogalmazta meg először pontosan, hogy egy fizikai elméletet bizonyítani mindig csak az adott mérési pontosság erejéig lehet. Ha azonban, ha egy kísérleti eredmény el nem tudom a tudományos hipotézisnek, akkor a hipotézist lényegesen módosítani kell, vagy egyáltalán meg kell tölte szabadulnunk. Egy hipotézis egy jelenség magyarázatára nem kielégítő, mert nem megcáfolható. Akármilyen hipotézisből további mérhető következtetéseket kell tudnunk levonni. A hipotézis így válik megcáfolhatóvá.

DOMOKOS GÁBOR (1933) professzor, Johns Hopkins Egyetem.
Levélcím: Department of Physics & Astronomy, The Johns Hopkins University Baltimore, MD 21218 – USA.
Fizikusdiploma: ELTE, 1956, a fizikai tudományok doktora, Dubna 1960.
Fő kutatási területe: elemi részecskék fizikája, részecske-asztrofizika.
E-mail: Gabor.Domokos@jhu.edu
Telefon: 00-1-410-5167377
Honlap: www.pha.jhu.edu/people/faculty/gd.html



KÖVESI-DOMOKOS ZSUZSA professzor, Johns Hopkins Egyetem.
Levélcím: Department of Physics & Astronomy, The Johns Hopkins University Baltimore, MD 21218 – USA.
Fizikusdiploma: ELTE, 1963.
Fő kutatási területe: elemi részecskék fizikája, részecske-asztrofizika.
E-mail: skd@jhu.edu
Telefon: 00-1-410-5167378
Honlap: www.pha.jhu.edu/people/faculty/skd.html