

8. CZELNAI RUDOLF: *Bevezetés a meteorológiába I. Légkörtani alapismeretek* – Egyetemi jegyzet, Eötvös Loránd Tudományegyetem, Természettudományi Kar, Tankönyvkiadó, Budapest, 1979
9. H.C. VAN DE HULST: *Light scattering by small particles* – New York, John Wiley & Sons, Inc. 1957; New York, Dover 1981
10. M. KERKER: *The scattering of light* – Academic Press, New York and London, 1969
11. JOHN A. ADAM: *The mathematical physics of rainbows and glories* – Physics Reports 356 (2002) 229–365
12. R.L. LEE, JR., A.B. FRASER: *The rainbow bridge: rainbows in art, myth and science* – Pennsylvania State University, Philadelphia, USA, 2001
13. <http://www.kfki.hu/fszemle>
<http://complex.elte.hu/cserti/Szivarvany.pdf>
14. J.D. WALKER: *Multiple rainbows from single drops of water and other liquids* – American Journal of Physics 44 (1976) 421–433
15. L.D. LANDAU, E.M. LIFSHIC: *Elméleti fizika I (Mechanika)* – Tankönyvkiadó, Budapest, 1974

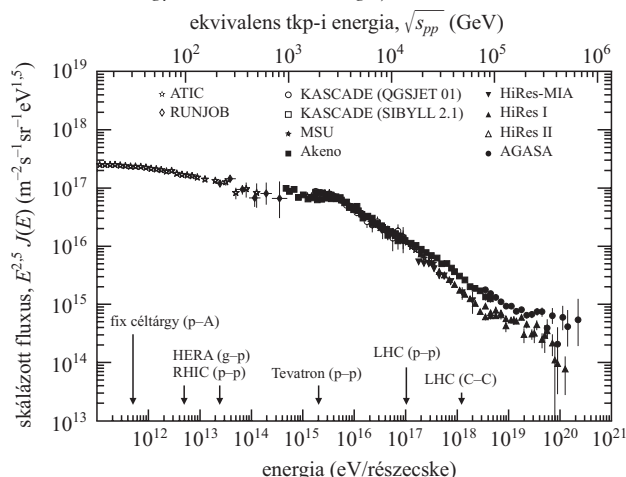
A NAGYENERGIÁJÚ NEUTRÍNÓK ÉS A KOZMIKUS SUGÁRZÁS FIZIKÁJA ÉS ASZTROFIZIKÁJA

Mészáros Péter
Pennsylvania State University

Világegyetemünk legtitokzatosabb hírvivői között vannak a neutrínók és a kozmikus sugárzás részecskéi, ezek között is pedig azok, amelyek nagy energiával érkezik Földünkhöz, azaz TeV (10^{12} eV) energiák fölött. Ezt az energiaszintet csak nemrég közelítették meg a világ legnagyobb laboratóriumi gyorsítóiban, mint például az európai CERN-ben és az USA-beli Fermilab és RHIC gyorsítóknban. Ezzel szemben, a hozzánk érkező kozmikus részecskék egy kis hányada ezt az energiaszintet több nagyságrenddel meghaladja, és a kozmikus sugárzás okozta atmoszférikus neutrínók között is akad jóval nagyobb energiájú.

A kozmikus sugárzás megfigyelt energiaspektruma eléri a 10^{20} eV-ot (1. ábra). Ezt a hatalmas, szinte makroszkopikus energiát (amely megfelel például egy gyorsan adogatott teniszlabda energiájának vagy egy 15 watos körtéből egy másodperc alatt kibocsátott energiának) egyetlen, földünkbe becsapódó atommag hozza magával. Ez a (Greisen, Zatsepin és Kuz'min kutatókról elnevezett) GZK-energiaszint, amely fölött várható, hogy a kozmikus részecskék száma drasztikusan megritkul a háromfokos kozmikus rádióhullám háttersugárzással való ($p, \gamma \rightarrow n, \pi^+$) fotomezon kölcsönhatás miatt.

1. ábra. A kozmikus sugárzás spektruma, különböző kísérletek eredményeit használva és összehasonlítva különböző jelenleg működő és tervezett földi gyorsítók elérhető energiájával [15].



Az utolsó évtized legégetőbb kérdése ezzel kapcsolatban az volt, hogy egy ilyen „GZK-levágás” észlelhető-e a kozmikus sugarak becsapódási rátáján? Ez idáig a világ két legnagyobb kozmikus sugárzást mérő berendezése, a japán AGASA és az Amerikai HiRes kísérletek csak igen kisszámú (tucatnál kevesebb) kozmikus sugárzási eseményt mértek 10^{20} eV energiák fölött, eltérő, de statisztikailag nem jelentősen különböző választ adva a GZK-levágás létezésére. Az egyértelmű választ nem könnyíti az a tény, hogy a két kísérlet más-más módszerrel és kalibrációval méri a kozmikus sugárzás részecskéinek energiáját. A földi atmoszféra felső rétegeibe érkező kozmikus sugárzás (akár proton, akár neutron, azaz közös nevükön nukleon, N) az atmoszférikus nukleonokkal az erős kölcsönhatás révén egy hadronikus elektromágneses (N, p vagy $N, n \rightarrow \text{pion, müon, elektron, pozitron}$) kaszkádszerű záport okoz, amely tehát főleg pionokból, müonokból és elektron-pozitron párokból áll.

A zápor energiáját és így az azt okozó kozmikus sugárzás nukleonjának energiáját az AGASA szcintillátorberendezésekkel a Föld szintjéhez érkező müonok révén méri. A HiRes (az előző úgynevezett „Légszem” kísérletük technikájával) a zápor által felgerjesztett atmoszférikus nitrogén fluoreszcenciáját méri optikai távcsövekkel. A legmagasabb energiájú kozmikus részecskék spektrumának és fizikai eredete kérdéseinek tisztázására már félig felépítették a Pierre Auger Kozmikus Sugárzás Observatóriumot [1], amelyet egy nemzetközi konzorcium működtet Argentínában (2. ábra). Ez a berendezés egyidejűleg kétféle módszerrel is méri a 10^{18} – 10^{20} eV energiájú kozmikus részecskéket. Egyrészt, a HiReshez hasonlóan, a zápor töltött részecskéi által a felső légkörben felgerjesztett nitrogénmolekulák fluoreszcens fényét méri több irányban figyelő optikai távcsövekkel. Másrészt, a Föld felszínére érkező zápor keltette müonpárok víztartályokban okozott Cserenkov-sugárzását figyelni meg gyors időfelbontású fotoelektron-sokszorozókkal.

Ez idáig az Auger Observatórium teljes részecske-„befogadóképessége” (accumulated acceptance) $1600 \text{ km}^2 \cdot \text{steradián} \cdot \text{év}$, ami éppen meghaladja a már leál-

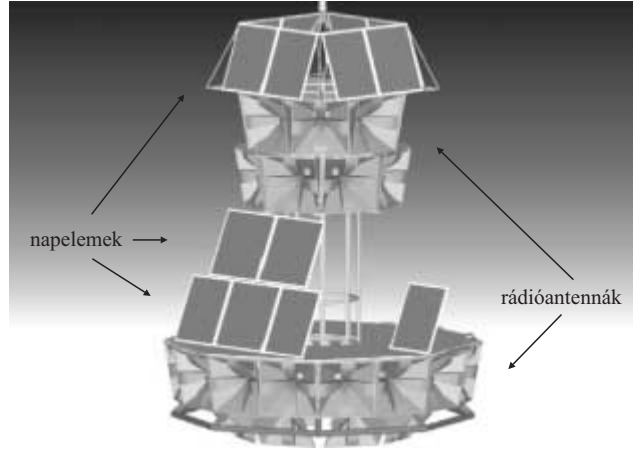


2. ábra. A Pierre Auger Koszmikus Sugárzási Observatórium egyik víz alapú Cserenkov-tankja, az argentinai Andok hegyvonulat lábánál. A 3000 km² műszerezett felületen elhelyezett 1600 tankból már 800, a 24 atmoszférikus fluoreszcens távcsőből már 12 működik.

lított AGASA tíz év alatt elért adatmennyiségét, és meghaladja a HiRes eddigi összbefogadását is. Az Auger-konzorcium most frissen megjelent jelentéseiből, amelyeket az Indiában tartott 29. Nemzetközi Koszmikus Sugárzási Konferenciára küldtek be, megerősítést nyer, hogy a 10²⁰ eV fölötti energiájú kozmikus részecskék kétségtelenül léteznek, de az egy éve működő, csak félig felépült obszervatóriumban észlelt becsapódások száma még nem elég ahhoz, hogy a GZK-levágásról véglegesen tudjon állítani [2]. A jövőre elkészülő teljes, 3000 km² területű mérőfelület viszont körülbelül tízszerese lesz az AGASA felületének, és a befogadása jövőre már kétszerese lesz az eddiginek. Így néhány éven belül komoly eséllyel rendelkezünk majd a GZK-vágás létezésének eldöntésére.

Várhatóan ezekből a 10²⁰ eV energiájú kozmikus eseményekből körülbelül EeV (azaz 10¹⁸ eV) energiájú neutrínók is keletkeznek a fotomezon kölcsönhatás révén ($p, \gamma \rightarrow \mu^+, \bar{\nu}_\mu \rightarrow e^+, \nu_e, \bar{\nu}_\mu$). A neutrínók megfigyelése körülmenyesebb, mivel ezek csak az általuk indukált másodlagos töltött müonok révén észlelhetők. A neutrínó ugyanis roppant kicsi kölcsönhatási keresztmetszettel rendelkezik, és a felülről érkező, neutrínóindukált müonok száma elenyészően kicsi a hadronikus elektromágneses zápor által indukált müonok számához képest. Viszont a láthatárnál pár fokkal alacsonyabb megfigyelési irányokból a földkéreg – éppen a gyenge kölcsönhatás okán – a neutrínókat átengedi, miközben az erősebben kölcsönható hadronkaszkádból eredő müonokat kiszűri. Az Antarktiszra telepített mérőberendezés láthatárán a jég felülete alól előbukkanó neutrínók által az utolsó több száz méteren előidézett ritka kölcsönhatások során keletkező relativisztikus müonok a Cserenkov-hatáshoz hasonló koherens rádiósugárzást okoznak (Aszkaryan-effektus), amelyet a 30–40 km magasságban a Déli Sark körül lebegő ANITA tudományos léggömb [3] lefelé irányított rádióantennáival lehet majd mérni (3. ábra). (Ennek a kísérletnek egy kisebb prototípusa már sikeresen bebizonyította a mérési elv gyakorlati kivitelezhetőségét).

A jóval alacsonyabb, de földi laboratóriumokban még nem elérhető, TeV-es energiájú extraterresztriális neutrínókról



3. ábra. Az ANITA együttműködés léggömbjének építés alatt álló, mintegy 7 m magas gondolája. Az antennák segítségével az Antarktisz fölött lebegő műszer körülbelül 680 km átmérőjű területről lesz képes az Aszkaryan-effektus rádiósugárzását mérni [3].

már egy ideje tudjuk, hogy sokkal nagyobb számban érkezik hozzánk, mint a feltételezett 10¹⁸ eV-os neutrínók. Sőt, GeV energiákon felül már az atmoszférikus neutrínók oszcillációt is kimutatták, melynek során az elektron, a müon és a tau neutrínói nagy távolságot megtéve részben egymásba változnak át ([4], Nobel-díjjal honorált kísérleti eredmény). A TeV energiáknál észlelt nagyobb becsapódási ráta kiegyenlíti, sőt meghaladja az EeV-hez képest alacsonyabb kölcsönhatási keresztmetszetet, ami viszonylag megkönnyíti a megfigyelésüket. Az égbolt felsőbb tartományából érkező neutrínók az atmoszféra felső rétegeiben újfent, bár ritkán müonokat keltnek ($\nu, N \rightarrow \text{pion} \rightarrow \text{müon}$) a gyenge kölcsönhatás révén. Ezek teljesen elvesznek a hadronikus záporok ($p, N \rightarrow \text{pion} \rightarrow \text{müon}$) által keltett, sokkal nagyobb számú müon sokaságában. Viszont azok a neutrínók, amelyek a láthatárunk szintje alatt csapódnak a Föld atmoszférájába, túlnyomó részt átjutnak a földkérgen (és ritkán megfigyelhető müonokat is keltnek), miközben a hadronikus záporok müonjai elnyelődnek a földkéregben. Így a TeV-es energiáknál is kizárólag csak az alulról érkező neutrínók megfigyeléséről lehet szó. Fontos körülmény, hogy az EeV energiáknál a neutrínószám sokkal alacsonyabb, és ezek a nagyobb hatáskeresztmetszet miatt csak a láthatár alatti néhány fokos tartományban juthatnak át a detektorhoz. Ugyanakkor PeV energiák alatt akár a Föld teljes átmérőjén is szinte elnyelésmentesen jutnak át a neutrínók. Ilyen módon a láthatár alatti majdnem 2 π szteradiánból érkező TeV–PeV energiájú atmoszférikus neutrínókat már több éve méri a Déli Sarkon sikeresen működő Amanda kísérlet. Ennél is jóval érzékenyebben fogja ezt megtenni ennek a kísérletnek most épülő, IceCube nevű [5] hússzor nagyobb mérőtér fogatú utódja.

Honnét jönnek ezek a hatalmas energiájú kozmikus sugarak és a velük összekapcsolódó neutrínók, és milyen módon érik el ezeket az energiákat? Az izotrop érkezési irány azt bizonyítja, hogy a naprendszerünknel, sőt a Tejútjánál (galaxisunknál) is jóval távolabbi szülőhelyet kell feltételeznünk. Másrészt a GZK kozmikus sugárzás 95%-os bizonyossággal nem fotonokból áll [6], és részecskéi – mivel elektromágneses záporokat okoznak –

elektromos töltéssel is rendelkeznek. Nagy impulzusuk folytán pedig nukleonokra lehet következtetni. Ha protonokról van szó, felgyorsításuk 10^{20} eV energiára, történjék ez akár elektromágneses terek révén (pl. [7]), akár lökéshullámokkal, azaz a Fermi-gyorsítás révén (pl. [8]), a következő feltételt adja a V potenciálra, amellyel E_p energiára gyorsítjuk fel a protonokat,

$$V = \frac{1}{c} \frac{d\Phi}{dt} \sim \frac{1}{c} \frac{BR^2 v}{R} \sim \beta BR > \frac{E_p}{e},$$

ahol Φ a mágneses fluxus, t az idő, R a gyorsítási távolság, V a gyorsítási térerőssége, $\beta = v/c$ és B a mágneses tér. Másrészt, a forrás luminozitására (L), amelyből ezek a részecskék erednek, az

$$L > \frac{B^2}{8\pi} 4\pi R^2 v > \left(\frac{E_p}{\beta e}\right)^2 \beta c = \frac{c}{\beta} \left(\frac{E_p}{e}\right)^2 \\ \sim 10^{45.5} E_{p,20}^2 \text{ erg/s}$$

követelményt kell kielégítenie, ahol $E_{p,20} = E_p/10^{20}$. Ennek a követelménynek általában csak kétféle asztrofizikai objektum felel meg: a gamma-kitörések (GRB-k) és az aktív galaxismagok (AGN-ek). Ezekről viszont tudjuk, hogy a szóba jöhető v tömegsebességek erősen relativisztikusak: az AGN-eknél észlelt részecskecsóvák (*jets*) Lorentz-faktora, γ_p , a 10–30 értékig is felmegy, míg a GRB-eknél észlelt csóvák átlagos γ_j értéke 300 körül van. Így tehát a gyorsításra fordítható t időből és az R távolságból egy-egy γ_j faktor jön be, amivel a luminozitási követelmény megnövekszik az

$$L > \frac{2\gamma_j^2}{\beta} E_{p,20}^2 10^{45.5} \text{ erg/s},$$

tehát legalább a 10^{47} – 10^{48} erg/s értékre. Itt már csak a legerőteljesebb AGN-ekről lehet szó, vagy pedig a GRB-kről, amelyeknek az átlagos luminozitása is megfelel ennek a feltételnek.

Mind a GRB-ekben, mind az AGN-ekben a részecskegyorsítás valószínűleg a Fermi-mechanizmus révén történik, amelyben a töltött részecskék a csóvákban megjelenő lökéshullámok diszkontinuitásán keresztül többszörösen oda-vissza szóródnak, minden egyes szórásnál a tömegsebesség különbségének megfelelő energiával gyarapodva. Ráadásul, mivel a csóvák maguk is relativisztikus tömegsebességgel ($\gamma_j \gg 1$ Lorentz-faktorral) mozognak, a csóvában elért részecskeenergiák egy további γ_j együtthatóval megszorozva figyelhetők meg.

A lökéshullámok általi Fermi-gyorsítás egyébként nagy valószínűséggel bebizonyított jelenség a szupernóva-maradványoknál, ahol a megfigyelt nem termikus gamma-, röntgen- és rádiósugárzás a felgyorsított elektronok szinkrotronsugárzásával magyarázható. Ilyen nem termikus fotonokat észleltek szupernóva-maradványokban, például a HESS Cserenkov-távcsővel, egészen 20 TeV energiáig [9]. Másrészt, a szupernóva-maradványokban tartalmazott protonok és ionok is szükségszerűen részt vesznek a gyorsítási folyamatban, és ezek is relativisztikus energiákat érhetnek el, legalább PeV-es

energiáig. A kozmikus sugárzásban PeV alatt észlelt protonok eredetének ez a legvalószínűbb magyarázata. Vitatott kérdés még az, hogy a szupernóva-maradványokban észlelt 20 TeV-es fotonok vajon teljes egészében az elektronok inverz Compton-szórásából erednek-e, vagy a proton–proton kölcsönhatásokban keletkező pionok bomlásának eredményei.

A GRB- és AGN-csóvákban is jól magyarázható a megfigyelt gamma-, röntgen- és optikai nem termikus foton-spektrum a lökéshullámok által gyorsított relativisztikus elektronok szinkrotron és inverz Compton-sugárzásával (pl. [10, 11]). Itt is várható a jelen levő ionok felgyorsítása, mégpedig ugyanazon fizikai körülmények között, amelyekkel a foton-spektrum is magyarázható, a protonok esetében egészen a megfigyelt rendszerében mért 10^{20} eV energiáig [12]. Tehát lehetséges, hogy a GZK-energiás protonok forrásai a GRB-k, vagy esetleg az erősebb AGN-ek.

Másrészt, a GZK tartománybeli kozmikus sugárzás megfigyelt fluxusát is meg kell magyarázni, mely körülbelül egy részecske négyzetkilométerenként és száz évenként. Az E_p energiájú protonok pionkeltés miatt elnyelődnek, amikor

$$E_\gamma > \frac{m_\pi m_p}{E_p} \sim 10^{-3} E_{p,20}^{-1} \text{ eV}$$

energiájú fotonokkal kölcsönhatnak. Ilyen energiájúak a 3 K hőmérsékletű kozmikus háttérsugárzás fotonjai, amelyek sűrűsége

$$n_\gamma \sim (400/\text{cm}^3) \exp\left(1 - \frac{3}{E_{p,20}}\right).$$

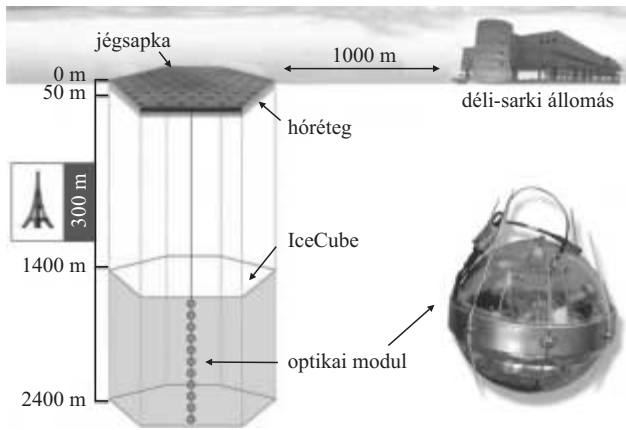
A protonok szabad úthossza tehát

$$\lambda_E \sim \frac{m_p}{m_\pi} \frac{1}{n_\gamma \sigma_\pi} \sim 11 \exp\left(\frac{3}{E_{p,20}} - 1\right) \text{ Mpc},$$

az úgynevezett „GZK-távolság”, ahol egy megaparsec = 1 Mpc \sim 3 millió fényév, m_p és m_π a proton és a pion tömege, σ_π a (p, γ) fotomezon reakció hatáskeresztmetszete $\sim 5 \cdot 10^{-26}$ cm². Tehát legfeljebb 50 Mpc-en belül kereshetők a GZK-protonok forrásai.

Itt ötlük fel az AGN-eredettel kapcsolatos egyik legnehezebb probléma: 50 Mpc-en belül csak néhány (gyengébb) AGN található. Ráadásul, ennél az energiánál a protonoknak az intergalaktikus és galaktikus mágneses térben történő elhajlása legfeljebb 1 fokos. Amíg az alacsonyabb energiájú kozmikus sugárzás érkezési irányát a mágneses elhajlás izotropizálja, addig a GZK-protonok szinte egyenes vonalban érkeznek hozzánk. Márpedig, az eddig megfigyelt GZK-protonok nem mutatnak semmilyen kitüntetett érkezési irányt. Tehát jóval nagyobb számú forrást kell feltételeznünk, mint amennyi erős AGN van ezen a GZK-távolságon belül.

A GRB-k esetében is látszólag probléma lép fel, mivel a (felénk irányított csóvájú, tehát megfigyelhető) kitörési ráta körülbelül $R_{\text{GRB}} \sim 0,5 \cdot 10^{-3} (D/100 \text{ Mpc})^{-3}$ évente. Viszont az intergalaktikus mágneses térben fellépő időbeli diszperzió



4. ábra. A Déli Sarkon építés alatt álló IceCube jég alapú Cserenkov-neutrínódetektor sematikus ábrája. Egy köbkilométeres térfogatot nanomásodperces felbontású fotocsövekkel műszereznek fel, amelyeket szálakon eresztnek le 1,5 és 2,5 kilométer közötti mélységbe, és a neutrínóütkezésekből eredő, felfelé törő müonok Cserenkov-fényét mérik. Az Amanda-II prototípus 12 szállal és 677 fotocsövel már sikeresen működik, az IceCube majd 80 szálon 4800 fotocsövel fog működni. A prototípusvizsgálat céljára ezekből egy szállal már bővítették a létező Amanda berendezést.

$$t_{disp} \sim 3 \cdot 10^7 \text{ év} \left(\frac{B}{10^9 G} \right)^2 \left(\frac{\lambda_B}{10 \text{ Mpc}} \right) \left(\frac{D}{100 \text{ Mpc}} \right) E_{p,20}^{-2},$$

ahol a $B \sim 10^{-9} G$ és a $\lambda_B \sim 10 \text{ Mpc}$ értékek parametrizálják az intergalaktikus mágneses tér átlagerősségét és a koherenciahosszát. Ezzel a GZK-távolságon belül

$$N_{GRB} \sim R_{GRB} t_{GRB} \sim 5 \cdot 10^3 B_{-9}^2 \lambda_{B,10} D_{10}^2 E_{p,20}^2$$

adja meg a GZK-fluxushoz járulékot adó GRB-k számát, ami megfelel a követelményeknek.

A GRB-knél csakúgy, mint az AGN-eknél, a protonok a GZK-energia alatt egy $N(E_p) \sim E^{-2}$ körüli energiaeloszlást alakítanak ki a Fermi-féle gyorsítási mechanizmussal. Különböző kölcsönhatások változtatják az eloszlást a protonok intergalaktikus útja során. A forrásokban magukban egy másik kölcsönhatás vezet igen érdekes következményekre. Ez a reakció újfent a

$$p, \gamma \rightarrow \Delta^- \rightarrow n, \pi^+ \rightarrow \pi^+, \nu_\mu \rightarrow \bar{\nu}_\mu, e^+, \nu_\mu$$

fotomezon kölcsönhatás a felgyorsított relativisztikus protonok és, ez esetben, a forrásban keletkezett fotonok között. A GRB-k esetében a fotonluminozitás az eredeti kitörés ideje alatt alapvetően egy hatványfüggvényyszerű eloszlás, amelyre átlagosan fennáll (pl. [10]), hogy $N(E_p) \sim E^{-1}$, illetve $N(E_p) \sim E^{-2}$, az úgynevezett $E_{br} \sim 1 \text{ MeV}$ törési energia alatt, illetve felette. A fotonok sűrűsége a lökeshullám térfogatában a gamma-kitörés ideje alatt elég nagy ahhoz, hogy a gyorsított protonok (p, γ) kölcsönhatási átlagideje ugyanolyan nagyságrendű legyen, mint a dinamikai vagy a gyorsítási időskála, így a protonok energiájának jelentős része, amennyiben az meghaladja a Δ rezonancia küszöbét, müon és ν formájában jelenhet meg. A gamma-kitöréssel egy időben tehát, a GRB luminozitásának egy jelentős része ν_μ -ként és $\bar{\nu}_\mu$ -ként várható [13]. A neutrínóspektrum a fotonok spektrumot tükrözi, a neutrínókitörési energia körülbelül 100 TeV (ahol a fo-

tonkitörési energia a proton nyugalmi rendszerében megfelel a Δ rezonancia energiájának).

A neutrínók szinte elnyelés nélkül, egyenes vonalban jutnak el hozzánk az Univerzum legtávolabbi részeiből, ahol a GRB-kitörések történnek. Az egész Univerzumban évenként kitörő GRB-k (kb. egy GRB naponta) egy „diffúz neutrínó-háttérsugárzást” adnak. Az Antarktisz jegében elhelyezkedő köbkilométeres IceCube [5] Cserenkov-detektor (4. ábra), vagy a köbkilométeres KM3NeT vizes Cserenkov-detektor (az Európai Unió indítványára az Antares prototípusra alapozva, pl. [14] a Földközi-tenger alatt épül) ezt a diffúz neutrínóháttérrel észlelni tudja majd a neutrínók által keltett, a Föld belsejéből felfelé haladó müonok Cserenkov-fénye révén. Ezek megjelenési ideje egybeesik az egyes gamma-sugarak által jelzett GRB-k kitörési időpontjával. Különösen közeli GRB-k esetében pontszerű neutrínóforrásként is észlelni lehet a kitöréseket. Az atmoszférikus neutrínók háttérzaja kiküszöbölhető a kitörés rövid időtartama és jól meghatározott irányja segítségével. (Mind a jégbe, mind a vízbe telepített köbkilométeres Cserenkov-detektorok körülbelül 0,5–0,7 fokos irányfelbontásra képesek 1–100 TeV között, pl. [5, 14]).

A nagyenergiájú kozmikus sugárzás és a neutrínók rejtélye sokkal behatóbb vizsgálódás tárgya lesz a következő öt évben az Auger, az IceCube és más nagyszabású kísérletek révén. Az itt felvázolt kérdések a nagyenergiájú részecskék fizikájának és asztrofizikájának csak egy részét jelentik. A múlt tapasztalataira alapozva, nagy valószínűséggel feltételezhető, hogy a jelenlegi kérdések tisztázásával egy időben egy egész sor új kérdéskör tárul majd fel, amint a ma elérhető legnagyobb energiákon és távolságokon túlhatolunk.

Köszönetnyilvánítás

Köszönettel tartozom Patkós András és Balázs Lajos kollégáimnak, valamint az ELTE Atomfizikai Tanszékének a szíves vendéglátásért és közreműködésért, amely a Magyar Tudományos Akadémiának egy Domus-ösztöndíja és az OTKA (T034549), NASA NAG5-13286 és NSF AST0307376 programok támogatásával történt.

Irodalom

1. J.W. CRONIN – Nucl. Phys. B138 (2005) 465, további részletek: <http://www.auger.org/>
2. P. SOMMERS és az AUGER COLLABORATION – 29th ICRC Procs., Pune, India, 2005, <http://www.arxiv.org/pdf/astro-ph/0507150>
3. ANITA COLLABORATION – Nucl. Phys. B Supp. 143 (2005) 554, további részletek: <http://www.phys.hawaii.edu/~anita/>
4. M. KOSHIBA – (2002) http://www.icepp.s.u-tokyo.ac.jp/news/Nobel_prize_en.html
5. J. AHRENS és az ICECUBE COLLABORATION – New Astronomy Reviews 48 (2004) 519, további részletek: <http://icecube.wisc.edu/>
6. M. RISSE és az AUGER COLLABORATION – 29th ICRC Procs., Pune, India, 2005, <http://www.arxiv.org/pdf/astro-ph/0507402>
7. A.M. HILLAS – Annual Reviews Astronomy and Astrophysics 22 (1984) 425
8. R. BLANDFORD, D. EICHLER – Phys. Rep. 154 (1987) 1
9. F. AHARONIAN, és mtársai – Astronomy and Astrophysics 437 (2005) L7, további részletek: <http://www.mpi-hd.mpg.de/hfm/HESS/HESS.html>
10. P. MÉSZÁROS – Annual Reviews Astronomy and Astrophysics 40 (2002) 137
11. L. MARASCHI, F. TAVECCHIO AIPC 745 (2005) 129
12. E. WAXMAN – Phys. Rev. Lett. 75 (1995) 386
13. E. WAXMAN, J.N. BAHCALL – Phys. Rev. Lett. 78 (1997) 2292
14. J. AGUILAR és az ANTARES COLLABORATION – Astroparticle Phys. 23 (2005) 131, további részletek: <http://km3net.org/>
15. R. ENGEL – Nucl. Phys. B Supp (2005) in press (astro-ph/0504358)