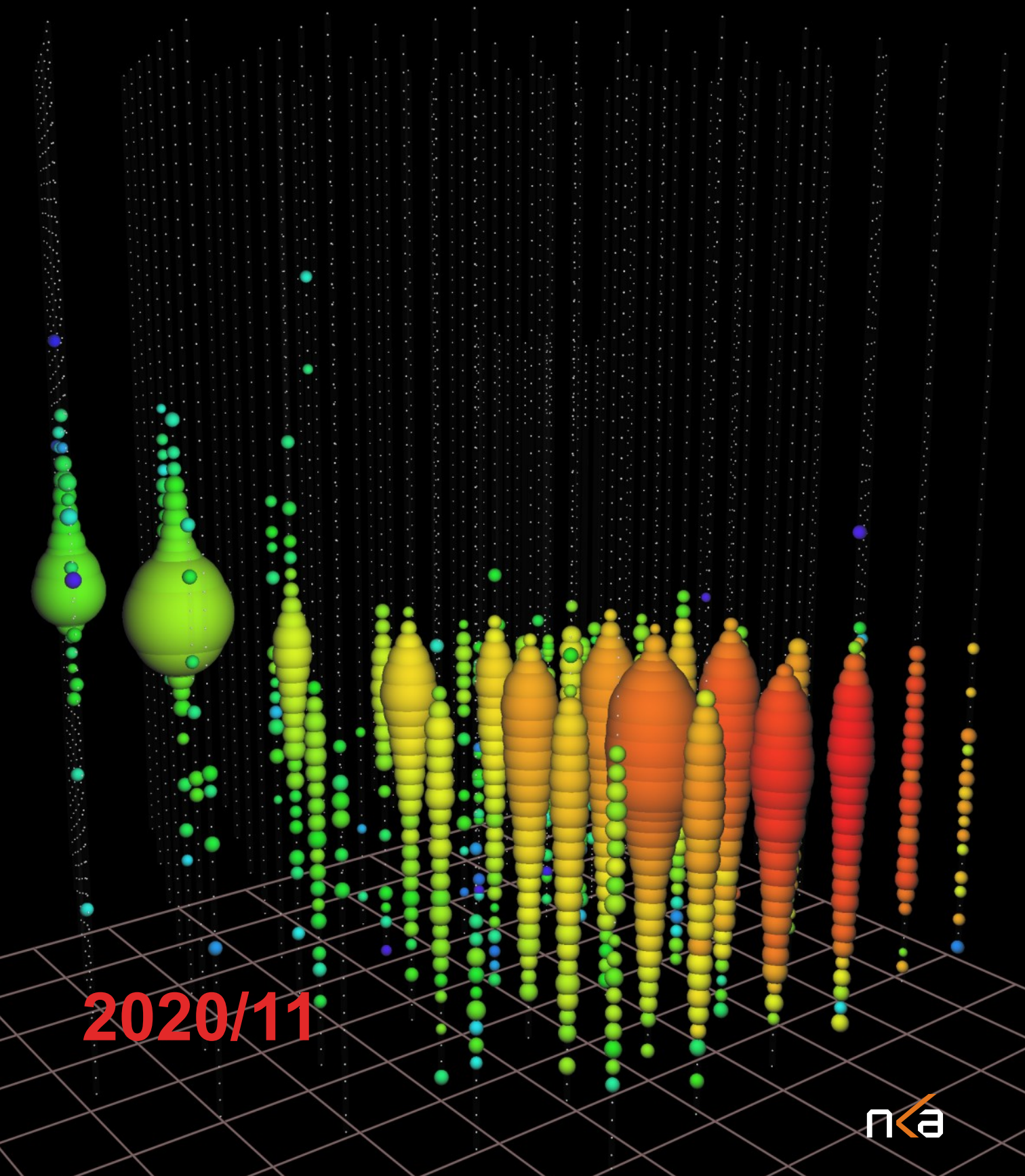


fizikai szemle



2020/11

A csillagászok a négy kozmikus hírvívő, az elektromágneses sugárzás, a kozmikus sugarak, a neutrínók és a gravitációs hullámok megfigyelésével tanulmányozzák a Világegyetemet. Minden egyes észlelési ablak kinyitásával valami újat tanultunk és tanulunk jelenleg is a körülöttünk levő fizikai világról. A négy kozmikus hírvívő valamelyikének detektálására alkalmas földi és űrbe telepített obszervatóriumok együttműködésén alapuló többcsatornás, vagy angol kifejezéssel „multimessenger”-csillagászat a Világegyetem legenergiásabb jelenségeinek egyidejű megfigyelését teszi lehetővé. Ilyenek például a kozmikus részecskegyorsítók, nagy energiájú kozmikus sugarak, γ -fotonok és neutrínók erős forrásai.

Az extragalaktikus eredetű, azaz a galaxisunk határain túlról érkező hírvívők közül a neutrínókat észlelhetjük a Világegyetem azon távoli szegleteiből is, amelyek mind a kozmikus sugarak, mind a fotonok számára átláthatatlan régiók – a neutrínók a Világegyetem legjobb szabadulóművészei. Ez a tény, illetve a neutrínódetektorok öröndetes fejlődése óriási lendületet adott a neutrínócsillagászatnak.

Bevezető

A neutrínók könnyű elemi részecskék, leptonok, fermionok. A négy alapvető kölcsönhatás közül a gravitációtól eltekintve csak a gyenge kölcsönhatásban vesznek részt, emiatt az anyaggal szemben közömbösek és detektálásuk nehézkes. Három ízüket ismerjük aszerint, hogy melyik másik leptonnal hozhatók kapcsolatba valamilyen bomlási folyamatból: elektronneutrínó (ν_e), müon-neutrínó (ν_μ) és tau-neutrínó (ν_τ), illetve ezek antirészecskéi. Nyugalmi tömegük felső határa a KATRIN kísérlet legfrissebb eredményei szerint 1,1 eV [1].

Földi körülmények között neutrínók például részecskegyorsítóknál és atomreaktorokban, de akár a Föld belsejében is keletkezhetnek. Az égbolt felől érkező neutrínóknak eredetük és energiájuk szerint négy csoportját különböztetjük meg. Ezek növekvő energia szerint a kozmikus neutrínóhátér, sztelláris neutrínók, kozmikus és kozmogenikus neutrínók. A

kozmosz neutrínóhátér egyik komponense a primordiális neutrínóhátér, ami az ősrobbanást („Big-Bang”) követő első egy-két másodpercben indult útjára. Minden köbcentiméterben akár 300 ilyen úgynevezett Big-Bang neutrínó is lehet, viszont már jelentősen lehűltek ($E \sim 10^{-4}$ eV), emiatt detektálásuk komoly technikai kihívás, ugyan vannak rá kísérletek [2], kimutatásuk eddig nem sikerült. A diffúz szupernóva-neutrínó-hátér a Világegyetemben lezajlott szupernóva-robbanások összessége adja, amely kis energiájú neutrínók folytonos forrása. Fluxusának felső határa a negyedik Szuper-Kamiokande mérései szerint $2,9 \bar{\nu}_e/\text{cm}^2/\text{s}$, 17,3 MeV energiaszint felett [3]. A sztelláris, néhány száz 10 MeV-nél kisebb energiájú neutrínók főként nukleáris folyamatokban jönnek létre, például a Nap belsejében vagy robbanó szupernóvákban. A nagy, 10 GeV feletti energiájú kozmikus neutrínók távoli források kozmikus sugarai által keltett mezonok bomlása során jönnek létre. Az extrém nagy, néhány száz 10 PeV feletti energiájú kozmogenikus neutrínók az ultranagy energiájú kozmikus sugarak és a kozmikus mikrohullámú háttér sugárzás kölcsönhatásában jönnek létre, első detektálásuk még várat magára. Jelen írásban a kozmikus neutrínók keletkezésével és detektálásával foglalkozunk.¹

Kozmikusneutrínó-keltő kölcsönhatási csatornák

A kozmikus neutrínók keltésére a „fentről le” elv érvényes, azaz a neutrínók nagyobb tömegű részecskék bomlásából jönnek létre. Két neutrínó-keltő kölcsönhatási csatornát különböztetünk meg. Az egyik csatornában a relativisztikus sebességű protonok fotonokkal, a másik csatornában pedig egymással vagy a körülöttük levő anyaggal hatnak kölcsön. A neutrínók keltésének feltétele, hogy az elsődleges részecskék közötti kölcsönhatás tömegközépponti energiája fedezze a neutrínóvá és egyéb részecskékké bomló másodlagos részecske nyugalmi energiáját. Ha nagy energiájú proton fotonnal találkozik, az energiakövetelmény teljesülése esetén egy Δ^+ részecske jön létre, ami 2/3 valószínűséggel semleges töltésű pionná és protonná, vagy 1/3 valószínűséggel pozitív töltésű pionná és neutronná alakul:

$$\begin{aligned} p + \gamma &\rightarrow \Delta^+ \rightarrow \pi^0 + p, \\ &\rightarrow \pi^+ + n. \end{aligned} \quad (1)$$

¹A már megszokott MeV, azaz megaelektronvolt (10^6 eV) mellett az írásban többször előfordul a GeV (giga, 10^9 eV), a TeV (tera, 10^{12} eV), a PeV (peta, 10^{15} eV), valamint az EeV (exa, 10^{18} eV) egység is.



Kun Emma a CSFK Konkoly Thege Miklós Csillagászati Intézetének tudományos munkatársa, MTA Prémium posztdoktori ösztöndíjas, Junior Prima-díjas csillagász. Kutatási területei az aktív galaxismagok és nagy energiájú részecskesugárzások, extragalaktikus részecskenyalábok interferometriai rádiócsillagászata, szupernagy tömegű fekete lyuk-kettősök, galaxisok forgásgörbéi.

Ha egy nagy energiájú proton másik protonnal hat kölcsön, az energiakövetelmény teljesülése esetén a kölcsönhatásban ugyanakkora valószínűséggel jön létre semleges, pozitív vagy negatív töltésű pion (és egyéb részecskék):

$$p + p \rightarrow N_{\pi} [\pi^0 + \pi^+ + \pi^-] + X. \quad (2)$$

A pozitív (negatív) töltésű pion aztán müonkeltésen és bomláson keresztül müonneutrínóvá (müon-antineutrínóvá), pozitronná (elektronná), elektronneutrínóvá (elektron-antineutrínóvá), valamint müon-antineutrínóvá (müonneutrínóvá) bomlik:

$$\pi^+ \rightarrow \mu^+ + \nu_{\mu}, \quad \mu^+ \rightarrow e^+ + \bar{\nu}_{\mu} + \nu_e, \quad (3)$$

illetve

$$\pi^- \rightarrow \mu^- + \bar{\nu}_{\mu}, \quad \mu^- \rightarrow e^- + \nu_{\mu} + \bar{\nu}_e. \quad (4)$$

A főként nagy energiájú protonokból és könnyebb atommagokból álló kozmikus sugarak, az elektromágneses spektrum legenergiikusabb tartományába eső γ -fotonok és a kozmikus neutrínók keltődése tehát szorosan összefügg. A következőkben a nagy energiájú kozmikus neutrínók elsődleges részecskéit tárgyaljuk.

Ultrahigh energiájú kozmikus sugarak

A kozmikus sugarak főként nagy energiájú hadronokból állnak. Szerepük fontos a galaktikus dinamikában, felfelemelegítik a csillagközi gázt, befolyásolják a csillagformálódást és kölcsönhatnak a mágneses terekkel is. A megfigyelt elsődleges (azaz a Föld atmoszféráján túlról érkező) kozmikus sugarak jó közelítéssel hatványfüggvény alakú energiaspektrumának abszcissza-tengelye 12 nagyságrendet átfogva 0,1 GeV-tól valamivel több mint 10^{11} GeV-ig, a fluxus pedig 4 részecske/cm²/s-tól 1 részecske/km²/100 évig tart, 32 nagyságrendet átfogva (részecske/m²/sr/s/GeV egységben) [4, 5]. Kompozíciós mérések szerint a spektrum 100 GeV körüli energiáig erősen protondominált, efelett a protonok mellett nehezebb magok is előfordulhatnak [6]. A spektrum karakterisztikus jellemzői (törések a spektrumban) az „első térd” 3 PeV-nál, a „második térd” 100 PeV-nál, a „boka” 8 EeV-nál és a „lábuji” 60 EeV-nál [7]. A galaktikus és extragalaktikus eredet közötti átmenet 10^9 GeV körül, a boka környékén következik be.

Az ultrahigh energiájú kozmikus sugárzást („ultra-high energy cosmic rays”, UHECR) a 10^{18} eV, némely esetben a 10^{20} eV energiát is meghaladó energiájú hadronok alkotják. Az UHECR-részecskék fluxusa igen csekély: becslések szerint egy 1 km²-es területen közel 1 évszázadot kell várni 1 ilyen részecske detektálásához. Mi okozhatja ezt a kicsi detektálási gyakoriságot? Az UHECR-részecskék kölcsönhatnak a kozmikus mikrohullámú háttérsugár-

zás (KMHS) fotonjaival, $5 \cdot 10^{18}$ eV felett a Bethe-Heitler-féle párkeltés

$$p + \gamma_{\text{KMHS}} \rightarrow p + e^+ + e^-, \quad (5)$$

$5 \cdot 10^{19}$ eV felett pedig a már látott Δ^+ részecske keltése által. Párkeltés esetén, 10^{19} eV energia körül a hígulási hossz (az a távolság, amelynek megtétele után a UHECR-részecske közegen való áthaladásának valószínűsége e -ed részére csökken) 1000 megaparszek (Mpc) [8]. Δ -rezonancia esetén ez a távolság már csak néhányszor 10 Mpc [8]. Az ennél távolabbról a Föld irányába induló UHECR-részecskék fluxusa jelentősen lecsökken, ami a Greisen–Zacepin–Kuzmin (GZK-) levágást eredményezi az energiaspektrumukban [9, 10]. A GZK-horizont távolsága $5 \cdot 10^{19}$ eV energián ~ 50 Mpc, ami kicsivel több mint 0,01-os vöröseltolódásnak (z) felel meg. A GZK-levágás feletti energiájú, azaz kozmikus értelemben fiatal UHECR-részecskéket is detektáltak már, ezek valószínűleg a lokális Univerzumból ($z \leq 0,05$) származnak. A GZK-horizonton túli, $5 \cdot 10^{19}$ eV energia feletti UHECR-részecskék és a KMHS kölcsönhatásában keletkezett neutrínók a már említett kozmogénikus vagy GZK-neutrínók. Töltött részecskék lévén a galaktikus és intergalaktikus mágneses terek az UHECR-eket eredeti pályájuktól eltérítik [11], forrásaik körül diffúz jellegű forró foltokat hozva létre. Így a csekély számú detektált UHECR-részecskét nehéz az égi forrásaikhoz kapcsolni.

A protonok nyugalmi tömege (energiaegységekben) 938 MeV. Milyen kozmikus részecskegyorsítókban és mely folyamatok által érhetik el az UHECR-részecskék a nyugalmi tömegüknek megfelelő energiánál jellemzően 10–12 nagyságrenddel nagyobb energiát? Keletkezésüknek két alapvető elvét ismerjük, a „fentről le”, és a „lentől fel” típusú modelleket. A „fentről le” forgatókönyv szerint az UHECR-részecskék olyan szupernehéz részecskék bomlásából jönnek létre, amelyek energiája 10^{20} eV-tól egészen a GUT-skáláig, $\sim 10^{25}$ eV-ig terjed [12]. Az ilyen típusú modellekben a protonok a Föld közelében jönnek létre (γ -fotonokkal és nagy energiájú neutrínókkal egyetemben), így elméleti spektrumukban nem jelenik meg a GZK-levágás. A folyamatra utaló jelek hiánya és a kozmikus spektrumban ténylegesen jelen levő GZK-levágás miatt mai ismereteink szerint a „fentről le” helyett az UHECR-részecskék „lentől fel” típusú elv szerint keletkeznek, azaz távoli forrásokban a kezdetben kisebb energiájú kozmikus sugarak gyorsulnak fel ultrahigh energiákra.

A töltött kozmikus sugarakat leghatékonyabban ultrahigh energiákra gyorsító egyik mechanizmus, a diffúz lökeshullám általi gyorsítás, vagy elsőrendű Fermi-gyorsítás. Ez hidrodinamikai lökeshullámok határfelületén történik, ahol a különböző plazmaállapotok közötti határfelületen a részecskesebesség hirtelen megváltozik. Asztrofizikai lökeshullámokban általában az inhomogén mágneses tér felelős a kozmikus sugarak gyorsításáért [13]. Ilyen típusú UHECR-

gyorsítás történhet galaxishalmazokat körülvevő burkokban, csillagontó galaxisok szeleiben, aktív galaxismagok permanens és γ -kitörések tranziens részecskenyalábjában, vagy árapály-szétszakítások részecskenyalábjában. Az „Espresso” modellben az UHECR-részecskék olyan szupernóva-maradványokban létrejöttek, kezdetben alacsonyabb energiájú kozmikus sugarak, amelyek AGN-ek relativisztikus nyalábjá általi nyírás gyorsítással akár a 10^{20} eV energiát is képesek elérni [14]. UHECR-részecskék létrejöhetnek fiatal, gyorsan forgó neutroncsillagok és magnetárok szeleiben, elektromotoros erő általi gyorsítás hatására. A Pierre Auger Array és Telescope Array UHECR-detektorok mérései szerint az AGN-ek és csillagontó galaxisok szignifikáns UHECR-források. Vak keresések alapján a szupergalaktikus sík² irányából mérhető a legerősebb UHECR-anizotrópia (ahol egyébként csillagontó galaxisok és AGN-ek is előfordulnak) [15–17].

Kozmikus neutrínók

Ahol kozmikus sugarak UHECR-részecskékké gyorsulnak, ott γ -fotonok és nagy energiájú neutrínók is keltődnek. Az extragalaktikus gyorsítóközegekből származó nagyon nagy, akár 100 GeV feletti energiájú γ -fotonok eltérülés nélkül utaznak a Világegyetemben, viszont ezeknek is van horizontja (1 TeV felett körülbelül $z \sim 1$ -ig látunk γ -tartományban). Ennek oka az, hogy a γ -fotonok kölcsönhatnak az extragalaktikus háttérfénnyel, valamint a KMHS fotonjaival, és a vonatkozó energiakritérium teljesülése esetén a γ -fotonok párkeltés során ($\gamma + \gamma \rightarrow e^+ + e^-$) megsemmisülnek.

A kozmikus neutrínók tehát kulcsfontosságú hírnökök a Világegyetem kozmikus sugarak és fotonok számára áthatolhatatlan részeinek megismeréséhez, viszont – mivel gyengén hatnak kölcsön az anyaggal – detektálásuk komoly kihívás. Ezért a neutrínódetektorokat a földfelszín alá, jégbe, bányákba, tavakba, tengerekbe helyezik, ahol a detektoranyag kiszűri a zavaró kozmikus háttérrel. Az eddig észlelt kozmikusneutrínó-események közül a legnagyobb energiájúak PeV nagyságrendűek, többségük 10–100 TeV nagyságrendű. Az eddig detektált müonok közül a legenergiusabb 4,5 PeV energiájú volt, az ezt keltő müonneutrínó energiája pedig körülbelül 8,7 PeV, vagyis 0,014 J lehetett. Ez majdnem 16 nagyságrenddel nagyobb a neutrínók nyugalmi tömegének felső határánál, ami elképesztően nagy nem termális energiára utal.

Galaktikus neutrínóforrások

A nagy tömegű csillagok fejlődésének végén bekövetkező SNII-típusú szupernóva-robbanások során keletkező lökéshullámok sűrű csillagközi anyaggal találkozva PeV energiákra gyorsítják az abban jelen

levő töltött hadronokat, TeV tartományba eső energiájú neutrínók emissziójához vezetve. Neutroncsillagok kettős rendszerének összeolvadásában ezred másodperces periódussal forgó pulzárok jöhetnek létre. A Rák-köd észlelései azt mutatják, hogy a központi pulzár forgási energiájának nagy része a pulzárszelet alkotó plazma kinetikai energiájává alakul át, ami a csillag nyugalmi rendszeréből nézve akár 10^9 – 10^{10} Lorentz-faktorú plazmamozgást is eredményezhet. További galaktikus források például mikrokvazárok, magnetárok, anomális röntgenpulzárok, molekulafelhők [18].

Extragalaktikus neutrínóforrások

Aktív galaxismagok

Az aktív galaxismagok (active galactic nuclei, AGN) a legnagyobb folyamatos fénytelteljesítményű objektumok a Világegyetemben. Hajtómotorjuk a központi szupernagy tömegű fekete lyuk, ami a környezetéből származó anyagból tömegbefogási, úgynevezett akkréciós korongot formál maga körül. Rádióhangos AGN-ekben a forgó fekete lyukak közvetlen közeléből részecskenyalábok párja indul. Legvalószínűbb forrásuk a központi fekete lyuk forgása, ami óriási energiát juttat a nyalábokba. Az AGN-nyalábok a Világegyetem legerősebb permanens részecskegyorsítói. A részecskenyalábokra való rálátás függvényében a rádióhangos AGN-ek három osztályát különböztetjük meg: blazárok (BL Lac objektumok és lapos spektrumú kvazárok), kvazárok és rádiógalaxisok (Fanaroff–Riley I és II típusok [FR-I, FR-II]).

Jelen tudásunk szerint a részecskenyalábjukat a Föld felé irányító AGN-ek, a blazárok domináns komponensét adják az AGN-ek folytonos neutrínóspektrumának [19, 20]. Intenzív extragalaktikus rádió-, optikai, röntgen- és némely esetben γ -források. A blazárok felől érkező sugárzást minden hullámhosszon a Doppler-erősített részecskenyalábjuk dominálja. A részecskenyalábokban felgyorsított kozmikus sugarak kölcsönhatnak a közeli gázzal és/vagy sugárzási térrel, nagy energiájú neutrínók emissziójához vezetve. Az akkréciós korong fotontengere például kiváló neutrínókeltő célközeg. Az FR-I típusú rádiógalaxisok nyalábjai [21] és a rádiócsendes, röntgenben detektált AGN-ek akkréciós korongja [22] is hozzájárulnak a folytonos neutrínóspektrumhoz. A TeV-emitterek (főként blazárok) és az FR-II típusú rádiógalaxisok tranziens neutrínóflereket mutathatnak [21, 23]. Kozmikus neutrínók keletkezhetnek szupernagy tömegű kettős fekete lyukak részecskenyalábjában is [24–26].

Csillagontó galaxisok

A rádiófrekvenciákon észlelt szinkrotronsugárzás alapján relativisztikus elektronok populációja sejtethető a csillagontó galaxisokban. A relativisztikus elektronok jelenlétéből valamiféle gyorsító folyamatra következtetünk. A Pierre Auger Array detektor mérései megmutatták, hogy a csillagontó galaxisok valóban az

²A szupergalaktikus sík a szupergalaktikus koordináta-rendszer alapsíkja, a Virgo-szuperhalmaz szimmetriásíkja.

UHECR-részecskék egyik legszignifikánsabb forrásai. Habár kísérletileg még nem bizonyított, a csillagontó galaxisok a kozmikus neutrínók forrásai lehetnek [27].

γ -kitörések

A γ -kitörés (gamma-ray burst, GRB) néhány millisekundumtól néhány percig tartó felvillanás a γ -tartományban, eredete lehet galaktikus és extragalaktikus is. A rövid, legfeljebb 2 másodpercig tartó γ -kitörések valószínűleg két neutroncsillag [28] vagy egy neutroncsillag és egy fekete lyuk összeolvadása során jönnek létre. A γ -kitörések nagyobb hányadát kitevő, percekig tartó hosszú GRB-k nagyobb tömegű csillagok magjának összeomlásához köthetők. Ezt támasztja alá, hogy szinte az összes jól tanulmányozott hosszú GRB csillagontó galaxisokhoz köthető.

A GRB prekursor fázisában kompakt objektumok összeolvadása vagy szupernóva-robbanás egy fotonokból, elektronokból és protonokból álló, relativisztikus sebességű tűzgolyót hoz létre [29]. Ez összeütközik a központi pulzár szeleivel vagy a szupernóva-robbanás táguló héjával, kozmikus részecskék és γ -fotonok emissziójához vezetve. Prompt fázisban UHECR-részecskék igen nagy fluxusa jön létre, nagy energiájú γ -fotonokkal egyetemben. A neutrínóspektrum ebben az esetben jórészt csak $p\bar{p}$ kölcsönhatásokból származik. Az utófénylés neutrínói pedig akkor keletkeznek, amikor a GRB robbanásából származó lökéshullámok beleütköznek a csillagközi anyagba. Egyelőre kísérletileg nem igazolt az észlelt GRB-k és neutrínók közvetlen kapcsolata [30].

Az IceCube Déli Sarki Neutrínóobszervatórium

Az IceCube Neutrínódetektor a neutrínók és az antarktisi jég kölcsönhatásában létrejött másodlagos részecskék Cserenkov-sugárzását méri [31–33]. 2000 és 2011 között az előd AMANDA és az IceCube építése során az Antarktisz 1450 m és 2450 m-es mélységek közötti 1 köbkilométernyi, a nagy nyomás miatt kristálytisztaságába összesen 86 detektorfüzért helyeztek le. Az egymástól 125 m-re levő, nagy nyomású forró vízzel fűrt lyukakba füzérenként 60 (összesen 5160) darab, egymástól 17 m távolságra levő fotoelektron-sokszorozót tartalmazó digitális optikai modul (DOM) telepítettek.

Az elektronneutrínók által keltett elektronok többször szóródnak a jégben, mielőtt energiájuk annyira lecsökken, hogy láthatatlanná váljanak az IceCube szenzorai számára. Szférikus jellegű, zápor-típusú mintázatot hagynak, ami miatt az őket keltő elektron-neutrínó irányát meglehetősen pontatlanul, jellemzően néhányszor 10 fok bizonytalansággal lehet meghatározni. Az IceCube leginkább a sáv-típusú eseményeket előidéző müonokra érzékeny, ezek a részecskék hagyják a leghosszabb nyomot a szenzormátrixban. Az elektronneutrínók energiája, a müonneutrínóknak pedig a beérkezési iránya rekonstruálható pontosabban, utóbbi esetében a mediánhiba 1 fok

körüli. A tau-neutrínók által keltett tauonok is zápor-típusú eseményt hoznak létre. Ez az elektronok által létrehozott mintázattól abban különbözik, hogy kettős robbanást mutat: egyet a tauon keletkezésekor, egyet pedig bomlásakor. A tauonok igen rövid élettartama miatt a kettős robbanás észlelését a PeV energiatartományban várják. Kozmikus tau-neutrínókat eddig még nem sikerült egyértelműen detektálni.

A kozmikus neutrínók és a háttér elválasztása több szelekciós kritérium alapján történő, igencsak nehéz feladat. Az IceCube felszíni egysége az IceTop egy 300 TeV és 1 EeV közötti energiákon működő, összesen 324 darab DOM-ból álló detektor. A déli égbolt felől érkező elsődleges kozmikus sugarak záporait detektálja, ezzel segítve a kozmikus neutrínók és az atmoszferikus háttér elkülönítését. A kozmikus neutrínók (rekonstruált) spektruma $dN/dE \sim E^{-2}$ alakú, míg az atmoszferikus háttér neutrínói $dN/dE \sim E^{-3.7}$ szerint skálázódnak, tehát a spektrum is segít a szelekcióban. Az északi égbolt felől érkező müonok nagy valószínűséggel kozmikus eredetűek, mivel a jóval kisebb energiájú atmoszferikus müonokat a Föld tömege kiszűri. Az IceCube szenzormátrixa körül is van egy vétórégió, amely a déli égbolt felől 90 m, az északi égbolt felől 10 m, körbe pedig 50 m vastagságú, és szintén az atmoszferikus müonokat szűri. A detektorfüzerekre merőlegesen 2085 m és 2165 m mélység között található egy tiltott régió, itt a jég magas portartalma problémát okoz a detektálásban.

Az IceCube Déli Sarki Neutrínóobszervatóriumban több mint száz kozmikus eredetű, 10 TeV és 10 PeV közötti tartományba eső energiájú neutrínót detektáltak eddig, a több milliárd atmoszferikus neutrínó és a több százmilliárd kozmikus sugar eredetű müon mellett.

A TXS 0506+056 jelű blazár

2017. szeptember 22-én az IceCube Neutrínódetektor egy ~290 TeV rekonstruált energiájú müonneutrínót észlelt az északi éggömb irányából, az esemény azonosítója IC-170922A. Az IceCube automata figyelőrendszerébe kapcsolt összes földi és űrobszervatórium 1 percen belül értesült az eseményről, és megkezdtek a neutrínó érkezési iránya körüli égterület összehangolt többcsatornás vizsgálatát. Napokkal a neutrínó detektálása után a Fermi-űrtávcső LAT Kollaborációja jelentette, hogy neutrínó legvalószínűbb beérkezési irányától mindössze 0,1 fokra található TXS 0506+056 jelű blazár γ -flert produkál 100 MeV – 300 GeV energiatartományban. A MAGIC teleszkópok egészen 400 GeV energiáig megnövekedett γ -fluxust mértek. Mérések történtek röntgen-, optikai és rádióhullámhosszakon is. A neutrínót és a γ -fotonokat közös fizikai képbe helyező modellek és a többcsatornás mérések alapján az IC-170922A jelű neutrínóesemény és a TXS 0506+056 γ -flere között 3σ szignifikanciaszintű korrelációt állapítottak meg [34].

Ezután az IceCube Kollaboráció a TXS 0506+056 irányából további neutrínókat keresve újraelemezte az

előző 9,5 év adatait. Találtak is egy igen erős neutrínóflert: 2014 szeptembere és 2015 márciusa között 13 ± 5 kozmikus neutrínó érkezett a TXS 0506+056 felől [35], a korreláció $3,5\sigma$ szignifikanciaszintű. Felmerülhet a kérdés, miért nem találták meg ezt a neutrínóflert korábban? A neutrínók detektálásánál és pontforrásokhoz kötésénél végzett statisztikai vizsgálatok (prior) paraméterei a feltételezett forrás égi pozíciója és spektruma. Ha tudjuk, hová nézzünk, akkor nagyobb valószínűséggel találjuk meg a kozmikus neutrínókat az adatokban, ez történt a TXS 0506+056 esetében is. Az IC-170922A-t azért tudták korábban a Texas-forráshoz kötni, mert az γ -flert mutatott. A legfrissebb eredmények szerint az igazán hatékony neutrínókeltő közegek átláthatatlanok a γ -fotonok számára, ami megmagyarázza, hogy miért volt alacsony a TXS 0506+056 γ -aktivitása a 2014/2015-ös nagy neutrínófler idején.

Az IC-170922A és TXS 0506+056 közötti korreláció, valamint a 2014/2015-ös neutrínófler bejelentését követő masszív PR tevékenység után a TXS 0506+056 jelű blazár rövid időn belül az aktív galaxismagok „rocksztárjává” vált. Habár vannak ígéretes jelöltek, a szakma széles körű véleménye szerint kozmikus eredetű neutrínók forrása bizonyítottan egyedül a TXS 0506+056 jelű blazár.

Kitekintés

Láttuk, hogy a nem termális Világegyetem jobb megértéséhez szükséges puzzle egyes darabkái a kozmikus sugarak, a γ -fotonok és a neutrínók hármasának megfigyelése és tanulmányozása alapján gyűjthetjük össze. A kozmikus sugarakat és a fotonokat a neutrínó-asztrofizika köti össze. Minden egyes új energia-tartomány feltérképezése potenciálisan felfedezéseket tartogat, tehát kulcsfontosságú a neutrínócsillagászat eszközeinek fejlődése.

Az Antarktisz 10 köbkilométernyi jegét detektoranyagként használó IceCube-Gen2 és a Földközi-tenger mélyén épülő KM3NeT-hez hasonló következő generációs neutrínódetektorok működésének megkezdésével sokat fogunk még tanulni a neutrínóégboltról. Az IceCube-Gen2 célja kozmikus neutrínók statisztikailag teljes mintájának észlelése a PeV–EeV energiatartományban, valamint ízenként több száz neutrínó észlelése a TeV feletti energiákon. Ezzel lehetővé válna az individuális (pont)források neutrínó-spektrumának észlelése.

A 19. században Olbers felvetette a kérdést, hogy ha az időben és térben végtelen Univerzum hőmérsékleti egyensúlyban van, akkor miért sötét az éjszaka, miért nem látjuk a végtelen Univerzum végtelen fotontengerét? Az Olbers-paradoxon feloldását az ősrobbanásban született, tehát időben és térben is véges Világegyetem tágulásának kísérleti kimutatása hozta el, ami alapvetően megváltoztatta a körülöttünk levő fizikai világról alkotott képünket. Az optikai esethez hasonlóan feltehetjük azt a gondolatébresztő kérdést, miért ilyen sötét a neutrínóégbolt?

A neutrínócsillagászat fiatal tudomány. Viszont a kozmikus nagy energiájú neutrínóknak már legalább egy bizonyított forrását ismerjük. A jelenleg ismert neutrínófluxus alapján már modellszelekciót végezhetünk. Biztosak lehetünk abban, hogy a neutrínócsillagászat jövője fényes, és a következő évtizedekben számos, a nagy energiájú kozmikus neutrínókhöz kapcsolódó felfedezésről fogunk még hallani.

Irodalom

1. M. Aker és tsai: An improved upper limit on the neutrino mass from a direct kinematic method by KATRIN. *Phys. Rev. Lett.* **123** (2019) 221802.
2. M. G. Betti és tsai: Neutrino physics with the PTOLEMY project: active neutrino properties and the light sterile case. *JCAP* **07** (2019) 047.
3. H. Zang és tsai: Supernova Relic Neutrino search with neutron tagging at Super-Kamiokande-IV. *Astroparticle Phys.* **60** (2015) 41.
4. S. Swordy: The energy spectra and anisotropies of cosmic rays. *Space Sci. Rev.* **99** (2001) 85.
5. Pierre Auger Collaboration: The cosmic ray energy spectrum measured using the Pierre Auger Observatory. *ICRC* **35** (2017) 486.
6. A. M. Hillas: Cosmic Rays: Recent Progress and some Current Questions. arXiv: astro-ph/0607109v2.
7. H. Dembinski és tsai: Data-driven model of the cosmic-ray flux and mass composition from 10 GeV to 10^{11} GeV. *ICRC* **35** (2017) 533.
8. D. Hooper, A. Taylor, S. Sarkar: The Impact of Heavy Nuclei on the Cosmogenic Neutrino Flux. *Astroparticle Phys.* **23** (2005) 11.
9. K. Greisen: End to the cosmic ray spectrum? *Phys. Rev. Lett.* **16** (1966) 748.
10. G. T. Zatsepin, V. A. Kuzmin: Upper limit of the spectrum of cosmic rays. *JETP Lett.* **4** (1966) 78.
11. C. D. Dermer, S. Razzaque, J. D. Finkle, A. Atoyan: Ultra-high-energy cosmic rays from black hole jets of radio galaxies. *New Journal of Phys.* **11** (2009) 065016.
12. P. Bhattacharjee: Origin and propagation of extremely high energy cosmic rays. *Physics Reports* **327** (2000) 109.
13. R. Blandford, D. Eichler: Particle acceleration at astrophysical shocks: A theory of cosmic ray origin. *Phys. Rept.* **154** (1987) 1.
14. R. Mbarek, D. Caprioli: Espresso Acceleration of Ultra-High-Energy Cosmic Rays up to the Hillas Limit in Relativistic MHD Jets. *ICRC* **36** (2019) 348.
15. Pierre Auger Collaboration: Correlation of the Highest-Energy Cosmic Rays with Nearby Extragalactic Objects. *Science* **318** (2007) 938.
16. Pierre Auger Collaboration: An Indication of Anisotropy in Arrival Directions of Ultra-high-energy Cosmic Rays through Comparison to the Flux Pattern of Extragalactic Gamma-Ray Sources. *ApJ* **853** (2018) 29.
17. Pierre Auger Collaboration and Telescope Array Collaboration: Full-sky searches for anisotropies in UHECR arrival directions with the Pierre Auger Observatory and the Telescope Array. *ICRC* **36** (2019) 439.
18. W. Bednarek, G. F. Burgio, T. Montaruli: Galactic discrete sources of high energy neutrinos. *New. Astron. Rev.* **49** (2005) 1.
19. K. Mannheim és tsai: Cosmic ray bound for models of extragalactic neutrino production. *Phys. Rev. D* **63** (2001) 023003.
20. A. Mücke és tsai: BL Lac objects in the synchrotron proton blazar model. *Astroparticle Phys.* **18** (2003) 593.
21. J. Becker Tjus és tsai: High-energy neutrinos from radio galaxies. *Phys. Rev. D* **89** (2014) 123005.
22. Y. Inoue és tsai: On High-energy Particles in Accretion Disk Coronae of Supermassive Black Holes. *ApJ* **880** (2019) 40.
23. F. Halzen, A. Kheirandish: High-energy Neutrinos from Recent Blazar Flares. *ApJ* **831** (2016) 12.
24. E. Kun, P. L. Biermann, L. Á. Gergely: A flat-spectrum candidate for a track-type high-energy neutrino emission event, the case of blazar PKS 0723-008. *MNRAS Lett.* **466** (2017) 34.
25. E. Kun, P. L. Biermann, L. Á. Gergely: Very long baseline interferometry radio structure and radio brightening of the high-energy neutrino emitting blazar TXS 0506+056. *MNRAS Lett.* **483** (2019) 42.

26. S. Britzen és tsai: A cosmic collider: Was the IceCube neutrino generated in a precessing jet-jet interaction in TXS 0506+056? *A&A* 630 (2019) 103.
27. A. Loeb, E. Waxman: The cumulative background of high energy neutrinos from starburst galaxies. *JCAP* 5 (2006) 3.
28. LIGO Scientific Collaboration and Virgo Collaboration: GW170817: Observation of Gravitational Waves from a Binary Neutron Star Inspiral. *Phys. Rev. Lett.* 119 (2017) 161101.
29. T. Piran: The physics of gamma-ray bursts. *Rev. Mod. Phys.* 76 (2005) 1143.
30. M. G. Aartsen és tsai (IceCube): Extending the Search for Muon Neutrinos Coincident with Gamma-Ray Bursts in IceCube Data. *ApJ* 843 (2017) 112.
31. M. G. Aartsen és tsai (IceCube): First year performance of the IceCube neutrino telescope. *Astroparticle Phys.* 26 (2006) 155.
32. M. G. Aartsen és tsai (IceCube): Evidence for High-Energy Extraterrestrial Neutrinos at the IceCube Detector. *Science* 342 (2013) 1.
33. M. G. Aartsen és tsai (IceCube): Time-Integrated Neutrino Source Searches with 10 Years of IceCube Data. *Phys. Rev. Lett.* 124 (2020) 051103.
34. M. G. Aartsen és tsai: Multimessenger observations of a flaring blazar coincident with high-energy neutrino IceCube-170922A. *Science* 361 (2018) eaat1378.
35. M. G. Aartsen és tsai (IceCube): Neutrino emission from the direction of the blazar TXS 0506+056 prior to the IceCube-170922A alert. *Science* 361 (2018) 147.