

KOZMIKUS SUGÁRZÁS EXTRÉM ENERGIÁKON – I. RÉSZ

Kövesi-Domokos Zsuzsa

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

A tudományos világ idén, 2012-ben ünnepli a kozmikus sugárzás felfedezésének centenáriumát. A huszadik század első évtizedeiben sok kutató vett részt annak felismerésében, hogy a világűrben nagy energiájú ionizáló sugárzás érkezik. *Victor Hess* osztrák fizikus 1912-ben hidrogénnel töltött léggömbjével számos alkalommal nagy magasságba emelkedett és mérte a sugárzás erősségét. E meglehetősen veszélyes léggömbutazások eredményeként kétséget kizárólag megállapította, hogy a sugárzás az atmoszférán kívülről jön és a Nap nem domináns forrása e kozmikus sugárzásnak. 1912 óta nagyon sok adat gyűlt össze a bejövő fluxus energia-eloszlásáról és kémiai összetételéről.

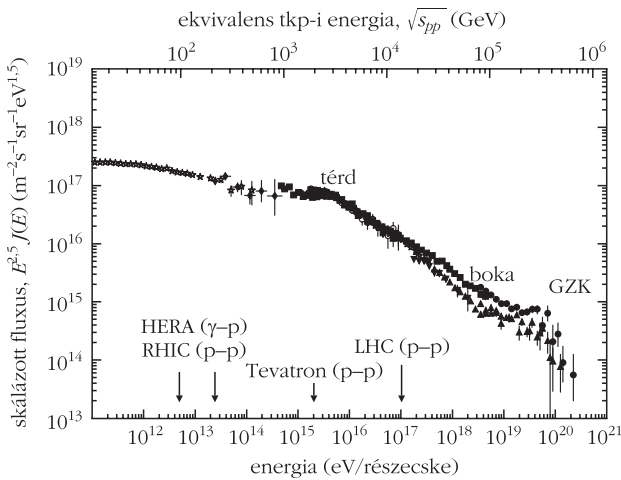
A kozmikus sugarak fizikája hagyományosan a Naprendszerünkön túlról érkező részecskékkel foglalkozik. Az atmoszféra tetejére érkező részecskék főleg nagy energiájú ($E > 10^{10}$ – 10^{11} eV) protonok és könnyű atommagok ($\approx 99\%$), a maradék 1% pedig elektronok és gamma-fotonok.

Írásomban főleg a kozmikus sugárzás részecskefizikai aspektusaival foglalkozom a legnagyobb energiákon. A csillagászati források, a gyorsítás és a világűrben való terjedés kérdéseit nem tárgyalom részletesen.

A primér kozmikus részecskék energiaspektruma és sok minden más is

Sok-sok évtized méréseit és különböző mérési módszerek eredményeit gyűjti össze az *1. ábra*. Érdekes egy kis időt eltölteni a rengeteg információval, amit ez az egyetlen ábra magában foglal.

Először: a vízszintes tengelyen haladva vegyük észre, hogy a bejövő primér részecskék energiája 10^{12} eV-től 10^{20} eV-ig változik – ez nyolc nagyságrendet fog át. Kozmikus sugárzással foglalkozó fizikusok kedvenc példázata, hogy egy 10^{20} eV energiájú elemirész annyi energiát hordoz, mint amennyi energiát nyer egy teniszlabda a világranglista-vezető teniszezők szervájánál. Az utóbbi évtizedek legfontosabb gyorsítói ütközőnyalábos gyorsítók – mint például a Tevatron vagy az LHC – az energiatengelyen bejelöltük ezek ekvivalens energiáját rögzített céltárgyas kísérleti elrendezésben. Az egyre nagyobb energiájú gyorsítók kulcs szerepet játszottak és játszanak az alapvető kölcsönhatások és részecskék (kvarkok, leptonok) elmélete, a Standard Modell felépítésében. Úgy tűnik, hogy az LHC CMS és ATLAS detektorai az utolsó, hiányzó ré-



1. ábra. Primér kozmikus részecskék spektruma az energia függvényében.

szecskét a Higgs-bozont is detektálják. Ugyanakkor a részecskefizikusok kevés dologban biztosabbak, mint abban, hogy a Standard Modell nem az utolsó szó egy alapvetőbb elmélet megtalálásában. (Túl sok tömegparaméter szükséges, nincs mód a sötét anyag beillesztésére, nincs egy elméletté egyesítve a gravitáció és a többi kölcsönhatás.) Az 1. ábra azt is mutatja, hogy a kozmikus részecskéket gyorsító „égi gyorsítók” legalább két-három nagyságrenddel nagyobb energiájú protonokat, atommagokat tudnak előállítani, mint az LHC. Az elemirész-fizikában (és a csillagászatban is) a legmeglepőbb új eredményeket általában akkor értük el, amikor a kísérletek egy új energiatartományba léptek. Ez az egyik ok, amiért az extrém energiájú ($E > 10^{18}$ eV) kozmikus sugárzási kutatás oly fontos és a mérési eredmények nemcsak a csillagászokat izgatják, hanem a részecskefizikusokat is.

Másodszor: nézzük meg az 1. ábrán a függőleges tengelyen a $J(E)$ fluxusadatokat! A beérkező részecskék (protonok, atommagok) száma négyzetméterenként, másodpercenként és 1 eV-os energia-intervallumonként nagyon gyorsan csökken az energia növekedésével. Az energiaspektrum struktúráját jobban meg lehet érteni, ha „mesterségesen” enyhítjük a függvény meredekségét és ezért $E^{2.5}J(E)$ -t ábrázoljuk. A fluxus az energia negatív hatványával csökken. A kitevő két energiánál drámaian megváltozik: $E \approx 10^{15}$ eV-nál a fluxus meredekebb csökkenésbe megy át, majd $E \approx 10^{18}$ eV-nál kicsit ellaposodik megint. A fizikusok *térdnek* és *bokának* becézik ezt a két törést – így kapva egy teljes lábat. Az extrém energiájú kozmikus sugarak a boka feletti energiatartományban vannak. Ez az intervallum nagyon fontos kérdéseket ad fel a részecske- és az asztrofizikusoknak is. A részecskefizikusoknak olyan energiatartományba kell kiterjeszteniük a Standard Modellt, amelyet a gyorsító kísérletek nem ellenőrizhettek. Ugyanakkor óriási lehetőséget ad az új fizika megismerésének.

Nem valószínű, hogy új, nagyobb energiájú gyorsító hamarosan épülne. *Zeldovics*, a híres orosz fizikus ezt úgy mondta, hogy a „Világegyetem a szegény ember gyorsítója”. Sajnos az égi gyorsítók által szolgálta-

tott nyaláb kétségbeejtően kevés részecskét produkál a mi légkörünk tetején és a csillagászok kezdenek kifogni azokból az égi gyorsítókból (speciális neutroncsillagok, gammakitörések, különféle aktív maggal rendelkező galaxisok), amelyek ezekre az extrém energiákra képesek a protonokat, atommagokat gyorsítani és ráadásul elég közel vannak. Erről a problémáról eddig nem tettünk említést. Amikor a mi galaxisunk, a Tejútrendszer közelében keressük az extrém energiájú gyorsítókat, körülbelül 150 millió fényév sugarú gömbön belül nagyon keveset találunk. Ez a $150 \cdot 10^6$ fényévnyi sugár nagyon jelentős, annyira, hogy saját neve is lett: *GZK-sugár*. *Greisen*, *Zatsepin* és *Kuzmin* ismerte fel, hogy a mikrohullámú háttérsugárzásban egy proton háborítatlanul közlekedik, amíg energiája $\approx 5 \cdot 10^{19}$ eV alatt van. Ennél nagyobb energiánál a mikrohullámú háttérsugárzás fotonja és a proton ütközésében egy pion keletkezhet és a proton energiája drámaian csökken. Még a legnagyobb várható energiákon is néhány ütközés után a proton energiája leesik a pionkeltés küszöbe alá. Így alig várhatunk protonokat olyan forrásokból, amelyek a GZK-sugáron kívül esnek és energiájuk túllépi a fent említett küszöbenergiát. A primér részecskék számában emiatt bekövetkező jókora csökkenést *GZK-levágásnak* nevezzük. Az atommagok sem sikeresebbek, a háttérsugárzáson kívül más energiatartományba eső fotonokkal is ütközhetnek és alacsonyabb energiájú darabokra esnek szét.

Harmadszor: tanulmányozzuk egy kicsit, milyen módon lehet mérni a kozmikus részecskéket! Az 1. ábra adataiból kiszámíthatjuk, hogy hány részecskét várunk a légkör tetején különböző energiákon, vagy még inkább hány részecskét várunk egy adott energiánál nagyobb energiával:

$$E > 10^{14} \text{ eV} \approx \frac{10}{\text{m}^2 \text{ nap}},$$

$$E > 5 \cdot 10^{15} \text{ eV} \approx \frac{0,1}{\text{m}^2 \text{ év}} \text{ (kb. a „térd” felett),}$$

$$E > 10^{18} \text{ eV} \approx \frac{10}{\text{km}^2 \text{ év}} \text{ (kb. a „boka” felett),}$$

$$E > 10^{20} \text{ eV} \approx \frac{1}{\text{km}^2 \text{ évszázad}}.$$

Ezek a számok jól mutatják, hogy míg a „térd” környéke alatti energián a fluxus elég nagy ahhoz, hogy léggömbbel, repülővel vagy műholddal felküldhető kisméretű detektorokban történjen a primér, beérkező részecskék első kölcsönhatása, a „térd” feletti fluxus már túl alacsony erre a közvetlen megfigyelésre. Ugyanakkor óriási szerencse, hogy a „térd” feletti részecskék energiája elég jelentős ahhoz, hogy egy „levégőmaggal” (oxigénnel, vagy nitrogénnel) ütközve *légizápot* hozzon létre. Tehát ezeken az energiákon a légkört használjuk céltárgynak és a légkörben törté-

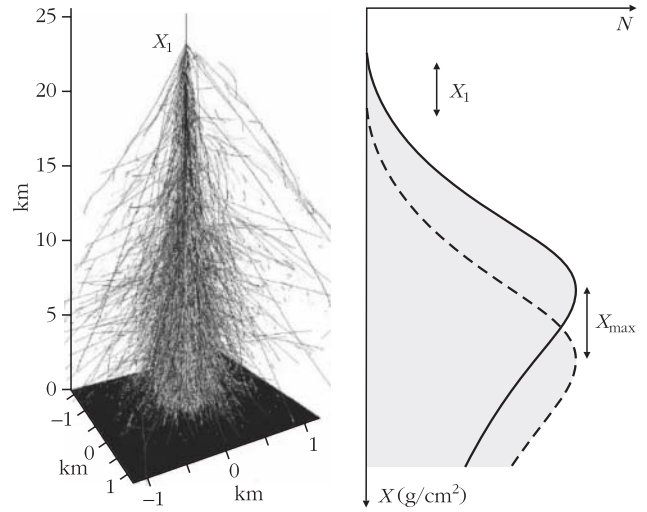
nő második, harmadik, sokadik kölcsönhatásban keletkező részecskéket figyeljük meg a Föld felszínén. Így elég nagy felületű detektorokkal az egyre vérszényesebb primér részecskeszám is megfigyelhető. A rossz hír és a tekintélyes probléma az, hogy a primér részecske mibenlétét és energiáját csak közvetett módszerekkel lehet kihámozni a mérhető adatokból. A következőkben a légizáporok tulajdonságait tanulmányozzuk és a közvetett mérési berendezések lehetőségeit arra, hogy a záport elindító primér részecske energiáját, kémiai összetételét és beesési irányát meghatározzuk.

Kiterjedt légizáporok és detektorok

A *Heitler-modell* nagyszerűen leírja egy légizápor várható *átlagos tulajdonságait*. Ha egy nagyenergiájú gamma-foton indítja el a záport akkor *elektromágneses záporról* beszélünk. A gamma-részecske egy levegőmaggal kölcsönhatva – párkeltéssel átlagosan egy kölcsönhatási hossz után – két részecskét (egy elektront és egy pozitront) ad, amelyek átlagosan egyenlően osztják meg az energiát. Ezek fékezési sugárzással egy-egy gamma-fotont keltenek; a második kölcsönhatási hossz befutása után már átlagosan négy részecske rohan lefelé lényegében fénysebességgel. Ez a duplázódási folyamat akkor fejeződik be, amikor már nincs elég $E_{kritikus}$ energia a duplázódásra és más folyamatok is jelentősekké válnak. Ekkor a záporban keltett részek N_{max} maximális számára jó közelítéssel igaz, hogy $E_{primér} \approx E_{kritikus} \cdot N_{max}$. Vegyük észre azt is, hogy a zápor maximális lehatolási mélysége a légkörben érzékenyen függ az első kölcsönhatás helyétől.

Az elektromágneses zápor ismerete sarkalatos annak ellenére, hogy a primér részecskék főként protonok vagy atommagok. Ezek erősen kölcsönható részecskék, és a légkör tetején (a földfelszíntől körülbelül 20 km magasságban) egy levegőmaggal ütközve nagy számú nagyenergiás részecskét, főleg pionokat (semlegeseket és pozitív vagy negatív töltésűeket) keltenek. A semleges pionok szinte azonnal két gamma-fotonra bomlanak, amelyek egy-egy elektromágneses záport indítanak, ahogy ezt előbb megismertük. A csökkent energiájú proton (az atommagokat később megint előveszjük) és a töltött pionok erős kölcsönhatással további semleges és töltött pionokat keltenek. A semleges pionok újabb elektromágneses záporokat indítanak. Az energia csökkenésével a töltött pionok bomlási folyamata válik meghatározóvá, amelynek során müonokra és müonneutrínókra esnek szét. Ezek a müonok a földfelszínt általában eléri és alkalmas detektorokkal megfigyelhetők. A zápor végül olyan, mint egy „elektromágneses palacsinta” (azaz nagyszámú elektron, pozitron és foton): meglehetősen vékony és átmerője lassan növekszik, ahogy közel fénysebességgel söpör lefelé az atmoszférában.

Foglaljuk össze egy proton által keltett légizápor lényeges tulajdonságait. Az első kölcsönhatás után, az erős kölcsönhatásban résztvevő záporcentrum vonal-



2. ábra. Bal oldalon látható a légizápor lefolyása, X_1 jelöli az első kölcsönhatás helyét. Jobb oldalon N a töltött részek száma a levegőben megtett út függvényében.

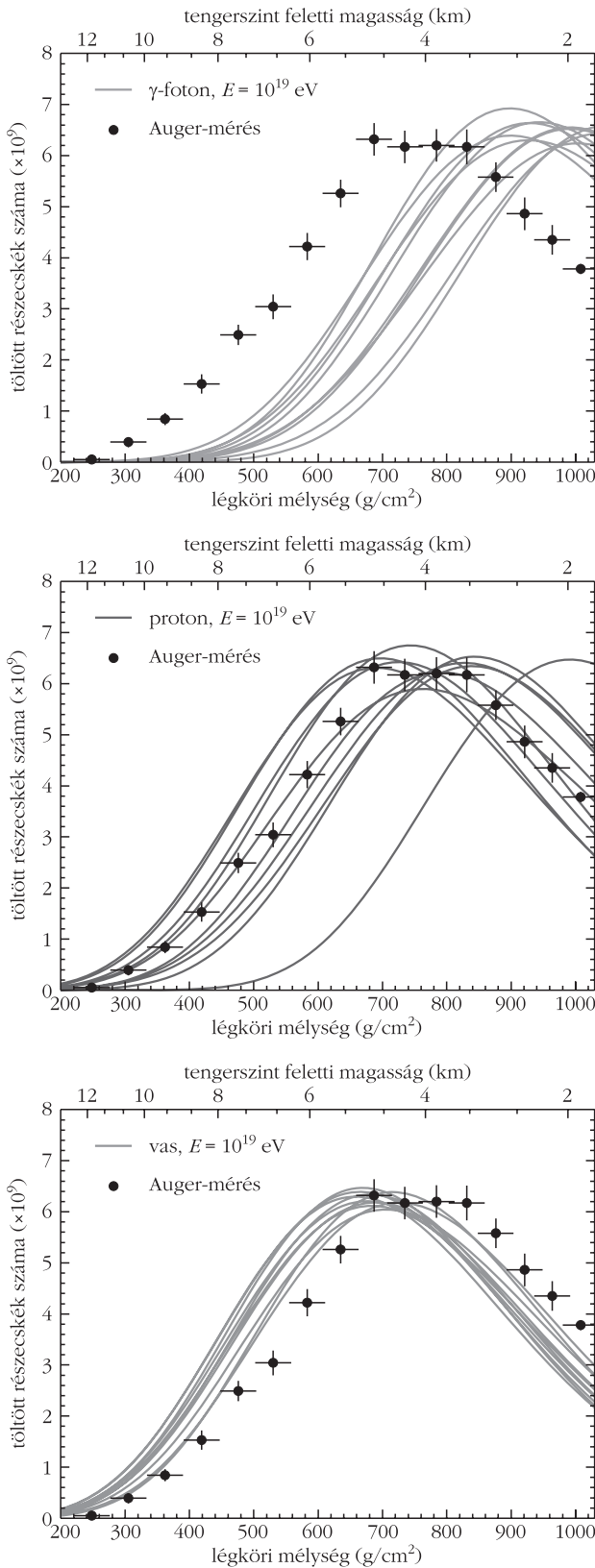
forrásként semleges pionokon keresztül sok elektromágneses záport kelt. A záporfejlődés leírható a gamma-záporok szuperpozíciójaként (2. ábra).

Természetesen a zápormaximum (ahol a záporban lefelé rohanó részek száma maximális) érzékeny arra, hogy gammazáport figyelünk-e meg, vagy egy ugyanolyan energiájú proton által indított záport. A protonzápor semleges pionjaiból származó gamma-fotonok jóval alacsonyabb energiával rendelkeznek, mint a primér energia. így kevesebb duplázódás után esik a részecskék energiája az $E_{kritikus}$ érték alá. Azaz a protonzápor maximuma rövidebb út után következik be. A primér atommagot – nagyon leegyszerűsítve – úgy tekinthetjük, mint a magban lévő protonok és neutronok összességét, amelyek egymás között demokratikusan osztják el a teljes primér energiát. Egy-egy proton vagy neutron kisebb energiával indul, mint a mag primér energiája, megint azt várjuk, hogy a zápormaximuma rövidebb út után következik be. Azonban itt több proton/neutron által keltett elektromágneses zápor összességét kapjuk és emiatt a záporról záporra várható fluktuáció a zápor maximumában jóval kisebb, mint egy protonzápor esetén. Az előbbiekből világos, hogy *a zápor longitudinális fejlődésének ismerete az információk kincsésbányája a primér részecske tulajdonságait illetően* (3. ábra).

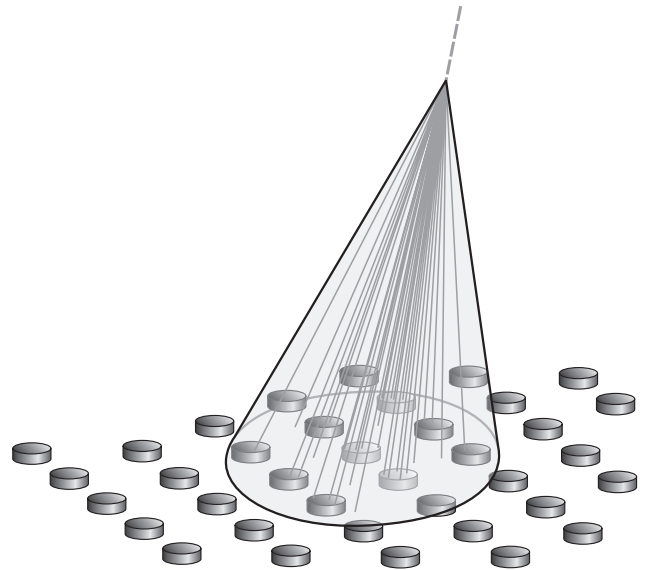
Egy dolgot nem szabad elfelejteni: az előbbi megfontolások az *átlagos* tulajdonságokat írják le, egy légizápor fejlődésében óriási fluktuációk lehetségesek. Az átlagos viselkedést sok-sok kiterjedt légizápor megfigyeléséből állapítjuk meg.

A kozmikus záporok mérésének igáslovai a *felszíni kiterjedt légizápor-detektorok*. Éjjel, nappal, esőben, hóban, holdfényben és felhős időben egyaránt működnek. Nagy területen elhelyezett detektorok mintát vesznek a beérkező részecskeszám-eloszlásból (4. ábra).

Ez a longitudináliszápor-fejlődésnek (a záporokúpnak) egy metszetét méri csak. Nagy körültekintéssel felépített légizápor-szimuláló programok eredményei támogatják



3. ábra. Mindhárom ábrán ugyanabban, az Auger Observatórium által megfigyelt záporban észlelt töltött részecskék számát jelölik a fekete pontok a légköri mélység függvényében. A folytonos vonalú, különböző szürkéségű görbék záporosimulálás eredményei: $E = 10^{19}$ eV energiájú gamma-foton, proton és vas primér feltételezésével. Jól megfigyelhetők a szövegben hangsúlyozott tulajdonságok (M. Unger, Snowpac 2010).

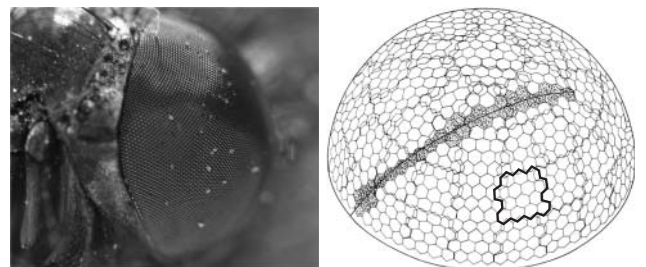


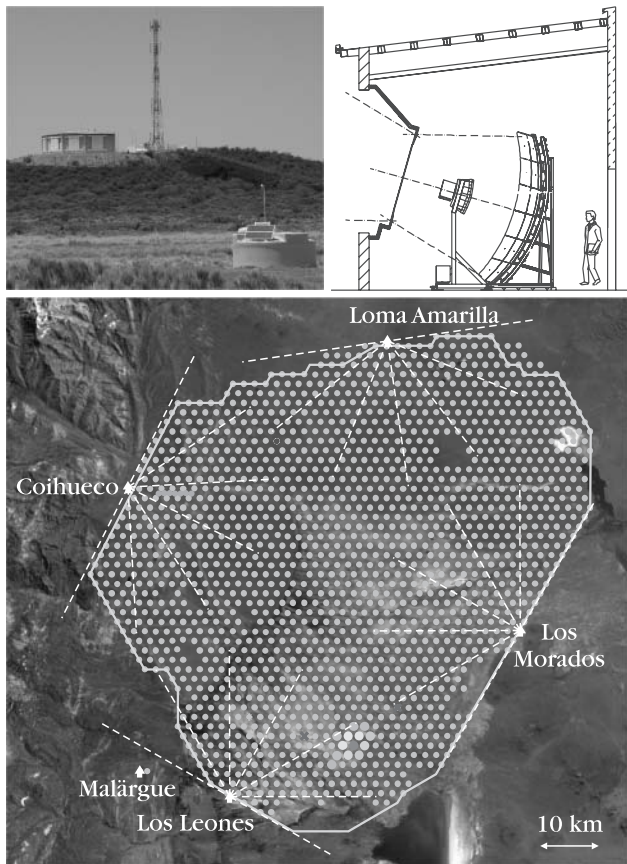
4. ábra. Felszíni részecske-detektorok hálózata mintát vesz egy záporból. Extrém energiákon a zápor „lábnyoma” néhány száz km². (Nature-ből adaptálva).

a mért eloszlás alapján kapott energiabecslést. Ezek a záporosimuláló programok érzékenyen függnek az erős kölcsönhatási rész modellezésétől, ezáltal növelve az energiabecslés szisztematikus hibáját. Minél nagyobb energiájú záporokat tanulmányozunk, annál nagyobb területre kell szétosztani a mintát vevő detektorokat, hogy a primér részecskefluxus csökkenését ellensúlyozzuk. Néhány éve hagyta abba működését a sokáig legnagyobb felszíni zápor-detektor, a Japánban épített AGASA (Akeno Giant Air Shower Array). 111 darab, egyenként 2,2 m² felületű detektor és 27 műondetektor volt szétterítve 100 km²-nyi területen.

Az extrém energiás adatok legnagyobb része az AGASA csoporttól jött, mialatt az első megbízhatóan működő *fluoreszcens detektorok* megépültek. Az alapvető fizikai elv jól ismert és egyszerű: a záporban sebesen száguldó töltött részecskék a levegő nitrogénmolekuláit gerjesztik, majd azok közeli ultraibolya hullámhossztartományba eső fotonok *izotróp* kisugárzásával térnek vissza alapállapotukba. Ez ugyan egy elég kis hozamú folyamat, de extrém energiájú kozmikus sugarak esetén már több milliárd töltött részecske gerjeszti a molekulákat. Így a folyamat elegendő fényt termel, amelyet nagy konvex tükrökkel

5. ábra. A bal oldalon látható légy szeméhez hasonlóan a *Fly's Eye* leképezi az eget. A vastagon körülrajzolt folt az egy tükör által leképezett égboltot mutatja és benne a kis hatszögek pedig az egy-egy fotoelektron-sokszorozó által „látott” foltot mutatják. A sötét csig egy zápor fényjelét illusztrálja.





6. ábra. A szürke pontok az 1600 „mintavevő”, hexagonális rácsban elrendezett felszíni detektorokat jelzik. A szomszédok távolsága 1,5 km. Négy teleszkópállomás (balra fent) – mindegyik hat fluoreszcens teleszkóppal (jobbra fent) – nézi a háromezer km²-nyi területet. Ezek látószögét a sugárirányban menő szaggatott vonalak jelzik.

gyűjtenek és fotoelektron-sokszorozókra fókuszálva mérik az intenzitást. Egy detektor sok-sok tükörből áll és mindegyik az égbolt különböző, egymást érintő foltjára van beállítva. A detektor egy légy szeméhez hasonlóan rakja össze a teljes képet (5. ábra).

Több okból is a jó szerencse kíséri a fizikusokat ezen a nehéz kutatási területen. Először is ebben az ultraibolya hullámhossztartományban a levegő meglehetősen átlátszó, messziről is jól „látható” a zápor. Másrészt a fényjel az egész longitudinális záporfejlődést pontosan mutatja, ennek fontosságát főleg a primér részecske megállapításánál (gamma-foton, proton, mag) hangsúlyoztuk már. Még egy jelentős tény a listán: a légkör úgy működik, mint egy kaloriméter, a teljes kisugárzott fény arányos a primér részecske energiájával. Az energiabecslés sokkal megbízhatóbb, mint a felszíni zápor-detektoroknál. Egyetlen kellemetlen tulajdonsága van: csak felhőtlen, holdfénymentes éjszakákon használható. (Ez körülbelül 10–15%-a felszíni zápor-detektorok lényegében folytonos adatgyűjtésének.)

A Fly’s Eye (Légyszem, 1981–93) volt az első jól funkcionáló fluoreszcens detektor, majd ennek alaposan feljavított változata a sztereoszkopikusan is működő kettős Légyszem, avagy HiRes detektor (High Resolution Fly’s Eye). HiRes 1999-ben kezdte a méréseket és hét évig gyűjtött adatokat.

Jelenleg a legnagyobb detektor a Pierre Auger Observatórium Argentínában, amely egy *hibrid detektor*. Egy óriási felszíni légizápor-detektor területét négy fluoreszcens detektor is figyeli, ahogy ezt a 6. és a 7. ábra mutatja. Az adatgyűjtés már 2004-ben megkezdődött, ámbar a teljes detektorrendszer 2008-ra épült meg. Az Auger-berendezés nagyságát jól érzékelteti a 8. ábra. Megjegyzésre méltó, hogy egy *hibrid detektor* nagyban javítja a felszíni zápor-detektor energiameghatározását. A *hibrid események* (9. ábra), amikor mindkét detektorrendszer ugyanazt a záport figyeli meg (körülbelül 10–15%-a az összes megfigyelt zápornak) keresztkalibrálást tesznek lehetővé. A fluoreszcens komponens sokkal megbízhatóbb energiabecslésével újralibrálható a felszíni zápor-detektor és ez az összes megfigyelt zápor jobb energiameghatározását garantálja.

Az északi féltekén a Teleszkóprendszer (Telescope Array) egy már működő hibrid detektor (a HiRes fluoreszcens detektorait felhasználva egy felszíni zápor-detektort is építettek), amely azonban kisebb méretű, mint az Auger Observatórium. Az adatgyűjtés 2008-ban kezdődött el. Az Auger North (Auger Észak) is a tervezőasztalon van, de megépítésére egyelőre nincs pénzügyi fedezet.

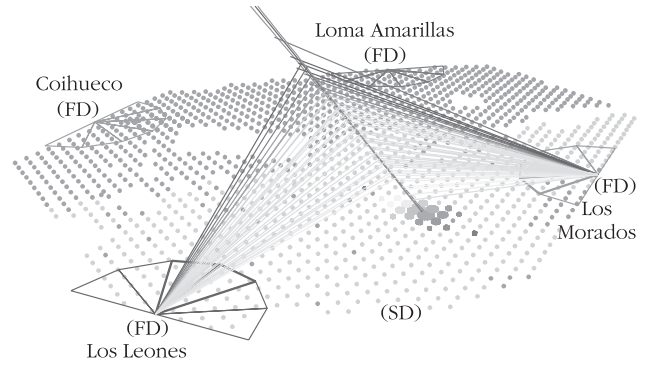
7. ábra. Fölül az 1600 Cserenkov-detektor egyike és fizikusok helyi barátaikkal. Alul az egyik fluoreszcens detektor tükré és kamerája látható.





8. ábra. A teljes Auger Observatórium a Balaton környékre vetítve.

Ezen a ponton jobb, ha megállunk és értékeljük az extrém energiatartományban működő fluoreszcens detektorok bevezetése által nyújtott jelentős új lehetőségeket. Először is a longitudinális fejlődés megfigyelhetősége, az átlagoszám- és maximum- és fluktuációjának mérése segít megállapítani a bejövő magok átlagos



9. ábra. Hibrid esemény megfigyelése az Auger Observatóriumban. Két fluoreszcensdetektor-állomás (FD) és a felszín-detektorrendszer (SD) is mér.

összetételét. Ez a felszíni légizápor-detektor mérések egyik Achilles-sarka. Az energiamérés nagyobb pontossága és a hibrid módban történő újralibrálás nemcsak a hadron-modellezés bizonytalanságai-ból adódó szisztematikus hibát csökkenti, hanem a keresztkalibrálás által a hasznos adatgyűjtési időt egy teljes naptári nappá növeli a felhőtlen, holdfénymentes éjszakák helyett.

A következő számban sorra kerülő folytatás első része a gyorsítókkal már ellenőrzött részecskefizika kiterjesztésével foglalkozik az extrém energiák tartományába. Azután a fluoreszcens detektorok és a két új hibrid detektor legújabb megfigyeléseit tárgyalja kiemelve az Univerzum korai fejlődéséről szóló szigorú korlátokat.