

JELEK A STANDARD MODELLEN TÚLRÓL?

Leptonuniverzalitás-anomáliák és leptokvarkkeresés a Nagy Hadronütköztetőn

Pásztor Gabriella
ELTE TTK Fizikai Intézet

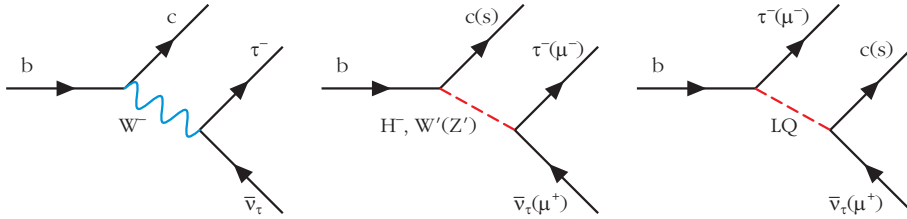
A Higgs-bozon felfedezésével [1–4] a standard modell [5] utolsó hiányzó láncszeme is a helyére került, azonban az elmélet nyitott kérdései [6–9] továbbra is fejtevést okoznak. Megválaszolásukra rengeteg javaslat született az elmúlt évtizedekben kiterjesztve a minimális elméletet új kölcsönhatásokkal, új szimmetriákkal, további térbeli dimenziókkal [10]. Fizikusok generációi kutattak és kutatnak az „új fizika” nyomai után egyre hatalmasabb méretű és nagyobb energiájú részecskegyorsítók adataiban bányászva két egymást kiegészítő stratégiát követve. Egyrészt ismert részecs-

kék kölcsönhatási tulajdonságainak (például bomlási ágarányainak) pontos mérésével ellenőrizhetjük az esetleges eltéréseket („anomáliákat”) a standard modell jóslataitól, és ezekből következtethetünk új kölcsönhatások, új részecskék létrejöttére; másrészt közvetlenül is kereshetjük a részecskeütközésekben felszabaduló energiából születő egzotikus nehéz részecskék megjelenését, amelyek (ha valóban léteznek) az „új fizika” régen várt hírnökeiként egy újabb tudományos forradalmat hozhatnak el.

Az elmúlt évek egyik legérdekesebb kutatási területe a leptonuniverzalitás esetleges sérülésének tanulmányozása és a lehetséges okok (új skalár-, vektorbozon-, és leptokvarkállapotok) felkutatása volt. Az eddigi eredményekről és azok jelentőségéről ejtünk szót az alábbiakban.

Az írás a Higgs-bozon felfedezésének 10. évfordulója alkalmából a Magyar Tudományos Akadémián rendezett tudományos ülésen elhangzott előadás alapján készült.

A szerző hálás Horváth Dezsőnek és Trócsányi Zoltánnak a kézirat gondos átolvasásáért és hasznos megjegyzéseikért.



1. ábra. A $b \rightarrow c\tau\bar{\nu}_\tau$ bomlás a standard modellben a gyenge kölcsönhatás közvetítő W -bozonon keresztül (bal oldal) és kiterjesztett elméletekben (közép és jobb oldal). Feltételezett skalár (H^\pm), vektorbozon (W') és leptokvark (LQ) részecskék léte is hozzájárulhat ezekhez a folyamatokhoz.

Leptonuniverzalitás

A részecskefizika standard modellje leírja, ám nem magyarázza a három fermionsalád létét, a megfigyelt ízmintázatot és ízkeveredést, a neutrínók kicsi, de nem nulla tömegét, valamint a fermiontömegek növekedését az egymást követő családokban. Ezek oka a standard modellen túlra vezet. A leptonszektor egy érdekes ellenőrzési lehetőséget rejt, ami rámutathat az „új fizika” természetére.

A standard modell szerint a gyenge kölcsönhatás közvetítői, a W - és Z -bozonok azonos erősséggel csatolódnak a különböző leptonokhoz (az e , μ , τ ízekhez), azaz a $W \rightarrow \ell\nu_\ell$ és $Z \rightarrow \ell^+\ell^-$ bomlások gyakorisága alig függ¹ az ℓ lepton íztől. Az ettől mért eltérés új fizika (például a későbbiekben tárgyalt új leptokvark-állapotok) hozzájárulásának világos jele lenne.

A nehéz b -kvarkokat tartalmazó hadronok bomlásai kitűnő lehetőséget adnak a leptonuniverzalitás sérülésének vizsgálatára. Egyrészt e ritka gyenge bomlásoknál az eddig elért alacsonyabb kísérleti pontosság nyitva hagyja a lehetőséget szignifikáns anomáliák létre, másrészt a kiterjesztett modellek gyakran erősebb csatolást jósolnak a 3. családhoz. Ez utóbbira példa egy kiterjesztett Higgs-szektor esetén a magasabb ágarány τ -állapotokba a töltött Higgs-bozon hozzájárulása miatt, mivel a Higgs-részecskék csatolása az elemi részecskékhez azok tömegétől is függ. A ritka bomlásokban megjelenő anomáliákért feltételezhetően felelős új állapotok egy része közvetlenül is előállítható, felfedezhető lehet az LHC-n.

¹A bomlási ágarányok különbözőségét a standard modellben csupán fázistér- és helicitás-elynyomás okozhatja, amelyek a lepton-tömegek különbözősége miatt lépnek fel. Ezek a hatások pontosan kiszámolhatók és figyelembe vehetők a mérési eredmények és az elmélet összehasonlításakor.



Pásztor Gabriella részecskefizikus, az MTA-ELTE Lendület CMS Részecske- és Magfizikai Kutatócsoport vezetője, a CERN LHC CMS együttműködést vezető testület tagja. Részt vett a Higgs-bozon felfedezésében. Fő kutatási területe a részecskefizika standard modelljén túlmutató jelenségek kutatása. A CMS-kísérlet BRIL luminozitmérő rendszerének projektmenedzsereként korszerű mérőberendezések működtetését, valamint tervezését és megépítését is irányítja az LHC új nagy intenzitású adatgyűjtési szakaszára.

A $b \rightarrow c\ell\bar{\nu}_\ell$ és a $b \rightarrow s\ell^+\ell^-$ bomlások (1. és 2. ábra) vizsgálata izgalmas új eredményeket hozott az elmúlt években. A felfedezéshez még alacsony (általában 3σ) szignifikanciájú $b \rightarrow c\ell\bar{\nu}_\ell$ mérésekben eltérést találtak a standard modelltől, ami a leptonuniverzalitás sérülésére

(és ezzel új fizika megjelenésére) utalhat. Természetesen, ahogy azt az új 2022. decemberi $b \rightarrow s\ell^+\ell^-$ eredmények szemléltetik a CERN LHCb-kísérletében [11, 12], az észlelt anomáliák mögött akár kísérleti torzítások is állhatnak.

Kísérletileg a különböző ($i \neq j$) leptonizéket tartalmazó bomlási ágarányok hányadosát tanulmányozzák:

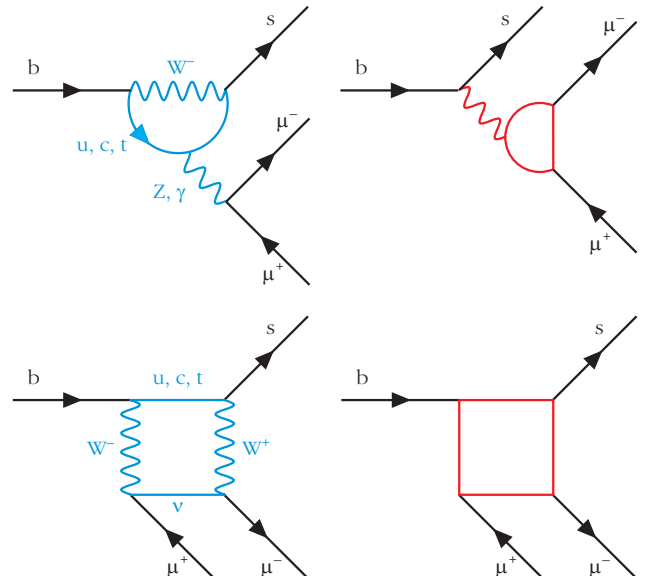
$$R_{X \rightarrow Y} = \frac{\mathcal{B}(X \rightarrow Y\ell_i^+\ell_i^-)}{\mathcal{B}(X \rightarrow Y\ell_j^+\ell_j^-)}$$

vagy

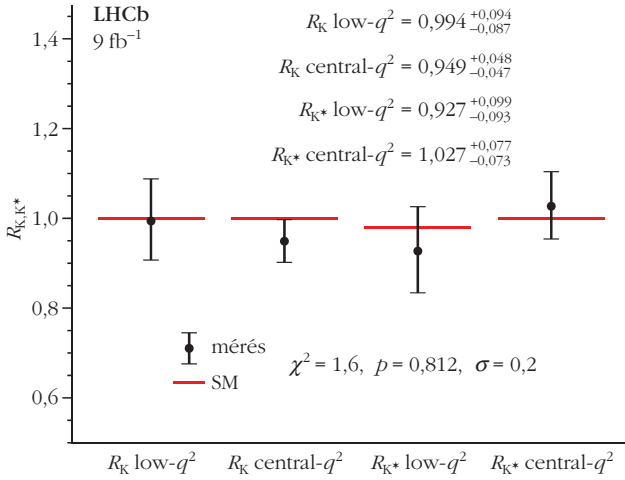
$$R_{X \rightarrow Y} = \frac{\mathcal{B}(X \rightarrow Y\ell_i^+\nu_i)}{\mathcal{B}(X \rightarrow Y\ell_j^+\nu_j)}$$

A végállapotban megjelenő elektronok, müonok és tau-leptonok különböző észlelési határfokából adódó szisztematikus torzítást úgynevezett kettős ágarányhányadosok mérésével jelentősen le lehet csökkenteni.

2. ábra. A $b \rightarrow s\mu^+\mu^-$ bomlás úgynevezett pingvin- (fölül, 1. és 2. diagram) és dobozdiagramokon (alul, 3. és 4. diagram) keresztül a standard modellben (1. és 3. diagram) és további egzotikus nehéz részecskéket tartalmazó modellekben (2. és 4. diagram). A 1. ábrán látható alacsonyabb rendű folyamatok új Z' -bozon- vagy leptokvark-állapotok létezése esetén szintén erre a végállapotra vezethetnek.



$$R_{(K,K^*)} \equiv \frac{\frac{N}{\epsilon}(B^{(+,0)} \rightarrow K^{(+,*)} \mu^+ \mu^-)}{\frac{N}{\epsilon}(B^{(+,0)} \rightarrow K^{(+,*)} J/\psi (\rightarrow \mu^+ \mu^-))} \frac{\frac{N}{\epsilon}(B^{(+,0)} \rightarrow K^{(+,*)} e^+ e^-)}{\frac{N}{\epsilon}(B^{(+,0)} \rightarrow K^{(+,*)} J/\psi (\rightarrow e^+ e^-))}$$



3. ábra. A leptonuniverzalitást ellenőrző R_K és R_{K^*} kettős ágarányhányados mért értékei B-mezonok $K\ell^+\ell^-$ végállapotot eredményező bomlásaira a leptonpár invariáns tömeg-négyzet függvényében az LHCb kísérlet 2. futási periódusának (Run 2) adataiban [12]. A hányadosok pontos definíciója az ábra tetején látható. Az N/ϵ mennyiségek a mért eseményszámok észlelési hatásokkal normált értékeit jelölik az adott folyamatra. Az eredmények jó egyezést mutatnak a standard modellel. Az invariáns tömeg-négyzet értékeit egy alacsony és egy központi tartományra osztották: $0,1 < q^2 < 1,1 \text{ GeV}^2$ („low- q^2 ”) és $1,1 < q^2 < 6,0 \text{ GeV}^2$ („central- q^2 ”). A négy mérés és a standard modell (SM) egyezése $0,2\sigma$ -n belül van.

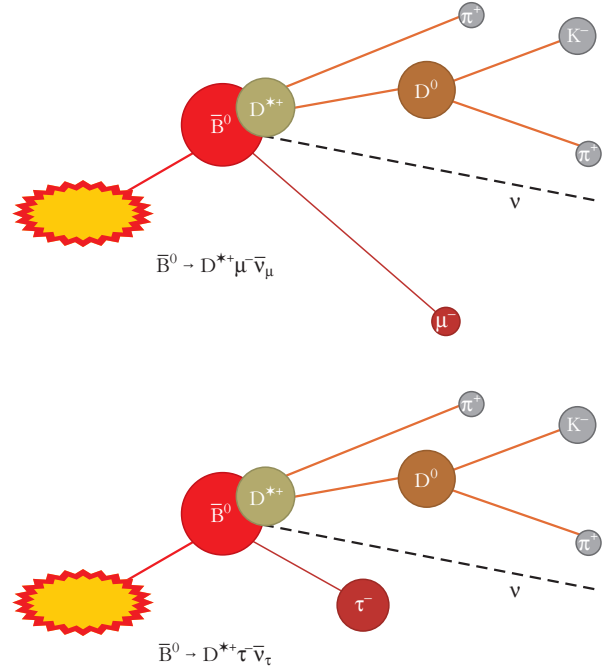
A 3. ábrán a

$$B^+ \rightarrow K^+ \ell_i^+ \ell_i^- \text{ és } B^0 \rightarrow K^{*0} \ell_i^+ \ell_i^-$$

bomlások tanulmányozásával kapott R_K és R_{K^*} hányadosok mért értékeit láthatjuk a leptonpár invariáns tömeg-négyzetének függvényében. Itt a normálás az azonos végállapotra vezető, gyakori J/ψ mezon keresztüli rezonáns bomlás ágarányaival történik, feltételezve, hogy a J/ψ elektromágneses kölcsönhatáson keresztüli bomlásakor nem sérül a leptonuniverzalitás. A friss LHCb-mérés jó egyezést mutat a standard modell jóslatával [11, 12], míg a korábbi R_K eredmény $3,1\sigma$ távolságra volt a standard modelltől [13]. A leglényegesebb különbség a félreasonosított hadronok hozzájárulásának pontosabb meghatározása az elektronpárt tartalmazó végállapotban. A javított mérési módszertan várhatóan a hasonló

$$R_X = \frac{\mathcal{B}(B \rightarrow X \mu^+ \mu^-)}{\mathcal{B}(B \rightarrow X e^+ e^-)}$$

hányadosok esetén is megszünteti a korábban észlelt eltéréseket a standard modelltől.



4. ábra. A $\bar{B} \rightarrow D^{*+} \mu^- \bar{\nu}_\mu$ és $\bar{B} \rightarrow D^{*+} \tau^- \bar{\nu}_\tau$ bomlások szemléltetése. A kezdeti „tűzgömb” a proton-proton ütközés elsődleges kölcsönhatási csomópontját jelöli, amelyből a \bar{B}^0 semleges anti-B mezon keletkezik. A kirepülő \bar{B}^0 bomlásakor egy másodlagos csomópontban keletkezik egy D^{*+} mezon és egy $\ell^- \bar{\nu}_\ell$ leptonpár. A D^{*+} mezon bomlása egy kaont és két piont ad, amelyek lendületének pontos mérésével a D^0 és D^{*+} ismert tömege visszakapható. A \bar{B}^0 -ból születő müon bomlás nélkül hagyja el a detektort, jellegzetes nyomot hagyva benne. A tau-lepton felismerését nehezíti, hogy a detektorban elbomlik általában egyetlen, vagy három, egy irányba tartó kisebb lendületű töltött részecskére és neutrínóra.

Azonban a $b \rightarrow c \ell^- \bar{\nu}_\ell$ bomlások vizsgálata az elektron-pozitron ütköztető b-gyárak (BaBar, Belle) és az LHCb adataiban is érdekes anomáliát mutat. A tau-lepton és müont adó bomlások (4. ábra) tanulmányozásával kapott

$$R_{D^{(*)}} = \frac{\mathcal{B}(\bar{B}^0 \rightarrow D^{*+} \tau^- \bar{\nu}_\tau)}{\mathcal{B}(\bar{B}^0 \rightarrow D^{*+} \mu^- \bar{\nu}_\mu)}$$

hányadosok által kifizített síkon látjuk a mérési eredményeket a kaliforniai BaBar, a japán Belle és az LHCb adataiból az 5. ábrán [14]. Bár az egyes mérések pontossága korlátozott, a mért eltérés a standard modelltől általánosnak tűnik. A mért értékek átlagát összehasonlítva a standard modell jóslatával $3,2\sigma$ szignifikanciát kapunk az anomáliára. Az adatok analízise számos nehézséget rejt, amelyek közül kiemelendő a tau-lepton tartalmazó végállapotban a háttér folyamatok hozzájárulásának becslése. A különböző kísérletek méréseinek összhangját mérő χ^2 -valószínűség 32%, ami elfogadható egyezést mutat. A μ - τ leptonuniverzalitás sérülésének bizonyítása (vagy elvetése) további pontos vizsgálatokat igényel, de az eddigi eredmények mindenképpen érdekesek. A Belle II és az LHCb új, nagyobb adatmennyiséget feldolgozó, és ezért várhatóan lényeg-

gesen kisebb mérési bizonytalanságú eredményeit éppen ezért nagy várakozás övezi.

Leptokvarkkeresés

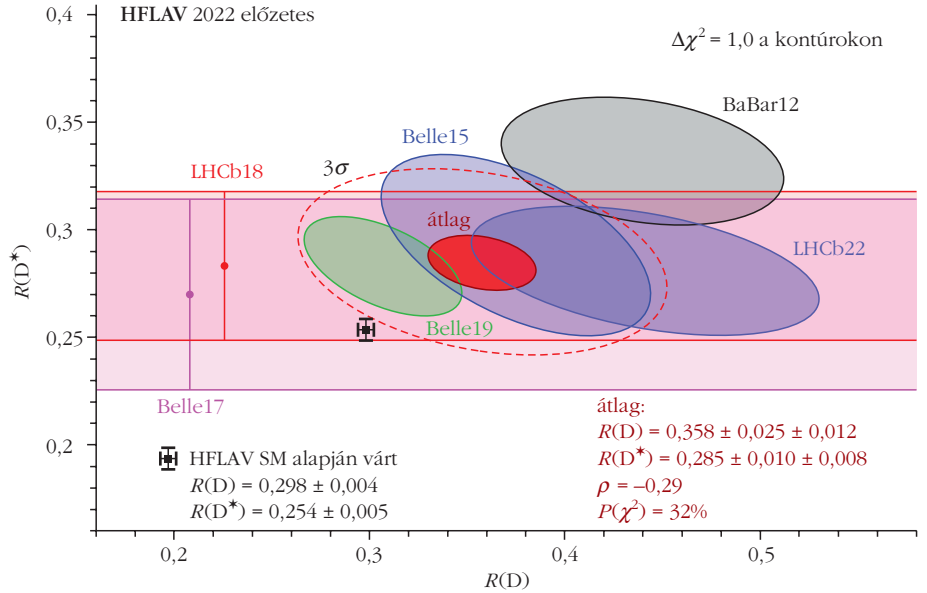
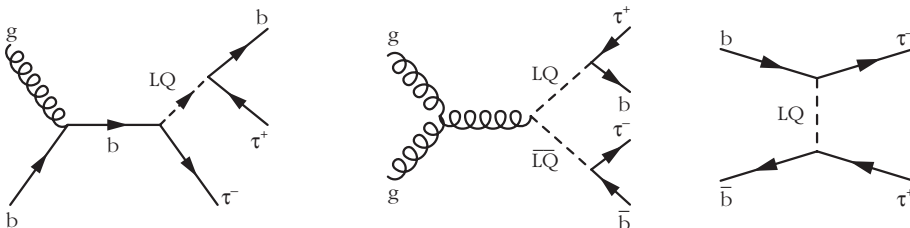
A leptonuniverzalitás anomáliáinak magyarázatául szolgálhat például egy eddig ismeretlen leptokvark (LQ) állapot léte. A leptokvarkok olyan feltételezett nehéz részecskék, amelyek lepton- és bariónszáma [15] is nullától különböző, így közvetlenül csatolódnak egy kvarkhoz és egy leptonhoz. Az erős és az elektromgyenge kölcsönhatást magas energiákon közös keretbe foglaló *nagy egyesített elméletekben* leptokvarkállapotok is megjelennek [16].

A fent említett μ - τ anomália magyarázataként szolgálhat egy LQ-b- τ kölcsönhatás hozzájárulása. Ezért különösen érdekes a $\tau\nu$ és $\tau\tau$ végállapotok vizsgálata, ami még nem szignifikáns, de izgalmas eseménytöbbletet mutat a CMS-kísélet leptokvark-keresési analíziseiben. A mérések érzékenysége már megközelelti az anomáliák által jósolt tartományt. Példaként az egyszeres, kettős és nemrezonáns leptokvark-keletkezés (6. ábra) keresésének eredményét mutatjuk be a $\tau\tau$ végállapotban a 7. ábrán [17]. Az LHC Run 2 alatt gyűjtött adataiban enyhe eseménytöbblet figyelhető meg. A következő években rögzítésre kerülő további LHC-adatok segítségével ez az izgalmas feltételezés is ellenőrizhetővé válik, és (ha a természet is úgy akarja) akár egy új korszakalkotó felfedezést is tehetünk.

Új fizika vagy mérési probléma?

Az ízfizika már a múltban is rámutatott az elmélet továbbfejlesztésének irányára. Gondolhatunk itt a Glashow–Iliopoulos–Maiani (GIM) mechanizmusra, amely a ritkaságsértő gyenge semleges áramok elnyomását

6. ábra. Feltételezett leptokvark (LQ) keletkezés az LHC-n: egyszeres (bal), kettős (közép) és nemrezonáns (jobb) keletkezés. A kezdeti állapotú protonok gluonjainak (g) és/vagy b-kvarkjainak (b) kölcsönhatásából születnek a leptokvarkok, amelyek azonnal b-kvarkra és tau-leptonra bomlanak el.



5. ábra. A leptonuniverzalitást ellenőrző R_D és R_{D^*} ágarányhányados megengedett értékei B-mezonok D/v végállapotot eredményező bomlásainak vizsgálatából a BaBar-, a Belle- és az LHCb-kísélet adataiban. Minden eredmény, és így az összesítések is, a standard modell jóslatánál (fekete pont szisztematikus bizonytalansági szakaszokkal) magasabb hányadosokat ad [14].

magyarázta meg a negyedik, úgynevezett c-kvark létének feltételezésével, és nyert kísérleti bizonyítékot a J/ψ -mezon ($c\bar{c}$ kötött állapot) felfedezésével. Később a kaonrendszerben észlelt CP-sértés magyarázatául vették be a 3. család kvarkjait, amelynek közvetlen bizonyítékát az Y mezon ($b\bar{b}$ kötött állapot) megfigyelése adta. A történelmi példák reményt adnak arra, hogy talán most is egy új korszak hajnalán vagyunk.

A nagy pontosságú mérések azonban számtalan buktatót rejthetnek, ahogy az R_K -szerű ágarányhányadosok mérésében eltűnő anomália is rámutatott. A fizikai objektumok felismerése, a jelszerű végállapotra vezető háttéresemények számának becslése, a standard modell-jóslatok pontossága további gondos ellenőrzést igényel. Ahogy a mondás is tartja: rendkívüli állításokhoz rendkívüli bizonyíték szükséges.

Bár az LHC azon küldetése, hogy felfedezzük az új fizikát még várat magára, több izgalmas 3σ szignifikanciát meghaladó anomália is megjelent az adatokban. Ezek közül a leptonuniverzalitás sértését és a leptokvarkok keresését emeltük ki, de érdekes eredmények láttak napvilágot a Higgs-szektor és a szuperszimmetrikus partnerrészecskék kutatásából is. Természetesen

ezek közül több vélhetően csak statisztikus fluktuáció, esetleg a mérés szisztematikus torzításából ered. Ahhoz, hogy egy új, forradalmi változás következzen be – hasonlóan a Higgs-bozon 2012-es felfedezéséhez – elegendő, ha ezek közül csupán egy nyer minden kételyt kizáró megerősítést az LHC-kísérletek új ada-

CMS előzetes

137 fb⁻¹ (13 TeV)

95% CL felső korlát

— észlelt

--- várt

■ 68% CL várt

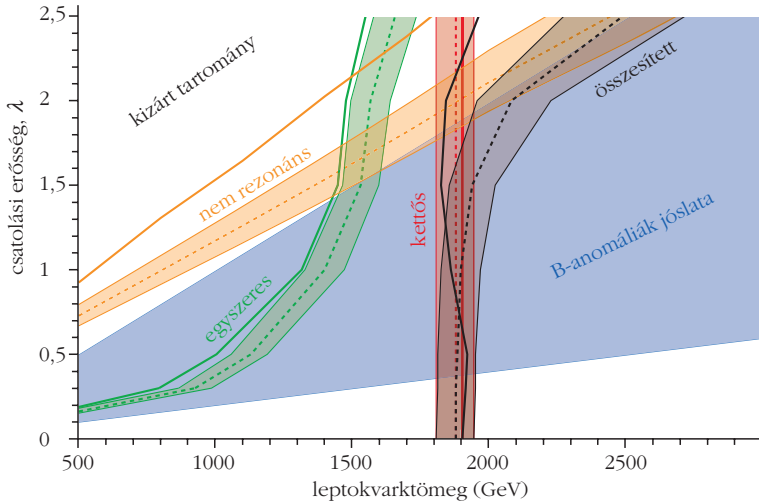
— egyszeres

— kettős

■ B-anomáliákból várt vektor, $\beta = 1, \kappa = 1$

— nem rezonáns

— összesített



7. ábra. A leptonuniversalitás-anomáliák által jósolt paramétertartomány és a közvetlen leptoquarkkeresések eredménye a leptoquark tömege és a leptoquark – b-kvark – τ -lepton kölcsönhatás csatolási erőssége (λ) által kifeszített síkon. A leptoquarkkeresés észlelt (folytonos vonalak) és a jel hiányában várt (szaggatott vonalak 1σ szisztematikus bizonytalansági sávval) kizárási tartományának határait tüntettük fel az egyszeres, kettős és nemrezonáns folyamatok kereséséből, illetve az eredmények összesítéséből a CMS-kísérlet Run 2 adataiból. A vonalak fölötti, illetve a tőlük balra fekvő paramétertartomány van kizárva, tehát az ízanomáliák által preferált régiót a közvetlen keresés erősen megszorítja: a LQ tömege 1,8 TeV felett kell legyen. Az analízisben megfigyelt enyhe eseménytöbblet okozza a vártnál gyengébb korlátokat a nem rezonáns és egyszeres keletkezés vizsgálatánál, illetve az összesített eredményénél [17].

taiban a következő években, vagy talán diákjaink vezetésével a következő generációs detektorok és a Magas Luminozitású Nagy Hadronütköztető (HL-LHC) idején.

Irodalom

- Pásztor Gabriella: Higgs-vadászat @ CERN. *Fizikai Szemle* 62/10 (2012) 358.
- Horváth Dezső: Séta a Higgs-bozon körül: az adatelemzés rejtelméi – 1. rész: a Higgs-bozon keresése. *Fizikai Szemle* 71/2 (2021) 37.
- Horváth Dezső: Séta a Higgs-bozon körül: az adatelemzés rejtelméi – 2. rész: a Higgs-bozon megfigyelése. *Fizikai Szemle* 71/3 (2021) 84.
- Veszprémi Viktor: A Higgs-bozon kutatása: befejezett vagy csak most kezdődik? *Fizikai Szemle* 70/4 (2020) 118.
- Horváth Dezső: A részecskefizika anyagelmélete: a standard modell. *Fizikai Szemle* 58/7–8 (2008) 246.
- Takács Gábor: Fizika a Standard Modellen innen és túl. *Természet Világa, Mikrovilág–2012, 2013/1. különszám* (2013) 3.
- Horváth Dezső: A részecskefizika sérült szimmetriái vajon megoldják-e a problémáit? *Természet Világa* 2017/11 (2017) 495.
- Trócsányi Zoltán: A részecskefizika helyzete tíz évvel a Higgs-bozon felfedezése után. *Fizikai Szemle* 73/9 (2023) 269.
- Pásztor Gabriella: Az Univerzum titkai és a Nagy Hadronütköztető: nyitott kérdések a részecskefizikában, *Fizikai Szemle* 73/2 (2023) y.
- Pásztor Gabriella: Rejtett dimenziók nyomában az ATLAS detektorral. *Természet Világa, Mikrovilág–2012, 2013/1. különszám* (2013) 53.
- LHCb collaboration: Test of lepton universality in $b \rightarrow s\ell^+\ell^-$ decays. LHCb-PAPER-2022-046, CERN-EP-2022-277, arXiv:2212.09152 [hep-ex]
- LHCb collaboration: Measurement of lepton universality parameters in $B^+ \rightarrow K^+\ell^+\ell^-$ and $B^0 \rightarrow K^{*0}\ell^+\ell^-$ decays. LHCb-PAPER-2022-045, CERN-EP-2022-278, arXiv:2212.09153 [hep-ex]
- LHCb Collaboration: Test of lepton universality in beauty-quark decays. *Nature Physics* 18 (2022) 277.
- LHCb collaboration: New test of lepton universality using the first simultaneous measurement of $R(D)$ and $R(D^*)$ observables at LHCb. LHCb-PAPER-2022-039 (in preparation), <https://lhcb-outreach.web.cern.ch/2022/10/18/new-test-of-lepton-universality-using-the-first-simultaneous-measurement-of-rd-and-rd-observables-at-lhcb/>
- Horváth Dezső, Trócsányi Zoltán: Antirészecskék? *Fizikai Szemle* 72/11 (2022) 347.
- Cynolter Gábor: A Standard Modellen túl. *Természet Világa* 2000/III különszám (2000) 15.
- CMS Collaboration: The search for a third-generation leptoquark coupling to a $\tau\tau$ lepton and a b quark through single, pair and nonresonant production at $\sqrt{s} = 13$ TeV. CMS-PAS-EXO-19-016, <http://cds.cern.ch/record/2815309>