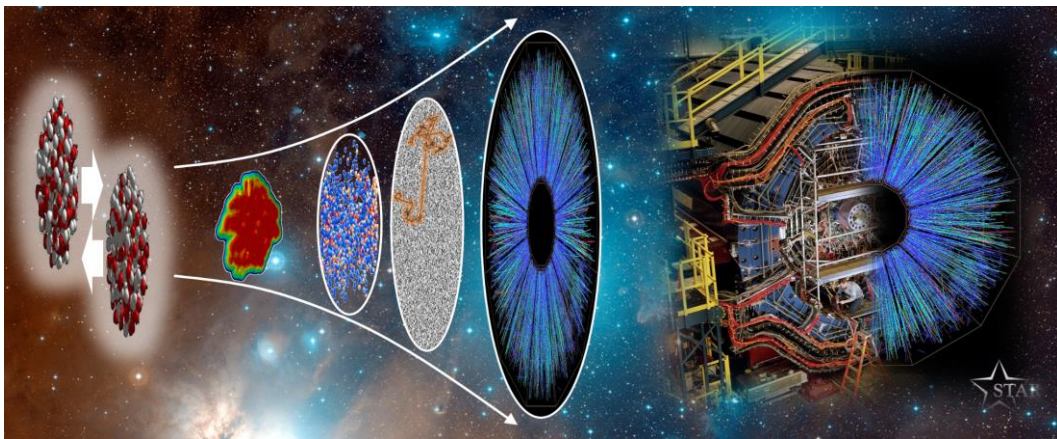
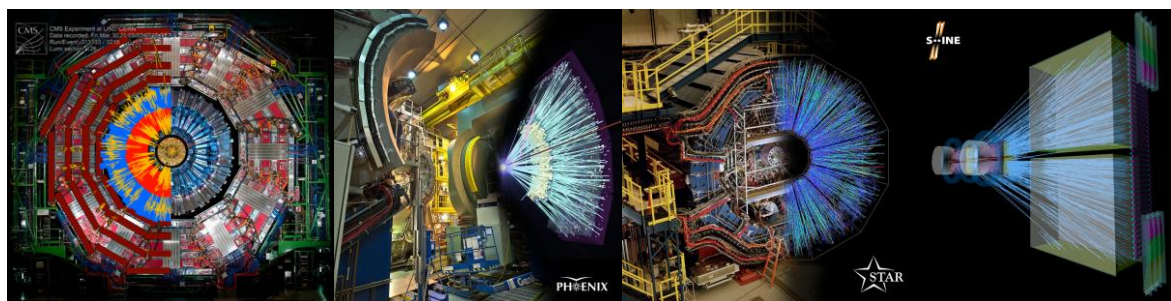


Részecskegyorsítókön átívelő mérésekben tárták fel az ELTE kutatói az ősleves geometriáját

A világ legnagyobb energiájú részecskegyorsítóiban a fizikusok az atommagot alkotó anyagot vizsgálják. Kutatásuk célja a Világegyetemet a születése utáni első milliommód másodpercben kitöltő anyag tulajdonságainak és viselkedésének megértése. Az ELTE fizikusai a három legfontosabb atommag-ütköztető gyorsítóban (két svájci és egy amerikai berendezésnél) is méréseket végeztek, hogy az ősleves geometriáját feltérképezzék. Méréseik összekapcsolják a részecskék mozgását a tengeri ragadozók mozgásával, a klíma változásával és tűzsejti folyamatokkal.

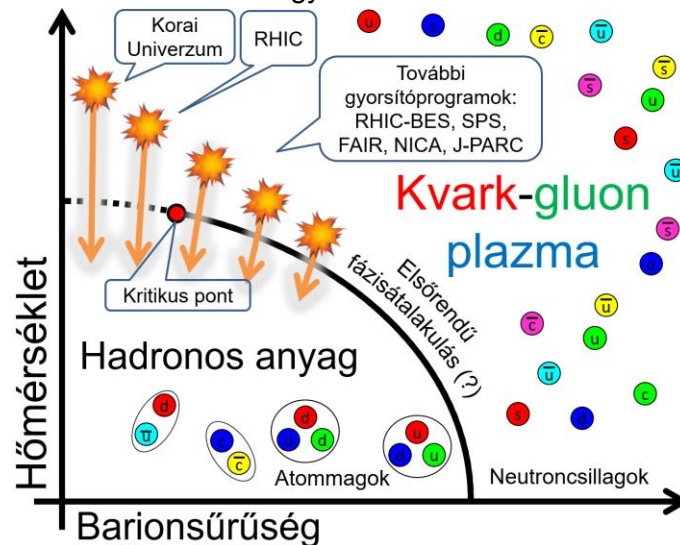


Az Ősrobbanás után a világ olyan forró volt, hogy még az atommagok is megolvadtak, és alkotóelemeik, a kvarkok őslevese töltötte ki a teret. Ahogy a hőmérséklet csökkent, ez a kvarkleves “megfagyott”, és a ma is ismert részecskék, például a protonok és a neutronok is létrejöttek belőle. Ez történik a részecskegyorsítók kísérleteiben is, csak sokkal kisebb méretben: két atommag ütközése nyomán egyetlen kis kvarkanyag-csepp jön létre. Ez aztán egyfajta “kifagyás” után a hagyományos anyag fázisába kerül, és az ebben a fázisban jelen lévő, már ismert fajta részecskéket mérjük a kísérletekben.



A kvarkanyag azonban az ütközési energiától függően kezdetben más és más energiasűrűséggel és hőmérséklettel rendelkezik, így a tulajdonságai is mások. Ezért végeznek méréseket különféle energiájú részecskegyorsítóknál, az amerikai Relativisztikus Nehézion-ütköztető (Relativistic Heavy Ion Collider, RHIC), a svájci Szuper Protonszinkrotron (Super Proton Synchrotron, SPS) és Nagy Hadronütköztető (Large Hadron Collider, LHC) kísérleteiben.

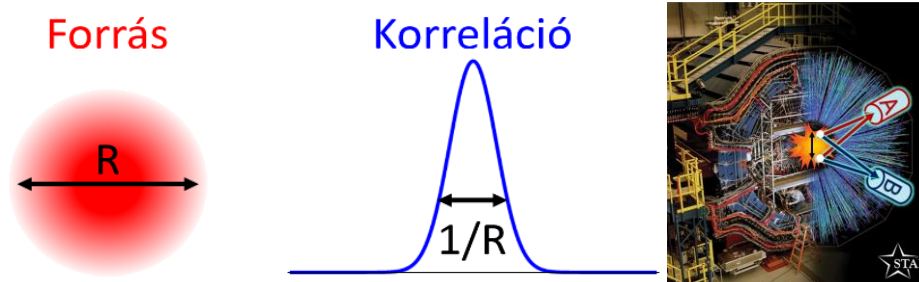
“Mindez annyira lényeges kérdés, hogy a kvarkanyag vizsgálata érdekében új gyorsítókat építenek Németországban, Oroszországban és Japánban is. A legfontosabb kérdés talán a fázisok közötti átmenet mikéntje: a fázisok térképén ezt jellemző megjelenhet egy kritikus pont, és ennek keresése a fent említett kísérletek egyik központi célja.” - mondja Csanád Máté, az ELTE Atomfizikai tanszékének egyetemi tanára.



A kutatások hosszú távú célja a kvarkanyagot és az atommagokat irányító erős kölcsönhatás jobb megértése. A tudásunk jelenlegi szintje ahhoz hasonlítható, amennyit Volta, Maxwell vagy Faraday korában tudott az emberiség az elektromosságról: ismertük az alapegyenletek egy verzióját, de rengeteg kísérleti és elméleti eredményre volt szükség ahhoz, hogy széleskörűen kiaknázhassuk ezen tudásunkat, és a mindennapokat alapvetően befolyásoló technológiák alakuljanak ki - a lámpától kezdve a tévén és a telefonon át a számítógépekig és az internetig. Az erős kölcsönhatás megismerése ehhez képest gyerekcipőben jár, éppen ezért fontosak a feltérképezésére irányuló kutatások.

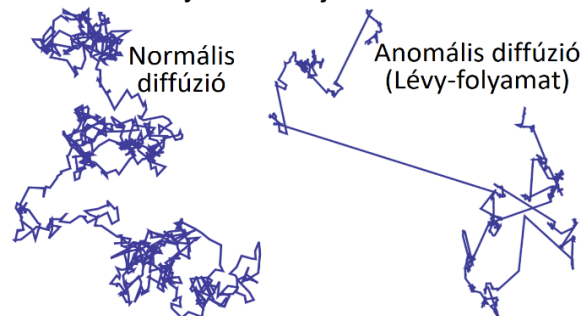
Femtoszkópia, avagy a kvarkanyag femtométeres geometriája

Az ELTE kutatói mindegyik gyorsítónál becsatlakoztak a kísérletekbe, és az elmúlt évek munkája nyomán átfogó kép alakult ki a kvarkanyag geometriájáról. Ehhez a femtoszkópia módszereit alkalmazták: ezek lényege, hogy a keletkező részecskék kvantumozott természete miatt kialakuló korrelációk (azaz a detektorrendszer különböző pontjaiban észlelt részecskék közötti kapcsolatok) elárulják a közeg, azaz a részecskekeltő forrás femtométeres skálájú szerkezetét.



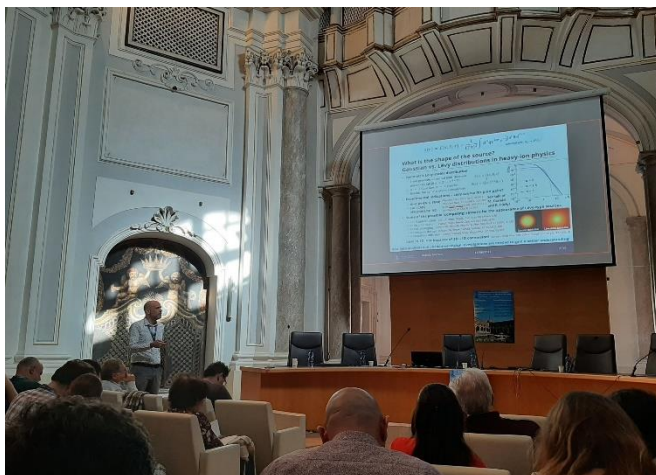
“A korábbi évtizedekben a femtoszkópiában azzal a feltételezéssel éltek, hogy a kvarkanyag normális eloszlású, azaz a természetben oly sok helyen fellelhető Gauss-alakot követi.” - fűzi hozzá Nagy Márton, a csoport egyik vezető kutatója.

A magyar kutatók azonban általánosabb keretek között mozogva az egész más tudományokból is ismert Lévy-folyamatot vették alapul, amely a tengeri ragadozók zsákmánykeresését, tőzsdei folyamatokat vagy éppen a klíma változását is jól jellemzi. Mindezen folyamatok közös tulajdonsága, hogy egyes pillanatokban igen nagy változások következnek be (például ha a ragadozó új, távolabbi területre vándorol), és ilyenkor nem normális, Gauss-eloszlás, hanem Lévy-eloszlás jöhet létre.



Ez több okból is igen fontos. Egyrészt a kvarkanyag "kifagyásának", hagyományos anyaggá alakulásának az egyik legtöbbször vizsgált jellemzője a femtoszkópiai mérésekből kapott méretskála, avagy femtoszkópiai sugár - ez azonban függ attól, hogy milyen feltételezéssel élünk a közeg geometriáját illetően. Ahogy Csanád Máté összefoglalja: *"Ha a Gauss-feltételezés nem helyes, akkor mindezen vizsgálatok csak Lévy-feltételezés mellett adnak pontos választ. A Lévy-eloszlást jellemző «Lévy-kitevő» értéke pedig a fázisátalakulás mikéntjéről is árulkodik, így ennek ütközési energiától való függése tulajdonképpen a kvarkanyag fázisairól árulkodik."*

Az első, ezzel kapcsolatos eredményeket a RHIC gyorsító PHENIX kísérletében érték el a magyar kutatók, ahogy arról [korábban beszámoltunk](#). Munkájuk alapján kijelenthető, hogy a Lévy-eloszlások adják a kvarkanyag geometriájának helyes leírását, és a Lévy-kitevő értéke 1,2 körül alakul - távol a Gauss-eloszlásra jellemző 2,0 értéktől, de a kritikus pontra esetlegesen utaló 0,5 körül értéktől is. Mindezen eredményeket [a Physical Review C folyóirat közölte](#) még 2018-ban. Miután azonban a PHENIX kísérletben korlátozott az elérhető ütközési energiák sora, ezért az ELTE-s kutatók újabb kísérletekhez csatlakoztak, hogy ott folytassák a méréseket.



Az ELTE kutatói legújabb eredményeiket a 2023. november 6-10. között megrendezett [Workshop on Particle Correlations and Femtoscopy](#) konferencián mutatták be, amely a femtoszkópia tudományágának legfontosabb, éves konferenciája. Pórfy Barnabás, Kincses Dániel, Nagy Márton és Csanád Máté meghívott előadása is szerepelt a programban, ezzel az ELTE kutatócsoportja igen hangsúlyosan képviseltethette magát.

Eredmények az SPS részecskegyorsító NA61/SHINE kísérleténél

A kvarkanyag tulajdonságainak megfelelő áttekintéséhez elengedhetetlen, hogy különböző energiákon és ütköző rendszereken végezzünk méréseket. Ezen gondolat a kisebb energiájú, fix céltárgyas nehézion-ütközéseket vizsgáló kísérlet, az SPS gyorsítónál működő NA61/SHINE mozgatórugója. Az NA61 az elődjétől, az NA49 kísérlettől "örökölt", precíz detektorokkal méri az ütközés utáni részecskéket. A kísérlet egyik legfőbb célja a kritikus pont keresése, ezért kutatócsoportunk csatlakozása az NA61 erőfeszítéseivel természetes volt. Az itt elért eredményeink megmutatták, hogy alacsonyabb energián, kis és közepes rendszerekben is megjelenik a Lévy-eloszlás, mindezt az [European Physics Journal C](#) folyóiratban publikáltuk. A méréseinkből kiderül, hogy a forrás alakja Cauchy-eloszláshoz közelít, ugyanis a Lévy-kitevő értéke 0,9 és 1,5 körül mozog berillium-berillium ütközésekben. Továbbá a [Universe](#) folyóirat által publikált cikkben argon-szkandium rendszerben végzett méréseinket tárgyaljuk. Eredményeink arra mutatnak, hogy, ez a nagyobb méretű ütközés más, Gauss-tól kevésbé eltérő geometriát eredményez ugyanis a Lévy-kitevő értéke 1,5 és 2,0 közé esik. Kutatásunk folytatásaként a jövőben még alacsonyabb energián, illetve nagyobb rendszerekben fogjuk megmérni a femtoszkopikus-korrelációkat.



Eredmények a legnagyobb ütközési energián, az LHC CMS kísérletében

A ma rendelkezésre álló legnagyobb ütközési energiák a Nagy Hadronütköztetőben érhetőek el, ahol ólom atommagokat ütköztetnek. Ezen részecskegyorsító egyik detektorrendszere a CMS kísérlet, melyben az ELTE-s fizikusok is részt vesznek. Az elmúlt évek kutatásai során megállapították, hogy a kvarkanyag geometriája az itt elérhető jóval nagyobb ütközési energián is Lévy-eloszlással jellemezhető. *“A korábbi eredményekhez képest azonban a Lévy-kitevő értéke itt nagyobb, tehát az eloszlás közelebb van a Gauss-eloszláshoz. Ezen eltérés és a Lévy-eloszláshoz vezető effektusok mélyebb megértéséhez a szimulációk segítségével is vizsgáltuk az atommagok ütközését”*. - mondja Kórodi Balázs, a CMS-es méréseket és a szimulációs vizsgálatokat elvégző hallgató (aki azóta már az Ohio Egyetem doktorandusza). A Lévy-eloszlás a szimulációkban is megjelent, továbbá kiderült az is, hogy a Gauss-eloszlástól való eltérésnek fontos okai a bomlástermékek és az anomális diffúzió. A CMS kísérletben elért eredményeket a [Physical Review C folyóirat fogadta el közlésre](#), míg a szimulációs eredmények az [Entropy](#) és a [Physics Letters B](#) folyóiratokban jelentek meg.

Új elméleti eredmények

Az ELTE femtoszkópiával foglalkozó kutatói a kísérleti munka mellett jelentős hangsúlyt fektetnek a téma elméleti kidolgozására is, az elmúlt évek során jelentős előrelépéseket értek el ezen a téren is. Többek között kiszámolták a megfigyelhető részecskék közötti erős kölcsönhatás okozta módosulást a korrelációkban, illetve a korrelációk kiszámolásához szükséges matematikai módszerekben értek el jelentős előrelépéseket; mindezen eredményeik a [Physical Review C](#), [Universe](#) és [European Physical Journal C](#) folyóiratokban jelentek meg.

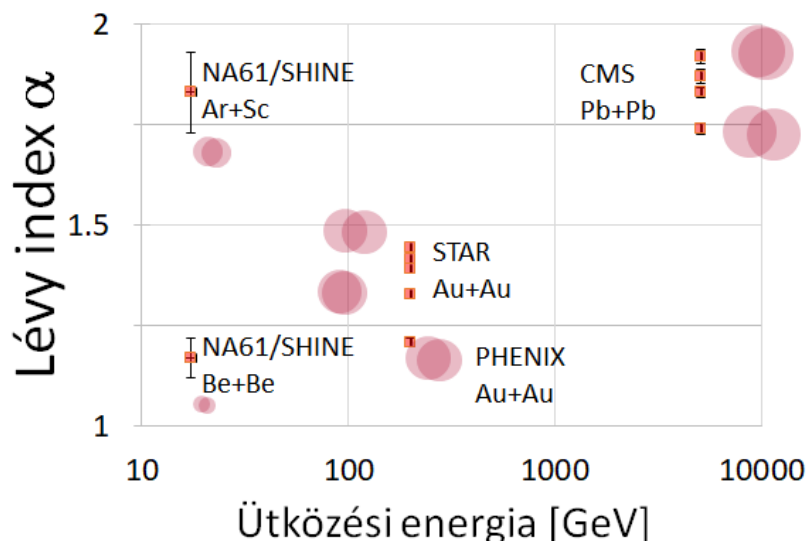
“A kísérleti és elméleti munka mindig kéz a kézben jár. A PHENIX kísérletben elért első eredményeink azt mutatták, hogy a mérési adatok összhangban vannak az elméleti számításokkal. Az új kísérletekbe lépve azonban jóval nagyobb mennyiségű adat vált elérhetővé, és a pontosabb mérések leírásához pontosabb elméleti számításokra is szükség lett.” - mondja Kincses Dániel, az ELTE posztdoktori kutatója, aki már az egyetemi tanulmányai kezdete óta, közel 10 éve foglalkozik a témával.

A mérések következő generációja

Az új elméleti eredmények segítségével a precíziós mérések új korszaka nyílhat meg, a kvarkanyag geometriájának többdimenziós feltérképezésével. A gömbszimmetriától való eltérés, azaz a femtoszkópiai sugár 3 különböző irányban történő mérése fontos új információkkal szolgálhat, azonban az ilyen típusú mérések rendkívül bonyolultak. Az előzetes eredmények alapján a STAR kísérletnél ezen mérések is megvalósíthatók, a kutatók jelenleg is dolgoznak az új eredményeken, amelyek hamarosan bemutatásra kerülnek a [23. Zimányi Nehézion-fizikai Téli Iskolán](#). A rendezvény a szakterület a femtoszkópia szakterületét is hangsúlyosan tárgyaló nemzetközi konferenciája, amely a Wigner FK és az ELTE közös szervezésével jön létre minden év decemberében. A konferencia nemzetközi tanácsadó bizottságának elnöke Csanád Máté, helyi szervezőbizottságának vezetői pedig Kovács Péter, Kincses Dániel, és Lökös Sándor.

Az ELTE részvétele a különféle kísérletekben

Az ELTE kutatói négy kísérletben is részt vesznek: az SPS gyorsítónál az NA61/SHINE, a RHIC-nél a PHENIX és a STAR, az LHC esetében pedig a CMS együttműködéseknek tagja az ELTE. Az NA61/SHINE csoport vezetője Yoshikazu Nagai, a CMS csoport vezetője Pásztor Gabriella, míg a RHIC-es csoportok vezetője Csanád Máté, aki egyúttal a ELTE femtoszkópiai kutatásait is koordinálja, illetve a RHIC-beli magyar részvétel vezetője. A csoportok változatos módokon járulnak hozzá a kísérletek sikeréhez: a detektorfejlesztéstől az adatfelvételen át az adatalemzésig sok projektben vesznek részt, illetve elméleti kutatásokat is végeznek. Ahogy Csanád Máté mondja: *“A femtoszkópiai kutatásaink különlegessége az, hogy három részecskegyorsító négy kísérletében végezzük azokat - így minden korábbinál széleskörűbb képet tudunk kapni a kvarkanyag geometriájáról és lehetséges fázisairól.”*



Kutatásaikat az NKFIH több pályázata (TKP, OTKA, ÚNKP, TÉT) is támogatja, illetve az amerikai munkában nagy segítséget nyújtott többük Fulbright ösztöndíja is. A fent felsorolt femtoszkópiai kutatásokban az alábbi fizikusok vettek/vesznek részt az ELTE-n:

- Kovács László (hallgató, PHENIX)
- Purzsa Aletta (hallgató, elméleti kutatás)
- Kurgyis Bálint (hallgató, PHENIX és elmélet, jelenleg a Stanfordi Egyetem PhD hallgatója)
- Kórodi Balázs (hallgató, CMS és elmélet, jelenleg az Ohio Egyetem PhD hallgatója)
- Pórfy Barnabás (doktorandusz, NA61/SHINE)
- Kasza Gábor (doktorandusz, PHENIX)
- Kincses Dániel (posztdoktori kutató, PHENIX, STAR és elméleti kutatás)
- Ayon Mukherjee (posztdoktori kutató, STAR)
- Sneha Bhosale (posztdoktori kutató, STAR)
- Srikanta Tripathy (posztdoktori kutató, STAR, jelenleg a Varsói Műszaki Egyetem kutatója)
- Lökös Sándor (posztdoktori kutató, PHENIX, jelenleg a Krakkói Magfizikai Intézet kutatója)
- Nagy Márton (vezető kutató, CMS, PHENIX, STAR és elméleti kutatás)
- Csanád Máté (a csoport vezetője)

A csoport a fenti témákban ezen kívül együttműködik Csörgő Tamással (HUN-REN Wigner FK) és Novák Tamással (MATE), illetve külföldről Roy Lacey (Stony Brook Egyetem), Wesley Metzger (Nijmegen Egyetem), Maria Stefaniak (Ohio Egyetem) fizikusokkal, és természetesen a gyorsítók kísérleteinek több csoportjával is.



A témában írt cikkek

- A csoportunk által írt, végleges adatokat tartalmazó kísérleti publikációk:
 - PHENIX együttműködés, [Phys.Rev.C 97 \(2018\) 6, 064911](#), arXiv:[1709.05649](#)
 - CMS együttműködés, [Phys.Rev.C \(2023\), közlésre elfogadva](#), arXiv:[2306.11574](#)
 - NA61/SHINE együttműködés, [Eur.Phys.J.C 83 \(2023\) 10, 919](#), arXiv:[2302.04593](#)
- Az előzetes adatokat bemutató, konferenciakötetben megjelent publikációk:
 - Kovács *et al.* [PHENIX], [Universe 9 \(2023\) 7, 336](#), arXiv:[2307.09573](#)
 - Mukherjee *et al.* [STAR], [Universe 9 \(2023\) 7, 300](#), arXiv:[2306.13668](#)
 - Pórfy *et al.* [NA61/SHINE], [Universe 9 \(2023\) 7, 298](#), arXiv:[2306.08696](#)
 - Kórodi *et al.* [CMS], [Universe 9 \(2023\) 7, 298](#), arXiv:[2306.08696](#)
- Elméleti publikációink a témában:
 - Kincses, Nagy, Csanád, [Phys.Rev.C 102 \(2020\) 6, 064912](#), arXiv:[1912.01381](#)
 - Kincses, Stefaniak, Csanád, [Entropy 24 \(2022\) 3, 308](#), arXiv:[2201.07962](#)
 - Kórodi, Kincses, Csanád, [Phys. Lett. B 847 \(2023\) 138295](#), arXiv:[2212.02980](#)
 - Kurgyis, Kincses, Nagy, Csanád, [Universe 9 \(2023\) 7, 328](#), arXiv:[2007.10173](#)
 - Nagy, Purzsa, Csanád, Kincses, [Eur.Phys.J.C 83 \(2023\) 1015](#), arXiv:[2308.10745](#)

Korábbi ismeretterjesztő cikkek a témában:

<https://ng.24.hu/tudomany/2017/09/24/ugy-tunik-kvarkanyag-cseppeket-eszlelt-a-phenix/>

[https://index.hu/techtud/2018/12/11/magyar fizikusok részvetelevel sikerult ujrafozni az o srobbanas utani oslevest/](https://index.hu/techtud/2018/12/11/magyar_fizikusok_reszvetelevel_sikerult_ujrafozni_az_o_srobbanas_utani_oslevest/)

<https://www.origo.hu/tudomany/20180522-reszecskekorrelaciokkal-vizsgaltak-mikent-mozognak-a-reszecskek-az-osanyagban.html>

<https://www.elte.hu/content/fizikusaink-a-femtoszkopia-elvonalaban.t.26342>