

Transzportmodell fejlesztése relativisztikus nehézion-reakciók vizsgálatára

PhD Tézisfüzet

2022

Szerző: Balassa Gábor

Témavezető: Dr. Wolf György

Konzulens: Dr. Takács Gábor

Budapesti Műszaki és Gazdaságtudományi Egyetem
Természettudományi kar
Fizikai Tudományok Doktori Iskola



Wigner Fizikai Kutatóközpont
Részecske- és Magfizikai Intézet
Elméleti Fizikai Osztály, Nehézion-fizikai Kutatócsoport



Bevezetés

Nagyenergiás nehézion reakciók során külső elektronjaitól megfosztott atommagokat ütköztetünk egymásnak relativisztikus energiákon, amely energiák pár száz MeV-től egészen TeV nagyságrendig is terjedhetnek. Ezen ütközések következtében igen sűrű, nagy hőmérsékletű anyag keletkezik, amelynek vizsgálata során értékes információkat szerezhetünk az alapvető kölcsönhatások tulajdonságairól, mint például az erősen kölcsönható anyag fázisdiagrammja, fázisátmeneteinek tulajdonságai. Ilyen és ehhez hasonló ütközési kísérleteket tipikusan nagyenergiás gyorsító komplexumokban végeznek, mint például az LHC-ben Svájcban, vagy az RHIC-ben az Egyesült Államokban. A nehézion kutatások fontosságát jelzi az is, hogy jelenleg is több nehézion ütköztető építése van folyamatban, melyek előre láthatólag a közeljövőben meg is kezdik működésüket. Közülük is számunkra a legfontosabbak a Németországban készülő FAIR komplexum, ahol a szokásos nehézionok mellett akár antiproton nyalábokkal is képesek lesznek kísérletezni, illetve az Oroszországban készülő NICA komplexum, ahol proton, deuteron és különböző nehézion-nyalábok állnak majd rendelkezésre. A disszertáció során az erősen kölcsönható anyag struktúráját vizsgálom pár GeV bombázó energiás antiproton-mag ütközésekben, melynek során három charmónium állapot (c - és \bar{c} -kvark kötött állapota), a J/Ψ , $\Psi(3686)$, illetve $\Psi(3770)$ részecskék sűrű közegbeli tömegeltolódásából lehet következtetni a gluonkondenzátum adott sűrűségű, közegbeli várhatóértékének nagyságára. A különböző kondenzátumok vákumbeli és közegbeli várhatóértékei igen fontos szerepet játszanak a hadronok egyes tulajdonságainak vizsgálatában, mint például azok tömege, vagy bomlási szélessége, melyekre többek között például QCD összszabály módszerrel [Cohen94] lehet becsléseket tenni. A legfontosabb alacsony dimenziós kondenzátumok pl. kvark kondenzátum, gluonkondenzátum vákumbeli várhatóértékei igen jól ismertek [Shifman79, Ioffe06], azonban a sűrű közegbeli értékeikre csak elméleti becslések vannak [Cohen91]. A disszertációban vizsgált gluonkondenzátum véges sűrűségű várhatóértéke azon felül, hogy szerepet játszik egyes hadronok tömegének közegbeli módosulásában, akár a kvarkbezárásban is fontos szerepe lehet [Nielsen82], így annak vizsgálata mindenképpen hasznos feladat a modern fizika szempontjából. Elméleti megfontolásokból ismert, hogy egyes vektormezonok, mint például az előbb említett charmónium állapotok, a sűrű közegben tömegeltolódást, illetve bomlási szélesség módosulást szenvednek, ahol az előző arányos kell legyen a gluonkondenzátum közegbeli várhatóértékével, illetve a közeg sűrűségével [Morita12]. Ez a tény egy igen jó módszert ad arra, hogy nagyenergiás nehézion-ütközések során, ahol tipikusan a normál magsűrűségnél is sűrűbb anyag keletkezik, a tömegeltolás mérésével becslést lehessen tenni a gluonkondenzátum értékére. Az ütközések során kialakuló sűrűséget azonban nem lehet közvetlen mérésekkel meghatározni, ahhoz elméleti megfontolások szükségesek. Egy igen széles körben alkalmazott módszer a nehézion-ütközések modellezésére az úgynevezett nemegyensúlyi transzportmódszerek alkalmazása [Buss12], melyek során a rendszer teljes nemegyensúlyi időfejlődése vizsgálható, tipikusan numerikus módszerekkel. A transzportmódszerek lehetőségét teremtenek az egyes ütközések során létrejövő részecskespektrumok, impulzus- és energiaeloszlások, sűrűségprofilok, hatáskeresztmetszetek, fluktuációk, illetve számos

egyéb, az ütközéseket jellemző más tulajdonság vizsgálatára is. A nehézion-fizikában manapság alkalmazott transzportkódok közül a legismertebbek az Ultrarelativisztikus Kvantum Molekuláris Dinamika kód (UrQMD), a Dubna kaszkád modell, a parton-hadron-húr dinamikai modell (PHSD), illetve az általunk is alkalmazott Boltzmann-Uehling-Uhlenbeck modell (BUU). Az említett modellek kisebb-nagyobb mértékben mind eltérnek egymástól, amely eltérések az alkalmazott energiatartományokban, a felhasznált elemi hadron-hadron hatáskeresztmetszetekben, numerikus közelítésekben, vagy éppen a transzportegyenletek megoldására alkalmazott szimulációs módszerekben jelentkeznek.

A transzportkódok fontos bementi paraméterei az elemi hadron-hadron hatáskeresztmetszetek, melyeket ideális esetben mérésekből lehet meghatározni, ám sok esetben olyan egzotikus folyamatok is érdekelnek minket, melyekhez még nem ismert hatáskeresztmetszetek alkalmazására lenne szükség. Ilyenkor az adott folyamat leírására alkalmas modellekből, például alacsonyenergiás effektív modellekből, statisztikus modellekből, partonikus modellekből, lehet meghatározni az ismeretlen hatáskeresztmetszeteket, melyeket beépítve a transzportmodellekbe vizsgálhatóak a kívánt folyamatok. Ilyen, a disszertáció szempontjából is érdekes folyamatok például az inkluzív és exkluzív elemi hadron-hadron (proton-proton, pion-proton, proton-antiproton) charmónium keltési hatáskeresztmetszetek, $\sqrt{s} \approx 1 - 10$ GeV tömegközépponti energiás ütközésekben, vagy éppen az $X(3872)$ lehetséges tetrakvark állapot alacsonyenergiás keltési hatáskeresztmetszetei, melyekre igen korlátozott számban vagy egyáltalán nem léteznek mérési eredmények. Míg az előbbi folyamatokra $\sqrt{s} > 10$ GeV energiákon létezik pár mérési eredmény, melyek alapján értelmes alacsony energiás extrapolációkat lehet végezni [Lynn07], addig az utóbbira a disszertáció írásának idején csupán néhány, viszonylag nagy hibával mért mérési pont létezik proton-proton ütközésekben, $\sqrt{s} \approx [1 - 10]$ TeV tömegközépponti energiákon [Chatrchyan13]. Az említett $X(3872)$ állapot azért is különösen érdekes, mert a mérések alapján meghatározott kvantumszámjai és egyéb tulajdonságai alapján nem fér bele a konvencionális mezon/barion képbe. Elméleti megfontolások alapján az $X(3872)$ részecske lehetne egy szorosan kötött $[uc\bar{u}\bar{c}]$ tetrakvark állapot, egy lazábban kötött $D^0\bar{D}^{*0}$ mezon-mezon molekula állapot, egy $[uc][\bar{u}\bar{c}]$ dikvark-antikvark kötött állapot, vagy akár egy $c\bar{c}g$ kvark-gluon hibrid állapot is. A tényleges struktúra azonban jelenleg még nem ismert, melynek következtében ez, és az ehhez hasonló részecskék elméleti és kísérleti vizsgálata manapság igen divatos és érdekes kutatási területe a modern fizikának. Az $X(3872)$ struktúrájának meghatározására egy lehetséges módszer lehet nehézion ütközések alkalmazása, melynek során az adott állapot sűrű közegbeli viselkedéséből következtetni lehet annak összetételére. Erre többek között az adhat lehetőséget, hogy a disszociációs hatáskeresztmetszetek erősen függenek az adott állapot térbeli kiterjedésétől, azaz egy lazábban kötött molekulaállapot a nukleonokkal való szóródás következtében nagyobb arányban tűnhet el a sűrű közegben, mint egy szorosabban kötött dikvark-antikvark állapot, így az ütközés végén megvizsgált részecske multiplicitásokból következtethetünk azok felépítésére [Cho13]. Természetesen ehhez szükségesek a keltési hatáskeresztmetszetek, melyekre mérések hiányában jelenleg csupán elméleti becsléseket tudunk tenni, így az ilyen egzotikus részecskék kutatásában jelenleg különösen fontos szerep jut a különböző modellek által számolt tulajdonságok,

hatáskeresztmetszetek összehasonlítására, illetve olyan kísérletek tervezésére, amelyek képesek lehetnek az egyes tulajdonságok kimérésére.

Célkitűzések

A disszertáció elsődleges célja a nehéz c -kvarkot és \bar{c} -antikvarkot tartalmazó charmónium állapotok viselkedésének vizsgálata antiproton indukált (antiproton+mag) reakciókban. Elméleti számítások szerint ezen állapotok közegbeli tömegeltolása információt szolgáltat a gluonkondenzátum várhatóértékéről adott sűrűségeken. Ilyen irányú mérések jelenleg nem léteznek, így elsődleges céltom becslést adni arra, hogy az elméletből meghatározott tömegeltolások mérhetőek lehetnek-e a jelenleg is épülő FAIR, illetve NICA gyorsítókban. Közülük is elsősorban a FAIR komplexumban készülő PANDA kísérletet vizsgálom meg részletesen, ahol pár GeV bombázó energiás antiprotonokkal fogunk bombázni nehéz magokat, például aranyat, vagy ólmot. A rendszer modellezéséhez egy általunk fejlesztett Boltzmann-Uehling-Uhlenbeck alapú "off-shell" transzportkódot alkalmazom, amely képes véges szélességgel rendelkező részecskék helyes, az energiamegmaradást nem sértő dinamikájának a leírására is.

A transzportkód bemeneti adatai között igen fontos szerepet játszanak azon elemi hadron-hadron hatáskeresztmetszetek, melyek során a vizsgált J/Ψ , $\Psi(3686)$, illetve $\Psi(3770)$ részecskék létrejöhetnek. Mivel az említett reakcióknak nem léteznek alacsony, pár GeV tömegközépponti energiás mérési eredményei, ezért arra saját becsléseket kell tennem. A szükséges hatáskeresztmetszetek meghatározásához egy saját, statisztikus alapokon nyugvó modell kidolgozását tűztem ki célul, melyhez fontos volt meghatározni annak bizonytalanságát, illetve lehetőségeit exkluzív, illetve inkluzív reakciók leírására. Alacsony energiákon továbbá elkészítettem egy Monte-Carlo kódot, amely numerikusan képes vizsgálni olyan folyamatokat is, ahol a végállapotban sok ($m > 3$) részecske is megjelenhet, és az analitikus számítások nehézkesek lennének. Az ilyen folyamatokat leginkább proton-antiproton nyugalmi annihilációban érdemes vizsgálni, ahol viszonylag sok mérés létezik a többpionos végállapotú valószínűségekre, így a modell közvetlenül összehasonlítható a mérésekkel.

A tömegeltolást vizsgáló transzportszimulációkhoz elengedhetetlen inkluzív charmónium keltési hatáskeresztmetszeteket meg kellett határozni proton-proton, pion-proton, illetve proton-antiproton ütközésekben, ahol az első két esetben közvetlen összehasonlítási lehetőség is van $\sqrt{s} \approx 10 - 20$ GeV környékén. A nehéz c -kvarkokat tartalmazó hadronokhoz hasonlóan az általam vizsgált energiatartományban fontos még meghatározni a b -kvarkokat tartalmazó hadronok, például Υ bottomónium "család" keltési hatáskeresztmetszeteit is, melyeknek a jelen disszertáción túlmutató szerepük lesz a további kutatásaink során.

A szokásos mezon és barion hatáskeresztmetszetek meghatározásán túl további célként tűztem ki az $X(3872)$ lehetséges tetrakvark állapot inkluzív keltési hatáskeresztmetszeteinek meghatározását proton-proton, pion-proton, illetve proton-antiproton ütközésekben, amely eredmények felhasználása szintén ezen disszertáción túlmutató jelentőségű. Az itt meghatározott hatáskeresztmetszetekkel a későbbiekben szimulációkat

fogunk tudni végezni olyan nehézion-ütközési rendszerekre, melyek alkalmasak lehetnek információt szolgáltatni az $X(3872)$ tényleges felépítéséről, azaz, hogy például egy szorosan kötött dikvark-antidikvark, vagy éppen egy lazán kötött $D^0\overline{D}^{*0}$ állapot-e.

A hatáskeresztmetszetek meghatározása után elérhetővé vált a J/Ψ , $\Psi(3686)$, illetve $\Psi(3770)$ charmónium állapotok, nehézion-ütközések során létrejövő sűrű közegbeli viselkedésének vizsgálata az általunk fejlesztett BUU-transzportmodellel. Elsődlegesen $E_k = 6-9$ GeV labor kinetikus energiás antiproton-arany ütközések nemegyensúlyi dinamikai viselkedésének vizsgálata a cél, amelynek során a charmónium állapotok közegbeli tömegeltolását, illetve annak kísérleti lehetőségeit vizsgáltam meg.

Vizsgálati módszerek

A disszertáció során végzett legtöbb alapvető számításhoz, illetve ábrák elkészítéséhez a MATLAB programnyelvet használtam. Az alapvető hatáskeresztmetszetek, illetve a statisztikus modell Monte-Carlo-szimulációs kódját szintén MATLAB környezetben implementáltam. A transzportszámításokhoz alkalmazott Boltzmann-Uehling-Uhlenbeck nemegyensúlyi transzportkód FORTRAN nyelven íródott Wolf György által, melyben én a charmónium számításokhoz szükséges kódrészek implementálásában, illetve a szimulációk futtatásában és az eredmények elemzésében vettem részt.

Új tudományos eredmények (Tézispontok)

1.

Elemi hadron-hadron ütközések alacsony energiás (pár GeV tömegközépponti energiás) hatáskeresztmetszeteinek meghatározásához kidolgoztam egy statisztikus alapokon nyugvó modellt, amely az alkalmazott elvekből kiindulva több szempontból is eltér az irodalomban jelenleg ismert módszerektől. Míg a szokásos statisztikus modellek az egyszerű n -részcskés fázistérintegrálokból kiindulva adnak becslést az egyes folyamatok arányaira, tipikusan nagyobb energiákon, addig a saját modell, tűzlabda folyamatok kaszkádja segítségével, a rezonanciák bomlási paramétereit, az állapotsűrűségeket, illetve a hadronok kvarktartalmát ún. kvark-kombinatorikai faktorokon keresztül figyelembe véve képes becslést adni exkluzív, illetve inkluzív folyamatok hatáskeresztmetszeteire, akár alacsony energiákon is.

A modellel meghatároztam számos olyan exkluzív hatáskeresztmetszetet, melyre sok esetben csak korlátozott számú mérési adat létezik. Alacsony végállapotú részecske multiplicitások esetén módszert adtam analitikus számítások elvégzésére, továbbá elkészítettem egy numerikus Monte-Carlo-kódot, amellyel lényegesen bonyolultabb, sokrészcskés végállapotok valószínűségének leírása is lehetővé vált. A numerikus módszert sikerrel alkalmaztam nyugalmi proton-antiproton annihiláció során létrejövő több pionos végállapotok valószínűségeinek leírására, illetve a végállapotú pion multiplicitás eloszlásának meghatározására. A modellszámítások eredményei a mérési eredményekkel összevetve hibahatáron belül vannak. A statisztikus modell alapjainak leírását az említett

számításokkal [P1] publikáció tartalmazza.

2.

A modell és a mérési eredmények összehasonlításának segítségével megbecsültem az elemi hadronikus ütközések hatáskeresztmetszeteinek leírására megfogalmazott statisztikus modell relatív hibaeloszlását, amelynek segítségével meghatároztam a modell bizonytalanságát exkluzív, illetve inkluzív hatáskeresztmetszetek esetében is. Az inkluzív hatáskeresztmetszetek számításához módszert adtam azok egyszerűbb meghatározásához, amelynek segítségével elkerülhető az összes lehetséges folyamat felösszegzése és numerikusan kezelhető formában kiszámíthatóak az adott inkluzív összegek. Az inkluzív hatáskeresztmetszetek számítására kidolgozott módszerrel meghatároztam a $p\pi^- \rightarrow \rho^0 X$, $pp \rightarrow \rho^0 X$, $p\bar{p} \rightarrow \rho^0 X$, $p\pi^- \rightarrow K^0 X$, $p\pi^- \rightarrow K^*(892)^+ X$, illetve $p\pi^- \rightarrow K^*(892)^- X$ inkluzív folyamatok hatáskeresztmetszeteinek \sqrt{s} függését viszonylag széles energiaskálákon, ahol csak néhány mérési pont létezik. A statisztikus modell bővített változatát az inkluzív hatáskeresztmetszetekkel, illetve a hibabecsléssel [P2] publikációban foglaltam össze.

3.

A statisztikus modell legfontosabb szabad paramétereit, a c - és b -kvark keletkezési valószínűségeket, az elérhető inkluzív charmónium, illetve bottomónium keltési hatáskeresztmetszetek néhány mérési pontjához illetve, becslést tettem az inkluzív charmónium ($c\bar{c}$), illetve bottomónium ($b\bar{b}$) részecskék keltési hatáskeresztmetszeteire proton-proton, pion-proton, illetve proton-antiproton ütközésekben pár GeV tömegközépponti energiától egészen több tíz GeV tömegközépponti energiáig. A $c\bar{c}$ charmónium állapotokra meghatároztam a direkt J/Ψ keltés inkluzív hatáskeresztmetszetének, illetve a magasabban fekvő χ_{c1} , χ_{c2} , illetve $\Psi(3686)$ keltési hatáskeresztmetszeteinek arányait is, amely egy további validációját is jelenti a modellnek. Az illesztett paraméterek felhasználásával további becsléseket tettem az inkluzív D -mezon keltési valószínűségekre is proton-proton, illetve pion-proton ütközések esetén. A statisztikus modell teljes, már c - és b -kvarkokat is tartalmazó bővített változatát, a charmónium és bottomónium hatáskeresztmetszetekkel [P3] publikációban foglaltam össze.

4.

A statisztikus modell felhasználásával becsléseket tettem az $X(3872)$ lehetséges tetra-kvark állapot inkluzív keltési hatáskeresztmetszeteire proton-proton, pion-proton, illetve proton-antiproton ütközésekben $\sqrt{s} \approx 1 - 10$ GeV energiákon, azzal a feltevéssel, hogy az $X(3872)$ egy $[uc]$ dikvark és egy $[\bar{u}\bar{c}]$ antidikvark kötött állapota triplet-antitriplet színkonfigurációban. Validációs lépésként a modellszámításokat összehasonlítottam egy elérhető mérési ponttal $\sqrt{s} = 7$ TeV energián proton-proton ütközésekben, melyhez a triplet-antitriplet és szextett-antiszextett színkonfigurációs valószínűségeket variálva

meghatároztam az $X(3872)$ és $\Psi(3686)$ részecskék inkluzív keltési hatáskeresztmetszeteinek nagyenergiás arányait. A nevezett számításokat részletesen a [P4] publikáció tartalmazza.

5.

Az általunk fejlesztett Boltzmann-Uehling-Uhlenbeck alapú transzportkóddal megvizsgáltuk a J/Ψ , $\Psi(3686)$, illetve $\Psi(3770)$ vektormezonok közegbeli tömegmódosulását $E_k = 6 - 9$ GeV labor kinetikus energiás $\bar{p} + Au$ ütközésekben, melynek során javaslatot tettünk annak mérési lehetőségére a készülő FAIR komplexumban tervezett PANDA kísérletben. A számítások során arra a következtetésre jutottunk, hogy pár GeV-es antiproton indukált reakciókban a $\Psi(3686)$ részecske tömegeltolása detektálható lehet a végállapotú dileptonspektrum (e^-e^+) vizsgálatával. A javasolt kísérlet közvetlen hasznosítási lehetőségeként meghatározható lesz a gluonkondenzátum várhatóértéke, antiproton indukált reakciókban létrejövő sűrűségeken, amely közelítőleg a normál mag-sűrűségnek felel meg. A transzportszámítások eredményeit a [P5,P6,P7] publikációk foglalják össze.

Irodalmi hivatkozások listája

[Cohen94] T.D. Cohen, R.J. Furnstah, D.K. Griegel, Xue-min Jin, "QCD sum rules and applications to nuclear physics", *Prog. Part. Nucl. Phys.* **35**, 221 (1995).

[Shiffman79] M.A.Shifman, A.I.Vainshtein, V.I.Zakharov, "QCD and resonance physics. theoretical foundations", *Nucl. Phys. B* **147**, 385 (1979).

[Ioffe06] B.I. Ioffe, "QCD (quantum chromodynamics) at low energies", *Prog. Part. Nucl. Phys.* **56**, 232 (2006).

[Cohen91] Thomas D. Cohen, R.J. Furnstahl, David K. Griegel, "Quark and gluon condensates in nuclear matter", *Phys. Rev. C* **45**, 1881 (1992).

[Nielsen82] H. B. Nielsen, A. Patkos, "Effective dielectric theory from QCD", *Nucl. Phys. B* **195**, 137 (1982).

[Morita12] Kenji Morita, Su Hounq Lee, "Charmonium mass in hot and dense hadronic matter", *Phys. Rev. C* **85**, 044917 (2010).

[Buss12] O.Buss, T.Gaitanos, K.Gallmeister, H.van Hees, M.Kaskulov, O.Lalakulich, A.B.Larionov, T.Leitner, J.Weil, U.Mosel, "Transport-theoretical description of nuclear reactions", *Phys. Reports* **512**, 1 (2012).

[Lynn07] O. Linnyk, E.L. Bratkovskaya, W. Cassing, H. Stöcker, "Charmonium dynamics in nucleus–nucleus collisions at SPS and FAIR energies", *Nucl. Phys. A* **786**, 183 (2007).

[Chatrchyan13] S. Chatrchyan et al. [CMS Collaboration] *JHEP* **1304**, 154 (2013).

[Cho13] S. Cho, S. H. Lee, "Hadronic effects on the X(3872) meson abundance in heavy ion collisions", *Phys. Rev. C* **88**, 054901 (2013).

A t ezispontokhoz tartoz o tudom nyos k zlem nyek

[P1] G. Balassa, P. Kov acs, Gy. Wolf, "A statistical method to estimate low-energy hadronic cross sections", *Eur. Phys. J. A* **54**, 25 (2018).

[P2] G. Balassa, Gy. Wolf, "A statistical model to calculate inclusive hadronic cross sections", *Eur. Phys. J. A* **56**, 174 (2020).

[P3] G. Balassa, Gy. Wolf, "Charmed and bottomed hadronic cross sections from a statistical model", *Eur. Phys. J. A* **56**, 237 (2020).

[P4] G. Balassa, Gy. Wolf, "Production cross sections of tetraquark states in elementary hadronic collisions", *Eur. Phys. J. A* **57**, 246 (2021).

[P5] Gy. Wolf, G. Balassa, P. Kov acs, M. Z et enyi, Su Houng Lee, "Mass shift of charmonium states in $\bar{p}A$ collision", *Phys. Lett. B* **780**, 25 (2018).

[P6] Gy. Wolf, G. Balassa, P. Kov acs, M. Z et enyi, Su Houng Lee, "Charmonium Excitation Functions in $\bar{p}A$ Collisions", *Acta Phys. Pol. B Proc. Suppl.* **11**, 531 (2018).

[P7] Gy. Wolf, G. Balassa, P. Kov acs, M. Z et enyi, Su Houng Lee, "Charmonium spectral functions in $\bar{p}A$ collision", *Acta Phys. Pol. B Proc. Suppl.* **10**, 1177 (2017).

Tov bbi tudom nyos k zlem nyek

[O1] G. Balassa, P. Rogolino,  . Rieth, R. Kov acs, "New perspectives for modelling ballistic-diffusive heat conduction", *Cont. Mech. Therm.* **33**, 2007 (2021).

[O2] Gy. Wolf, G. Balassa, P. Kov acs, M. Z et enyi, Su Houng Lee, "Observation of Charmonium Mass Modification in Proton Induced Reactions", *JPS Conf. Proc.* **26**, 024003 (2019).