

Az LHC TOTEM kísérlete

Csanád Máté

ELTE Atomfizikai Tanszék, 1117 Budapest, Pázmány Péter sétány 1/A.

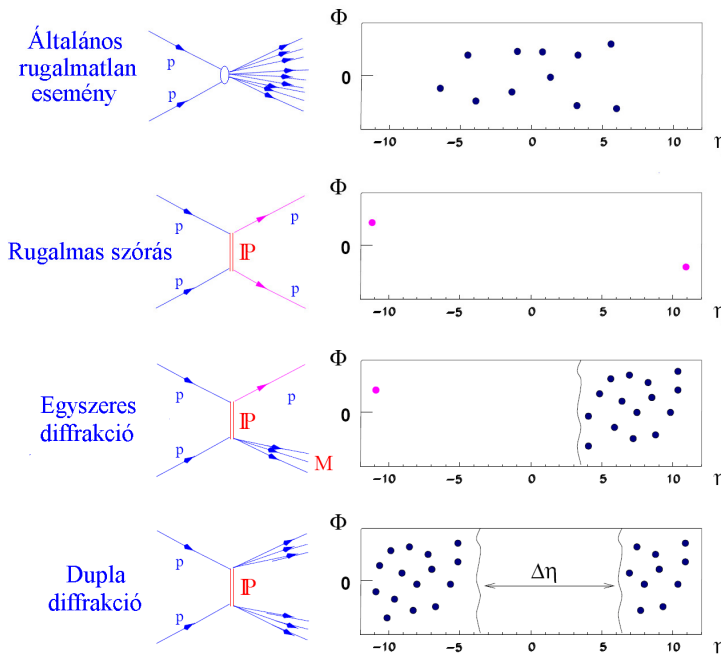
A svájci CERN kutatóintézetben létrehozott LHC gyorsító indulása napjaink egyik leginkább várt tudományos eseménye. A kísérleti részecskefizikai és nehézionfizikai kutatások új frontvonalára nyílik majd meg az LHC kísérleteiben. Ezek közül egy a TOTEM kísérlet, melynek célja a teljes proton-proton hatáskeresztmetszet mérése és a proton szerkezetének mélyebb megértése. A TOTEM detektorrendszerét úgy alakították ki, hogy a fenti célokhoz szükséges méréseket, azaz a rugalmas és diffraktív szórás hatáskeresztmetszetét a lehető leghatékonyabban tudja mérni a megfelelő kinematikai tartományban. Jelen cikkben a TOTEM fizikai céljait és detektorainak felépítését tekintjük át.

Bevezetés

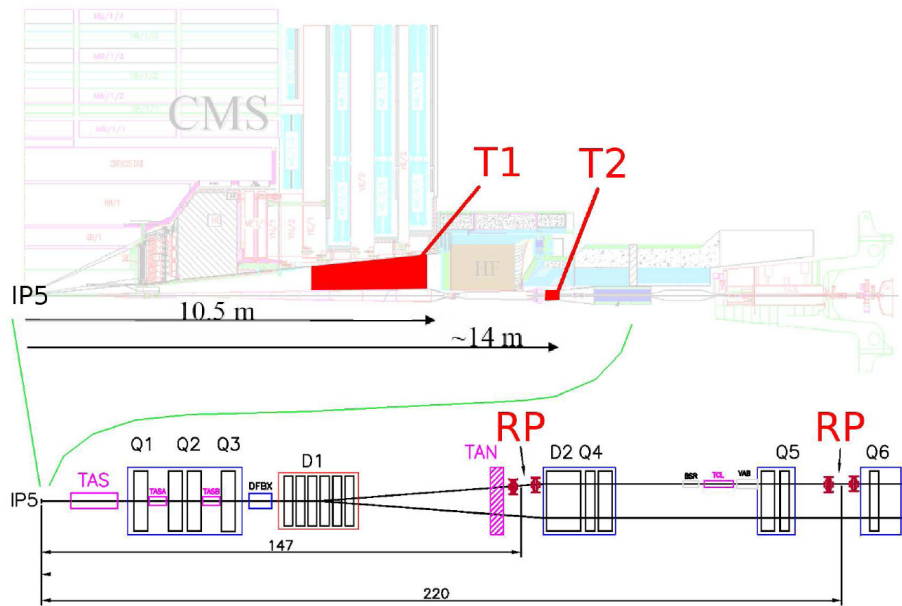
A genfi székhelyű Európai Nukleáris Kutatási Szervezet, azaz a CERN 2009-ben elindította a Nagy Hadronütköztető (LHC) néven ismert gyorsítóját. Először 900 GeV, majd 2,36 TeV, végül 2010 márciusában 7 TeV tömegközépponti energiájú proton-proton ütközéseket hoztak létre. A tervezett maximális 14 TeV energia eléréséhez még további ellenőrzésekre van szükség. Az LHC bemutatásával korábbi cikkekben [1] találkozhatott az Olvasó. Jelen cikk témája a TOTEM (amely a „TOTal cross section, Elastic scattering and diffraction measurement” kifejezés rövidítése, ennek jelentése „teljes hatáskeresztmetszet, rugalmas szórás

és diffrakció mérés”), az LHC egyik (létszámában a kisebbek közé tartozó) kísérlete [2]. A TOTEM egy a szervezett magyar részvétellel működő LHC együttműködések közül, a magyar csoport honlapját lásd a <http://totem.kfki.hu> címen. A többi LHC kísérlet (ALICE, ATLAS, CMS, LHCb, LHCf) közül az ALICE, az ATLAS és a CMS kísérletben vesznek részt magyarok.

Az egyedi kinematikai tartományban lévő TOTEM berendezésekkel a leginkább előreszóródó (azaz a leginkább nyalábirányban kirepülő) részecskéket észlelhetjük, ezért a TOTEM ideális előreszórási jelenségek vizsgálatára, például rugalmas és diffraktív szórás mérésére (ezek kinematikai leírása az 1. ábrán látható).



1. ábra: A rugalmas szórás és a diffrakció kinematikai képe látható ezen az ábrán. Rugalmas szórásban csak impulzuscsere történik, a protonok nem bomlanak fel. Diffrakció esetén a bejövő protonok közötti kölcsönhatás eredményeként a protonok felbomolhatnak. A grafikon p baloldalt a bejövő, jobboldalt a kimenő protonokat jelöli, P pedig a kicserélt részecske jele. A diagramokon $\eta = 0.5 \cdot \log(p+p_z)/(p-p_z)$ a (pseudo)rapiditást, Φ pedig a nyalábra merőleges (transzverz) síkbeli szöget jelöli. Fontos jele a diffraktív és rugalmas eseményeknek, hogy a keletkező részecskék η tartományba két jól elkülönülő részre osztható.



2. ábra: A felső, méretarányos ábrán az előreszóródott részecskéket észlelő T1 és T2 nyomkövető detektorok láthatóak, a CMS detektorai (halványan a háttérben) által körülveve, az IP5 ütközési pont jobboldalán. Az alsó (szintén méretarányos) ábra az LHC nyalábcsőve mentén elhelyezkedő római edények (Roman Pot, RP) láthatóak. Az egyik állomás 147 méterre (RP147), a másik 220 méterre (RP220) található az ütközési ponttól. A TOTEM detektorainak másik fele az ütközési pont (IP5) túloldalán, szimmetrikusan helyezkedik el

A TOTEM fő célja a teljes proton-proton hatáskeresztmetszet mérése, amelyhez a rugalmas szórás hatáskeresztmetszetének kis t értékeknél való mérésre (ahol t a nyalábirányra merőleges impulzus négyzetét jelenti, azaz a kis t nagy rapiditásnak felel meg), illetve a rugalmas és rugalmatlan események időegységenkénti számának meghatározására van szükség. A TOTEM célja továbbá a proton szerkezetének mélyebb megértése diffraktív események vizsgálatán keresztül. Látható tehát, hogy a TOTEM fizikája kiegészíti a többi LHC kísérlet céljait, az egyedi kinematikai tartományon túl azért is, mert a többi kísérlet által mért érdekes különféle hatáskeresztmetszeti adatok normálásához szükség van a teljes hatáskeresztmetszet ismeretére.

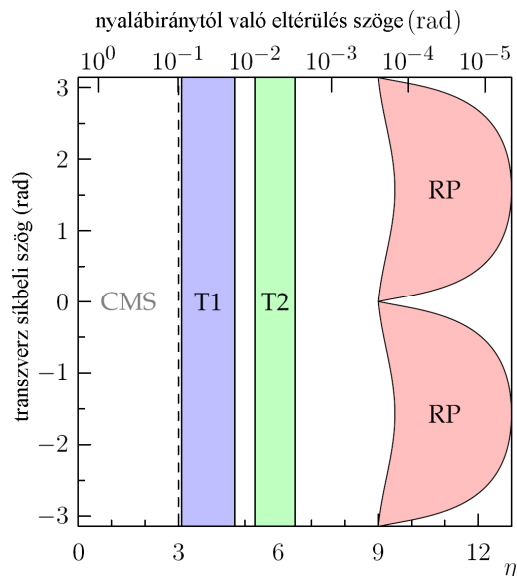
A TOTEM felépítése

A TOTEM kísérletet úgy tervezték meg, hogy a fenti mérések elvégzésére alkalmas legyen. Ehhez nagy rapiditástartományt lefedő detektorokra van szükség, hogy a kijövő részecskék döntő hányadát észlelhessük (1. ábra). A TOTEM felépítése a 2. ábrán látható módon olyan, hogy a detektorai a nyalábhöz képest minél kisebb szögben érkező részecskéket észleljék. A TOTEM fő részei a „római edénynek” (Roman Pot) nevezett szilícium-detektorok és a T1 és T2 „teleszkópok”. Az ezek által lefedett kinematikai tartományt a 3. ábra mutatja. Látható, hogy a detektorok rapiditástartománya $\eta=12$ -ig is kimegy, ez körülbelül 10^{-5} rad szögnél kisebb eltérést jelent a nyalábiránytól. Ezen detektor-rendszerrel a rugalmas események 99,5%-a és a diffraktív események 84%-a észlelhető.

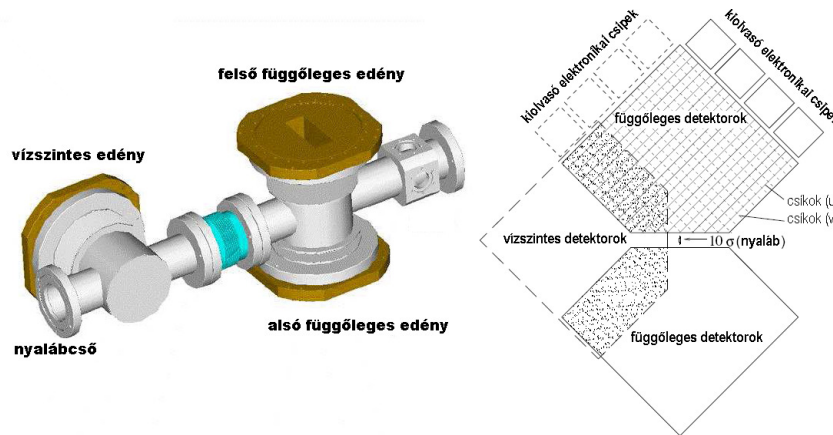
A Roman Pot detektorok

A nagymértékben előreszórót protonokat mozgatható, a nyalábcsőbe nyúló detektorok (azaz római edények) segítségével észlelhetjük - ezt a kísérleti technikát az ISR-nél vezették be [3], és azóta más gyorsítóknál is sikerrel

alkalmazták. A TOTEM esetében ezt úgy alkalmazzuk, hogy a szilícium detektor-lapokat és a hozzájuk tartozó kiolvasó elektronikát ezekbe az úgynevezett római edényekbe, azaz Roman Pot detektorokba tesszük, és ezeket az edényeket másodlagos vákuumba helyezve csatlakoztatjuk a nyalábcső elsődleges vákuumrendszeréhez. A detektorokat az edényekkel együtt mozgathatjuk a nyalábtól a lehető legkisebb, de még biztonságos távolságra. Mivel így a nyalábhöz nagyon közel beérkező protonokat is érzékeljük, így az igen nagy rapiditású tartomány is rendelkezésünkre áll. A magyar csoport egyik feladata volt az edényekhez kapcsolódó szimulációk elvégzése [4].



3. ábra: A TOTEM detektorok által lefedett kinematikai tartomány. Az ezen az ábrán nem szereplő negatív rapiditás (vagy eltérülési szög) esetén ugyanezek a tartományok érhetőek el.



4. ábra: A Roman Pot (RP) detektorok felépítése. Balra a nyalábcsőhöz csatlakozó edények, jobbra az edényekben található szilícium-detektorok (lapkák) elrendezése látható. Egy állomáson két, a balra látható ábrához hasonló RP egység van, egy egységben pedig három (egy vízszintes és két függőleges) edény. Az ütközési pont két oldalán 2-2 állomás van, ezekben tehát 24 edény, és minden edényben 10-10 szilícium-detektor (azaz összesen 240 lap)

A római edényekben lévő detektor 3,5 cm-es oldalhosszúságú szilícium lapkákból áll (4. ábra), edényenként 10 darabból. A lapkákat 512 csíkra vagy csatornára osztották [5], így a különböző irányban elhelyezett lapkákkal a beérkező protonok transzverz pozícióját és ezáltal impulzusát tudjuk meghatározni (4. ábra). A lapokon megjelenő jelet úgynevezett VFAT chipekkel olvassuk ki, négy darab tartozik egy szilícium lapkához.

Fontos látni, hogy a szilícium detektor-lapokat annyira tehetjük közel a nyalábhoz, hogy csak a szórt részecskék ütközzenek bele. Ehhez a nyalábvastagság (σ) tízszeresének megfelelő távolságot választunk. A nyalábvastagság azonban a gyorsító optikájától függ, így a detektorok által lefedett kinematikai tartomány is. Az LHC normál optikája (a szokásos Twiss-féle béta függvény β^* paraméterének értékeivel kifejezve, amely a nyalábkeresztmetszet oszcillációjának ütközési pontban vett hullámhosszát jelenti) $\beta^* = 0,5-2$ m, az igazán precíz TOTEM mérésekhez azonban speciális, $\beta^* = 90$ m és 1540 m-es optikára is szükség van (β^* nagy értéke fókuszált, kis keresztmetszetű nyalábot jelent, míg kis β^* esetén a nyaláb keresztmetszete nagyobb). A $\beta^* = 90$ m optika már a korai adatfelvételi periódusokban elérhető lesz, míg a 1540 m várhatóan későbbi időszakokban. A megfelelő precíz méréshez azonban relatíve alacsony luminozitás is elegendő, így rövid, speciális optikájú adatfelvételi periódussal is elérhetőek a TOTEM által megcélzott mérések.

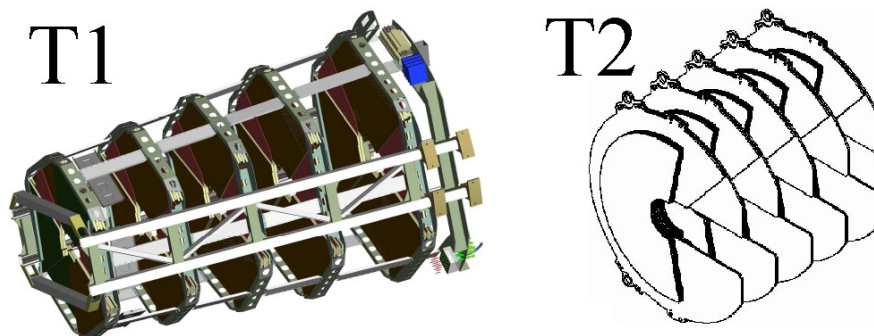
Az előreszórást mérő teleszkópok

A TOTEM előreszórást mérő teleszkópjai (T1 és T2) négyegységnyi rapiditástartományt fednek le. Szimmetrikusan helyezkednek el a CMS előreszórást mérő régiójához közel, az ütközési pont mindkét oldalán (2. ábra).

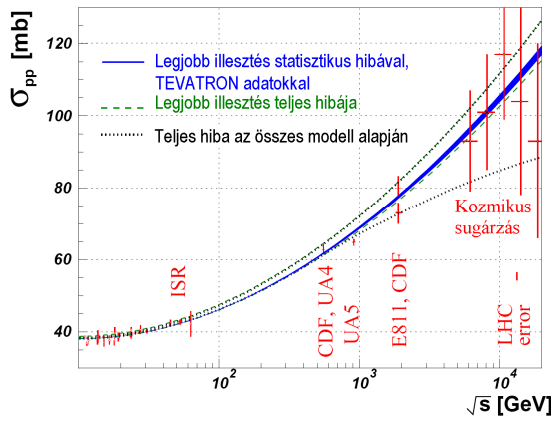
A T1 ($3,1 < |\eta| < 4,7$) karonként 5 síkból áll, ezek pedig egyenként 6 trapéz alakú katódcsík kamrából (Cathode Strip Chamber, azaz CSC), ütközési ponttól való távolságuk 7,5 – 10,5 méter. A T2 ($5,3 < |\eta| < 6,5$) teleszkóp 20 félkör alakú gáztöltésű elektronsokszorozóból (Gas Electron Multiplier azaz GEM) áll, és 13,5 méterre található az ütközési ponttól. A teleszkópok felépítését az 5. ábrán láthatjuk. Az általuk lefedett kinematikai tartomány miatt a rugalmatlan szórás események számának mérésében játszanak jelentős szerepet. Kulcsfontosságúak továbbá a rugalmatlan folyamatok részletes vizsgálatát célzó mérésekben is.

A TOTEM adatkiolvasó rendszere

A Roman Pot, a T1 és a T2 detektorok csatornáinak kiolvasására is 128 csatornás, úgynevezett VFAT chipeket használunk. A TOTEM adatkiolvasó (data acquisition, azaz DAQ) rendszere így igen egységes, a Roman Pot 240 szilícium-detektorához 960 VFAT chip csatlakozik, míg a T1-hez és a T2-höz összesen 1160. A DAQ feladata ezen 2220 VFAT adatainak kiolvasása. A magyar csoport feladatai között kiemelt helyen említhetjük a DAQ és a hozzá kapcsolódó valós idejű megfigyelő (monitoring) rendszer fejlesztését.



5. ábra: A T1 (jobbra) és T2 (balra) detektorok rajza. Az ütközési ponthoz képest elfoglalt pozíciójukat lásd a 2. ábrán.



6. ábra: A teljes proton-proton hatáskeresztmetszet (σ_{pp}) a tömegközépponti energia (\sqrt{s}) függvényében, a COMPETE együttműködés számításai szerint [2].

A TOTEM kísérlet céljai

A TOTEM céljai között tehát megtalálható a proton-proton szórás teljes hatáskeresztmetszetének és a rugalmas szórás differenciális hatáskeresztmetszetének mérése, illetve proton szerkezetének mélyebb megértése diffraktív események vizsgálatán keresztül. A TOTEM detektorai által lefedett kinematikai tartományt (5. ábra) ez alapján alakították ki. A Roman Pot által lefedett tartomány függ a gyorsító optikájától (lásd fent).

Teljes hatáskeresztmetszet és luminozitás

Minden részecske-ütközés vizsgálata esetén elsődlegesen fontos kérdés a teljes hatáskeresztmetszet megmérése. A teljes proton-proton hatáskeresztmetszet alacsony energián jól ismert, LHC energiákon azonban csak nagy bizonytalanságú kozmikus sugárzási adatokból nyerhetünk információt. Az eddigi mérési adatok és elméleti görbék a 6. ábrán láthatóak.

A TOTEM méréseinek bizonytalansága az ún. optikai tételt felhasználó számítás alapján megbecsülve mindössze 1% lesz. A mérés alapja a következő összefüggés:

$$\sigma_{tot} = \frac{16\pi}{1 + \rho^2} \frac{dN_{el} / dt|_{t=0}}{N_{el} + N_{inel}} \quad (1)$$

Itt N_{el} a rugalmas (elasztikus), N_{inel} a rugalmatlan (inelasztikus) szórást szenvedett részecskék száma, t a szórásban átadott transzverz irányú impulzus négyzete, ρ pedig egyfajta szórási paraméter, a rugalmas szórás amplitúdójának valós és képzetes részének hányadosa, elméleti becslés [6] alapján értéke 0,14-re tehető (ez az $1 + \rho^2$ kifejezésen keresztül szerepel a képletben, ezért az ebből adódó hiba csekély). A mérés kritikus része a rugalmas szórás extrapolálása a $t = 0$ értékhez. A TOTEM azért alkalmas erre különösen, mert az igen nagy rapiditás éppen igen kicsi t értékek felel meg. Minél közelebb tehetjük tehát a detektorokat a nyalábhoz, annál közelebb juthatunk a $t = 0$ értékhez. A gyorsító optikájának $\beta^* = 2$ m értéke esetén a $|t| > 1$ GeV² tartomány érhető el, $\beta^* = 90$ m esetén a legkisebb elérhető $|t|$ érték 0,04 GeV², míg $\beta^* = 1540$ m esetén ugyanez 0,002 GeV². Fontos megemlíteni továbbá, hogy a luminozitás mérése is lehetséges hasonló módon, mivel erre a következő összefüggés vonatkozik:

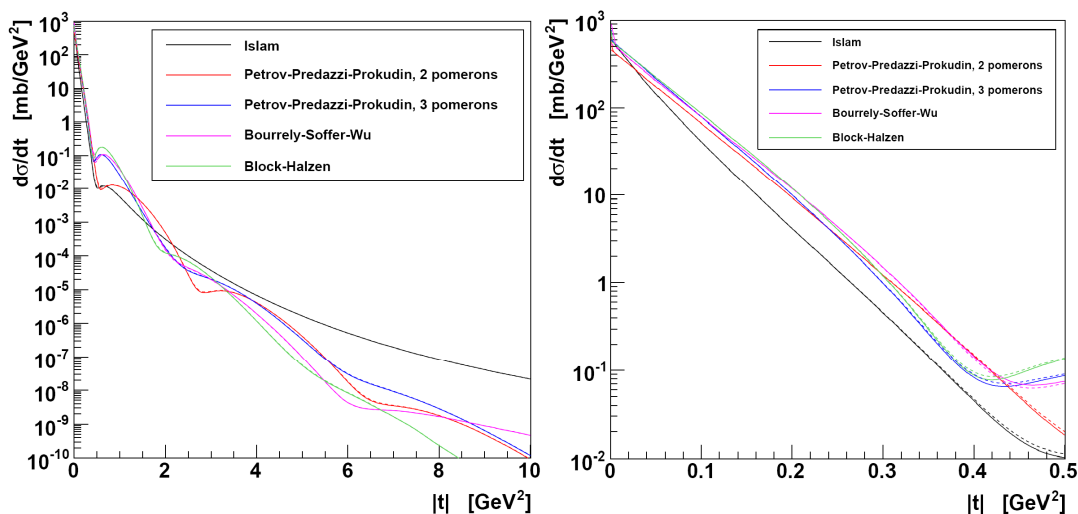
$$L \sigma_{tot} = N_{el} + N_{inel} \quad (2)$$

A hatáskeresztmetszet mérésnek hibája $\beta^* = 90$ m optika esetén 5%, míg a speciális, $\beta^* = 1535$ m optika esetén 1-2%. A luminozitás hibája pedig 7, illetve 2% a két különböző optika esetén. Ekkora hibával már megszorítást lehet majd tenni az elméleti modellekre.

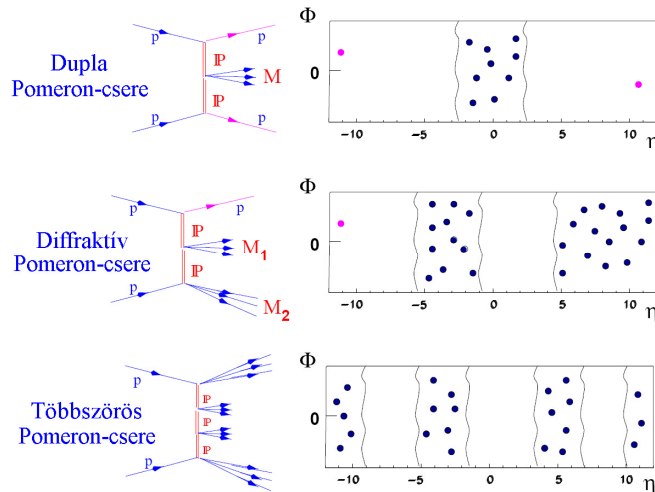
Rugalmas szórás

A nagy impakt paraméterű ütközésekre irányuló érdeklődés középpontjában áll a rugalmas szórás differenciális hatáskeresztmetszetének ($d\sigma/dt$) mérése is. A nagyenergiás rugalmas szórási folyamatokra vonatkozóan igen pontos mérések állnak rendelkezésre széles energiatartományban. Ezek alapján különböző jóslatok születtek 14 TeV energiára, ezek a 7. ábrán láthatóak, amely különböző modellek [7-10] jóslatait mutatja.

A TOTEM nagyjából a $10^{-3} - 10$ GeV² $|t|$ intervallumon végez majd méréseket, ezek eredményei tehát el tudják majd dönteni, hogy melyik elméleti modell helyes.



7. ábra: A rugalmas szórás differenciális hatáskeresztmetszetére vonatkozó jóslatok különböző modellek alapján, a 0-10 GeV² illetve a 0-0.5 GeV² tartományban [6-10]



8. ábra: Az 1. ábrán látható egyszeres és dupla diffrakción kívül egyéb diffraktív folyamatok is lezajlanak. Közös jellemzőjük a keletkezett részecskék rapiditástartományában lévő rések, illetve a legtöbb esetben az épen maradt protonok. A kicserélt részecske jele itt is P , mivel az diffraktív és elasztikus folyamatok esetében a Regge-elmélet által bevezetett Pomeron használják az impulzuscseré hatáskeresztmetszetének leírására [11]. A Pomeron tehát hipotetikus részecske, amelyet szórási hatáskeresztmetszetek hipotetikus leírására használnak.

Diffrakció

A diffrakciós és rugalmas folyamatok összesen nagyjából 50%-át teszik ki a teljes hatáskeresztmetszetnek. Ezen folyamatoknak sok, a protonszerkezethez és a QCD (kvantumszín-dinamika; a kvarkok és gluonok kölcsönhatását leíró elmélet) alacsony energián mutatott viselkedéséhez kapcsolódó részletét nem értjük még teljesen. A legtöbb diffraktív eseményben (a különböző típusú események az 1. és a 8. ábrán láthatóak) megmarad az egyik vagy mindkét proton, és csak kicsit módosul az impulzusa. Ezen protonok észlelése a CMS detektorrendszerével együtt (amely a központi tartományban lévő, az ütközésben keletkezett részecskéket észleli) a diffraktív események részletes leírását teszi lehetővé. Fontos látni továbbá, hogy már az LHC méréseinek korai szakaszában elérhető a diffrakciós folyamatok hatáskeresztmetszetének mérése a TOTEM számára, $\beta^* = 2$ m optika esetén is 2%-os relatív hibával.

Összefoglalás

A TOTEM kísérlet egyedülálló abból a szempontból, hogy az előreszórt protonok pályáját igen nagy precizitással tudja meghatározni. A gyorsító hagyományos optikájával is pontosan megmérhetjük a diffrakciós és rugalmas szórási folyamatok hatáskeresztmetszetét, speciális optikájú mérésekkel pedig a proton-proton szórást teljes hatáskeresztmetszet határozhatjuk meg. A TOTEM mérési programjának végrehajtása során olyan kérdésekre nyerhetünk választ tehát, amelyek további, a többi LHC kísérlet eredményein túli betekintést engednek a kvantumszín-dinamika működésébe.

Köszönetnyilvánítás

A szerző köszönetét fejezi ki a TOTEM együttműködés tagjainak és a magyar TOTEM csoportnak. Kutatási munkánkat az OTKA NK 73143, NKTH-OTKA 74458 pályázatok, a Magyar-Amerikai Vállalkozási Ösztöndíj Alap és a TOTEM kísérlet támogatja.

Irodalomjegyzék

- [1] Krajczár K.: Az első ütközések az LHC-ben: a CMS Együttműködés eredményei 900 GeV és a világrekord 2,36 TeV ütközési energián, *Nukleon III. évf.* (2010) 54
- [2] G. Anelli et al., *The TOTEM Experiment at the CERN Large Hadron Collider*, JINST 3 S08007, 2008
- [3] U. Amaldi et al., *The energy dependence of the proton proton total cross-section for center-of-mass energies between 23 and 53 GeV*, *Phys. Lett. B* 44 (1973) 112.
- [4] M. Deile et al., *Beam Coupling Impedance Measurement and Mitigation for a TOTEM Roman Pot*, *Conf.Proc.C0806233 [arXiv:0806.4974]*
- [5] G. Ruggiero et al., *Planar edgeless silicon detectors for the TOTEM experiment*, *Nucl. Instrum. Methods Phys. Res., A* 582 (2007) 854-857
- [6] J.R. Cudell et al., *Benchmarks for the forward observables at RHIC, the Tevatron-Run II, and the LHC*, *Phys. Rev. Lett.* 89 (2002) 201801.
- [7] M.M. Islam, R.J. Luddy and A.V. Prokudin, *Near forward pp elastic scattering at LHC and nucleon structure*, *Int. J. Mod. Phys. A* 21 (2006) 1;
- [8] C. Bourrely, J. Soffer and T.-T. Wu, *Impact-picture phenomenology for $\pi\pi$; $K\pi$ and pp elastic scattering at high energies*, *Eur. Phys. J. C* 28 (2003) 97;
- [9] V.A. Petrov, E. Predazzi and A. Prokudin, *Coulomb interference in high-energy pp scattering*, *Eur. Phys. J. C* 28 (2003) 525;
- [10] M.M. Block, E.M. Gregores, F. Halzen and G. Panzeri, *Photon proton and photon photon scattering from nucleon nucleon forward amplitudes*, *Phys. Rev. D* 60 (1999) 054024.
- [11] V. N. Gribov, *Possible Asymptotic Behavior Of Elastic Scattering*, *JETP Lett.* 41:667-669,1961