

VU Research Portal

Flavor and evolution effects in TMD phenomenology

Signori, A.

2016

document version

Publisher's PDF, also known as Version of record

[Link to publication in VU Research Portal](#)

citation for published version (APA)

Signori, A. (2016). *Flavor and evolution effects in TMD phenomenology: Manifestation of hadron structure in high-energy scattering processes*. [PhD-Thesis – Research external, graduation internal, Vrije Universiteit Amsterdam].

General rights

Copyright and moral rights for the publications made accessible in the public portal are retained by the authors and/or other copyright owners and it is a condition of accessing publications that users recognise and abide by the legal requirements associated with these rights.

- Users may download and print one copy of any publication from the public portal for the purpose of private study or research.
- You may not further distribute the material or use it for any profit-making activity or commercial gain
- You may freely distribute the URL identifying the publication in the public portal

Take down policy

If you believe that this document breaches copyright please contact us providing details, and we will remove access to the work immediately and investigate your claim.

E-mail address:

vuresearchportal.ub@vu.nl

Een prachtig landschap

Protonen en neutronen zijn bouwstenen van materie en verantwoordelijk voor bijna alle massa in onze wereld. Ondanks vele inspanningen om onze kennis over deze deeltjes te vergroten, is een volledig begrip van hun interne structuur nog ver weg. Vrij recentelijk worden er dankzij een synergie van theoretisch en experimenteel onderzoek pogingen gedaan om een multidimensionaal beeld van de interne structuur van het proton te krijgen en het dynamische gedrag van de fundamentele quarks en gluonen (collectief partonen genoemd) te bestuderen. De interne structuur van het proton wordt theoretisch beschreven met de kwantumchromodynamica (QCD), een fascinerend terrein in de natuurkunde met nog veel onbekende stukken. Ondanks dat de wereld van QCD niet direct met onze ogen waarneembaar is, kunnen we haar schoonheid waarderen gebruikmakend van deeltjesversnellers, de krachtigste microscopen ter wereld. De procedure die in H. 5 van dit proefschrift wordt beschreven, kan in essentie worden opgevat als het nemen van een foto van het proton in impulsruimte. De energie-overdracht bij een dergelijke lichtflits is dermate hoog dat het proton uiteenvalt. De brokstukken kunnen vervolgens worden gebruikt om de protonstructuur te reconstrueren.

Confinement

Wanneer we foto's maken met een extreem hoge resolutie, lijken de bouwstenen van het proton zich nagenoeg als vrije deeltjes te gedragen. Als we daarentegen naar het proton kijken met lagere resoluties, dan blijken de quarks en gluonen opgesloten te zitten in het proton als gevolg van de sterke kernkracht in QCD. Dit wordt *confinement* genoemd. Vandaag de dag bestaat er nog geen volledige wis-

kundige beschrijving voor de overgang naar confinement. Het is een van de meest kenmerkende eigenschappen van QCD en tevens een openstaand natuurkunde-problemen. Een wiskundige beschrijving van confinement in QCD is daarom ook niet voor niets een van de Millenium Prize Problems van het Clay Mathematics Institute. Ons beperkte begrip van confinement heeft als gevolg dat de protonstructuur (of de structuur van hadronen meer in het algemeen) niet berekend kan worden met de QCD theorie. Een andere optie, echter, is het maken van “subatomaire foto’s” van het proton gebruikmakende van de uitwisseling van fotonen waarmee experimentatoren gemakkelijk kunnen werken.

Multidimensionale afbeeldingen van het proton

De studie van de interne structuur van het proton is een van de “hot topics” in de deeltjesfysica. Het is een aanvulling op de zoektochten naar nieuwe fysica in de Large Hadron Collider (LHC) en zeker niet minder belangrijk. Het draagt niet alleen bij aan onze kennis en ons begrip van de wereld om ons heen, maar het zal ook invloed hebben op openstaande vragen in de deeltjesfysica zoals het ontrafelen van de verschillende bijdragen aan de spin van het proton [13, 77, 317].

Kennis van de multidimensionale protonstructuur maakt de analyse mogelijk van eigenschappen die anders ontoegankelijk zouden zijn. Een goede analogie is het volgende voorbeeld: electrocardiografie geeft eendimensionale informatie over de hartactiviteit, maar geeft geen gedetailleerde informatie over de multidimensionale interne structuur van het hart. Meer verfijnde tomografie opent deuren naar die multidimensionale structuur en levert nieuwe fundamentele informatie op.

Wat betreft protontomografie beschikken we over goede kennis van eendimensionale afbeeldingen in impulsruimte (zie Fig. 1.2 en H. 4), de collineaire partondistributiefuncties (PDFs). Hoewel deze functies zeer nuttig zijn voor het bestuderen van processen waar hadronen bij betrokken zijn (zoals de proton-proton botsingen die plaatsvinden in de LHC), zijn ze beperkt in gebruik vanuit het oogpunt van nucleontomografie, omdat ze de verdeling van partonen beschrijven in één enkele dimensie in impulsruimte vanwege de aanname dat de partonen collineair bewegen, parallel aan de impuls van het proton. Meer informatief zijn de zogenaamde transversale-impulsafhankelijke distributies (TMDs), driedimensionale afbeeldingen in impulsruimte (zie H. 2).

De coördinaten die worden gebruikt om deze afbeeldingen te parametriseren zijn de impulscomponenten (deze worden gebruikelijk opgesplitst in collineair en transversaal) van de partonen, maar ook de energie van het overgedragen foton waarmee een foto van het proton is gemaakt. De energie-afhankelijkheid van de distributies kan nagenoeg volledig worden berekend met behulp van de QCD evolutievergelijkingen (zie H. 3), waardoor we bijvoorbeeld de afbeeldingen van het proton verkregen met de Hadron-Electron Ring Accelerator (HERA) bij DESY ook kunnen gebruiken voor LHC experimenten bij CERN. Voorzichtigheid is echter ge-

boden betreffende de afhankelijkheid van transversale impuls. Dit geeft aanleiding tot een berekenbare procesafhankelijkheid van de distributies [24].

Open vragen

In eerste benadering zijn er acht verschillende types van driedimensionale afbeeldingen van quarks en gluonen in impulsruimte (zie H. 2). Dit volgt uit de mogelijke correlaties tussen impulsen en spins van de partonen. Vanuit een theoretisch oogpunt weten we hoe we dit soort afbeeldingen kunnen definiëren door middel van operatoren in QCD. Niettemin zijn er nog steeds veel belangrijke vragen met betrekking tot TMDs waarbij een volledig antwoord ontbreekt, bijvoorbeeld: “Hoe ziet de afhankelijkheid van de transversale impuls er nou precies uit?”.

Deze vraag staat centraal in dit proefschrift en wel in het bijzonder voor het geval van de simpelste driedimensionale afbeelding voor quarks, de ongepolariseerde distributie. Experimentele data afkomstig van proton-proton en lepton-proton botsingen lijkt de wijzen op een Gauss-achtige afhankelijkheid voor kleine transversale impulsen. Het ontbreekt ons echter nog aan informatie over de precieze afhankelijkheid van de quarksmaken (zie Fig. G.1). Bewegen de up-quarks bijvoorbeeld sneller in het nucleon dan de down-quarks, of juist andersom? En hoe zit het met de ‘zee’-quarks behorend bij de zee van quark-antiquark paren? Bewegen deze sneller dan de anderen? De laatste vraag wordt besproken in H. 5. Uit analyses van lepton-proton en lepton-deuteron data volgt dat zee-quarks waarschijnlijk sneller bewegen dan up-quarks, welke weer sneller bewegen dan down-quarks. Dit resultaat is tevens interessant voor de beschrijving van andere reacties waarbij hadronen een rol spelen, zoals bij elektron-positron annihilatie waarbij pionen en kaonen gemaakt worden (zie H. 6), alsook bij proton-proton botsingen in de LHC (zie H. 7). In beide gevallen zijn er nieuwe effecten waargenomen.

In H. 8 onderzoeken we de wisselwerking tussen twee driedimensionale distributies, namelijk die voor ongepolariseerde en lineair gepolariseerde gluonen in ongepolariseerde protonen. Voor beide distributies bestuderen we hun precieze definities en de invloed van evolutievergelijkingen, waarbij we een proces selecteren om hun eigenschappen beter te kunnen onderzoeken.

Invloed en vooruitzichten

De interpretatie van de enorme hoeveelheid data afkomstig van hadronversnellers zoals de LHC hangt over het algemeen af van onze kennis van partondistributiefuncties, zowel in één dimensie (de PDFs) als in drie dimensies (de TMDs). Tot nu toe is er voor de data-analyse van hoogenergetische processen aangenomen dat alle quarks bewegen met dezelfde gemiddelde transversale impuls. Nu we weten dat meer algemene, quarksmaakafhankelijke scenario’s ook mogelijk zijn, is het belangrijk om de impact hiervan te testen, zoals wordt beschreven in H. 6 en 7. Het

verfijnen van onze kennis van de protonstructuur zal ook de nauwkeurigheid van het zoeken naar nieuwe fysica in hadronversnellers vergroten.

Goede kennis van de ongepolariseerde TMDs voor quarks en gluonen is belangrijk om de andere gepolariseerde distributies nauwkeurig te kunnen bestuderen, vanwege hun invloed op het fenomenologische onderzoek. De mogelijkheid om het baanimpulsmoment van partonen te meten, maakt de hadrontomografie in impulsruimte een waardevol startpunt om de spinopbouw van het proton beter te begrijpen.

Nieuwe experimentele programma's zoals in Europa het 'A Fixed Target Experiment' in de LHC (AFTER@LHC) en in de Verenigde Staten de Electron-Ion Collider (EIC) zullen ons in staat stellen om nog krachtigere en preciezere foto's te maken van de interne structuur van het proton. Voor fysici werkzaam op het gebied van de hadronfysica worden het spannende tijden.

Voor meer inleidende informatie over de openstaande problemen in de hadronfysica, zie bijvoorbeeld [13,318], "The proton in 3D" (A. Bacchetta, M. Contalbrigo) en "Femtostrutture: e pluribus unum" (A. Bacchetta, A. Signori; alleen in het Italiaans). Bijdrages aan outreachprogramma's over deeltjesfysica zijn beschikbaar op Quantum Diaries, het blog van de Interactions collaboratie.