

# Summary

In May 1992, the HERA collider produced its first collisions between electrons and protons, at a center-of-mass energy of 295 GeV. The ZEUS experiment, one of the two main detectors at HERA, recorded  $24.7 \text{ nb}^{-1}$  of data in the fall of 1992. The analysis of this data, leading to an initial determination of the proton structure function  $F_2$  in the kinematic domain accessible at HERA, is the main subject of this thesis.

In the first chapter, a short review of inclusive deep-inelastic-scattering (DIS) is given. The DIS process is described by two Lorentz-invariant variables, commonly taken to be  $x$  (the momentum fraction of the struck parton) and  $Q^2$  (the virtuality of the intermediate vector boson). HERA explores DIS for large values of  $Q^2$  and low values of  $x$ . The DIS cross section is parametrized in terms of structure functions, which in turn can be expressed in terms of parton densities. The  $Q^2$  evolution of the parton densities, predicted by QCD, is summarized, and several QCD inspired parametrizations of the structure functions in the HERA kinematic domain are discussed. We also briefly present the status of pre-HERA fixed target DIS experiments.

The second chapter offers a description of the HERA accelerator complex, the luminosity measurement and the ZEUS detector. One of the components of the ZEUS detector that is mainly used in this analysis, the calorimeter, is discussed in more detail.

Chapter three treats the reconstruction of  $x$  and  $Q^2$  from measured quantities. Whereas in fixed target experiments only the final state lepton can be used to reconstruct  $x$  and  $Q^2$ , the almost completely hermetic ZEUS detector observes the hadronic final state as well. Particularly useful is the introduction of an energy and an angle that describe the complete hadron flow in an exact and model independent way. This introduces redundancy in the determination of  $x$  and  $Q^2$ , which is utilized to develop several  $(x, Q^2)$  reconstruction methods. As it turns out, especially the ‘double angle’ method, which uses only the angles of the final state electron and hadron flow, reconstructs  $x$  and  $Q^2$  accurately and is in addition insensitive to energy fluctuations in first order.

Chapter four describes the selection of the DIS data sample. During fall 1992, approximately  $4.2 \cdot 10^6$  triggers were recorded and written to tape. A number of requirements is developed that effectively reject the non-DIS background events;

the electron- and proton-gas events, cosmic muons and photo-production. The main ingredients in the rejection of the background events are the arrival times of the events, conservation of four-momentum and electron identification. Also the events for which the kinematic variables can not be reconstructed reliably are rejected. This is mainly achieved by a fiducial cut on the impact position of the final state electron, and a requirement on the minimally visible hadron energy. Only approximately 2000 events pass all selection requirements. A small fraction of photo-production background events still contaminates this final sample.

Chapter five investigates various distributions of the DIS sample in comparison with the Monte Carlo predictions. The Monte Carlo distributions are given for extreme choices of the proton structure function parametrizations. The data sample shows the main characteristics of DIS, but the electron energy of the data was somewhat degraded and broadened as compared to the simulation. This effect is visible for the hadron energy as well, and it is believed to originate from an incorrect simulation of the dead material in front of the calorimeter. On the other hand, the distributions for the electron and hadron angles are well described by the Monte Carlo. Therefore the ‘double angle’ reconstruction method is expected to have the smallest systematic uncertainty, and it is used as the nominal method to determine the kinematic variables.

In chapter six, we determine from the  $x$  and  $Q^2$  distributions the proton structure function  $F_2$ . A correction is made for the effect of the longitudinal structure function  $F_L$ . The detector acceptance and smearing is investigated in bins  $x_i + \Delta x_i$  and  $Q_i^2 + \Delta Q_i^2$ . In each bin the remaining photoproduction background events, the most difficult type of background to recognize, is estimated and rejected on a statistical basis. The systematic uncertainty on the measured  $F_2$  is investigated by repeating the analysis with different selection criteria and reconstruction methods. The final result for the first  $F_2$  measurement with  $24.7 \text{ nb}^{-1}$  of data, is listed in table 6.7. The table contains 17  $F_2$  data points in the kinematic area  $0.0001 < x < 0.1$  and  $10 < Q^2 < 1000 \text{ GeV}^2$ .

The measured  $F_2$  as a function of  $x$  is rising rapidly towards low values of  $x$ . In chapter seven we compare our results with the result of H1, the experiment at the opposite side of the HERA complex. To appreciate the newly obtained measurement of  $F_2$  in more detail, we developed a QCD analysis, which governs the evolution in  $Q^2$  according to the Altarelli-Parisi equations in first order. This analysis indicates that the gluon content of the proton is large at small values of  $x$ , and behaves singularly (we find that for  $x \rightarrow 0$ , the gluon behaves as  $xG \rightarrow x^\delta$  with  $-0.5 < \delta < -0.3$ ). Although the Altarelli-Parisi equations describe the new data satisfactorily, the dense gluon distribution may yield interesting new physics, observable with high statistic HERA data, available in the near future.

# Samenvatting

De HERA deeltjesversneller in Hamburg, die in mei 1992 is gestart, produceert botsingen tussen elektronen en protonen bij ongeëvenaard hoge energie. Analyse van deze botsingen heeft aangetoond dat de dichtheid van extreem laag energetische ‘partonen’ in het proton opmerkelijk groot is. Deze conclusie kan worden getrokken na meting van de proton structuurfunctie  $F_2$ , in het kinematisch gebied dat bereikbaar is voor de HERA versneller. Het hoofdthema van dit proefschrift is de analyse van de in 1992 door de ZEUS detector geobserveerde elektron-proton botsingen, die heeft geleid tot een bepaling van de proton structuurfunctie  $F_2$ . Deze samenvatting geeft een korte toelichting op dit onderzoek.

De elementaire-deeltjesfysica bestudeert de bouwstenen van de natuur en hun onderlinge wisselwerking op het meest elementaire niveau. Binnen het huidige paradigma, dat uit deze eeuw stamt, geeft de experimentele deeltjesfysica een beschrijving van de bouwstenen van de natuur op een grootte van ongeveer  $10^{-15}$  cm. De quantummechanische modellen beschrijven, op zeer succesvolle wijze, verschillende typen elementaire deeltjes: zowel de elementaire deeltjes waaruit materie is opgebouwd als de zogenaamde krachtdeeltjes, die verantwoordelijk zijn voor de onderlinge wisselwerkingen.

De ‘sterke wisselwerking’, een van de vier basiskrachten in de natuur, is verantwoordelijk voor de stabiliteit van atoomkernen en de deeltjes waaruit deze bestaan, protonen en neutronen. De sterke wisselwerking wordt beschreven door de Quantum-Chromo-Dynamica (QCD), een model dat de interacties tussen de verschillende typen elementaire quarks beschrijft via uitwisseling van gluonen, de krachtdeeltjes. Van alle deeltjes die gevoelig zijn voor de sterke kernkracht en dus bestaan uit elementaire quarks en gluonen, is het proton de meest stabiele configuratie in de natuur. Het proton bestaat in eerste instantie uit drie quarks, twee van het type *up* (met elektrische lading  $\frac{2}{3}$ ) en één van het type *down* (met elektrische lading  $-\frac{1}{3}$ ), die bijeen gehouden worden door een aantal (elektrisch neutrale) gluonen.

De dynamische eigenschappen van QCD, gebaseerd op de quantumveldentheorie, maakt het proton echter veel complexer. QCD maakt het mogelijk dat een gluon splitst in twee quarks of gluonen met lagere energie; dat een quark een gluon met lagere energie afstraalt, of dat twee gluonen zich samenvoegen. Deze verschillende processen leiden tot een groot aantal ‘partonen’ (d.w.z. quarks en gluonen) in het

proton. Door deze complexe situatie, en de aard van de sterke wisselwerkingen, kan de dichtheid van partonen in het proton tot op heden niet afgeleid worden uit het QCD model. Metingen van de dichtheid van partonen levert waardevolle informatie voor een beter begrip van het proton en van QCD.

*Hoofdstuk 1 geeft het theoretisch kader, waarbinnen de metingen worden geplaatst.*

In 1992 vonden de eerste botsingen tussen elektronen en protonen plaats met de HERA versneller. Deze 'diep-inelastische verstrooiingen' zijn eigenlijk botsingen tussen elektronen en partonen in het proton. Bij zo'n interactie raakt het elementaire elektron een quark in het proton en breekt daarmee het proton in stukken. Het elektron en het geraakte quark veranderen van richting en worden geobserveerd met de ZEUS detector.

Er zijn twee grootheden waarmee de botsingskans van een (inclusieve) elektron-proton botsing beschreven worden. De eerste grootheid,  $Q^2$ , geeft het oplossend vermogen van de interactie aan. Grote waarden van  $Q^2$  betekent een groot oplossend vermogen. Met de HERA versneller kunnen structuren die ongeveer 1000 maal kleiner zijn dan het proton worden geobserveerd. Het is a priori niet vastgelegd met welke waarde van  $Q^2$  de interactie plaatsvindt en dus moet  $Q^2$  voor elke botsing worden bepaald.

De tweede kinematische grootheid bepaalt welke energie het geraakte quark in het proton had, voordat de botsing plaatsvond. Het is duidelijk dat de energie van het geraakte quark nooit groter kan zijn dan de energie van het proton als geheel. Het is gebruikelijk om de hoeveelheid energie van het geraakte quark te bepalen in verhouding tot de energie van het proton. Deze verhouding heet kortweg  $x$ , en ligt tussen 0 en 1. Een botsing met een lage waarde van  $x$  betekent dat er een botsing plaatsvond met een laag energetisch parton in het proton. Bij HERA kunnen botsingen gemeten worden met partonen die maar een fractie  $x = 10^{-4}$  van de proton energie dragen.

Door vele botsingen te observeren wordt uiteindelijk de waarschijnlijkheidsverdeling van de botsingen als functie van  $x$  en  $Q^2$  gemeten. De botsingskans wordt bepaald door het effect van de (bekend veronderstelde) elektro-zwakke wisselwerkingen en door het effect van de interne structuur van het proton zelf. Deze laatste, onbekende bijdrage wordt beschreven met de *proton structuurfuncties*. Juist de protonstructuur functie  $F_2$  geeft informatie over de dichtheid van de partonen in het proton.

*Hoofdstuk 2 geeft een beschrijving van de HERA versneller en de ZEUS detector.* De HERA machine biedt unieke mogelijkheden voor de bestudering van elektron-proton botsingen. Het apparaat versnelt pakketjes met elektronen en protonen in bundels, die in tegenovergestelde richting rondgaan in een ring van 6.3 km omtrek. De elektronen worden versneld tot een energie die gelijk is aan ongeveer  $5 \cdot 10^4$  maal hun rustmassa, en de protonen tot een energie van ongeveer 870 maal hun rustmassa. Op één van de punten waar deze pakketjes elkaar kruisen, elke 96 nanoseconde, staat de ZEUS detector opgesteld. Dit is een uiterst complex laboratorium waarin de tijdens de botsing geproduceerde deeltjes geobserveerd kunnen worden. De ZEUS detector

bestaat uit een aantal sub-detectoren, die ieder een specifieke bijdrage leveren aan de meting van de totale botsing. De belangrijkste sub-detector is de calorimeter, die het mogelijk maakt zowel de richting als de energie van het uitgaande elektron en het stukgeslagen proton te bepalen. Met sporenkamers, waarin de banen die de deeltjes volgen in beeld gebracht worden, kan de precieze locatie van de botsing gemeten worden.

*Hoofdstuk 3 behandelt de wijze waarop  $x$  en  $Q^2$  bepaald worden.* Zoals opgemerkt speelt een nauwkeurige bepaling van  $x$  en  $Q^2$  voor iedere botsing een cruciale rol. Voorgaande diep-inelastische verstrooiingsexperimenten boden alleen de mogelijkheid om via de gemeten energie en de hoek van het uitgaande lepton (het elektron) de kinematica te reconstrueren. Met de ZEUS detector bij HERA, kan ook informatie van het stukgeslagen proton worden gebruikt. Een belangrijk resultaat van dit proefschrift is het definiëren van een enkele hoek en energie waarmee het stukgeslagen proton exact kan worden beschreven, onafhankelijk van het specifieke model van het proton. De informatie van het uitgaande elektron en van het stukgeslagen proton kan ook gecombineerd worden, zodat  $x$  en  $Q^2$  op meerdere manieren bepaald kunnen worden. Eén van de nauwkeurigste reconstructiemethoden maakt alleen gebruik van de hoeken van het elektron en het stukgeslagen proton. Deze zogenoemde ‘dubbele-hoekformule’ is in dit proefschrift ontwikkeld. Een belangrijke eigenschap van deze reconstructiemethode is het feit dat deze vrijwel onafhankelijk van de gemeten energie is.

*In hoofdstuk 4 worden de elektron-proton botsingen geselecteerd.* De eerste botsingen in de HERA verneller vonden plaats in mei 1992. Na een korte onderbreking volgde later dat jaar een serie gegevens, waarbij ongeveer 2000 goed meetbare elektron-proton botsingen werden verzameld. Het aantal gemeten signalen in de detector was echter vele malen groter, en bestond voornamelijk uit botsingen van protonen en elektronen met rest-gas in de bundelpijp, uit kosmische muonen, uit botsingen waarbij het elektron niet hard genoeg botste om uit de bundelpijp te komen en uit slecht meetbare elektron-proton verstrooiingen. De grote uitdaging was om al deze ‘achtergrond botsingen’ uit te filteren en een verzameling zuivere elektron-proton botsingen over te houden. Daartoe zijn een aantal selectiecriteria ontwikkeld. Deze selectie verloopt in een aantal stappen. De ‘on-line’ trigger maakt een ruwe selectie en accepteerde in het najaar van 1992  $4.2 \cdot 10^6$  mogelijke botsingen. Dit hoofdstuk gaat gedetailleerd in op de ‘off-line’ selectie, die het aantal goed meetbare elektron-proton botsingen uiteindelijk bracht op ongeveer 2000.

*In hoofdstuk 5 worden de karakteristieken van de verzameling goed meetbare elektron-proton botsingen vergeleken met de voorspellingen van computersimulaties.* Deze computerprogramma’s zijn gebaseerd op Monte Carlo technieken die een zo realistisch mogelijke simulatie van de botsingen en van de effecten van de detector geven. Enerzijds bevestigen deze vergelijkingen dat de verzameling van 2000 gebeurtenissen inderdaad elektron-proton botsingen zijn. Anderzijds kunnen verschillen tussen de computersimulatie en de gemeten gebeurtenissen het gevolg zijn van fysica. Zo

kunnen verschillen tussen de gesimuleerde en de waargenomen botsingen duiden op structuurfuncties die in werkelijkheid anders zijn dan in het gehanteerde model. Omdat echter het uitgaande elektron en het stukgelagen proton dezelfde informatie over de kinematica van iedere gebeurtenis dragen, kunnen ook grootheden gedefinieerd worden die onafhankelijk van de structuurfunctie zijn. Hierdoor kan, onafhankelijk van het model, onderzocht worden of de simulatie overeenstemt met de gemeten gegevens. Nu blijkt dat, met behulp van onder andere de ‘dubbele-hoekformule’, de bepaling van de energie met de ZEUS calorimeter vooralsnog problematisch is. Dit probleem is zeer waarschijnlijk het gevolg van een niet geheel juiste simulatie van het materiaal waar de deeltjes doorheen gaan voordat zij in de calorimeter inslaan. Omdat de ‘dubbele-hoekformule’ onafhankelijk van energiemetingen is, staat dit probleem een betrouwbare reconstructie van de kinematische variabelen geenszins in de weg.

*In hoofdstuk 6 wordt uit de gemeten botsingskans de structuurfunctie bepaald.* Hoewel de ‘dubbele-hoekformule’ de kinematica betrouwbaar reconstrueert, is deze door de effecten van de detector niet perfect en moeten de gemeten botsingskansen gecorrigeerd worden, net als de effecten van de verschillende selectiemethoden. Deze correcties worden gemaakt met behulp van de computersimulaties. De invloed van de (bekend veronderstelde) elektro-zwakke wisselwerkingen op de botsingskansen zijn niet van belang voor de beschrijving van het proton. Om de proton structuurfunctie  $F_2$  te bepalen, worden deze invloeden op de gemeten botsingskansen ‘uitgeschakeld’. Ook kleine effecten, die het gevolg zijn van ‘longitudinale fotonen’, worden gecorrigeerd.

Door de hele analyseketen vele malen te herhalen met steeds kleine wijzigingen in de selectiefilters, de Monte Carlo simulatie en de reconstructie methoden, wordt de systematische fout in de gevonden meetpunten bepaald. In tabel 6.7 is de uiteindelijk gemeten  $F_2$  gegeven.

*In hoofdstuk 7 wordt de dichtheid van partonen in het proton bepaald.* De meting van proton structuurfunctie  $F_2$  geeft nieuwe informatie over de structuur van het proton. Het blijkt dat  $F_2$  stijgt als de waarde voor  $x$  kleiner wordt. Om dit resultaat volledig te kunnen beoordelen, wordt de evolutie van  $F_2$ , als functie van  $Q^2$ , vergeleken met QCD via de Altarelli-Parisi vergelijkingen. Daaruit blijkt dat QCD de nieuwe resultaten uitstekend beschrijft en dat de stijging van  $F_2$  vrijwel volledig verklaard wordt door een grote dichtheid van gluonen in het proton bij lage waarden van  $x$ . Deze grote gluondichtheid maakt het proton een uiterst complex systeem, waarin met behulp van toekomstige ZEUS gegevens ongetwijfeld veel meer inzicht verkregen zal worden. Door de grote gluondichtheid is het zeer wel mogelijk dat de tot dusver gehanteerde Altarelli-Parisi vergelijkingen herzien gaan worden. De analyse in dit proefschrift toont in eerste instantie aan dat met de HERA versneller en de ZEUS detector de inwendige structuur van het proton uitstekend meetbaar is, dat nieuwe resultaten gevonden zijn en dat intrigerende resultaten in het verschiet liggen.

*Beggar that I am,  
I am even poor in thanks.*  
- W. Shakespeare, Hamlet

## Acknowledgements

With great pleasure I have worked at NIKHEF in Amsterdam and at DESY in Hamburg, where I spent a year of my research. In both places I met many people whose enthusiasm for experimental physics was very inspiring. During the four years I became acquainted with excellent researchers who taught me the tricks of the trade. With all of them I spent many exciting days and nights working on the ZEUS experiment, or sharing relaxed moments over a couple of beers.

I am much obliged to all members of the ZEUS collaboration who made it possible to accomplish the analysis. I am also very thankful to the administrative and technical staff of NIKHEF who contributed considerably to the facilities and support available in Amsterdam. I cannot mention all the names but my gratitude is not less sincere.

I would like to thank my promotor, Jos Engelen. Not only did he teach me many aspects of experimental physics, did he introduce me to the community of high energy physics and did he stimulate me at the right moments, but he also allowed me a free hand in the exploration of the matters we were dealing with. The numerous and inspiring discussions with my co-promotor Paul Kooijman were essential and very fruitful. They generated many ideas that are expressed in this thesis and in the structure function analysis at ZEUS. Our minds complemented each other in a remarkable manner, much like our physical appearances.

The stirring meetings, guided by Malcolm Derrick and Allan Caldwell, guarantee a life-time remembrance of my days at DESY. Besides them, also Stefan Schlenstedt, who showed me the way in the complex software chain and in Berlin, Halina Abramowicz, Jim Whitmore, Nikolaj Pavel, Matthias Kasemann, José Repond and Lothar Bauerdick were of great help and importance. In this context I would also like to mention Frank Chlebana, Hubert Spiesberger and Robin Devenish. The latter I also thank for critically reading the manuscript.

I especially want to thank Andrej Dake with whom I shared many difficulties we encountered in our mutual research, which resulted in a mutual friendship. I owe him much for his lucid remarks and for the badminton games. When I arrived at NIKHEF he formed, together with staff members Henk Tiecke and Armin Tenner and the PhD students Sijbrand de Jong, Jan Straver, Henk Uijterwaal, Hermen van der Lugt and Paul de Jong a team that quickly admitted me to their discussions. I also want to mention the constructive criticism of Roel van Woudenberg, Marcel

Vreeswijk and Marc de Kamps.

Life is more than experimental physics. It was a wonderful and promising experience to be able to rely at all times on my friends and family. I especially remember the warm and teasing company of Saskia Jansens.