

Samenvatting

Het belangrijkste deel van de sterke wisselwerking, die de kerndeeltjes – ook wel *nucleonen* genoemd – in de kern bij elkaar houdt, wordt gevormd door de kracht tussen twee individuele deeltjes. Deze nucleon-nucleon-wisselwerking (NN -wisselwerking) toont een karakteristiek gedrag: wanneer de afstand tussen de twee nucleonen groter is dan ongeveer 1 femtometer, is de kracht aantrekkend, terwijl deze op korte onderlinge afstand juist sterk afstotend is. Het gebruik van een dergelijke realistische NN -interactie in de berekening van kern-eigenschappen introduceert correlaties in de golffunctie van de kern.

Het gedrag van de NN -wisselwerking kan worden beschreven door middel van theoretische modellen met zeer diverse ingrediënten. Deze modellen worden getoetst aan experimentele resultaten op het gebied van vrije nucleon-nucleon-verstrooiing en aan de gemeten eigenschappen van het deutron. Sinds kort zijn verscheidene theoretische modellen beschikbaar die deze gegevens beschrijven met een χ^2 per punt van ongeveer één. Deze modellen blijken echter verschillende voorspellingen te doen omtrent de kenmerken van drie-deeltjes-systemen, zowel ten aanzien van de eigenschappen van de begintoestand als ook omtrent de waarschijnlijkheden voor reacties, waarbij het drie-deeltjes-systeem in de eindtoestand niet meer intact is.

De ${}^3\text{He}(e, e'pp)$ reactie is zowel geschikt om onderzoek te doen naar het mechanisme van de twee-proton uitstootreactie als om berekeningen te toetsen, die gebaseerd zijn op helium-3 golffuncties, berekend met verschillende potentiaalmodellen. Op basis van berekeningen, uitgevoerd met een numeriek exact model van de ${}^3\text{He}(e, e'pp)$ werkzame doorsnede, zijn gebieden in de fase-ruimte aan te wijzen, waar de werkzame doorsnede vooral bepaald wordt door uitstoot van nucleonparen middels koppeling van een virtueel foton aan één nucleon. Dit wordt wel aangeduid met de benaming ‘één-deeltjes stroom’. Bovendien kan uit deze berekeningen worden afgeleid dat het foton zich vooral koppelt aan het proton dat in voorwaartse richting wordt uitgezonden. In de eindtoestand maakt dit proton dan de kleinste hoek met de overgedragen drie-impuls. Hieruit volgt

dat, in die gebieden waarin aan beide criteria is voldaan, de bepaling van de werkzame doorsnede van de ${}^3\text{He}(e, e'pp)$ reactie de mogelijkheid opent om de golffunctie van het gebonden ${}^3\text{He}$ -systeem te bestuderen.

Er dient wel te worden opgemerkt, dat het mechanisme zoals boven beschreven niet als enige verantwoordelijk is voor de gemeten werkzame doorsnede. Koppeling van het virtuele foton aan mesonen (aangeduid met de uit het Engels afkomstige afkorting MEC, oftewel *meson-exchange currents*) en het aanslaan van de Δ -resonantie zullen ook aan de werkzame doorsnede bijdragen, hoewel hun belang in het geval van directe twee-proton-uitstoot beperkt is. Hun bijdrage neemt echter belangrijk toe als naar die gebieden wordt gekeken waarin het neutron een hoge impuls heeft. Door de overgedragen impuls en vooral de overgedragen energie van het virtuele foton te variëren, kan in een experiment het relatieve belang van beide bijdragen worden vastgesteld.

Op grond van bovenstaande argumenten volgt dat de ${}^3\text{He}(e, e'pp)$ reactie bij uitstek geschikt is om onderzoek te doen naar NN -correlaties en stromen. In deze studie wordt een dergelijk experiment beschreven en worden de resultaten vergeleken met een theoretisch model op basis van de Faddeev-vergelijkingen. Binnen dit model zijn berekeningen uitgevoerd met verschillende modellen van de NN -wisselwerking.

Voor de uitvoering van dit experiment is gebruik gemaakt van de bijna continue elektronenbundel die geleverd wordt door AmPS, de 'Amsterdam Pulse Stretcher'. De energie van de inkomende elektronen was 564 MeV en de gemiddelde stroom lag tussen de 0,5 en 1,5 μA . Het gasvormige ${}^3\text{He}$ had een dikte van 270 mg/cm^2 en bevond zich in een cryogene hogedruk-cel. De verstrooide elektronen werden waargenomen in de QDQ magnetische spectrometer, terwijl de twee uitgestoten protonen gedetecteerd werden in HADRON detectoren. Laatstgenoemde detectoren zijn in hoge mate gesegmenteerd en dekken een grote ruimtehoek af. De werkzame doorsnede is gemeten voor drie waarden van de impuls-overdracht q , namelijk 305, 375 en 445 MeV/c . De energie overdracht ω door het virtuele foton was bij al deze metingen 220 MeV. Daarnaast werd bij $q=375$ MeV/c een reeks metingen uitgevoerd binnen een ω -bereik van 170 tot 290 MeV.

De gegevens zijn vergeleken met voorspellingen van het 'continuum-Faddeev'-model van Golak *et al.* In dit model wordt het effect van herverstrooiing van de

uitgaande nucleonen volledig meegenomen. Als stroom-operator kan voor een één-deeltjes stroom worden gekozen, maar daarnaast kan ook de bijdrage ten gevolge van de uitwisseling van π - en ρ -mesonen worden meegenomen. Aangezien nog geen Lorentz-covariante-beschrijving mogelijk is voor de werkzame doorsnede, zijn de berekeningen, om hun interne consistentie niet te verstoren, geheel niet-relativistisch uitgevoerd. Wel zijn verschillende modellen voor de NN -wisselwerking gebruikt: er zijn berekeningen gedaan met de Bonn-B, CD ('ladingafhankelijk') Bonn, Nijmegen-93 en met de Argonne v_{18} interactie-modellen.

De gemeten ${}^3\text{He}(e, e'pp)$ werkzame doorsnede laat een sterke correlatie zien tussen de hoeken van beide uitgezonden protonen. De grotere uitstootwaarschijnlijkheid komt overeen met de emissie van twee protonen onder een hoek van 180° in hun massa-middelpunts systeem, waarbij het (ongedetecteerde) neutron met een lage impuls achterblijft. Dit vormt een aanwijzing voor 'directe' twee-proton uitstoot. De breedte van de gemeten verdeling is een gevolg van de impulsverdeling van het neutron. Weergave van de gemeten werkzame doorsnedes als functie van deze neutron-impuls p_m laat zien, dat de werkzame doorsnede exponentieel afvalt als functie van p_m .

In het neutronimpuls gebied onder de $100 \text{ MeV}/c$ en voor een energie overdracht ruim onder het Δ -resonantiegebied, wordt de werkzame doorsnede voor het ${}^3\text{He}(e, e'pp)$ -proces waarschijnlijk gedomineerd door directe uitstoot van gecorreleerde protonparen. In dit gebied is namelijk de bijdrage van MEC's en Δ -excitatie onderdrukt. Berekeningen, uitgevoerd met uitsluitend één-deeltjesstromen, geven een redelijk goede beschrijving van de gemeten werkzame doorsnede voor het p_m gebied onder $100 \text{ MeV}/c$ bij $\omega=220 \text{ MeV}$ en $q=305 \text{ MeV}/c$. Bovendien laten metingen bij $q=375 \text{ MeV}/c$ een soortgelijke overeenkomst tussen meetresultaten en berekening zien. Daarbij kan nog worden opgemerkt dat berekeningen, waarin de bijdrage van MEC's is meegenomen, in dit p_m -gebied slechts een beperkte toename van de werkzame doorsnede te zien geven. Derhalve kan worden geconcludeerd dat, bij $\omega=220 \text{ MeV}$ en $p_m \lesssim 100 \text{ MeV}/c$, de werkzame doorsnede door directe uitstoot van twee protonen middels een één-deeltjesstroom wordt gedomineerd. Bij hogere waarden van de neutronimpuls, in het gebied van 120 tot $320 \text{ MeV}/c$, verschillen de metingen en één-deeltjesberekeningen ongeveer een factor vijf. Bijdrage van MEC's verhogen de berekende sterkte in dit gebied met ten hoogste 35% .

De invloed van tussentijdse Δ -excitatie hangt af van de invariante massa van het systeem van de twee nucleonen en het foton. Om deze invloed te onderzoeken zijn metingen uitgevoerd voor waarden van de energie overdracht van 170 tot 290 MeV. Dit komt overeen met een bereik van 2055 tot 2120 MeV/c² in invariante massa $W_{p_1 p_2'}$, wanneer p_m onder de 100 MeV/c blijft. De gemeten werkzame doorsnede neemt binnen dit interval met 50% toe, waarschijnlijk als gevolg van het toegenomen belang van Δ -excitatie bij hogere energie overdracht. Theoretische voorspellingen waarin bijdragen van MEC en Δ -excitatie worden meegenomen, onderschatten de gemeten sterkte bij hogere ω waarden met een factor twee, waarbij de bijdrage van MEC's bijna onafhankelijk is van de energie overdracht.

Van belang is te vermelden dat de Δ -bijdrage in de berekeningen is uitgevoerd binnen de zogenaamde 'statische' benadering. Hierbij worden de propagatie van de Δ en zijn vervalbreedte binnen de kern verwaarloosd. Berekeningen van de $^{16}\text{O}(\gamma, pn)$ werkzame doorsnede hebben aangetoond dat dit leidt tot een belangrijke onderschatting van de Δ -bijdrage. Bovendien wordt het resonante gedrag van Δ -excitatie niet door dergelijke statische berekeningen gereproduceerd.

Voor alle waarden van ω blijkt er een verschil tussen de gemeten en de berekende werkzame doorsnede te bestaan bij hogere neutronimpulsen. Dit verschil kan oplopen tot ongeveer een factor vijf. Binnen het meetbare bereik van energie overdracht is het te verwachten dat dit hoge p_m -gebied sterk wordt beïnvloed door Δ -excitatie binnen proton-neutron-paren (pn -paren). Dit proces is afhankelijk van de invariante massa van het betreffende systeem, hetgeen voor de onderhavige pn paren neerkomt op circa 2150 MeV/c². Deze massa komt overeen met de positie van de Δ -resonantie in de werkzame doorsnede voor deutron-elektrodesintegratie.

Een andere aanwijzing voor het belang van de Δ -bijdrage in het p_m -gebied boven 100 MeV/c vormt de afhankelijkheid van de werkzame doorsnede van de hoek van het voorwaarts uitgezonden proton. De snel toenemende werkzame doorsnede voor grotere hoeken lijkt een weerspiegeling van de hoekafhankelijkheid van Δ -excitatie, zoals gezien wordt in berekeningen van de $^{16}\text{O}(\gamma, pn)$ werkzame doorsnede en van coherente pion-fotoproductie.

Het is derhalve noodzakelijk dat het raamwerk van de 'continuum-Faddeev'-vergelijkingen wordt uitgebreid met een volledige beschrijving van Δ -excitatie.

Pas daarna kunnen kwantitatieve conclusies worden getrokken omtrent de gemeten werkzame doorsnedes bij hoge p_m of hoge ω .

In de ‘continuum-Faddeev’-berekeningen wordt herverstrooiing tussen de uitgaande nucleonen volledig meegenomen. De berekeningen zijn gebaseerd op een zogenaamde verstrooiings-reeks die herhaalde interacties tussen de nucleonen omvat, waarbij gebruik wordt gemaakt van realistische modellen van de NN -interactie. In kinematische gebieden waar twee nucleonen met vergelijkbare impuls worden uitgezonden, zijn herverstrooiingsprocessen de dominante factor die de werkzame doorsnede beïnvloeden. Dergelijke gebieden worden aangeduid als ‘FSI-configuraties’, naar de Engelse term voor eindtoestands-wisselwerking: *Final State Interaction*. Metingen rond ‘FSI-configuraties’ zijn derhalve een goed middel om de beschrijving van herverstrooiing in de berekeningen te testen.

In het gemeten deel van de fase-ruimte voor $\omega=220$ MeV en $q=445$ MeV/ c komt een ‘FSI configuratie’ voor tussen het voorwaarts uitgezonden proton en het neutron. In dit gebied blijkt een goede overeenkomst tussen meetresultaten en de berekening te bestaan. Ook gegevens verzameld bij $\omega=275$ MeV en $q=375$ MeV/ c laten overeenkomst tussen de vorm van de gemeten werkzame doorsnede en de berekening zien, hoewel in dit gebied de absolute sterkte door de berekening zeer wordt onderschat. Dit is waarschijnlijk het gevolg van het ontbreken van Δ -excitatie in de gebruikte stroom-operator.

Informatie over de golffunctie van ${}^3\text{He}$ kan in beginsel uit de $(e, e'pp)$ -reactie worden verkregen, wanneer een direct uitstoot-mechanisme via een één-deeltjestrroom en koppeling aan één specifiek proton wordt aangenomen. In het onderhavige experiment geldt dit voor het gebied bij $\omega \approx 220$ MeV en voor $p_m < 100$ MeV/ c . Berekeningen geven aan dat, binnen de grenzen van dit experiment, de werkzame doorsnede gedomineerd wordt door koppeling aan het voorwaarts uitgezonden proton. Hierdoor kunnen de impulsen van de nucleonen in de begintoestand worden teruggerekend, mits wordt aangenomen dat herverstrooiing in dit gebied verwaarloosd mag worden. In dat geval kan het nuttig zijn de werkzame doorsnede weer te geven als functie van de observabele $p_{diff,1}$, daar deze grootheid gerelateerd kan worden aan de relatieve impuls van de nucleonen van het geraakte paar in de begintoestand.

De gemeten werkzame doorsnede laat, bij $p_m < 100$ MeV/ c , als functie van $p_{diff,1}$ een dalende trend zien, hetgeen een afspiegeling vormt van de golf-

functie. Deze trend wordt goed gereproduceerd door de ‘continuum-Faddeev’-berekeningen. Berekeningen, uitgevoerd met diverse modellen van de NN -interactie, geven verschillende voorspellingen omtrent zowel grootte als helling van de werkzame doorsnede in dit gebied. De invloed van de MEC-bijdrage op de werkzame doorsnede is echter groot en de bijdrage van Δ -excitatie nog onduidelijk. Daarbij is, op dit moment, de statistische en systematische onzekerheid van de gemeten werkzame doorsnede nog aanzienlijk. Het is derhalve nog niet mogelijk een voorkeur uit te spreken voor een van de interactie-modellen.

De berekeningen met diverse interactie-modellen laten zien dat er grotere verschillen tussen de golffuncties bestaan bij hogere waarden voor de massamiddelpuntsimpuls en voor relatieve impulsen hoger dan $400 \text{ MeV}/c$ per nucleon. Om uit de ${}^3\text{He}(e, e'pp)$ -gegevens kwantitatieve conclusies te kunnen trekken omtrent details van de NN -interactie, zullen metingen gedaan moeten worden over een groter bereik in pp relatieve impuls, maar wel binnen het kinematisch gebied waar de werkzame doorsnede door directe twee-protonuitstoot wordt gedomineerd. Gebruik van hogere impulsoverdracht kan hierbij behulpzaam zijn, aangezien dit leidt tot een vermindering van het belang van Δ -excitatie en tot minder herverstrooiingseffecten. Dit leidt echter tot problemen met de huidige berekeningen, die in een niet-relativistisch raamwerk worden uitgevoerd.

Ook de studie van het hoge p_m -gebied biedt nog mogelijkheden, hoewel op dit moment nog geen goede theoretische beschrijving hiervan mogelijk is. Berekeningen laten zien dat de invloed van het interactie-model op de golffunctie hier groot is. Het is echter vooral noodzakelijk dat er ofwel verbeterde theoretische modellen komen, ofwel dat een experimentele methode wordt gevonden om de bijdrage van Δ -excitatie aan de werkzame doorsnede in dit gebied te bepalen. Meer experimentele gegevens, in het bijzonder een ontbinding van de ${}^3\text{He}(e, e'pp)$ -werkzame-doorsnede in de bijdragende structuurfuncties en studie van de complementaire reactie ${}^3\text{He}(e, e'pn)$, zijn van groot belang. Zij kunnen meer licht werpen op de processen die aan twee-nucleon-uitstoot ten grondslag liggen en leiden tot een beter begrip van nucleon-nucleon-correlaties.