

University of Groningen

## Relativistic models of nuclear matter

Jong, Frederik Eduard de

**IMPORTANT NOTE: You are advised to consult the publisher's version (publisher's PDF) if you wish to cite from it. Please check the document version below.**

*Document Version*

Publisher's PDF, also known as Version of record

*Publication date:*

1992

[Link to publication in University of Groningen/UMCG research database](#)

*Citation for published version (APA):*

Jong, F. E. D. (1992). *Relativistic models of nuclear matter*. s.n.

### Copyright

Other than for strictly personal use, it is not permitted to download or to forward/distribute the text or part of it without the consent of the author(s) and/or copyright holder(s), unless the work is under an open content license (like Creative Commons).

The publication may also be distributed here under the terms of Article 25fa of the Dutch Copyright Act, indicated by the "Taverne" license. More information can be found on the University of Groningen website: <https://www.rug.nl/library/open-access/self-archiving-pure/taverne-amendment>.

### 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.

Downloaded from the University of Groningen/UMCG research database (Pure): <http://www.rug.nl/research/portal>. For technical reasons the number of authors shown on this cover page is limited to 10 maximum.

Een atoomkern is opgebouwd uit protonen en neutronen. De grootte van de kern worden bepaald door de wisselwerking tussen de nucleonen. Uit het feit dat de nucleonen in een kern zijn gebonden, en dat de kern een eindige afmeting heeft kunnen twee cruciale karakteristieken van de nucleon-nucleon interactie worden afgeleid. Om de kerndeeltjes te binden moet de interactie op grotere afstand aantrekkend zijn. Op korte afstand heeft de wisselwerking een sterk afstotende pit die ervoor zorgt dat de nucleonen in de kern afstand van elkaar houden. Nauwkeuriger informatie over de interactie kan worden verkregen uit botsingsproeven tussen nucleonen. Uit deze metingen blijkt dat de wisselwerking zowel sterk als zeer gecompliceerd is.

Op basis van veldentheorie kan de nucleon-nucleon interactie worden beschreven door uitwisseling van deeltjes, mesonen. Sommige mesonen hebben een aantrekkend effect, anderen een afstotend. Afhankelijk van hun massa werken ze op grote (lichte mesonen) of kleine (zware mesonen) afstand. Door een juiste keuze van de gebruikte mesonen en de vrije parameters in het model kunnen de twee nucleon gegevens goed worden beschreven. Zo kan bijvoorbeeld het aantrekkend karakter op grotere afstand worden beschreven door een licht, aantrekkend meson: het pion.

Omgekeerd is het een interessant theoretisch probleem om, gegeven een representatie van de nucleon-nucleon interactie, de eigenschappen van kernen uit te rekenen. Mede door de karakteristieken van de interactie is dit een buitengewoon complex probleem. Zo complex, dat tot op heden slechts met grove benaderingen resultaten kunnen worden verkregen.

Om het probleem te vereenvoudigen stellen we ons een oneindig grote kern voor. Dit voegt een extra symmetrie toe: door de hele ruimte is het systeem hetzelfde. In plaats van aan te moeten geven waar elk deeltje zich bevindt kan het systeem worden beschreven met behulp van de Fermi-zee. Dit kunnen we ons voorstellen als een emmertje water. Hoe hoger het water staat (in terminologie: hoe groter het Fermi-momentum), hoe groter de dichtheid van nucleonen. Door deze simplificatie wordt het een stuk eenvoudiger om eigenschappen van de oneindige kernmaterie uit te rekenen. Aan de andere kant kunnen we door in steeds zwaardere kernen het verloop van bepaalde eigenschappen te volgen een goede schatting maken van een aantal 'experimentele' waarden van kernmaterie. Op deze manier vormt kernmaterie een ideale praktische tussenstap in de theoretische studie van kernen en de nucleon-nucleon interactie.

Een van de belangrijkste experimentele waarden is de positie van het saturatiepunt. Bij een bepaalde dichtheid van nucleonen hebben deze een minimale energie, deze combinatie van dichtheid en energie heet het saturatiepunt. Het reproduceren van het experimentele saturatiepunt is de eerste grote opgave in kernmaterieberekeningen. Meer algemeen kan de bindingsenergie als functie van

de dichtheid worden gebruikt in de astrofysica; zowel voor supernova-simulaties als in neutron-stermodellen.

Om grootheden als bindingsenergie te berekenen gebruikt men meestal diagrammen. Deze diagrammen moeten voldoen aan een serie formele regels, de Feynman regels. Elk diagram heeft een door de Feynman regels bepaalde waarde. De bindingsenergie is de som van alle binnen de regels mogelijke diagrammen. Dit zijn er oneindig veel, ze stuk voor stuk optellen is dan ook onmogelijk. Er is een voorschrift nodig om de belangrijkste diagrammen in één keer op te tellen. Eén zo'n schema werd eind vijftiger jaren voorgesteld door K.A. Brueckner. Alle diagrammen van een bepaalde klasse, de 'deeltje-deeltje ladder diagrammen', worden samengevoegd in de Brueckner  $g$ -matrix. Op deze manier kunnen we alle diagrammen uitdrukken met behulp van de  $g$ -matrix. Een simpele afschatting leert dat de twee diagrammen waarin de  $g$ -matrix één keer voorkomt, respectievelijk het Hartree- en Fock diagram, inderdaad de grootste bijdrage aan de bindingsenergie geven. Het blijkt evenwel dat, ondanks het gebruik van verschillende representaties van de nucleon-nucleon interactie, hiermee in niet-relativistische modellen het saturatiepunt niet kan worden gereproduceerd. Ook het systematisch toevoegen van diagrammen met meerdere  $g$ -matrices verbetert het resultaat niet.

Eén van de verbeteringen die de laatste jaren in de belangstelling staat, is de introductie van relativistische aspecten in het Brueckner schema. Een cruciaal verschil met niet-relativistische modellen is de behandeling van de zelf-energie. Deze beschrijft de invloed van het medium, de kernmaterie, op het gedrag van een nucleon. In niet-relativistische modellen is dit een enkel getal, een scalar. De zelf-energie heeft in het relativistische Brueckner model twee componenten; een 'scalair' en een 'vector' deel. Deze zijn beide groot maar hebben een tegengesteld teken zodat we in de niet-relativistische limiet, waar we de som van de twee moeten nemen, een klein getal overhouden. De splitsing van de zelf-energie in componenten heeft een zodanig effect op de positie van het berekende saturatiepunt dat dit nu bijna overeenkomt met de experimentele waarde.

Ondanks het succes in de beschrijving van het saturatiepunt heeft het relativistische Brueckner model tekortkomingen. De belangrijkste is dat het model thermodynamisch niet consistent is. Uit de thermodynamica volgen verscheidene, equivalente, uitdrukkingen voor grootheden als energie. In een thermodynamisch consistent model moeten de equivalente uitdrukkingen hetzelfde numerieke resultaat opleveren. Een maat hiervoor is in hoeverre aan het Hugenholtz-van Hove theorema voldaan is. Dit theorema geeft een relatie tussen de bindingsenergie en de één-deeltjesenergie. De laatste is weer een functie van de zelf-energie. Als niet aan deze relatie voldaan is, is het model thermodynamisch inconsistent. Voor het relativistische Brueckner model vinden we een discrepantie van 4 MeV. Dit is een substantiële afwijking, alhoewel het een stuk kleiner is als de afwijking die gevonden wordt in niet-relativistische Brueckner modellen. De oorzaak van de discrepantie

blijkt dat systematisch een klasse diagrammen, de 'gat-gat ladder diagrammen', is verwaarloosd. Deze zijn essentieel voor de thermodynamische consistentie van het model.

In hoofdstuk 3 van dit proefschrift is beschreven hoe het relativistische Brueckner model uitgebreid is met deze termen. Met dit model zijn een aantal berekeningen van kernmaterie observabelen uitgevoerd. Het resulterende saturatiepunt ligt binnen de foutengrenzen van de empirische waarde. Ook wordt rond het saturatiepunt aan het Hugenholtz-van Hove theorema voldaan. Het model beschrijft het saturatiepunt goed en is thermodynamisch consistent.

Als er geen interacties zijn, vullen de nucleonen de Fermi-zee volledig tot aan de rand. Zodra er wel een interactie is, 'kookt' het water: de nucleonen zijn een deel van de tijd niet in de Fermi-zee. Met het formalisme van hoofdstuk 3 kunnen we dit uitrekenen. We vinden een gemiddeld percentage van 11%. Dit komt goed overeen met de beschikbare experimentele informatie.

Een ander in dit proefschrift onderzochte uitbreiding betreft de introductie van een aangeslagen toestand van het nucleon, de delta-isobaar, in het relativistische Brueckner model. Dit is nodig om de twee-nucleon data voor hogere botsingsenergieën te kunnen beschrijven. Tot nu toe werd de delta-isobaar beschreven met een in essentie niet-relativistisch formalisme. Dat wil zeggen dat de zelf-energie van de delta-isobaar benaderd werd met een scalaire grootheid. Dit in tegenstelling tot de zelf-energie van het nucleon waarvoor we een scalair en een vector deel hebben. In hoofdstuk 4 wordt een formalisme gepresenteerd dat deze asymmetrie in de behandeling van het nucleon en de delta-isobaar opheft. In dit formalisme heeft de zelf-energie van de delta-isobaar, analoog aan die van het nucleon, zowel een scalaire als een vector component. Van de overige componenten, die voortvloeien uit de relativistische behandeling van de delta-isobaar, wordt aangetoond dat ze op een consistente manier verwaarloosd kunnen worden. Geïmplementeerd in het relativistische Brueckner model vinden we een kleine verschuiving in het berekende saturatiepunt. In tegenstelling tot die van het nucleon, zijn de componenten van de zelf-energie van de delta-isobaar klein en hebben ze hetzelfde teken. Het blijkt dat in ons model de eigenschappen van de delta-isobaar slechts weinig beïnvloed worden door het medium.