



Universiteit
Leiden

The Netherlands

Seismology of magnetars

Hoven, M.B. van

Citation

Hoven, M. B. van. (2012, February 15). *Seismology of magnetars*. Retrieved from <https://hdl.handle.net/1887/18484>

Version: Corrected Publisher's Version

License: [Licence agreement concerning inclusion of doctoral thesis in the Institutional Repository of the University of Leiden](#)

Downloaded from: <https://hdl.handle.net/1887/18484>

Note: To cite this publication please use the final published version (if applicable).

Nederlandstalige samenvatting

Het proefschrift dat u in handen hebt, bevat de resultaten van een promotieonderzoek in de sterrenkunde dat de afgelopen vierenhalf jaar heeft plaatsgevonden aan de Universiteit van Leiden. De basis van het werk dat in dit boek wordt gepresenteerd, bestaat uit een viertal gepubliceerde wetenschappelijke artikelen met als gemeenschappelijk onderwerp de *seismologie van magnetars*. De hoofdstukken 1, 2, 3 en 4 in dit boek zijn geheel of deels op deze artikelen gebaseerd.

Omdat het voor de niet-specialistische lezer geheel onduidelijk kan zijn wat er nu precies wordt bedoeld met ‘seismologie van magnetars’, volgt er in deze Nederlandstalige samenvatting een uitgebreide uitleg over dit onderwerp. In het kort is ‘seismologie van magnetars’ te vertalen als: de wetenschap van trillingen of bevingen van zeer sterk magnetische neutronensterren. De ervaring leert dat een dergelijke beschrijving meer vragen oproept dan beantwoordt, bijvoorbeeld: wat zijn neutronensterren? of: waarom zou je trillingen bestuderen? In de praktijk blijkt het moeilijk, zo niet onmogelijk te zijn om op dergelijke vragen korte én begrijpelijke antwoorden te geven. Op de vraag wat neutronensterren nu eigenlijk zijn, zou een antwoord bestaande uit enkele regels immers even onbevredigend als incompleet zijn. Aan de andere kant zou een complete uitleg van het onderwerp een onredelijke hoeveelheid kennis van de fundamentele natuur- en wiskunde vereisen. Om deze redenen beperken we ons tot de grote lijnen, ten koste van de vele details. Daarom vervolgen we in de geest van Einstein: “Zo eenvoudig mogelijk, maar niet eenvoudiger!”

Om het een en ander in het juiste perspectief te plaatsen, wordt eerst een beeld geschetst van het universum zoals dat bestaat in de huidige wetenschap. Vervolgens komen sterren ter sprake, met de nadruk op de levensloop en dood van sterren en de daaruit volgende geboorte van neutronensterren. Hierna wordt gesproken over neutronensterren en magnetars, en komt de inhoud van dit proefschrift specifiek aan bod.

Het heelal in een notendop

Ons beeld van de hemel op een willekeurige heldere nacht wordt gedomineerd door enkele duizenden gloeiende gasbollen die we met het blote oog kunnen onderscheiden. Deze schijnbaar statische constellatie van sterren aan de nachthemel vormt in werkelijkheid niet meer dan een kleine selectie ‘nabije’ burens van onze Zon. Dat wil zeggen, nabij in vergelijking tot andere sterren en sterrenstelsels in het heelal. Afstanden zijn immers relatief wanneer men bedenkt dat zelfs onze meest nabije buur, de ster α Centauri, bijna 300.000 maal verder weg staat dan onze eigen Zon, terwijl de Zon alweer zo’n 400 maal verder weg staat dan de Maan (zie tabel 1). Als men zich de beide sterren, α Centauri en de Zon, voorstelt als golfballetjes en men plaatst de Zon in Nederland, zal α Centauri in de buurt van de Franse Riviera te vinden zijn. Het opmerkelijke is dat de gigantische ruimte die zich tussen deze en andere sterren bevindt, vrijwel helemaal leeg is. Zou men, ware het mogelijk, van ster naar ster reizen, dan zou men niets maar dan ook niets tegenkomen dan lege ruimte.

Wie in een donkere, heldere nacht goed naar de hemel kijkt, ontdekt een vage, lichtende band die zich uitstrekt van horizon tot horizon. Dit is de Melkweg, een verzameling van enkele honderden miljarden sterren waarvan de Zon deel uitmaakt, in de vorm van een reusachtige pannenkoek. De afstanden zijn enorm; doet het licht van de Zon er overdag zo’n acht minuten over om ons te bereiken, het licht van een gemiddelde ster in de Melkweg is tienduizenden jaren onderweg om uiteindelijk een beeld op ons netvlies te vormen. Alhoe-

Tabel 1: *Astronomische afstanden*

object, afstand in:	kilometers	astronomische eenheden	lichtjaren
Maan	384.000	0,0026	$4,1 \times 10^{-8}$
Zon	$1,5 \times 10^8$	1	$1,6 \times 10^{-5}$
Saturnus	$1,4 \times 10^9$	9,5	$1,5 \times 10^{-4}$
α Centauri (dichtstbijzijnde ster na de Zon)	$4,1 \times 10^{13}$	270.000	4,3
Sagittarius A* (centrum van de Melkweg)	$2,6 \times 10^{17}$	$1,7 \times 10^9$	27.000
Andromeda (naburig sterrenstelsel)	$2,1 \times 10^{19}$	$1,4 \times 10^{11}$	$2,2 \times 10^6$
Virgo (nabij cluster van sterrenstelsels)	$4,8 \times 10^{20}$	$3,2 \times 10^{12}$	$5,1 \times 10^7$
Verst verwijderde objecten	$1,3 \times 10^{23}$	$8,7 \times 10^{14}$	$13,7 \times 10^9$

Tabel 1: *De afstanden tot verschillende objecten in het heelal in verschillende eenheden. Een astronomische eenheid (AE) komt overeen met de afstand van de Aarde tot de Zon. Een lichtjaar is de afstand die het licht in één jaar aflegt (licht plant zich voort met een snelheid van zo'n 300.000 kilometer per seconde). Om de leesbaarheid te bevorderen, hebben we de getallen gegeven in machten van 10, bijvoorbeeld: 10^6 is gelijk aan een 1 met 6 nullen, ofwel een miljoen. En 10^{-5} betekent 1 gedeeld door 10^5 , ofwel éénhonderdduizendste.*

wel een aanblik van de sterrenhemel anders doet vermoeden, is dit geheel van hemellichamen allesbehalve statisch. De onderlinge gravitatie tussen de sterren in de Melkweg maakt dat zij voortdurend in beweging zijn en gemiddeld met zo'n tweehonderd kilometer per seconde rondom het centrum van de schijf snellen. Als we een kleine honderdduizend jaar de tijd hadden, zouden we de sterren ten opzichte van elkaar langzaam van positie zien veranderen. Dit dy-

namische stelsel van sterren staat niet op zichzelf, maar vormt op zijn beurt samen met enkele tientallen naburige melkwegstelsels (of sterrenstelsels) een groep waarvan de leden onderling zwaartekracht op elkaar uitoefenen. Een van deze naaste burens, de Andromedanevel, bevindt zich zelfs op ramkoers met de Melkweg, de verwachting is dat deze twee stelsels over enkele honderden miljoenen jaren op ruwe wijze met elkaar zullen versmelten om zo uiteindelijk één groot systeem van sterren te vormen. De mogelijkheid dat daarbij de Zon in botsing zou komen met een andere ster is overigens vrijwel uitgesloten; gezien de enorme leegte waarin de relatief minuscule sterren zich bevinden, is de kans nihil dat individuele hemellichamen fysiek met elkaar in aanraking komen.

Interacties tussen sterrenstelsels zoals de Melkweg en Andromeda zijn daarentegen een veelvoorkomend fenomeen. Naar welke uithoek aan de hemel we de telescoop ook richten, als we goed genoeg kijken, vinden we er sterrenstelsels in diverse soorten en maten, vele daarvan verwickeld in een sierlijke dans met hun naaste burens. Deze complexe dynamiek is het gevolg van het feit dat de materie op deze kosmische schaal de neiging heeft om samen te klonteren. De structuur van het heelal is dientengevolge verre van gelijkmatig, maar heeft eerder iets weg van een spons. Holle leegtes van vele miljoenen lichtjaren in doorsnede worden omgeven door een fijnmazig web van filamenten en clusters bestaande uit soms duizenden sterrenstelsels.

Wanneer we verder uitzoomen, krijgen we een overzicht van het gehele voor ons zichtbare heelal. Op deze schaal is de materie, bestaande uit clusters en filamenten, zeer gelijkmatig verdeeld; het lijkt erop dat er geen structuur in de vorm van verdichtingen en leegtes te vinden is. Het opmerkelijke hierbij is dat, alhoewel clusters en filamenten zich lijken samen te trekken onder invloed van de zwaartekracht, de structuur op de allergrootste schaal een tegenovergestelde trend vertoont. Ver verwijderde sterrenstelsels blijken van elkaar af te bewegen in plaats van naar elkaar toe getrokken te worden, met een snelheid die groter is naarmate de stelsels verder van elkaar verwijderd zijn: het heelal dijkt uit als een ballon die opgeblazen wordt. Ver verwijderde sterrenstelsels moeten zich dus in het verleden dichter bij elkaar bevonden



Figuur 1: *Sterrenstelsels in verschillende soorten en maten in het cluster Abell 50740, op een afstand van zo'n 460 miljoen lichtjaar van de Aarde. Op enkele sterren na die zich op de voorgrond bevinden, zijn alle objecten in dit plaatje sterrenstelsels. Het grote, eivormige stelsel bestaat uit honderden miljarden sterren en heeft een doorsnede van ongeveer 100.000 lichtjaar. (NASA, ESA, and The Hubble Heritage Team (STScI/AURA))*

hebben. Wie in gedachten de tijd 13,7 miljard jaar terugdraait, komt op een punt waarop de ruimte zich in een toestand van onnoemelijke massadichtheid en temperatuur bevindt en in explosief tempo expandeert. Dit is het moment waar het heelal zijn oorsprong vond en het spoor dat deze gewelddadige geboorte naliet, is tot op heden meetbaar als een gelijkmatig aan de hemel verdeelde warme nagloed.

Hoe het heelal zich in de loop der geschiedenis heeft ontwikkeld tot wat wij er nu van waarnemen, blijft een onderwerp van voortdurend wetenschappelijk onderzoek. Aan de basis van dit vraagstuk ligt echter vaak de zoektocht naar inzicht in de fundamentele eigenschappen van de natuur. Wat is het karakter van ruimte en tijd? Wat is de aard van de verschillende fundamentele natuurkrachten? Hoe gedraagt materie zich onder de extreme omstandigheden die zich voordoen in het heelal? Om op dergelijke vragen antwoorden te vinden,

zijn astronomische waarnemingen, naast vele natuurkundige laboratoriumexperimenten, een onontbeerlijke bron van kennis en inzicht. De sterrenhemel biedt in veel gevallen omstandigheden die men in het laboratorium onmogelijk kan nabootsen. Zo zijn er sterren met extreme gravitatievelden, processen met extreme temperaturen, explosies met extreme energieën, objecten met extreme magnetische velden en ga zo maar door. We zullen zien dat het in dit proefschrift uitvoerig besproken object, een type neutronenster dat we magnetar noemen, ook in deze categorie van extreme objecten valt.

Het leven en sterven van een ster

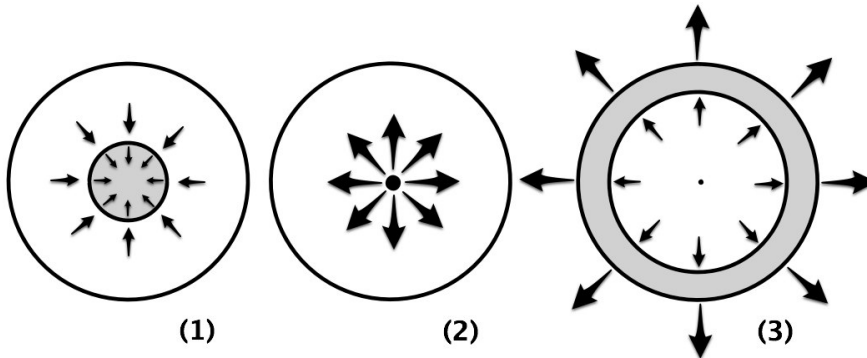
Wat sterren onderscheidt van andere hemellichamen zoals planeten, asteroïden of kometen, is dat sterren door de buitengewoon hoge druk en temperatuur in hun binnenste, spontaan tot verbranding komen. Het extreme klimaat dat zich in het binnenste van sterren voordoet, is het directe gevolg van de grote hoeveelheid massa waar zij uit bestaan. Een doorsnee ster zoals de Zon, is niets minder dan een ophoping van enkele honderdduizenden aardmassa's aan gas, bijeengehouden door de zwaartekracht die zij op zichzelf uitoefent. Ware het mogelijk een duik naar het binnenste van de Zon te maken, dan zou men, op zo'n zeventienhonderdduizend kilometer diepte, aankomen in een gebied waar niet alleen een verzengende temperatuur heerst van ruim vijftien miljoen graden Celsius, maar ook een druk waarbij iedere vingertop verpletterd zou worden onder een gewicht vergelijkbaar met dat van vijftig miljoen volwassen Afrikaanse olifanten. Hier, in het centrum van de Zon, zijn de omstandigheden zodanig dat individuele deeltjes, voornamelijk atoomkernen van het element waterstof, met elkaar versmelten om het zwaardere element helium te vormen. Deze verbranding door *kernfusie* is, in tegenstelling tot de verbranding die we kennen van het openhaardvuur, niet van chemische aard, maar van nucleaire aard. De energieopbrengst van deze nucleaire verbranding verhoudt zich diensgevolge tot die van een alledaagse verbranding, als een atoombom zich verhoudt tot dynamiet. Het is deze nucleaire energie die de Zon uiteindelijk uitstraalt in de vorm van licht. En tegelijkertijd levert deze

energie de druk die ervoor zorgt dat de Zon niet bezwijkt onder haar eigen gewicht. Wanneer na enkele miljarden jaren het moment komt waarop alle waterstof in het centrum van de Zon is opgebrand en omgevormd tot helium, zal haar binnenste inkrimpen onder het grote gewicht van alle bovenliggende massa. Als gevolg van de verhoogde druk die zo ontstaat, stijgt vervolgens de temperatuur weer, totdat deze een hoogte bereikt die toestaat dat heliumkernen met elkaar fuseren om zodoende wederom energie vrij te maken en het nog zwaardere element koolstof te vormen. Dergelijke opeenvolging van cycli, waarbij nucleaire reacties in het interne van de ster geleidelijk steeds zwaardere elementen vormen, is karakteristiek voor de levensloop van sterren. Voor de Zon echter leidt de episode van heliumverbranding het eindstadium van haar bestaan in. Haar buitendelen expanderen totdat de planeten Mercurius en Venus zijn verzwolgen onder haar oppervlak en de Aarde veranderd is in een gloeiend hete, verschroeide woestijn. Hierna krimpt de Zon geleidelijk terwijl zij als een nachtkaaars uitgaat.

Voor sterren die een aantal maal massiever zijn dan de Zon, betekent de vorming van koolstof echter niet het einde, maar gaat de verbranding van de elementen in onheilspellend tempo door totdat er ijzer gevormd wordt. Elementen zwaarder dan ijzer hebben de ongunstige eigenschap dat hun vorming uit lichtere elementen energie kost, in plaats van energie oplevert. Met andere woorden: ijzer is het as van de nucleaire verbranding, de brandstof is op! Het onvermijdelijke effect is dat, binnen enkele dagen (!) nadat zich ijzer begint te vormen in de sterkern, er niet voldoende energie meer geleverd wordt om de ster te behoeden voor instorting onder zijn eigen gewicht. Het gevolg is een catastrofe van ongeëvenaarde proporties.

Tijdens de implosie, die zich voltrekt in een fractie van een seconde, worden de nucleaire bestanddelen van ijzer en andere aanwezige elementen rap omgezet in neutronen en neutrino's.¹ De hoeveelheid energie die gedragen wordt door neutrino's is equivalent aan 10^{32} Hiroshima-bommen (een 1 met

¹Neutronen vormen samen met (positief geladen) protonen de bestanddelen van atoomkernen. Deze atoomkernen worden omgeven door een gas van (negatief geladen) elektronen. Wanneer, tijdens de implosie van de sterkern, de verschillende deeltjes met grote kracht samengeperst worden, beginnen de protonen in de atoomkernen elektronen in te vangen. Bij deze reactie komen deeltjes vrij die neutronen en neutrino's genoemd worden.



Figuur 2: Schematische weergave van de opeenvolgende gebeurtenissen in een ster tijdens de eerste paar seconden van een supernova. **(1)** Onder het gewicht van de bovenliggende massa begint de kern van de ster (grijs) te imploderen. **(2)** Tijdens de implosie worden neutronen en neutrino's gevormd. De neutronen zijn zeer massief en hopen zich op in de kern (zwarte stip), de lichte neutrino's (pijlen) bewegen met hoge snelheid naar buiten. **(3)** De buitenliggende lagen van de ster (grijs) worden door de hoog energetische neutrino's versneld en worden op deze manier met een explosieve schok verstoten. In het centrum blijft een neutronenster over (stipje).

32 nullen). Neutrino's zijn elementaire deeltjes die weinig interactie hebben met hun omgeving en daardoor gemakkelijk aan de imploderende kern van de ster kunnen ontkomen. Op hun weg naar buiten echter, geven deze neutrino's een fractie van hun energie af aan buiten liggende schillen van de ster, wat voldoende is om deze op explosieve wijze te verstoten; het begin van een van de krachtigste explosies in het heelal, een supernova. De restanten van wat ooit de buitenlagen van een massieve ster waren, worden met hoge snelheid de ruimte ingeschoten en verrijken zodoende het interstellair medium met alle 'zware' chemische elementen die de ster in zijn verbranding produceerde.¹ Terwijl de buitendelen van de ster gedurende deze fractie van een seconde tot hoge snelheid versneld worden, komt de implosie van de sterkeren, die inmiddels

¹De vele elementen waaronder zuurstof, stikstof en koolstof, die op Aarde zo prominent aanwezig zijn en het leven mogelijk maken, zijn alle afkomstig uit zware sterren die, lang voordat ons zonnestelsel zich vormde, explodeerden. Ons eigen lichaam, dat opgebouwd is uit deze chemische elementen, is dus in de letterlijke zin van het woord sterrenstof.

voornamelijk uit neutronen bestaat, abrupt tot een einde. De massadichtheid van de sterkern is op dat moment zo hoog opgelopen, dat individuele neutronen met elkaar in aanraking komen, waardoor verdere instorting een halt wordt toegeroepen.¹ Met een grote schok komt de invallende materie tot stilstand; de geboorte van een neutronenster (zie figuur 2 voor een schematische weergave van de opeenvolgende gebeurtenissen tijdens de vorming van een neutronenster).



Figuur 3: *Het restant van de supernova N49 in de Grote Magellaanse Wolk, op een afstand van 170.000 lichtjaar. De zichtbare structuur bestaat uit heet gas dat afkomstig is van een massieve ster die aan het eind van zijn leven explodeerde, ongeveer 5.000 jaar geleden. De ingestorte sterkern heeft zich gevormd tot een extreem magnetische neutronenster; een magnetar met de naam 'SGR 0526-66'. (NASA, ESA, and The Hubble Heritage Team (STScI/AURA))*

¹Hier wordt de vorming van een neutronenster bescheven. Bij een implosie van nog zwaardere sterren is de instorting niet te stoppen. In dat geval wordt er een zwart gat gevormd; een object waar zelfs het licht niet aan de zwaartekracht kan ontsnappen.

Neutronensterren

De geïmplodeerde sterkern, die voornamelijk bestaat uit neutronen, is een bol met een doorsnede van niet meer dan 25 kilometer. Alhoewel de grootte van een neutronenster naar astronomische maatstaven minuscule genoemd kan worden, is de hoeveelheid massa binnen deze kleine ruimte bijna anderhalf maal zo groot als die van onze Zon. De zwaartekracht op het oppervlak van de ster is bijgevolg zo intens, dat men er verpletterd zou worden onder zijn of haar eigen gewicht, dat ter plekke meer dan honderd miljard maal zo hoog is als op Aarde. Het komt erop neer dat de materie van een neutronenster zó sterk is samengeperst door de zwaartekracht, dat een brok ter grootte van een suikerklontje ongeveer zoveel massa bevat als de gehele menselijke wereldbevolking.

Gegeven de zeer kleine afmetingen van neutronensterren zou men kunnen verwachten dat het buitengewoon moeilijk moet zijn om deze objecten met een telescoop te observeren. Immers, het waarnemen van een neutronenster op een afstand van zo'n 1.000 lichtjaar (wat relatief dichtbij is) is vergelijkbaar met het waarnemen van een enkele zandkorrel op de planeet Mars! Om deze reden achtten de meeste astronomen het, tot zo'n vijftien jaar geleden, onmogelijk om ooit een neutronenster te observeren. Dit veranderde in 1967 toen Jocelyn Bell, promovenda aan de Universiteit van Cambridge, een opmerkelijke ontdekking deed. Met behulp van een primitieve radiotelescoop vond Bell een bron aan de hemel die iedere 1,3 seconden een korte puls van radiostraling uitzond. Omdat het pulseren zó regelmatig was, en omdat een dergelijk fenomeen onbekend was in de sterrenkunde, dachten Bell en haar promotiebegeleider Anthony Hewish in eerste instantie dat het signaal veroorzaakt werd door lokale radiozenders of andere storende invloeden. Toen na herhaalde experimenten het signaal aanwezig bleef, werd het duidelijk dat de pulserende bron daadwerkelijk een kosmische oorsprong had. Na de bekendmaking van het nieuwe en raadselachtige object, door Hewish 'pulsar' genoemd, gingen sterrenkundigen koortsachtig op zoek naar mogelijke verklaringen voor het fenomeen. In eerste instantie werd zelfs de mogelijkheid van buitenaards leven ('little green men') geopperd, maar al vrij snel werd het overduidelijk dat de bron een neutronenster moest zijn die werkte als een soort

vuurtoren; de ster zond een smalle bundel licht uit, die iedere 1,3 seconden dat de ster een wenteling om zijn as maakte, even in de richting van de Aarde scheen. Direct na de ontdekking van Bell begonnen andere onderzoeksgroepen pulserende radiobronnen te zoeken, en vonden sterren die in duizelingwekkend tempo pulseerden, sommige zelfs enkele honderden malen per seconde.¹

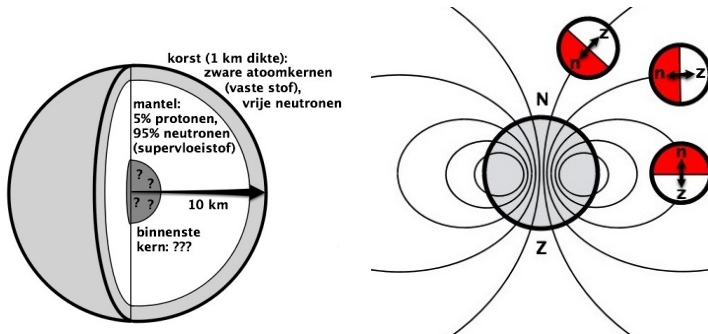
Eén van de overtuigende argumenten dat pulsars inderdaad neutronensterren moeten zijn, is de hoge rotatiesnelheid die afgeleid wordt uit de waargenomen pulsen. Men kan zich voorstellen dat op een object dat snel om zijn as draait, enorme middelpuntvliedende krachten (centrifugaalkrachten) werken. Deze krachten, die de massa van een roterende ster naar buiten willen slingeren², moeten tegengewerkt worden door de aantrekkende werking van de zwaartekracht. Als de zwaartekracht van een ster niet sterk genoeg is, vliegt de ster simpelweg uit elkaar. Om deze reden kan een ster als onze Zon nooit of te nimmer sneller om zijn as draaien dan zo'n één rotatie per halfuur.³ Het feit dat pulsars zich honderden malen per seconden om hun as wentelen, betekent dus dat we te maken hebben met een object dat een geweldig sterke zwaartekracht moet hebben. Daarbij komt dat de hoge rotatiesnelheid direct verklaard kan worden met de catastrofale implosie waaruit neutronensterren worden gevormd. Dit effect wordt wel *de wet van behoud van impulsmoment* genoemd, en het werkt als volgt: zoals de meeste hemellichamen, beweegt de ster vóór de implosie langzaam om zijn as. Wanneer de ster aan het einde van zijn leven implodeert, begint deze sneller te roteren naargelang zijn massa meer en meer naar binnen valt. Dit is vergelijkbaar met de manier waarop een ijsdanseres haar pirouette versnelt door massa (armen en benen) naar binnen te trekken. Het verschil met de ijsdanseres is echter dat de massa van een imploderende sterkern zó sterk geconcentreerd raakt in het centrum, dat de rotatiesnelheid bij de geboorte van een neutronenster kan oplopen tot enkele

¹In 1974 ontving Bell's promotiebegeleider Anthony Hewish, samen met Sir Martin Ryle van de Universiteit van Cambridge, de Nobelprijs voor de ontdekking van de eerste pulsar. Het feit dat Jocelyn Bell niet meedeelde in de prijs zorgde begrijpelijkerwijs voor enige publieke opschudding.

²Via hetzelfde principe werkt een centrifuge of een wasmachine. Hoe sneller de trommel roteert, hoe krachtiger de inhoud naar buiten geslingerd wordt.

³Hetzelfde argument geldt ook voor de Aarde. De rotatieperiode van de Aarde (een dag) zou in theorie nooit lager kunnen worden dan ongeveer 13 minuten. Bij een snellere rotatie zou de centrifugaalkracht sterker worden dan de zwaartekracht, en de Aarde zou in losse stukken uiteenvliegen.

honderden omwentelingen per seconde.



Figuur 4: Schematische weergaven van een neutronenster. Het linkerplaatje laat een dwarsdoorsnede van een neutronenster zien, met de bijbehorende afmeting en chemische samenstelling. Over de samenstelling van het binnenste deel van de kern (donkergrijs) bestaat onzekerheid. Het rechterplaatje laat een (sterk vereenvoudigd) magnetisch veld zien. De gekromde lijnen geven de magnetische veldlijnen weer. Hoe dichter de lijnen bij elkaar staan, hoe sterker het magnetisch veld. Men zou in theorie de richting van de veldlijnen kunnen bepalen met een kompas; de kompasnaald staat altijd parallel aan het magnetisch veld.

Sinds de ontdekking van pulsars zijn neutronensterren niet meer weg te denken uit de astronomie. Hun extreme fysische eigenschappen zoals de enorme massadichtheden en zwaartekracht, maken dat deze objecten een fundamenteel puzzelstuk vormen in de ontwikkeling van ons begrip van de natuur. De omstandigheden die zich voordoen op deze sterren zijn niet alleen extreem, maar ook uniek in die zin dat vele verschijnselen in en rondom neutronensterren geen equivalent kennen op Aarde, en zelfs in de meest geavanceerde laboratoria niet nagebootst kunnen worden. Zo bevindt het binnenste van neutronensterren zich mogelijk in een staat van superfluiditeit; een vloeistofvorm waarin geen frictie (viscositeit) bestaat (zie figuur 4). Aan de andere kant is het waarschijnlijk dat er een veelheid aan exotische natuurkundige deeltjes voorkomt, en dat de ster zich in een staat van supergeleiding bevindt. Het leidt te ver om al deze bijzondere eigenschappen hier te bespreken, maar het moge duidelijk zijn dat er nog zeer veel te leren valt van en over deze sterren.

Magnetars

Dankzij de grote vooruitgang van astronomische waarneemtechnieken in de afgelopen decennia, is het nu mogelijk om vrijwel alle uithoeken van de hemel te observeren in vrijwel alle mogelijke soorten licht. Deze recente ontwikkelingen hebben het mogelijk gemaakt om objecten in het heelal waar te nemen die anders voor het menselijke oog altijd onzichtbaar gebleven zouden zijn.¹ Zo heeft de komst van een generatie ruimtetelescopen die gevoelig zijn voor de hoog energetische röntgen- en gammastraling er in de afgelopen jaren aan bijgedragen dat een groot aantal tot dan toe onbekende typen objecten ontdekt werd. Tot deze nieuwe ontdekkingen behoort onder meer de klasse van magnetars; neutronensterren met een zeer sterk magnetisch veld.² De mogelijkheid dat, onder bijzondere omstandigheden, een neutronenster geboren kan worden met een extreem sterk magnetisch veld, was in het begin van de jaren negentig al voorspeld door de theoretische astrofysici Robert Duncan en Chris Thompson. In een serie belangrijke wetenschappelijke artikelen deed het duo uitvoerig uitleg over hoe een dergelijke ster gevormd zou kunnen worden, en wat zijn fysische eigenschappen zouden zijn. Een aantal jaren bleef het idee van magnetars een puur theoretische hypothese. Maar tegen het eind van de jaren negentig begonnen de observationele bewijzen zich op te stapelen dat een tot dan toe onbegrepen klasse van röntgen- en gammabronnen, inderdaad magnetars moesten zijn. De waargenomen eigenschappen van deze objecten voldeden in vrijwel alle opzichten aan de kenmerken die Duncan en Thompson voorspeld hadden voor magnetars: (1) De sterren waren zeer helder in röntgen- en gammastraling. (2) Ze waren zeer actief, wat wil zeggen dat hun helderheid voortdurend veranderde en dat er zo nu en dan sterke uitbarstingen plaatsvonden. (3) In veel gevallen viel de locatie van deze objecten samen met die van het restant van een relatief jonge supernova (zie figuur 3). (4)

¹Het zichtbare licht dat wij met onze ogen kunnen waarnemen, beslaat slechts een klein deel van het elektromagnetisch spectrum. Niet voor het oog zichtbaar zijn bijvoorbeeld radiostraling, infrarood, ultraviolet, röntgenstraling, gammastraling etc. Veel moderne (ruimte) telescopen zijn gevoelig voor deze ‘onzichtbare’ straling, en kunnen het voor ons onzichtbare heelal in kaart brengen.

²Alle neutronensterren hebben naar Aardse maatstaven zeer sterke magnetische velden; gemiddeld zo’n tien miljard maal sterker dan een typische koelkastmagneet. De magnetische velden van magnetars daarentegen zijn nog eens duizend maal sterker.

De sterren hadden een hele trage rotatie en leken geleidelijk aan iets trager te gaan roteren.¹

Hoewel de meeste neutronensterren, en dus ook magnetars, geboren worden met een zeer snelle rotatie, neemt deze snelheid in de loop van hun leven geleidelijk af. De oorzaak hiervan is de aanwezigheid van een sterk magnetisch veld (zie figuur 4), dat effectief werkt als een soort rem. Hoe sterker het magnetisch veld, des te sneller zal de rotatie vertragen. Het interessante is nu, dat men met behulp van de waargenomen pulsen (zoals die van Bell en Hewish), zowel de rotatiesnelheid als de mate van afremming van de ster heel nauwkeurig kan bepalen. Met deze gegevens kan men vervolgens een zeer goede schatting maken van de sterkte van het magnetisch veld van de ster. Zodoende was de constatering dat de raadselachtige röntgenbronnen een relatief langzame rotatie hadden en bovendien in hoog tempo vertraagden, een duidelijke aanwijzing dat de objecten neutronensterren moesten zijn met extreem sterke magnetische velden. Precies zo sterk als Duncan en Thompson voorspeld hadden voor de tot dan toe hypothetische magnetars.

Magnetars zijn buitengewoon rusteloze objecten. Het intense magnetische veld in deze sterren is onderhevig aan de sterke aantrekkende en afstotende magnetische krachten die magnetars tot bijzonder dynamische en temperamentvolle sterren maken. Omdat de magnetische veldlijnen langzaam van positie veranderen, worden sterke elektrische stromen aangedreven in de *magnetosfeer*², waarbij intense straling vrijkomt die de ster voor onze ruimte telescopen zichtbaar maakt als een bron van röntgenstraling. Het continue ‘verschuiven’ van magnetische veldlijnen laat de ster niet onberoerd. De reden hiervoor is dat de veldlijnen als het ware verankerd zijn in de vaste korst van de ster, waardoor deze een sterke trekkracht ondervindt wanneer de veldlijnen verschuiven. Omdat de korst opgebouwd is uit een sterke vaste stof, biedt het van nature veel weerstand tegen deze magnetische trekkracht. Wanneer echter in de loop der tijd de magnetische spanningen steeds sterker wor-

¹De beschrijving van magnetars die Duncan en Thompson gaven, is een stuk langer en gedetailleerder dan de vier punten die in de tekst genoemd worden. Hun voorspellingen bleken opmerkelijk correct te zijn.

²Met ‘magnetosfeer’ wordt de ruimte buiten de ster bedoeld die gekarakteriseerd wordt door de aanwezigheid van het sterke magnetische veld van de ster.

den, bestaat de mogelijkheid dat op een gegeven moment ofwel de korst het begeeft en breekt, ofwel het magnetisch veld het begeeft, waarbij een enorme hoeveelheid energie in een krachtige klap vrijkomt.¹ Dit soort uitbarstingen is karakteristiek voor jonge magnetars, en varieert sterk in krachtigheid. De allerkrachtigste van deze evenementen kunnen de sterren letterlijk doen schudden op hun grondvesten.

Oscillaties van sterren

In het voorgaande is het een en ander opgemerkt over de inwendige structuur en processen in sterren, met name toen de levensloop van sterren besproken werd. Men kan zich echter afvragen hoe het mogelijk is om überhaupt iets te weten te komen over de interne structuur van sterren. Immers wat we van sterren waarnemen, zelfs met de meest geavanceerde telescopen, is over het algemeen niet meer dan een minuscuul lichtpuntje aan de hemel. Zelfs in het geval van onze Zon, waarvan we weliswaar een gedetailleerder beeld hebben, lijkt het onmogelijk om verder te kijken dan wat zich aan haar oppervlak laat zien; de rest ligt verborgen onder dikke lagen gloeiend gas. Als het niet mogelijk is om dwars door een ster heen te kijken, hoe kunnen we dan iets te weten komen over zijn binnenste? Het antwoord op deze vraag is tweeledig.

Allereerst is het mogelijk om puur op theoretische gronden modellen op te stellen die op basis van bekende (of veronderstelde) natuurwetten de sterstructuur beschrijven. De ingrediënten van een dergelijk model zijn wiskundige vergelijkingen die beschrijven hoe fysische eigenschappen als druk, massadichtheid en temperatuur van elkaar afhangen in de ster. Het resultaat is vaak een reeks gedetailleerde stermodellen met variërende ster massa's, die voorspellingen doen over meetbare eigenschappen van de ster, zoals de lichtkracht en

¹Men kan zich dit voorstellen door het magnetisch veld van een magnetar te vergelijken met de strak gespannen snaren op een gitaar, en de vaste korst van de ster met de klankkast waarop de snaren bevestigd zijn. Door processen die zich in het interne van een magnetar afspelen, worden als het ware de snaren steeds strakker gespannen. Dit gaat zo geleidelijk door, totdat op een catastrofaal moment, ofwel de snaren breken, ofwel de brug op de klankkast breekt. Alle energie die men van het begin af gebruikt had om de snaren te spannen, komt er met een grote klap uit.

de temperatuur, en als zodanig aan de waarnemingen getoetst kunnen worden. De procedure is dus als volgt: men produceert een serie stermodellen van verschillende massa's en vervolgens selecteert men het model dat het best overeenkomt met de waargenomen lichtkracht en temperatuur van de ster. Dit model bevat een gedetailleerde beschrijving van de interne structuur van de ster en als bonus heeft men ook nog eens de massa bepaald. Het vraagstuk lijkt hiermee dus opgelost te zijn. Echter, het probleem met een dergelijke benadering is dat we blind hebben moeten vertrouwen op de correctheid van de theoretische aannames waarop ons stermodel berustte. We hebben deze aannames immers *zelf* niet getest. Het is bovendien niet ondenkbaar dat onze waarneming prima verklaard kan worden met een heel ander model. De vraag rijst dus: hoe testen we de correctheid van onze theorie?¹

Tot dusver ligt het probleem erin dat we er nog niet in geslaagd zijn om op *directe* wijze de interne structuur van de ster te bepalen. Ware het mogelijk geweest om met een röntgenbril naar binnen te kijken, dan konden we bepalen of ons theoretisch model al dan niet een juiste beschrijving van de ster geeft. Helaas is het zo dat röntgenstraling noch enige andere soort van straling, ons een beeld kan geven van het binnenste van sterren.² Er bestaat echter een alternatieve, directe methode om de interne structuur te bestuderen. Dit is de studie van waargenomen trillingen (oscillaties) van sterren; *asteroseismologie*. Deze oscillaties, die het stellaire equivalent zijn van aardbevingen, zijn niks anders dan golven die zich door de ster voortbewegen. Afhankelijk van de trillingssnelheid (frequentie) en golflengte dringt zo'n golf dieper of minder diep door in het inwendige van de ster. Op deze manier bevat iedere trilling informatie over de structuur op een bepaalde diepte in het inwendige, en door op slimme manier deze trillingen te analyseren, is het mogelijk om op een directe manier het binnenste van sterren in kaart te brengen. Dit mag ingewikkeld klinken voor lezers die niet vertrouwd zijn met de basisprincipes van de seismologie, toch heeft iedereen hier een intuïtief begrip voor. Gaat

¹ Anders gezegd: hoe testen we de correctheid van onze ideeën over de natuur van de ster?

² Een uitzondering vormt straling in de vorm van neutrino's. Zoals al eerder is opgemerkt, hebben neutrino's zeer weinig interactie met andere deeltjes, waardoor de meeste neutrino's ongestoord het binnenste van de Zon kunnen verlaten. Dit betekent dat waargenomen neutrino's een direct beeld kunnen geven van de structuur in het binnenste van de Zon, maar het betekent tevens dat het zeer moeilijk is om neutrino's waar te nemen.

u maar na hoe u door met uw vinger op een wijnglas te tikken, aan de hand van het geluid kunt bepalen of de kelk uit een dikke laag glas bestaat of juist een dun laagje, of het glas vol is of leeg. Het geluid dat u hoort, is immers niets anders dan de trilling van het glas. Wanneer dus uw tafelgenoot aan de linkerzijde beweert dat uw glas leeg is, en uw tafelgenoot aan de rechterzijde meent het tegendeel, hoeft u het glas niet gezien te hebben om te bepalen of deze moet worden bijgevuld of niet. Op analoge wijze is het mogelijk om informatie af te leiden over de inhoud van sterren en over de correctheid van theorieën die sterren trachten te beschrijven.¹

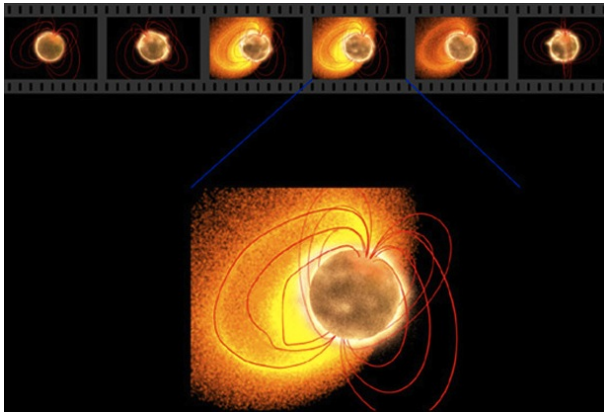
Willen we iets te weten komen over de interne structuur van een ster, of willen we onze theoretische ideeën toetsen, dan komt het er dus op aan om steroscillaties waar te nemen. En dat is in de praktijk waar de moeilijkheden beginnen. Het is immers nog maar de vraag of deze oscillaties wel aanwezig zijn, en als dat al zo is: zijn ze sterk genoeg om waargenomen te worden? Het moge duidelijk zijn dat hier een grote uitdaging ligt voor de observerende astronoom, die beperkt wordt door de gevoeligheid van zijn of haar telescoop. In sommige gevallen ligt de beperking in het feit dat bepaalde oscillaties uiterst zeldzaam zijn, zodat men simpelweg niet anders kan dan het moment afwachten dat zij zich voordoen. Dit is in het bijzonder het geval voor de trillingen van magnetars; het onderwerp van dit proefschrift.

Seismologie van magnetars

De omstandigheden waarbij magnetaroscillaties in sterke mate veroorzaakt worden, doen zich zó sporadisch voor, dat tot op heden slechts 3 gebeurtenissen zich voordeden (sinds 1979) waarbij de ster waarneembaar natrilde. Kort gezegd komt het erop neer dat, om een neutronenster zoals een magnetar te laten trillen, een gigantische kracht nodig is. Om een wijnglas te laten trillen,

¹Een ander voorbeeld waarin het verband tussen trillingen en de fysieke eigenschappen van materie duidelijk wordt, doet zich voor bij het bespelen van een snaarinstrument zoals een gitaar. In het geval dat men een enkele snaar bespeelt, wordt de hoogte van de toon (de snelheid van de trilling) bepaald door de positie waarop de snaar wordt ingedrukt, ofwel de lengte van de snaar. Anderzijds hangt de toonhoogte af van de spanning en de massa (dikte) van de snaar.

is een tikje met de vingers voldoende en om een gong te laten trillen, is een behoorlijke klopper nodig, maar om een neutronenster te laten trillen, zijn krachten nodig die het voorstellingsvermogen te boven gaan. Zulke krachten zijn echter, zoals al eerder opgemerkt, latent aanwezig in de enorme magnetische velden van magnetars, en het is vaak slechts een kwestie van tijd totdat deze in volle hevigheid vrijkomen. Een dergelijke uitbarsting van energie werd



Figuur 5: *Een artistieke interpretatie van een magnetar giant flare. In een fractie van een seconde vormt zich een ‘vuurbal’ in het magnetisch veld buiten de ster. In de loop van enkele minuten dooft deze vuurbal uit. (Illustratie van Robert Mallozzi)*

waargenomen op 27 december 2004, toen een magnetar met de obscure naam *SGR 1804-20*, in een heldere flits de aarde belichtte met intense, maar voor het oog onzichtbare röntgen- en gammastraling. Deze gebeurtenis, die een *Giant Flare* (reuzenuitbarsting) genoemd wordt, was in werkelijkheid zó krachtig dat er in een fractie van een seconde meer energie vrijkwam dan de totale energie die de Zon uitstraalt in honderdduizend jaar. Gedurende enkele minuten na de uitbarsting bleef de ster helder nagloeien, waarna de stralingsintensiteit weer terugkeerde naar het niveau van voor de uitbarsting. Bij nadere inspectie van de meetgegevens van deze nagloed, bleek de intensiteit van het waargenomen licht in zeer hoog tempo te fluctueren.

Een voor de hand liggende verklaring voor dit periodieke helderder en minder helder worden van de magnetar (tientallen tot honderden malen per seconde), is dat dit verschijnsel wordt veroorzaakt door hevige trillingen in de korst van de ster, vergelijkbaar met aardbevingen op Aarde. Een belangrijke aanwijzing die dit idee bevestigt, is dat de snelheid van de helderheids-

fluctuaties, ook wel ‘quasiperiodieke oscillaties’ (QPO’s) genoemd, vrij goed overeenkomt met de trillingssnelheid die men zou verwachten van de korst van een neutronenster. Daarbij komt, zoals we in hoofdstuk 2 van dit proefschrift aantonen, dat het precies dit soort ‘korstrillingen’ zijn, waarvan men verwacht dat ze ontstaan tijdens een reuzenuitbarsting. De vraag die zich voordoet, is dus wat de quasiperiodieke oscillaties ons kunnen vertellen over de interne structuur van neutronensterren. Om deze vraag adequaat te kunnen beantwoorden, moeten we allereerst, vanuit een theoretisch standpunt, een idee hebben van de natuurkundige aard van deze trillingen. Dit is het onderwerp dat in dit proefschrift behandeld wordt. De vragen die aan bod komen, zijn onder andere:

Hoe planten golven zich voort in een supervloeistof zoals die bestaat binnen in een neutronenster? (Hoofdstuk 1) Hoe en hoe sterk trilt een magnetar na een reuzenuitbarsting? (Hoofdstuk 2) Wat is het effect van het sterke magnetische veld op de trillingen van de korst? En hoe kunnen we ‘sterbevingen’ van magnetars het beste simuleren? (Hoofdstukken 3 en 4) De onderwerpen van de verschillende hoofdstukken zijn hieronder kort uiteengezet.

Hoofdstuk 1: Golven in de kern van een neutronenster

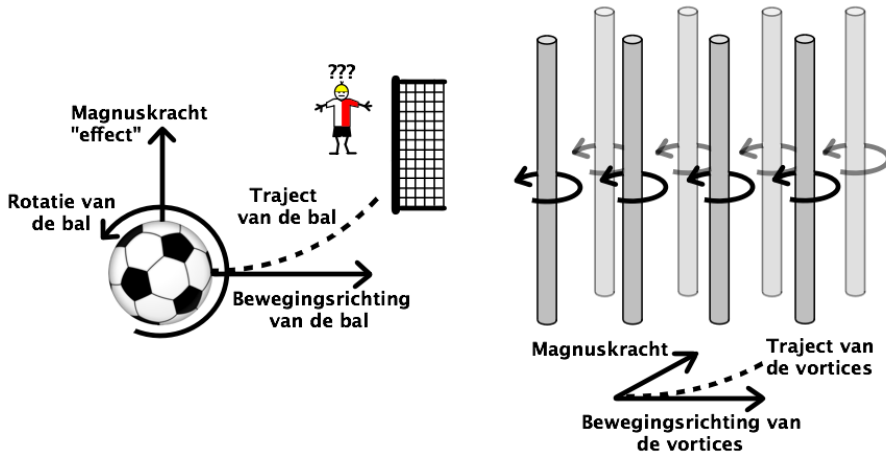
In hoofdstuk 1 wordt het fysische karakter van golven (trillingen) in de vloeibare kern van een neutronenster onder de loep genomen. Een factor die bepalend is voor de eigenschappen van een golf, is de staat waarin het medium zich bevindt. Zo gedragen golven in een vaste stof zich over het algemeen heel anders dan golven in een vloeistof of een gas.¹ Op dezelfde manier is de toestand van de materie binnen in een neutronenster bepalend voor het karakter van de golven die de ster doen trillen. Vanuit een theoretisch standpunt

¹Een fundamenteel verschil tussen golven in een vloeistof en golven in een vaste stof, is dat een vaste stof, in tegenstelling tot een vloeistof, weerstand biedt tegen zogenaamde ‘shear motion’ ofwel schuifbeweging. Deze schuifbewegingen kan men zich voorstellen als auto’s op de linkerrijbaan van een snelweg die auto’s op de rechterrijbaan proberen in te halen. In een vaste stof zou dit ‘inhalen’ onmogelijk zijn, omdat de deeltjes (auto’s) als het ware aan elkaar vastzitten. In een vloeistof is dit niet het geval en bewegen de deeltjes vrij langs elkaar.

verwacht men dat de neutronen in het binnenste van een neutronenster zich in een zeldzame staat van vloeibaarheid bevinden; superfluiditeit. Wat een supervloeistof bijzonder maakt ten opzichte van een normale vloeistof (zoals water), is dat het volledig vrij is van viscositeit (stroperigheid) en dat een supervloeistof als geheel niet kan roteren. Zou men, bij wijze van experiment, een supervloeistof in een theekopje proberen te roeren met een lepel, dan zou de vloeistof als geheel niet gaan roteren zoals thee dat wél zou doen. In plaats hiervan zouden diverse kleine wervelingen ontstaan, ook wel vortices (enkelvoud: vortex) genoemd, die zich verspreiden door de supervloeistof. Deze vortices kan men zich voorstellen als *microscopisch smalle tornado's* (zie figuur 6), die bestaan uit deeltjes die zich *niet* in een toestand van superfluiditeit bevinden en dus *wel* kunnen roteren. Hoe harder men vervolgens roert in het theekopje, hoe meer van dit soort vortices de kop op steken.

Het interessante is nu dat, omdat neutronensterren in het algemeen zeer snel om hun as draaien, de supervloeistof binnen in de ster gevuld is met een soort spaghetti van vortices. Om te begrijpen hoe golven zich in de ster voortplanten, moet men dus een goede beschrijving hebben van de interactie die individuele vortices hebben met elkaar en met andere deeltjes in de ster. Met name de interactie van de vortices met het magnetisch veld speelt een belangrijke rol. In hoofdstuk 1 bestuderen we het scenario dat vortices sterk beïnvloed worden door magnetische krachten. Het magnetisch veld treedt in dat geval op als een vork die door een bak spaghetti roert: wanneer het magnetisch veld beweegt, trekt het de vortices mee. Het verschil met de slierten spaghetti echter, is dat vortices roteren als een tornado, wat ervoor zorgt dat het zogenaamde 'Magnuseffect' optreedt. Dit effect, dat ook wel bekend is in balsporten (bijvoorbeeld als 'slice' en 'topspin' in het tennis), maakt dat de vortices een sterke tegenkracht geven die vervolgens weer invloed uitoefent op het (bewegende) magnetische veld. De vraag is: hoe sterk beïnvloedt deze 'Magnuskracht' de bewegingen van het magnetisch veld? Kan het magnetisch veld vrij bewegen, of wordt het beperkt door de vortices in de supervloeistof? Ofwel: is de spaghetti stijf en zwaar, zodat het veel kracht kost om erdoorheen te roeren? Of kost dit weinig moeite?

De analyse die in hoofdstuk 1 uiteengezet wordt, wijst uit dat de boven-



Figuur 6: Schematische weergave van het ‘Magnuseffect’ dat een belangrijke rol speelt in de dynamica van vortices in een supervloeistof. Het Magnuseffect is een bekend verschijnsel in balsporten. Als een voetbal (of tennisbal, golfbal etc.) geschoten wordt en daarbij een sterke rotatie meekrijgt, wordt het traject van de bal afgebogen door middel van een kracht die ‘Magnuskracht’ wordt genoemd (linkerplaatje). Hetzelfde effect is ook aanwezig in een supervloeistof (rechterplaatje). De vortices die een intrinsieke rotatie hebben, ondergaan een sterke Magnuskracht wanneer zij voortgestuwd worden door het magnetisch veld. De afbeelding aan de rechterzijde is een sterke vergroting van de werkelijkheid; in een magnetar is de afstand tussen individuele vortices een fractie van een millimeter.

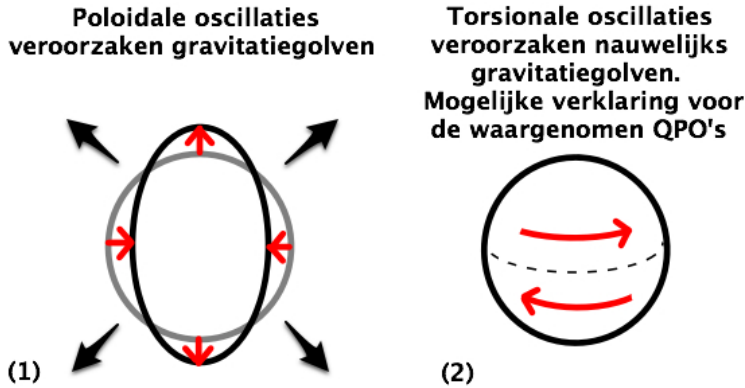
genoemde interactie afhankelijk is van de sterkte van het magnetisch veld en de rotatiesnelheid van de ster. Voor snel roterende neutronensterren kan de interactie tussen het magnetisch veld en de vortices een belangrijke rol spelen met uiteenlopende gevolgen. In het geval van een magnetar echter (zeer sterk magnetisch veld, trage rotatie) is de conclusie dat de vortices nauwelijks invloed uitoefenen op bewegingen (golven) van het magnetisch veld. Met andere woorden: de vortices geven geen noemenswaardige tegenkracht. Dit is een belangrijk resultaat met het oog op de berekeningen en simulaties die uitgevoerd en besproken worden in de volgende hoofdstukken.

Hoofdstuk 2: Het ontstaan van ‘magnetarbevingen’

In hoofdstuk 2 wordt onderzocht hoe en hoe sterk verschillende soorten van sterbevingen ontstaan na reuzenuitbarstingen op magnetars. Er worden twee verschillende mechanismen beschouwd die een reuzenuitbarsting en de daaruit volgende sterbevingen (oscillaties) kunnen veroorzaken. In beide scenario’s ontstaan de trillingen doordat de enorme druk- en trekkracht die het magnetisch veld al de tijd voor de uitbarsting op de ster uitoefende, plotseling wegvallen. (1) Eén mogelijkheid is dat een reuzenuitbarsting op een magnetar ontstaat ten gevolge van een enorme breuk van de korst. Zo’n breuk is het gevolg van sterke magnetische krachten die van binnenuit de ster de korst onder zulke hoge druk zetten, dat deze in een grote klap kraakt. Net als op Aarde zou zo’n breuk van de korst gepaard gaan met zeer sterke bevingen. (2) Een tweede mogelijkheid is dat het magnetisch veld buiten de ster (dus in de magnetosfeer), eveneens door grote magnetische spanningen, instabiel wordt en plotseling ‘breekt’. Zo’n gebeurtenis gaat gepaard met een enorm krachtige uitstoot van energie die de ster eveneens doet trillen. Het is overigens goed mogelijk dat beide mechanismen tegelijkertijd plaatsvinden tijdens een daadwerkelijke reuzenuitbarsting.

Een belangrijke vraag is welk soort van stertrillingen er ontstaat ten gevolge van beide scenario’s. Eén van de onderliggende motivaties voor deze vraag is dat het in theorie mogelijk is om bepaalde steroscillaties in de nabije toekomst waar te kunnen nemen met behulp van ‘gravitatiegolfdetectors’.¹ Sommige typen sterbevingen zijn efficiënter in het veroorzaken van gravitatiegolven dan andere. Met name de klasse van *poloïdale* oscillaties, die de ster als geheel vervormen (zie het linkerplaatje van figuur 7), zouden in theorie

¹Gravitatiegolfdetectors zijn astronomische instrumenten die momenteel in ontwikkeling zijn. Deze detectors zijn gevoelig voor gravitatiegolven en bieden zo, naast conventionele telescopen die licht waarnemen, een totaal nieuwe manier om naar het heelal te kijken. Gravitatiegolven worden voorspeld door Einstens *algemene relativiteitstheorie* en kan men omschrijven als periodieke schommelingen van ruimte en tijd. Deze golven verplaatsen zich net als licht met de lichtsnelheid door de ruimte en zorgen ervoor dat de ruimte lokaal periodiek iets inkrimpt en dan weer uitdijt. Het effect van een gravitatiegolf op een object is dus dat zijn lengte een heel klein beetje fluctueert. Deze schommelingen kunnen in theorie gemeten worden wanneer een gravitatiegolf de Aarde passeert, maar zijn over het algemeen zeer klein en daardoor uiterst moeilijk om waar te nemen. Met de huidige ontwikkelingen (anno 2012) is te verwachten dat gravitatiegolfdetectors binnen enkele jaren gevoelig genoeg zijn om de eerste gravitatiegolven te detecteren.



Figuur 7: Twee typen oscillaties die onderzocht worden in hoofdstuk 2. Het linkerplaatje (1) geeft de vervorming van de ster weer t.g.v. een poloïdale oscillatie. De ster wordt periodiek uitgerekt en dan weer afgeplat. Deze beweging veroorzaakt sterke fluctuaties in de ruimtetijd, die in theorie waargenomen zouden kunnen worden in de vorm van gravitatiegolven. De poloïdale oscillaties die ontstaan tijdens uitbarstingen op magnetars zijn echter te zwak om door toekomstige detectors gemeten te worden. Het rechterplaatje (2) geeft torsionale oscillaties weer. In dit voorbeeld bewegen het noordelijk en het zuidelijk halfrond periodiek in tegenovergestelde richtingen. In tegenstelling tot de poloïdale oscillaties, vervormen de torsionale oscillaties de ster niet. Ondanks het feit dat torsionale oscillaties zeer sterk zijn na een reuzenuitbarsting, veroorzaakt dit type van sterbevingen weinig gravitatiegolven en zal dus niet waarneembaar zijn voor toekomstige gravitatiegolfdetectors.

waargenomen kunnen worden, mits deze voldoende sterk aangeslagen worden tijdens reuzenuitbarstingen. In theorie bestaat dus de mogelijkheid om seismologie van magnetars te bedrijven met behulp van gravitatiegolfdetectors. Een andere klasse van sterbevingen zijn de *torsionale* oscillaties (zie het rechterplaatje in figuur 7). Deze bevingen zijn relatief traag en laten de ster horizontaal schudden (zoals de meeste aardbevingen op Aarde). Aangezien deze oscillaties de ster niet vervormen, zijn zij inefficiënt in het voortbrengen van gravitatiegolven. Desalniettemin zijn de torsionale sterbevingen zeer interessant vanwege het feit dat hun trillingsnelheid zeer goed overeenkomt met de ‘quasiperiodieke oscillaties’ (QPO’s) die waargenomen werden na reuzenuitbarstingen op magnetars. Het vermoeden bestaat dan ook dat deze QPO’s

in werkelijkheid veroorzaakt werden door torsionale oscillaties.

De berekeningen die uitgevoerd worden in hoofdstuk 2 laten zien dat de poloidale oscillaties van een magnetar na een reuzenuitbarsting te zwak zijn om waargenomen te worden met toekomstige gravitatiegolfdetectors. Dit is jammer, want het sluit de mogelijkheid uit om deze speciale klasse van oscillaties in de nabije toekomst te bestuderen door middel van gravitatiegolven. Dezelfde berekeningen tonen echter aan dat de torsionale oscillaties zeer sterk aangeslagen worden tijdens reuzenuitbarstingen. Dit bevestigt het vermoeden dat zij de oorsprong zijn van de waargenomen QPO's. In de hoofdstukken 3 en 4 wordt dit type van sterbevingen nader onderzocht.

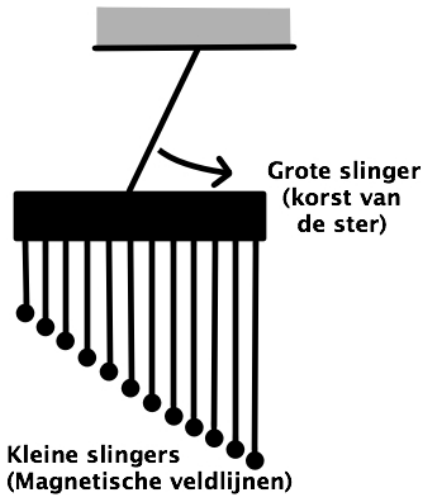
Hoofdstukken 3 en 4: Een dynamisch model van een magnetar

De hoofdstukken 3 en 4 vormen de hoofdmoot van dit proefschrift. In deze hoofdstukken worden de relevante natuurkundige elementen samengevoegd om zo tot een dynamisch model van een magnetar te komen. Dit wil zeggen dat het model in het bijzonder dient om de bewegingen, dus trillingen, van een magnetar te kunnen nabootsen in de computer. De kunst daarbij is om uit deze ingewikkelde mix van natuurkundige bouwstenen (magnetische velden, supervloeistof, vaste korst etc.) een zekere eenvoud en essentie te ontdekken. Immers, wanneer men een probleem tot zijn essentie weet te reduceren, verkrijgt men het grootste inzicht.

In de loop van de jaren zijn er diverse groepen onderzoekers geweest die het probleem van magnetaroscillaties benaderd hebben door middel van de zogenaamde 'brutekrachtmethode'. Deze benadering houdt in dat men een zo realistisch mogelijk model van een magnetar samenstelt, om deze vervolgens te laten doorrekenen met zeer geavanceerde computercodes die vele subtiele fysische processen integraal in rekening nemen. Alhoewel men op die manier zeer indrukwekkende resultaten heeft weten te bereiken, is het probleem van deze benadering dat het in het algemeen moeilijk is om deze goed te interpreteren. De computer geeft immers geen tekst en uitleg, alleen het resultaat.

In dit opzicht vormt het werk dat gepresenteerd wordt in de hoofdstukken 3 en 4 een aanvulling op de ‘brutekrachtmethode’ in de zin dat het een belangrijk inzicht biedt in de fysische processen die ten grondslag liggen aan het probleem. Daarbij wordt in deze hoofdstukken een alternatief rekenkundig model voor magnetaroscillaties gegeven dat niet onderdoet voor de meer geavanceerde computercodes. De essentie en de kracht van deze methode is dat het, in tegenstelling tot andere benaderingen, de magnetar ontbindt in losse onderdelen en deze individueel analyseert alvorens de afzonderlijke componenten weer samen te voegen. Zo worden de trillingen van de korst afzonderlijk berekend, evenals de trillingen van vele individuele magnetische veldlijnen in de kern van de ster. Vervolgens worden de korst en de magnetische veldlijnen weer samengevoegd en worden hun wederzijdse interacties berekend. Men kan de magnetar dus opvatten als een collectie oscillerende onderdelen die aan elkaar gekoppeld zijn. In figuur 8 is dit principe schematisch uitgebeeld als een grote slinger (korst van de ster) die gekoppeld is aan een groot aantal kleine slingers (magnetische veldlijnen). Aangezien het relatief eenvoudig is om de bewegingen van een systeem van gekoppelde oscillatoren te berekenen, biedt het rekenkundig model van de hoofdstukken 3 en 4 het grote voordeel dat deze het mogelijk maakt om lange en zeer nauwkeurige simulaties van magnetars uit te voeren, zonder dat dit de computer té veel tijd kost. Bovendien zijn bepaalde karakteristieke eigenschappen van een trillende magnetar intuïtief te begrijpen in termen van de trillingen van zijn losse onderdelen, namelijk de korst en het magnetisch veld.

Hoe werkt deze interactie tussen de trillende korst en magnetische kern van de ster? Om het antwoord op deze vraag te begrijpen is het van belang om een intuïtief begrip te hebben van de aard van magnetisme. Uit de dagelijkse praktijk weet men dat de magnetische eigenschappen van een materiaal samenhangen met het vermogen van dit materiaal om elektrische stroom te geleiden. Zo wordt een stuk ijzer (geleider van stroom) sterk aangetrokken tot een magneet, terwijl een stuk plastic (elektrische isolator) geen kracht voelt. De magnetische kracht is in werkelijkheid niets anders dan de aantrekking (of afstoting) van stromen elektrisch geladen deeltjes die zich in een materiaal



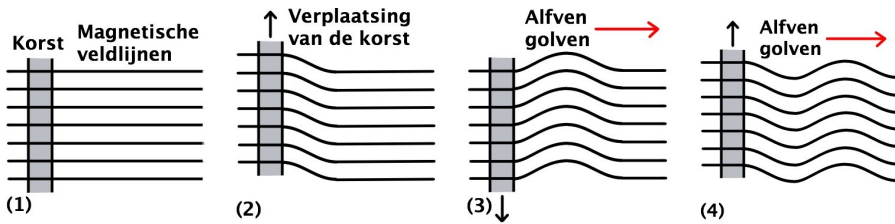
Figuur 8: *Trillingen van een magnetar zijn te vergelijken met de bewegingen van een grote slinger, die de korst van de ster voorstelt en die gekoppeld is aan een groot aantal kleinere slingers, die de magnetische veldlijnen voorstellen. Wanneer de korst (grote slinger) in beweging wordt gebracht, trekt deze de magnetische veldlijnen (kleine slingers) mee, die op hun beurt beginnen te slingeren, ieder op zijn karakteristieke snelheid (kortere magnetische veldlijnen slingeren/trillen van nature sneller dan langere veldlijnen). De trillende veldlijnen beïnvloeden op hun beurt de beweging van de korst.*

bevinden. Zo is het ook in een magnetar, waar zeer sterke elektrische stromen een gigantisch sterk magnetisch veld voortbrengen (een voorbeeld van een magnetisch veld van een magnetar is gegeven in figuur 4). De magnetische krachten die zo ontstaan, houden de geladen deeltjes die in de ster voorkomen, voornamelijk elektronen en protonen, als het ware in een houdgreep. Deze deeltjes kunnen namelijk vrij bewegen langs de magnetische veldlijnen, maar ondervinden een sterke magnetische tegenkracht wanneer ze hiervan afwijken en zijn op deze manier gebonden aan de veldlijnen als kralen aan een ketting. Dit effect is bijzonder sterk in neutronensterren, die uitstekende elektrische geleiders zijn¹. Het gevolg is tevens dat de magnetische veldlijnen gebonden zijn aan de vaste materie van de korst en de vloeibare materie van de kern van de ster. Wanneer de korst in beweging komt worden de veldlijnen, zowel in de korst als in de kern, meegetrokken. Deze veldlijnen gedragen zich min of meer als de gespannen snaren op een gitaar en worden door de snelle

¹Zoals al eerder is opgemerkt voorspelt de theorie dat de protonen in neutronensterren een supergeleider vormen. Supergeleiders geleiden elektrische stroom zonder weerstand, zodat de protonen zeer sterk gebonden zijn aan de magnetische veldlijnen.

beweging van de korst aan het trillen gebracht (zie figuur 9), ieder op zijn eigen, karakteristieke trillingssnelheid. Deze magnetische golven verplaatsen zich langs de magnetische veldlijnen door ster, komen na korte tijd aan de andere kant van de ster aan bij de korst en leveren op hun beurt weer een sterke trekkracht die de beweging van de korst weer beïnvloedt. Op deze manier ontstaat er een ingewikkeld samenspel tussen de bewegingen van de korst en die van de magnetische veldlijnen in de kern van de ster. Het uiteindelijke resultaat in de meeste gevallen, is dat de korst zijn bewegingsenergie op vrij korte termijn overdraagt aan de magnetische sterkern en zijn initiële trillingssnelheid verliest. In plaats daarvan wordt de beweging van de korst vrijwel geheel bepaald door de bewegingen van de vele magnetische veldlijnen. Een belangrijk punt hierbij, is dat deze magnetische veldlijnen allemaal een unieke trillingssnelheid hebben die varieert van veldlijn tot veldlijn. Het gevolg is dat de korst op een willekeurig moment in verschillende richtingen getrokken wordt door de veldlijnen. Deze tegengerichte krachten tellen op tot een nettokracht van vrijwel nul en het resultaat is dat de korst vrijwel tot stilstand komt. Dit principe wordt in vaktermen ook wel *resonante absorptie* of *Landau damping* genoemd en vormt de belangrijkste eigenschap van magnetar oscillaties. Deze *resonante absorptie* vindt alleen plaats wanneer de trillingssnelheid van de korst gelijk is (in resonantie is) aan de trillingssnelheid van een aantal magnetische veldlijnen in de kern van de ster. Als dit niet het geval is, dempt de trilling van de korst niet of nauwelijks. Dit leidt tot de conclusie dat de verschillende waargenomen trillingen (QPO's) in feite duiden op de afwezigheid van magnetische veldlijnen met overeenkomende trillingssnelheden.

De resultaten van het rekenkundig model dat in de hoofdstukken 3 en 4 beschreven wordt, alsmede de numerieke resultaten van andere groepen wetenschappers, geven een gedeeltelijke verklaring voor de waargenomen oscillaties van magnetars. Een aantal van de sterkste 'quasi periodieke oscillaties' komt zeer goed overeen met de uitkomst van numerieke berekeningen. Er is echter een klein aantal uitzonderingen op dit positieve resultaat. Met name de zeer 'snelle' QPO's, de waargenomen trillingen met de hoogste trillingssnelheden, lijken moeilijk verklaard te kunnen worden met het model. Dit kan



Figuur 9: *Hoe ontstaan magnetische golven (Alfvéngolven) in het interie van een magnetar? In deze vier plaatjes wordt schematisch afgebeeld hoe bewegingen in de korst van een magnetar magnetische golven lanceren in de ster. De plaatjes laten een close-up zien van een deel van de korst en een aantal magnetische veldlijnen. (1) Zowel de korst als de magnetische veldlijnen zijn in een rusttoestand. Op een gegeven moment (2) raakt de korst in beweging. Doordat de magnetische veldlijnen vastzitten aan de korst, worden deze meegetrokken wanneer de korst zich verplaatst. De korst schudt heen en weer en veroorzaakt magnetische (Alfvén)golven die zich langs de veldlijnen in het binnenste van de ster voortplanten (3) en (4).*

erop duiden dat de huidige ideeën over de interne structuur van magnetars aangepast moeten worden. De berekeningen zijn immers gebaseerd op een gedetailleerd stermodel, waar op zich nog enige onzekerheid over bestaat. Zo is het goed mogelijk dat de huidige aannames over de structuur van de binnenste kern van neutronensterren niet correct zijn en het is daarom van groot belang in de toekomst alternatieve stermodellen te bestuderen.