

CURSUSBOEK STERRENKUNDE

THOMAS IN'T VELD
WIM VAN ROY
HANS COECKELBERGHS
PETER POLLET
BRUNO VAN DE CASTEELE
JOHANNES BONSE

Redactie
THOMAS IN'T VELD

Eerste uitgave: oktober 1985
Twaalfde uitgave: december 2010 (volledig herzien)
Tweede druk van de twaalfde uitgave: juli 2012

Uitgegeven door WEGA vzw.
Gedrukt door Acco cvba.

Deze uitgave werd gezet met het gratis typesetting systeem X_YT_EX (www.tug.org/xetex)
in het lettertype *Adobe Caslon Pro*, letterpunt 11.

Niets uit deze uitgave mag worden verveelvoudigd of openbaar gemaakt, door middel van druk, fotokopie, of op enige andere wijze, zonder voorafgaande schriftelijke toestemming van de uitgever.

© WEGA 2012

D/2012/5907/1

Voorwoord

Het heelal verbaast ons nog altijd. Of het nu zwarte gaten, supernovae, verre planeten of water op Mars is, we worden overspoeld met telkens nieuwe ontdekkingen. Foto's van exploderende sterren of mysterieuze verschijnselen ver in de ruimte halen regelmatig de media. Op het internet zien we de laatste foto's van de ruimtetelescoop Hubble, of de nieuwste lanceringen naar het ruimtestation ISS.

Betrouwbare, degelijke en tegelijk toegankelijk geformuleerde achtergrondinformatie over de moderne sterrenkunde is echter veel moeilijker te vinden. Wat is de betekenis van een nieuwe ontdekking, van een Hubble-foto? Hoe verandert ons beeld van het heelal erdoor? Hoe weten sterrenkundigen in feite alles wat ze over het heelal verkondigen? Dit boek is er voor wie daarnaar op zoek is.

Het is een boek voor beginners, dat geen gespecialiseerde voorkennis veronderstelt, alleen de bereidheid om af en toe enkele uurtjes op een aangename manier de hersenen aan het werk te zetten. Het 'Cursusboek Sterrenkunde' is geschreven als begeleidend boek bij een cursus sterrenkunde, maar de ervaring heeft geleerd dat het ook perfect op zichzelf bruikbaar is, voor zelfstudie, of gewoon om op een interessante manier te verpozen. De auteurs hebben geprobeerd het boek helemaal up-to-date te maken, met de recentste ontdekkingen en ontwikkelingen tot op het moment van schrijven.

Het hoeven trouwens niet altijd Hubble-foto's te zijn: iedereen kan zelf de nachtelijke hemel bekijken, en al met een verrekijker of een kleine telescoop zijn er talloze wonderlijke verschijnselen te observeren. Duizenden amateurastronomen hebben de sterrenkunde als hobby gekozen. Ook voor wie met amateursterrenkunde wil beginnen, en wie zelf zijn of haar weg wil gaan zoeken in het heelal, is dit boek bedoeld.

Dit boek is ondertussen aan zijn 12e uitgave toe. Sinds de eerste editie in oktober 1985 is het uitgegroeid van een verzameling stencils bijgeleverd bij de cursus sterrenkunde tot een volwaardige uitgave die over heel de Benelux wordt gelezen. Dit werk zou niet mogelijk geweest zijn zonder de onschatbare bijdragen van, onder andere, Johan Camps, Sven Charleer, Joris De Ridder, Karen Derwael, Bruno Dufays, Johann Falter, Roald Hayen,

Filip Hendrickx, Els Hendriks, Piet Hendriks, Laura Hermans, Robert Houdart, Peter Leyten, Gunilla Meeus, Gwendolyn Meeus, Titia Phalet, Jo Raeymaekers, Alain Rega, Els Ronsmans, Steven Stroeykens, Katrien Uytterhoeven, Bruno Van de Castele, Herman Van den Heuvel, Alain Van der Jeught, Marc Vanlaer, Chris Van den Broeck, Jan Vanwildemeersch, Bart Veeckmans, Joost Verheyden en Jens Verstraeten.

De auteurs,
Leuven, december 2010

Inhoudsopgave

| | |
|--|-----------|
| Voorwoord | iii |
| 1 Kennismaking met de sterrenkunde | 1 |
| 1.1 De sterrenhemel | 1 |
| 1.2 De hemel in beweging | 1 |
| 1.3 Telescopen | 3 |
| 1.4 Het heelal in een notendop | 4 |
| 1.5 Waaruit is het heelal opgebouwd? | 4 |
| 1.6 Krachten, onzichtbare materie en energie | 7 |
| 1.7 Basisbegrippen | 8 |
| 2 Overzicht van het zonnestelsel | 13 |
| 2.1 Structuur van het zonnestelsel | 13 |
| 2.2 Ontstaan van het zonnestelsel | 15 |
| 3 De planeten | 19 |
| 3.1 Mercurius | 19 |
| 3.2 Venus | 21 |
| 3.3 Aarde | 22 |
| 3.4 Mars | 29 |
| 3.5 Jupiter | 32 |
| 3.6 Saturnus | 35 |
| 3.7 Uranus | 38 |
| 3.8 Neptunus | 39 |

| | | |
|----------|--|-----------|
| 4 | Kleine objecten in het zonnestelsel | 43 |
| 4.1 | Definities | 43 |
| 4.2 | Algemeen overzicht | 44 |
| 4.3 | Naamgeving | 45 |
| 4.4 | De planetoidengordel en het centrale deel van het zonnestelsel | 46 |
| 4.5 | Trans-Neptuniaanse objecten (TNO's) | 51 |
| 4.6 | Kometen | 54 |
| 4.7 | Meteoren, meteoroiden, en meteorieten | 58 |
| 5 | Het zonnestelsel in beweging | 63 |
| 5.1 | De zwaartekracht | 63 |
| 5.2 | De banen van de planeten | 63 |
| 5.3 | De wetten van Kepler | 64 |
| 5.4 | Het pad van planeten aan de hemel | 66 |
| 5.5 | Schijngestalten | 67 |
| 5.6 | Maansverduisteringen | 69 |
| 5.7 | Zonsverduisteringen | 70 |
| 5.8 | Seizoenen | 71 |
| 5.9 | Lagrangepunten | 73 |
| 6 | De zon | 75 |
| 6.1 | Energieproductie | 76 |
| 6.2 | Bouw van de Zon | 78 |
| 6.3 | Het oppervlak van de Zon | 79 |
| 6.4 | De Zonnecyclus | 81 |
| 6.5 | Het ruimteweer | 82 |
| 6.6 | Poollicht | 83 |
| 7 | Ontstaan van sterren | 85 |
| 7.1 | Het Hertzsprung-Russell diagram | 85 |
| 7.2 | Het ontstaan van een ster | 85 |

| | | |
|-----------|---|------------|
| 8 | Het einde van sterren | 89 |
| 8.1 | Het einde van een kleine ster | 89 |
| 8.2 | Novae | 92 |
| 8.3 | Het einde van een grote ster | 92 |
| 8.4 | Supernovæ | 93 |
| 8.5 | Neutronensterren en Pulsars | 95 |
| 8.6 | Zwarte Gat en | 96 |
| 8.7 | Gamma-uitbarstingen | 98 |
| 9 | Sterren concreet | 101 |
| 9.1 | Naamgeving van sterren | 101 |
| 9.2 | Beweging van sterren | 102 |
| 9.3 | Veranderlijke sterren | 103 |
| 10 | Sterrenstelsels | 107 |
| 10.1 | Onze melkweg | 107 |
| 10.2 | Interstellaire materie | 108 |
| 10.3 | Sterren in de Melkweg | 112 |
| 10.4 | Spiraalarmen | 116 |
| 10.5 | Donkere materie in sterrenstelsels | 119 |
| 10.6 | Een zwart gat in het centrum van de Melkweg | 121 |
| 10.7 | Kernen van sterrenstelsels | 121 |
| 11 | Clusters van sterrenstelsels | 127 |
| 11.1 | Clusters | 127 |
| 11.2 | Superclusters | 127 |
| 11.3 | En verder? | 128 |
| 11.4 | Satellietstelsels | 128 |
| 11.5 | Interactie tussen sterrenstelsels | 129 |
| 11.6 | Gravitatielenzen | 131 |
| 11.7 | Donkere materie rond sterrenstelsels | 132 |

| | |
|--|------------|
| 12 Evolutie van het heelal | 135 |
| 12.1 Wat nemen we waar? | 135 |
| 12.2 Het jonge heelal | 138 |
| 12.3 Verdere evolutie | 143 |
| 13 Leven in het heelal | 151 |
| 13.1 Het ontstaan van leven | 151 |
| 13.2 Leven op Aarde | 152 |
| 13.3 Leven in het heelal | 153 |
| 13.4 Is er buitenaards leven? De Drake-vergelijking. | 155 |
| 13.5 De paradox van Fermi | 157 |
| 13.6 SETI | 158 |
| 14 Sterrenkunde gisteren en vandaag | 161 |
| 14.1 De oorsprong van de sterrenkunde | 161 |
| 14.2 De Griekse sterrenkunde | 162 |
| 14.3 Sterrenkunde in de laatste vier eeuwen | 163 |
| 14.4 Ruimtevaart | 165 |
| 14.5 Het heelal begrijpen | 168 |
| 14.6 Astronomen aan het werk | 170 |
| 15 Licht | 173 |
| 15.1 Licht uit het heelal | 173 |
| 15.2 Spectroscopie | 175 |
| 15.3 Telescopen voor zichtbaar licht | 183 |
| 15.4 Het licht registreren | 187 |
| 15.5 Telescopen voor andere golflengten en andere soorten straling | 188 |

| | |
|---|------------|
| 16 Amateursterrenkunde | 191 |
| 16.1 Wat valt er te zien? | 191 |
| 16.2 Waarnemingen voorbereiden | 201 |
| 16.3 Sterrenkunde in groep | 202 |
| 16.4 De weg vinden aan de hemel | 203 |
| 16.5 Coördinaten | 205 |
| | |
| 17 Instrumenten voor de amateurastronoom | 207 |
| 17.1 Lichtwinst | 207 |
| 17.2 Vergroting | 208 |
| 17.3 Verrekijkers | 209 |
| 17.4 Verschillende types telescopen | 210 |
| 17.5 Montering | 211 |
| 17.6 Keuze van een telescoop | 213 |
| 17.7 Fotografie | 214 |
| | |
| 18 Onopgeloste vragen in de sterrenkunde | 219 |
| 18.1 Waarom is er materie in ons heelal? | 219 |
| 18.2 Waarom was het jonge universum zo homogeen? | 220 |
| 18.3 En waar komen dan de grote structuren van het heelal vandaan? | 220 |
| 18.4 Waaruit bestaat de donkere materie? | 221 |
| 18.5 Hoe zijn de eerste sterren ontstaan? | 222 |
| 18.6 Wat is de donkere energie precies? | 222 |
| 18.7 Hoe zag het heelal eruit op het moment van de Big Bang zelf? | 223 |
| 18.8 Onverenigbaarheid van kwantummechanica en algemene relativiteit. | 223 |
| 18.9 Wat is het uiteindelijke lot van het heelal? | 224 |
| 18.10Waarom heeft de tijd een richting? | 225 |
| 18.11Wat is tijd? | 225 |
| 18.12Veranderen de wetten van de fysica in de tijd? | 226 |

| | | |
|----------|--|------------|
| A | Magnitudes | 227 |
| B | Meten van afstanden | 229 |
| B.1 | De derde dimensie | 229 |
| B.2 | De aarde en de maan: driehoeksmetkunde | 229 |
| B.3 | De zon en de planeten: parallax | 231 |
| B.4 | Sterren: parallax en spectroscopie | 233 |
| B.5 | Melkwegstelsels: <i>standard candles</i> en roodverschuiving | 234 |
| B.6 | Andere technieken | 235 |
| C | Hemelmechanica | 237 |
| C.1 | De Universele Gravitatiëkracht | 237 |
| C.2 | De Wetten van Kepler | 237 |
| C.3 | De Wetten van Newton | 239 |
| C.4 | Referentiekaders en de vorm van de ruimte | 240 |
| D | Data en informatie | 243 |
| | Periodiek Systeem der Elementen | 247 |
| | Verantwoording en bronnen | 247 |

Hoofdstuk 1

Kennismaking met de sterrenkunde

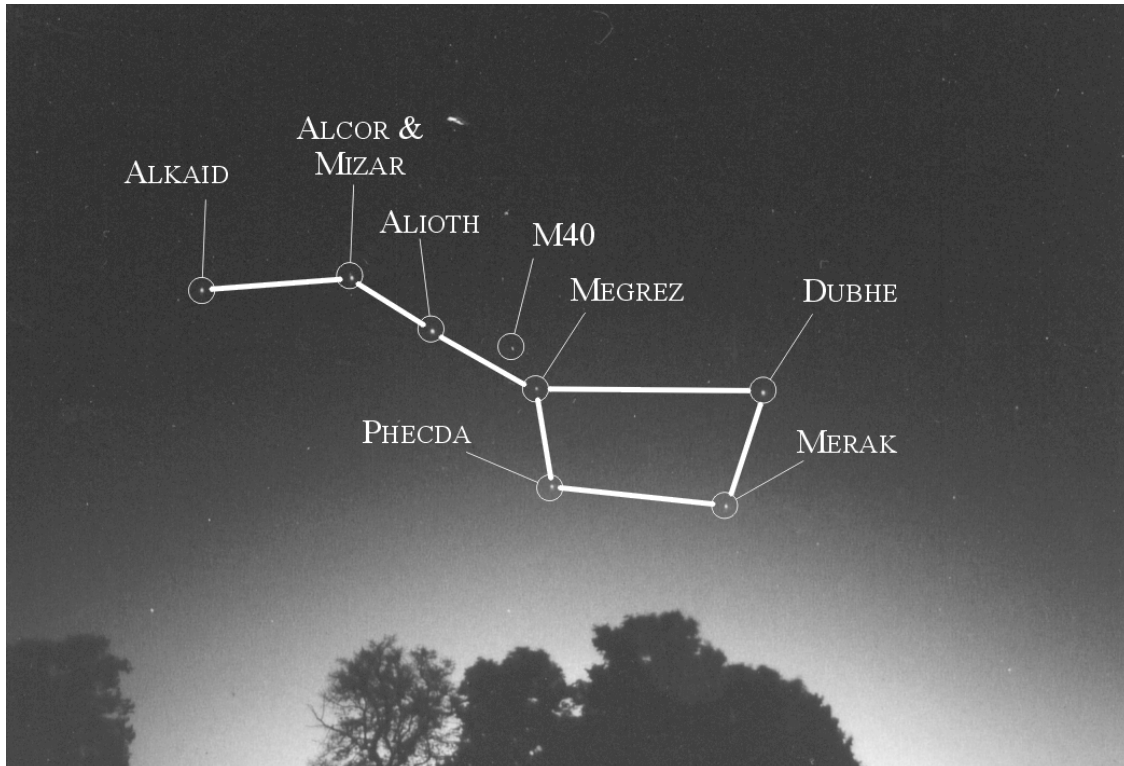
1.1 De sterrenhemel

Het eerste wat opvalt aan de nachtelijke hemel, althans wanneer er geen wolken of straatlampen in de weg zitten, zijn de sterren. Kleine lichtpuntjes, overwegend wit van kleur, die volkomen willekeurig verspreid lijken over het uitspannel. Sommigen lijken in groepjes dicht bij elkaar te staan, anderen staan geïsoleerd. Vaak vormen enkele sterren een patroon waar je met wat verbeelding iets in kan herkennen, een dier, een mens of wat anders. Die zogeheten sterrenbeelden dragen vanouds fantasievolle namen als de Leeuw, de Grote Beer, Hercules of de Slangendrager.

Veel betekenis hebben de sterrenbeelden niet: in bijna alle gevallen hebben de sterren erin helemaal niets met elkaar te maken, behalve dat ze gezien vanop Aarde toevallig min of meer in dezelfde richting staan. Sterrenbeelden zijn voor sterrenkundigen wel handig om de weg te vinden aan de hemel en om aan te duiden waar een bepaald object ongeveer te vinden is.

1.2 De hemel in beweging

De sterrenhemel staat geen moment stil. In het oosten komen sterren op en in het westen gaan er onder. Elke ster beschrijft in de loop van de nacht een pad aan de hemel, op precies dezelfde manier als de Zon overdag. Het resultaat is dat de hele sterrenhemel één keer per dag lijkt te draaien omheen een punt vlakbij de Poolster. Dat komt natuurlijk – weten we nu – doordat de Aarde eenmaal per dag om haar as draait, maar het heeft de astronomen vele eeuwen gekost om dat te achterhalen (zie hoofdstuk 14).



FIGUUR 1.1: Het sterrenbeeld 'Grote Beer'

Een andere soort beweging aan de nachtelijke hemel die de sterrenkundigen eeuwenlang voor raadsels heeft geplaatst is die van de *planeten*. Dat zijn lichtpuntjes die er op het eerste gezicht precies als sterren uitzien, maar op een andere manier bewegen.

De echte sterren of 'vaste sterren' maken wel allemaal de dagelijkse wentelbeweging rond de Poolster mee, maar daarbij verschuiven ze niet ten opzichte van elkaar: de vorm van de sterrenbeelden verandert niet (tenzij heel langzaam, over duizenden jaren, maar dat is een ander verhaal, zie hoofdstuk 9). Planeten verplaatsen zich echter wél tussen de sterren, een verplaatsing die vaak duidelijk van week tot week te zien is.

Dat komt, weten we nu, doordat de planeten allemaal rond de Zon draaien. De Aarde doet dat ook; ze draait éénmaal rond de Zon in één jaar – een beweging waarvan de gevolgen ook aan de sterrenhemel te zien zijn: één omwenteling van de sterrenhemel rond de Poolster (of één draaiing van de Aarde rond haar as) duurt in werkelijkheid geen 24 uur maar slechts 23 uur en 56 minuten en 4 seconden.

Omdat de Aarde op die tijd iets verder op haar baan rond de Zon heeft bewogen, moet ze nog 4 minuten verder draaien om weer precies naar de Zon te kijken. Dit zorgt ervoor dat Zon langzaam doorheen de sterrenhemel loopt, of nog dat er 's nachts, wanneer de Zon onder de horizon staat, van seizoen tot seizoen verschillende sterrenbeelden te zien zijn. (De sterrenbeelden die in een bepaald seizoen niet zichtbaar zijn, zijn niet 'weg', maar passeren overdag aan de hemel).

De oorzaak van de beweging van de planeten omheen de Zon is de *zwaartekracht* of *gravitatie*: de aantrekkende kracht die alle voorwerpen in het heelal op elkaar uitoefenen. Hoe zwaarder een voorwerp is (of: hoe meer massa het heeft), hoe sterker de zwaartekracht ervan. De Zon heeft zo'n grote massa dat ze alle planeten in haar greep houdt: haar zwaartekracht dwingt de planeten omheen de Zon te blijven draaien (hoofdstuk 5). De zwaartekracht is, zoals we zullen zien in de rest van dit boek, verantwoordelijk voor zeer veel van wat er gebeurt in het heelal, van de bewegingen van de planeten, over het ontstaan van sterren, tot zelfs de evolutie van het heelal als geheel.

1.3 Telescopen

Aanvankelijk was sterrenkunde voornamelijk de studie van de posities en de bewegingen van de hemellichamen. Maar door de uitvinding van de *telescoop* en van moderne meetinstrumenten hebben sterrenkundigen ook veel kunnen achterhalen over de *aard* van de hemellichamen, bijvoorbeeld over hun samenstelling. Telescopen maken sterren zichtbaar die te zwak zijn of te ver weg staan om ze met het blote oog te kunnen onderscheiden, en ze leveren een scherp en vergroot beeld.

Door *spectroscopie*, een techniek om licht te analyseren (hoofdstuk 15), kunnen sterrenkundigen achterhalen uit welke chemische stoffen hemellichamen samengesteld zijn en hoe warm het er is. De techniek laat bijvoorbeeld ook toe, door het Dopplereffect (hoofdstuk 15) te benutten, te meten met welke snelheid een hemellichaam zich van ons weg af beweegt of naar ons toekomt. Dankzij al die technieken zijn sterrenkundigen tot het volgende beeld van het heelal gekomen.

1.4 Het heelal in een notendop

De Aarde is een van de planeten die rond de Zon draaien. Bij de andere planeten zijn er die enigszins op de Aarde lijken – bollen van steen en metaal – en er zijn er die veel groter zijn en grotendeels uit gassen en vloeistoffen bestaan. De planeten zijn (in volgorde van toenemende afstand tot de Zon): Mercurius, Venus, Aarde, Mars, Jupiter, Saturnus, Uranus, en Neptunus.

Rond de meeste planeten cirkelen één of meer natuurlijke *satellieten* of *manen*. De Aarde heeft één maan, “de” Maan. Behalve de planeten draaien er rond de Zon ook een groot aantal kleinere objecten, van microscopische stofdeeltjes tot forse rotsblokken. Daartoe horen onder meer de *dwergplaneten* (zoals Pluto), de *planetoïden*, en de *kometen* (hoofdstuk 4). Het geheel van de Zon en alles wat eromheen draait, heet het zonnestelsel.



FIGUUR 1.2: Een 25cm spiegeltelescoop.

De Zon zelf is een ster, een reusachtige bol van gloeiend heet gas (plasma in vaktermen), die licht en warmte geeft door de kernreacties die in het binnenste ervan plaatsvinden. De Zon is de enige ster in onze directe omgeving; alle andere sterren staan honderdduizenden keren verder weg – de reden waarom we ze slechts zien als kleine lichtpuntjes. Ondanks die grote afstanden weten we heel wat over sterren, bijvoorbeeld hoe ze ontstaan, hoe ze evolueren en hoe ze aan hun einde komen (hoofdstukken 7 en 8). Vele sterren worden, zoals de Zon, begeleid door planeten (hoofdstuk 7).

De Zon vormt samen met 200 tot 400 miljard andere sterren de *Melkweg*, een verzameling van sterren en gaswolken in de vorm van een schijf, die door hun zwaartekracht allemaal bij elkaar blijven. De Melkweg is slechts één van ongeveer honderd miljard *sterrenstelsels* in het bekende heelal. Vele sterrenstelsels zijn gegroepeerd in *clusters*; zo behoort ons sterrenstelsel, de Melkweg, tot de *Lokale Groep*. In het hele heelal bewegen de clusters van sterrenstelsels allemaal met grote snelheid van elkaar weg. Dat doet sterrenkundigen vermoeden dat het heelal ooit

moet zijn begonnen in een grote explosie, de *Oerknal* of *Big Bang*.

1.5 Waaruit is het heelal opgebouwd?

Bijna alle hemellichamen die we kunnen zien, bestaan uit dezelfde soorten stoffen die we ook op Aarde vinden. Doorgaans echter niet in dezelfde verhoudingen: *helium* bijvoorbeeld, op Aarde een zeldzaam gas, vormt maar liefst een kwart van alle zichtbare materie in sterren en in de gaswolken die tussen de sterren zweven, en daarmee meteen ook ongeveer een kwart van alle klassieke materie die we in het heelal zien.

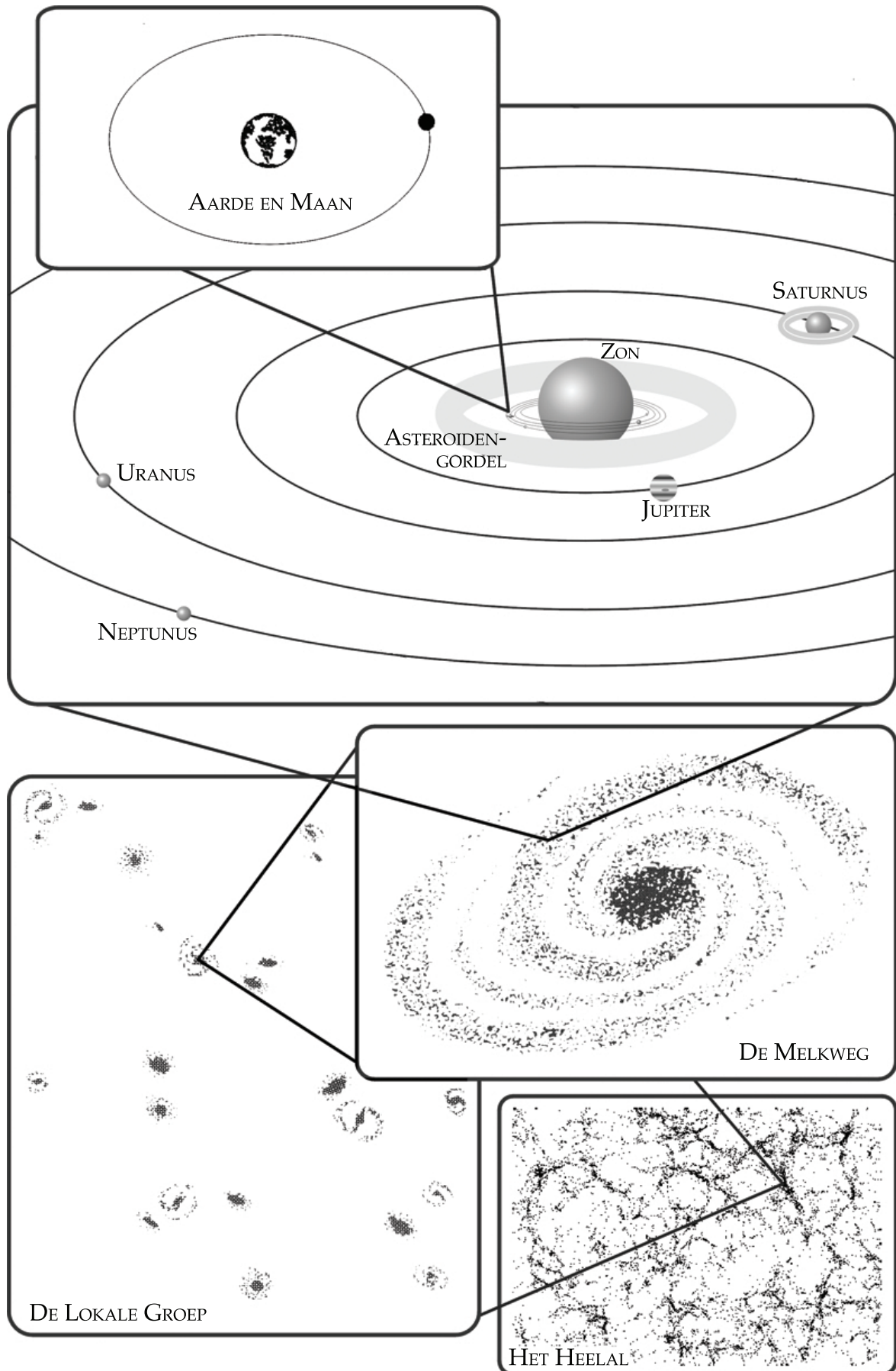
De andere drie vierden zijn voornamelijk *waterstof*. Alle andere stoffen zijn naar verhouding slechts in geringe mate in het heelal aanwezig, al kunnen ze natuurlijk plaatselijk – zoals op Aarde – wel een grote rol spelen.

De meeste materie is opgebouwd uit *atomen*, waterstof bijvoorbeeld uit waterstofatomen, helium uit heliumatomen. Atomen zijn ongeveer een tienmiljoenste van een millimeter groot. Er zijn 117 verschillende *elementen* of soorten atomen bekend: 80 die stabiel zijn, 12 die onstabiel (radioactief) zijn maar toch in de natuur gevonden worden, en (tot op dit moment) 25 die kunstmatig gemaakt worden maar instabiel zijn en niet lang bestaan. Waterstof is het kleinste en lichtste element, gevolgd door helium. De elementen worden vaak aangeduid met afkortingen, bijvoorbeeld H voor waterstof en He voor helium.

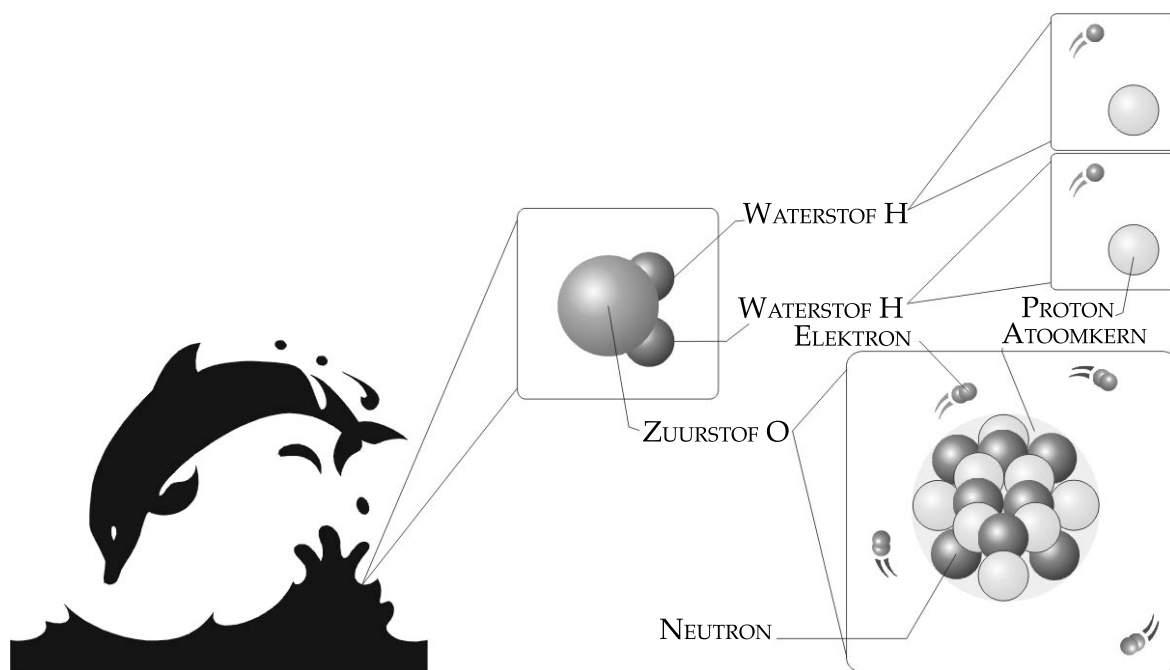
Atomen kunnen aan elkaar ‘kleven’ in groepjes die *moleculen* heten of in grote regelmatige opeenstapelingen die men *kristallen* noemt. Water bestaat bijvoorbeeld uit moleculen die elk bestaan uit twee waterstofatomen (H) en een zuurstofatoom (O), en we schrijven dit als H_2O . Gesteenten bestaan doorgaans uit kristallen waarin veel zuurstof, silicium (Si), ijzer (Fe), en magnesium (Mg) zit. Levende wezens bestaan uit ingewikkelde moleculen met vooral koolstof (C), waterstof, zuurstof, en stikstof (N) atomen.

Elk atoom is opgebouwd uit een kleine *atoomkern*, nog duizend maal kleiner dan het atoom zelf maar waarin het grootste deel van de massa van het atoom geconcentreerd is, en een zwerm van *elektronen* die rond de kern draaien. Die elektronen zijn *elementaire deeltjes*, die voor zover we weten niet meer verder opgesplitst kunnen worden. Ze zijn zo klein dat men hun afmetingen nog niet heeft kunnen bepalen – je kan ze je rustig als puntvormig voorstellen. Ze hebben een negatieve *elektrische lading*.

De kern zelf bestaat uit een aantal *protonen*, positief geladen deeltjes, en *neutronen*, deeltjes zonder elektrische lading. Door de protonen is de kern positief geladen,



FIGUUR 1.3: Plaats van de Aarde in het zonnestelsel, Melkweg, Lokale Groep en het Heelal.



FIGUUR 1.4: Water: een vloeistof opgebouwd uit atomen, die zelf weer bestaan uit elektronen, protonen en neutronen.

met als gevolg dat hij de negatief geladen elektronen aantrekt – elektrische ladingen met tegengesteld teken trekken elkaar immers aan, ladingen met hetzelfde teken stoten elkaar af. Door die elektrische aantrekkingskracht blijven de elektronen bij de kern.

Het eenvoudigste atoom, waterstof, heeft een kern die slechts uit één enkel proton bestaat, en daar rond cirkelt één enkel elektron. Een heliumatoom bestaat uit een kern met twee protonen en twee neutronen, omgeven door twee elektronen. Een ijzeratoom telt 26 protonen, 28 tot 32 neutronen en 26 elektronen.

In een normaal atoom zitten precies even veel negatieve elektronen als positieve protonen. Het atoom als geheel is daardoor elektrisch neutraal. Wanneer een atoom een elektron kwijtspeelt of er een bijwint, bijvoorbeeld door een botsing, is dat niet meer het geval. Zo'n atoom, met een of meer elektronen te veel of te weinig, heet een *ion*. Een voorbeeld: een waterstofatoom dat zijn enige elektron verloren heeft, is een positief ion geworden. Buiten de sterrenkunde wordt het een H^+ -ion genoemd, sterrenkundigen spreken meestal over H II ('*H-twee*'). Maar je kan het ook een waterstofkern of gewoon een proton noemen.

Het element waartoe een atoom behoort, wordt bepaald door het aantal protonen in de kern. Het aantal neutronen kan variëren, maar dit heeft geen invloed op de chemische eigenschappen van het atoom. Naast het gewone helium met twee neutronen, bestaat er bijvoorbeeld ook een zeldzame variant met slechts één neutron. Zulke varianten heten *isotopen*. Ze worden aangeduid door in het klein het

totale aantal protonen en neutronen voor het symbool van het element te schrijven. Helium met maar één neutron is bijvoorbeeld ${}^3\text{He}$ (spreek uit helium-3). Waterstof met behalve het proton ook nog een neutron is ${}^2\text{H}$ en wordt ook deuterium genoemd.

Behalve protonen, neutronen en elektronen, bestaan er nog een reeks andere deeltjes. Dat zijn geen bestanddelen van gewone atomen, maar ze komen wel voor bij allerlei processen in het heelal. Neutrino's bijvoorbeeld, die door de Zon worden uitgezonden. Of fotonen, de deeltjes waaruit licht bestaat.

1.6 Krachten, onzichtbare materie en energie

Tussen al deze deeltjes werken 4 fundamentele krachten. De *zwaartekracht* is vooral belangrijk op sterrenkundige schaal, waar ze verantwoordelijk is voor de grote structuren in het heelal en voor bijvoorbeeld de beweging van de planeten rond de Zon. De *sterke kernkracht* houdt atoomkernen bij elkaar, tegen de elektrische afstoting tussen de positief geladen protonen in, en de *zwakke kernkracht* is verantwoordelijk voor radioactief verval (wat het omzetten van protonen in neutronen inhoudt).

Op zwaartekracht na is de meest makkelijk waarneembare kracht in onze alledaagse wereld de *elektromagnetische kracht*. Ze houdt elektronen in hun baan rond een atoomkern, en zorgt voor de interactie tussen atomen onderling. Daardoor is ze verantwoordelijk voor alle scheikundige en biologische processen, voor de stabiliteit van alle materialen, metalen, mineralen, de sterkte van gebouwen, de computer waarop deze tekst wordt geschreven en het papier waerop u hem leest, enz. De elektromagnetische kracht is ook verantwoordelijk voor elektromagnetische straling en voor de interactie van licht met andere objecten in onze omgeving en in het heelal.

Het is dan ook niet verwonderlijk dat we het meeste weten over de soorten materie die beïnvloed worden door deze kracht. Deeltjes die niet interageren met de elektromagnetische kracht zijn veel moeilijker waar te nemen. Zo vliegen er elke seconde miljarden neutrino's los doorheen ons lichaam (en door heel de Aarde) zonder dat we er iets van merken, en om er toch enkele waar te nemen moet men gigantische ondergrondse of onderzeese detectoren bouwen.

Sterker nog, op dit moment weten we dat de 'klassieke' of 'zichtbare' materie slechts 4% van de materie/energie-inhoud van het heelal uitmaakt. Onzichtbare of 'donkere' materie, dit is materie die niet interageert met elektromagnetische straling maar waarvan we indirect wel de invloed op zwaartekracht kunnen zien, maakt een veel groter deel van het heelal uit, namelijk 23%. En het belangrijkste ingrediënt van het heelal, zo'n 73%, is een mysterieuze donkere energie die

de zwaartekracht tegenwerkt en de uitzetting van het heelal doet versnellen. De aanwijzingen die we hebben voor het bestaan van deze donkere materie en energie worden samengevat in hoofdstuk 12. De speurtocht naar hun precieze aard en eigenschappen vormt één van de grote uitdagingen van de actuele sterrenkunde. Je leest hier meer over in hoofdstuk 18.

1.7 Basisbegrippen

Om dit inleidend hoofdstuk af te sluiten groeperen we nog een aantal basisbegrippen. U kan dit in zijn geheel doornemen, maar ook rustig overslaan en later als naslagwerk gebruiken.

1.7.1 Magnitudes

Niet alle sterren zijn even helder. Sommigen zijn schitterende lichtpunten, andere zijn maar ternauwernood te onderscheiden. Om aan te duiden hoe helder een ster precies is, gebruiken sterrenkundigen het ietwat bizarre systeem van *magnitudes*. Dit valt terug te voeren op de oude Grieken, die de sterren rangschikten van eerste *grootte* of magnitude (helder) tot zesde grootte (zwak). De magnitudeschaal loopt dan ook ‘achterstevoren’: hoe helderder een ster, hoe kleiner haar magnitude. De zwakste sterren die nog net met het blote oog te zien zijn, hebben een magnitude van 6 tot 7. De beroemde Poolster in de Kleine Beer is van magnitude 2,1 en de heldere ster Wega in de Lier heeft magnitude 0. Magnitudes kunnen zelfs negatief zijn, en we onderscheiden ook nog schijnbare en werkelijke magnitudes. In appendix A vind je hierover meer informatie.

1.7.2 Afstanden

Bij de studie van hemellichamen valt het op hoe ver weg ze staan, van ons en van elkaar. Het heelal bestaat voornamelijk uit een onafzienbare leegte, met slechts hier en daar een naar verhouding minuscule stipje materie: een ster of een planeet.

De planeten staan typisch op enkele honderden miljoenen kilometer van ons. De meest nabije sterren (na de Zon) op enkele tientallen *biljoenen* kilometer. De meeste sterren staan nog veel verder weg. De Melkweg is ongeveer een *triljoen* kilometer groot. En de verste sterrenstelsels die astronomen al hebben waargenomen staan op zowat *honderdduizend triljoen* kilometer. Niet te verwonderen dus dat sterrenkundigen de kilometer niet zo’n handige eenheid vinden om mee te werken. In de plaats ervan gebruiken ze vaak de volgende eenheden:

De *astronomische eenheid*: is gelijk aan de gemiddelde afstand Aarde-Zon, of ongeveer 150 miljoen kilometer. Vaak afgekort tot AE of AU (van het Engelse astronomical unit). Dit is een handige eenheid voor afstanden binnen het zonnestelsel.

Het *lichtjaar*: is de afstand die het licht aflegt in een jaar, of ongeveer 9,46 biljoen kilometer of 63242 astronomische eenheden. Wordt gebruikt voor afstanden buiten het zonnestelsel.

De *parsec*: is gelijk aan 3,26 lichtjaar, afgekort pc. De bestaansreden van deze eenheid ligt in een van de technieken die astronomen gebruiken om de afstanden tot sterren te meten, de *parallax*-methode. (zie appendix B). Voor afstanden buiten de Melkweg gebruikt men vaak de *megaparsec* (Mpc), gelijk aan een miljoen parsec.

1.7.3 Temperatuur

De atomen en moleculen waaruit de materie bestaat, zijn voortdurend in beweging. In een gas of vloeistof bewegen de atomen of moleculen kriskras door elkaar, in een vaste stof trillen de atomen rond hun vaste positie.

De temperatuur is een maat voor de hevigheid van die beweging: hoe feller de beweging, hoe hoger de temperatuur. Bij -273°C zijn alle bewegingen stilgeval- len: dit is het absolute nulpunt. Wetenschappers geven de temperatuur aan in de Kelvin-schaal. Dit is niet meer dan de Celsius-schaal die zodanig verschoven is dat haar nulpunt overeenkomt met het absolute nulpunt: $0\text{ K} = -273^{\circ}\text{C}$. Het smeltpunt van water (0°C) is dan gelijk aan 273 K, en het kookpunt van water (100°C) is gelijk aan 373 K. Negatieve temperaturen bestaan niet op de Kelvin-schaal.

1.7.4 Wetenschappelijke notatie

In de astronomie komen vaak ‘astronomisch’ grote of kleine getallen voor, denk maar aan de afstanden die hierboven werden vermeld. Om deze eenvoudiger neer te schrijven gebruikt men de wetenschappelijke notatie, waarbij de exponent van 10 aangeeft hoe vaak een getal met 10 wordt vermenigvuldigd:

$$1 \times 10^3 = 10 \times 10 \times 10 = 1000 = \text{duizend. Kortweg geschreven als } 10^3.$$

$$3 \times 10^6 = 3 \times 10 \times 10 \times 10 \times 10 \times 10 \times 10 = 3\,000\,000 = \text{drie miljoen}$$

$$2 \times 10^9 = 2\,000\,000\,000 = \text{twee miljard.}$$

Negatieve exponenten geven aan hoe vaak men door dat getal (10) deelt

$$1 \times 10^{-1} = 10^{-1} = 1/10 = 0,1$$

$$2 \times 10^{-3} = 2/10/10/10 = 0,002$$

$$5 \times 10^{-6} = 0,000\,005.$$

Een lichtjaar (9 470 000 000 000 km) wordt dan $9,47 \times 10^{12}$ km, en de diameter van een waterstof-atoom (ongeveer 0,000 000 000 05 m) is dan 5×10^{-10} m. Dit werkt veel makkelijker dan wanneer men al die nulletjes moet tellen!

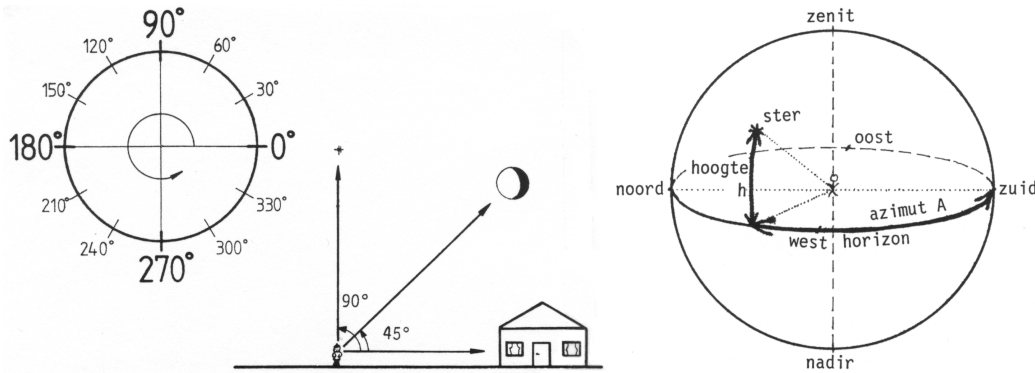
1.7.5 Coördinaten

Op Aarde kan men de positie van een plaats aangeven via de geografische *lengte* (of *longitude*) en *breedte* (of *latitude*). Zo bevindt het vergaderlokaal van Wega (*de Pit*) zich op $50^{\circ}52'14''$ noorderbreedte en $4^{\circ}42'49''$ oosterlengte. Aan de hemel kan men een gelijkaardig systeem gebruiken. Omdat de hemelbol voortdurend in beweging is (eigenlijk is het de Aarde die draait), komt men verschillende varianten tegen:

Lokale coördinaten Hierbij geeft men gewoon aan hoever een object boven de lokale horizon staat (*altitude*), en in welke (wind)richting het zich bevindt (*azimut*). De altitude loopt van $+90^{\circ}$ (het punt loodrecht boven ons, we noemen dit ook het *zenit*) over 0° (de horizon) tot -90° (het punt loodrecht onder onze voeten, we noemen dit ook het *nadir*). Merk op dat de poolster *niet* in het zenit staat, behalve wanneer men zich op de noordpool bevindt. Het azimut loopt van 0° in het noorden via het oosten (90°), het zuiden (180°), en het westen (270°) terug naar het noorden (360°).

Dit lijkt de eenvoudigste methode, maar ze is niet erg universeel omdat de coördinaten afhangen van de plaats waar men zich bevindt, en bovendien ook nog van het tijdstip waarop men kijkt. Voor een waarnemer is het wel belangrijk om te weten of een object zich voldoende hoog boven de horizon bevindt, en of er geen gebouwen of bomen voor staan.

Equatoriale coördinaten Dit zijn de meest gebruikte coördinaten. De hemelpolen liggen gewoon in het verlengde van de noord- en zuidpool van de Aarde, en de hemelevenaar is de projectie van de evenaar van de Aarde op de hemel. In plaats van noorder- en zuiderbreedte gebruikt men aan de hemel de term *declinatie*, die opnieuw van -90° (de zuidelijke hemelpool) tot $+90^{\circ}$ (de noordelijke



FIGUUR 1.5: Lokaal coördinatenstelsel. De windrichting van een object wordt aangegeven door het *azimut* (links), de hoogte boven de horizon door de *altitude* (midden). Het totale plaatje wordt rechts weergegeven.

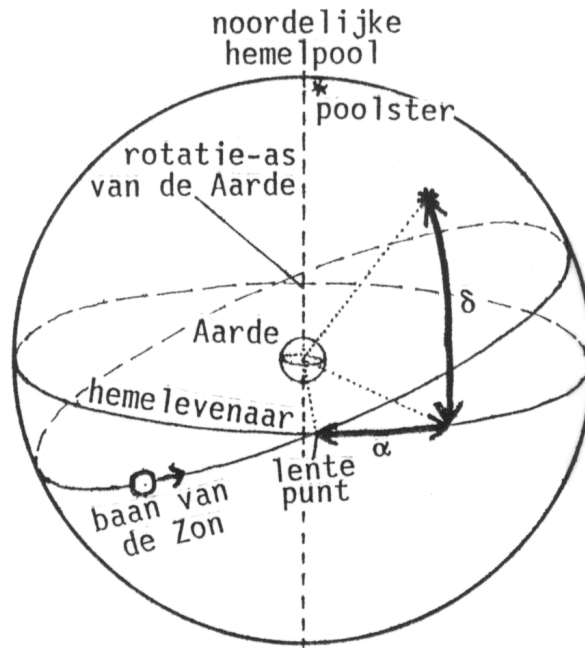
hemelpool) kan lopen. Elke graad ($^{\circ}$) is onderverdeeld in 60 boogminuten ($'$), en elke boogminuut in 60 boogseconden ($''$).

In de plaats van ooster- en westerlengte gebruikt men aan de hemel de term *rechte klimming* (afkorting RA, van het Engelse right ascension). Als nulpunt neemt men niet de projectie van de meridiaan van Greenwich (deze draait immers mee met de rotatie van de Aarde!), maar het *lentepunt*, dit is het punt in het sterrenbeeld Vissen waar de zon staat bij het begin van de lente. Rechte klimming loopt op in oostelijke richting, en wordt niet in graden uitgedrukt, maar in uren, minuten, en seconden, waarbij de volledige cirkel gelijk is aan 24 uur. Men gebruikt deze eenheid omdat ze (ongeveer) overeenkomt met de rotatie van de Aarde. Eén uur komt dus overeen met een hoek van 15° . Om het onderscheid te maken met boogminuten en boogseconden gebruikt men hier de symbolen h (*hora*), m (minuten), en s (seconden). Zo bevindt de ster Wega zich op declinatie $+38^{\circ}47'4''$ en rechte klimming 18h 36m 57s.

Equatoriale coördinaten zijn onafhankelijk van de plaats waar de waarnemer zich bevindt, en van de tijd.¹ Daarom gebruiken sterrenatlassen dit coördinatensysteem.

Ecliptische en galactische coördinaten In bepaalde omstandigheden gebruiken astronomen ook ecliptische coördinaten (de evenaar van dit systeem valt samen met de ecliptica, het vlak waarin de Aarde rond de Zon beweegt), of galactische

¹Dit is niet helemaal correct. De richting van de aardas verandert ook langzaam, net zoals de as van een draaiende tol zelf ook een cirkel beschrijft. Dit noemt men precessie, en in het geval van de Aarde duurt een volledige precessiecyclus ongeveer 26000 jaar. Om dit in rekening te brengen vermeldt men op sterrenatlassen ook steeds de epoche, dit is het exacte moment waarvoor de coördinaten berekend zijn. De meeste hedendaagse atlassen gebruiken epoche 2000. De precessie van de aardas sindsdien is klein, en voor amateurs volledig verwaarloosbaar.



FIGUUR 1.6: Equatoriaal coördinatenstelsel, met rechte klimming α en declinatie δ tegenover respectievelijk het *lente punt* en de *hemelevenaar*.

coördinaten (de evenaar en de polen van dit systeem vallen samen met het vlak en de polen van de Melkweg). Deze systemen zijn nuttig wanneer men posities beschrijft in het Zonnestelsel of in de Melkweg. In beide gevallen gebruikt men (ecliptische of galactische) longitude en latitude, net zoals voor posities op Aarde.

1.7.6 Tijd

In astronomische jaarboeken worden hemelverschijnselen meestal weergegeven in universele tijd (UT). Deze komt in essentie overeen met wat men in de volksmond Greenwich Mean Time (GMT) noemt. In de winter lopen we in België en Nederland één uur vooruit: een maansverduistering die om 21h 43m UT plaatsvindt, kunnen we zien om 22h 43m lokale tijd. Tijdens de zomer lopen we twee uur vooruit (zomertijd). Voor een sterbedekking om 1h 16m UT moeten we paraat staan om 3h 16m plaatselijke tijd.

Soms moet men ook een verschil maken tussen de sterrentijd, gerelateerd aan de positie tegenover de sterren, en de zonnetijd. Zo duurt een *siderische* dag (sterrendag) op Aarde 23h 56m 4,09s: op deze tijd heeft de Aarde 360° rond haar as gedraaid en staan de sterren weer op net dezelfde positie. De *synodische* dag duurt precies 24h. Na deze tijd staat de Zon weer op dezelfde plaats aan de hemel en dit is dan ook de tijdsduur die in ons dagelijks leven van belang is. Op deze tijd heeft de Aarde ongeveer 361° rond haar as gedraaid. De extra graad is nodig omdat de

Aarde ook ongeveer één graad heeft afgelegd op haar baan rond de zon (360° in 365 dagen).