

## VI. De geschiedenis van het heelal

### VI.1. Inleiding

Wanneer we de geschiedenis van het heelal willen nagaan, moeten we vooral eerst de structuur van het heelal onderzoeken. Immers, zoals we zullen zien, is de ontwikkeling in de tijd van het heelal ten nauwste gekoppeld aan de "meetkundige" structuur. De structuur van het heelal zullen we alleen nagaan in een benadering, waarbij we het heelal homogeen gevuld denken met materie. Inhomogeniteitseffekten zullen we niet beschouwen. De hele vorming van sterstelsels en de verdere evolutie van de materie beschouwen we in feite losgekoppeld van de meetkundige structuur.

Tenslotte: hoewel al ruim 60 jaar modellen van het heelal langs mathematisch-fysische weg worden afgeleid is het pas sinds 10 jaar mogelijk over zoveel waarnemingsgegevens te beschikken, dat enige toetsing mogelijk is. Niettemin zal blijken, dat er nog erg weinig definitiefs te zeggen valt over de bouw van het heelal, nòch waar het naar toe gaat, nòch waar het vandaan komt.

### VI.2. Waarnemingen

Zoals we in het vorige hoofdstuk zagen hebben we de beschikking over gegevens betreffende:

- a) Uitdijing van het heelal: de wet van Hubble.
- b) Brontellingen, zowel optisch als radio.
- c) De 3K achtergrondstraling.
- d) Schattingen over de huidige gemiddelde materiedichtheid.

### VI.3. Algemene relativiteitstheorie en de Einsteinvergelijkingen

We gaan er van uit dat het heelal homogeen en isotroop is. in de vier-dimensionale euclidische ruimte wordt een afstand  $s$  tussen twee gebeurtenissen in het ruimte-tijd-kontinuum gekarakteriseerd door  $(x_1, y_1, z_1, t_1)$  en  $(x_2, y_2, z_2, t_2)$  door

$$s^2 = (t_2 - t_1)^2 - \frac{1}{c^2} \left\{ (x_2 - x_1)^2 + (y_2 - y_1)^2 + (z_2 - z_1)^2 \right\}. \quad (1)$$

Deze ruimte heet ook de Minkowski ruimte, en is invariant onder Lorentztransformaties. Het infinitesimale lijn-element wordt gegeven door

$$ds^2 = dt^2 - \frac{1}{c^2} \left\{ dx^2 + dy^2 + dz^2 \right\}. \quad (2)$$

Theorie  
Rel.

Je kunt ook zeggen dat de metriek in die ruimte gegeven wordt door de metrische tensor  $g_{ij}$ , die diagonaal is, en verder komponent heeft  $g_{11} = 1$ ,  $g_{22} = g_{33} = g_{44} = -\frac{1}{c^2}$ .

Het uitgangspunt bij de algemene relativiteitstheorie is, dat de metrische tensor, afhangt van de materieverdeling in dezelfde ruimte. De ruimte is niet euclidisch meer, maar kan gekromd zijn. We voeren de algemene vorm in:

$$ds^2 = g_{ij} dx^i dx^j \quad (\text{sommatie konventie}).$$

In deze gekromde ruimte (we veronderstellen verder  $g_{ij}$  symmetrisch) is de kortste verbinding tussen twee gebeurtenissen, niet meer een rechte lijn, maar is een lijn die moet voldoen aan de "geodeetvergelijking":

$$\frac{d^2 x^i}{ds^2} + \left\{ \begin{matrix} i \\ jk \end{matrix} \right\} \frac{dx^j}{ds} \frac{dx^k}{ds} = 0 \quad (3)$$

waarbij de  $\left\{ \begin{matrix} i \\ jk \end{matrix} \right\}$  de Christoffelsymbolen van de 2e soort heten, die gegeven worden door:

$$\left\{ \begin{matrix} i \\ jk \end{matrix} \right\} = \frac{1}{2} g^{im} \left( \frac{\partial g_{jm}}{\partial x^k} + \frac{\partial g_{km}}{\partial x^j} - \frac{\partial g_{jk}}{\partial x^m} \right) \quad (4)$$

In principe volgen lichtstralen en vrij vallende deeltjes geodeten. De Christoffelsymbolen zijn géén tensoren, maar wel kun je uit deze grootheden een tensor van rang 4 opbouwen:

$$R_{\lambda\mu\nu}^{\sigma} = \frac{\partial}{\partial x^{\mu}} \left\{ \begin{matrix} \sigma \\ \lambda\nu \end{matrix} \right\} - \frac{\partial}{\partial x^{\nu}} \left\{ \begin{matrix} \sigma \\ \lambda\mu \end{matrix} \right\} + \left\{ \begin{matrix} \tau \\ \lambda\nu \end{matrix} \right\} \left\{ \begin{matrix} \sigma \\ \mu\tau \end{matrix} \right\} - \left\{ \begin{matrix} \tau \\ \lambda\mu \end{matrix} \right\} \left\{ \begin{matrix} \sigma \\ \tau\nu \end{matrix} \right\} \quad (5)$$

Dit heet ook de Riemann of krommingstensor van de ruimte. Voor een fatsoenlijke ruimte gelden voor R een aantal symmetrische relaties. Bovendien valt hij te kontraheren:

$$R_{\lambda\mu\sigma}^{\sigma} = R_{\lambda\mu} \quad \text{heet de Riccitenor, en daaruit vindt men}$$

via  $R_{\mu}^{\lambda} = g^{\lambda\sigma} R_{\sigma\mu}$  een scalar  $R = R_{\lambda}^{\lambda}$  door kontraktie. Deze R heet de krommingsinvariant van de ruimte. In een euclidische ruimte is hij overal 0. In een gekromde ruimte is hij een maat voor 1/kromtestraal. Ga je kijken hoe een tensor varieert, wanneer je van het ene naar een ander punt in de ruimte gaat, dan kun je niet de "gewone" partiële afgeleiden nemen, immers de ruimte is krom, maar je moet in die gekromde ruimte die tensoren in verschillende punten met elkaar vergelijken. Deze vorm van differentiatie heet kovariante differentiatie en heeft het voordeel dat dit proces losgelaten op een tensor, wéér een tensor oplevert (dat is niet zo

wanneer je botweg partiëel differentieert). Het proces wordt aan-gegeven met " , " , dus:

$A^i_{j,k}$  , is de kovariante afgeleide van  $A^i_j$  naar  $k$  (in de richting  $k$ ) en

$$A^i_{j,k} = \frac{\partial A^i_j}{\partial x^k} + \left\{ \begin{matrix} i \\ km \end{matrix} \right\} A^m_j - \left\{ \begin{matrix} m \\ jk \end{matrix} \right\} A^i_m \quad (6)$$

Door wat heen en weer te spelen kun je laten zien, dat voor de Ricci tensor geldt:

$$2 R^i_{j,i} - R^i_{i,j} = 0 \quad (7)$$

(7) slaat op de structuur van de ruimte. Einstein wilde graag die structuur koppelen aan de materiedichtheid. Hij definieerde daar-toe de energietensor

$$T^{ij} = \left( \rho + \frac{p}{c^2} \right) u^i u^j - g^{ij} \frac{p}{c^2} . \quad (8)$$

Hierin is  $\rho$  de materiedichtheid,  $p$  de druk, en  $u^i$  de viersnelheid van de materie. (Deze tensor haal je uit de speciale relativiteitstheorie; daar werkt hij; je moet maar hopen dat hij het in de ART ook doet; hierover is nog steeds zeer veel discussie gaande!). In de Minkowski-ruimte is de 4-divergentie van  $T^{ij}$  nul. In de ART geldt dat

$$T^{ij}_{,j} = 0 \quad (9)$$

We kunnen (7) echter ook als een divergentie schrijven, omdat

$$R^i_{i,j} = \frac{\partial R^i_i}{\partial x^j} = \frac{\partial}{\partial x^j} (R^i_i - 2\Lambda) = \left\{ \delta^k_j (R^i_i - 2\Lambda) \right\}_{,k} \quad (10)$$

zodat (7) te schrijven is als

$$\left\{ R^i_j - \delta^i_j (R^k_k - 2\Lambda) \right\}_{,i} = 0 \quad (11)$$

De essentie van het hele verhaal is nu, dat (9) en (11) met een faktor aan elkaar gelijk worden gesteld: (11) geldt in een "lege" gekromde ruimte, (8) in een "gevulde" Minkowski ruimte, en de stelling is dat de ruimte (11) gekromd is t.g.v. de aanwezige materiedichtheid (8). (9) = (11) geeft het gelijkstellen van twee divergenties, op een konstante ( $\Lambda$ ) na zijn dan ook de tensoren gelijk.  $\Lambda$  is de inmiddels beruchte kosmologische konstante, maar is niets meer (of minder) dan een integratiekonstante. De Einstein-vergelijkingen zijn nu:

$$- 8\pi G T^{ij} = R^{ij} - \frac{1}{2} g^{ij} (R^k_k - 2\Lambda) \quad (12)$$

Je kunt nu voor een metrische tensor  $g^{ij}$ , vgl. (12) in componenten gaan uitschrijven. Gaan we uit van een metriek:

$$ds^2 = dt^2 - f(t) g(r) \left\{ dr^2 + r^2 d\vartheta^2 + r^2 \sin^2 \vartheta d\varphi^2 \right\}$$

dan blijkt een zeer algemene klasse van mogelijkheden gegeven te worden door  $f(t) = R^2(t)$ ,  $R$  willekeurige funktie van  $t$ , en  $g(r) = \left(1 + \frac{kr^2}{4}\right)^{-2}$  met  $k$  onbepaald ( $k = 0$  geeft een "vlak" heelal).

$R$  vervult de rol van schaalparameter en karakteriseert hoe de ruimtelijke afstand tussen twee massapunten die vrij in de ruimte "zweven" (of vallen) in de tijd varieert.

Voor deze metriek is  $R_i^i = -\frac{12k}{R^2(t)}$ . Ik kan nu mijn koördinaten  $(r, \vartheta, \varphi)$  zó kiezen, dat  $r$  dimensieloos is (een vrij vallende massa houdt dan steeds dezelfde koördinaat  $r$ ), dan moet ook  $k$  dimensieloos zijn, en heeft  $R(t)$  de dimensielengte. Kies ik verder de koördinaten zó, dat  $k = \pm 1$  of  $0$ , dan is het duidelijk dat  $R_i^i = \mp \frac{12}{R^2(t)}$ , of  $= 0$ .  $R_i^i$  geeft de kromming van de ruimte aan, en  $R(t)$  is dan de kromtestraal van die ruimte.  $R_i^i = 0$  betekent: vlakke ruimte (of  $R(t) \rightarrow \infty$ );  $R_i^i > 0$ ,  $k = -1$ , resp.  $R_i^i < 0$ ,  $k = +1$ , betekent een hol hyperbolisch heelal, resp. een bol sferisch heelal. Door deze keuze van koördinaten heeft  $R(t)$  echt een afstandsfunktie gekregen en heet ook wel de straal van het heelal.

We kunnen nu de Christoffelsymbolen afleiden en dan invullen in de Einsteinvergelijkingen: (' betekent: differentiëren naar  $t$ ):

$$8\pi G \rho = \frac{3}{R^2} (kc^2 + R'^2) - \Lambda \quad (13)$$

$$\frac{8\pi G}{c^2} p = -2 \frac{R''}{R} - \frac{R'^2}{R^2} - \frac{kc^2}{R^2} + \Lambda \quad (14)$$

Je kunt uit de metriek meteen afleiden, dat de roodverschuiving  $1 + z$  gegeven wordt door

$$1 + z = \frac{\lambda_{(\text{ontvangen})}}{\lambda_{(\text{emissie})}} = \frac{R(t \text{ van ontvangst})}{R(t \text{ van emissie})} \quad (15)$$

of:  $z = \frac{R_0}{R} - 1$ . De Hubble konstante is gedefinieerd door  $v = Hs$  met de  $s$ -de afstand, of liever als  $dv = Hds$ . Met behulp van Doppler leid je dan meteen af, dat

$$H = \frac{1}{R} \frac{dR}{dt} \quad (H^{-1} \equiv T_0 \text{ (dimensietijd)}) \quad (16)$$

terwijl als dimensieloze versnellingsparameter gebruikt wordt

$$q_0 = -\frac{R''}{R} \left( \frac{R}{R'} \right)^2 \quad (17)$$

Bezien we (13) dan geldt dat:

$$H^2 = \frac{R'^2}{R^2} = \frac{8\pi}{3} G\rho - \frac{3kc^2}{R^2} + \Lambda \quad (18)$$

en in een drukloos heelal ( $p/c^2 = 0$ ) geeft (13) :

$$q_0 = \frac{1}{2} + \left( \frac{kc^2}{R^2} - \Lambda \right) T_0^2 \quad (19)$$

We kunnen ook uit (13) en (14)  $kc^2 + R'^2$  elimineren,

$$\frac{R''}{R} = \frac{\Lambda}{3} - \frac{4\pi G}{3} \left( \rho + \frac{3p}{c^2} \right) \quad (20)$$

Deze vergelijking kunnen we opvatten als een soort krachtvergelijking, waarbij het rechterlid de drijvende kracht vormt. Van belang is hierbij de kosmologische konstante  $\Lambda$ , immers is  $\Lambda > 0$  dan heeft dat een uit elkaar stuwende kracht tot gevolg,  $\Lambda < 0$  een samentrekkende. De discussie over  $\Lambda$  duurt nog steeds voort; vaak wordt gesteld dat hij niet nodig is en dat men hem eigenlijk gewoon nul moet nemen. Einstein heeft hem o.a. destijds ingevoerd om een statisch heelal mogelijk te maken, niet uitdijend, waarbij  $\Lambda = 4\pi G \left( \rho + \frac{3p}{c^2} \right)$ .

Maken we  $\Lambda = 0$  dan is het duidelijk dat de expansie in elk model vertraagd wordt. Afhankelijk van de grootte van  $\rho$  dijt het heelal tot een eindige  $R$  uit, of gaat de uitdijing onbeperkt verder.

Houden we even  $\Lambda = 0$  dan is duidelijk uit (18) dat voor

$$H^2 > \frac{8\pi}{3} G\rho, \quad k < 0 \quad \text{geldt}$$

dus een niet gesloten hyperbolisch heelal

$$\text{voor } H^2 < \frac{8\pi}{3} G\rho, \quad k > 0 \quad \text{geldt}$$

dus een gesloten, sferisch heelal.

De waarde

$$\rho_c = \frac{3H^2}{8\pi G} \quad \text{heet de kritische dichtheid,} \quad (21)$$

en uit de waargenomen waarde voor  $H$  volgt:  $\rho_c \sim 10^{-29} \text{ g cm}^{-3}$ . Uit de waargenomen stelsels en andere materie werd vroeger  $\rho$  geschat op  $\sim 10^{-31} - 10^{-30} \text{ g cm}^{-3}$ ; tegenwoordig schat men al aardig dicht tegen de kritische waarde aan.

We kunnen nu heelalmodellen rubriceren naar de verschillende combinaties van de parameters  $\Lambda$ ,  $k$ , gedrag van  $R$ ,  $q_0$ ,  $\rho$  etc. In

fig. VI.1 staan deze parameters weergegeven, waarbij indices "0" aangegeven, "op dit moment", en  $\sigma_0 \equiv \frac{4\pi G \rho_0}{3H^2} = \frac{\rho_0}{2\rho_c}$ . In fig. VI.2 staat dan de evolutie van R als functie van t aangegeven voor modellen met  $k = \pm 1, 0$ , en de verschillende waarden van  $q_0$  gedurende die evolutie; hierbij is  $\Lambda = 0$  genomen. Er blijven dan slechts drie soorten heelal over:

- 1) gesloten, sferisch,  $k = +1$ , pulserend
- 2) niet gesloten, vlak,  $k = 0$ , asymptotisch, snelheid naar 0
- 3) niet gesloten, hyperbolisch,  $k = -1$ , steeds verder uitdijend.

De ouderdom van het heelal is dan ook afhankelijk van het model, d.w.z.  $T_0$  is wél een maat voor de ouderdom, maar de precieze waarde wordt bepaald door  $k$ , nl. hoe sterk de uitdijing is vertraagd, door de aanwezigheid van de materie.

Tenslotte bezien we even het sterk vereenvoudigde geval  $k = 0$ ,  $\Lambda = 0$  en  $\rho/c^2 = 0$ , zodat: volgens (13) en (14):

$$\frac{8\pi G \rho}{3} = \frac{R'^2}{R^2} \quad \text{en} \quad 0 = \frac{2R''}{R} + \frac{R'^2}{R^2} \quad (22)$$

De eerste vergelijking geeft na vermenigvuldiging met  $R^3$  dat

$$\begin{aligned} \frac{d}{dt} \frac{8\pi G \rho}{3} R^3 &= \frac{d}{dt} R R'^2 = R'^3 + 2 R R' R'' = \\ &= R^2 R' \left( 2 \frac{R''}{R} + \frac{R'^2}{R^2} \right) = 0, \end{aligned} \quad (23)$$

m.a.w.  $\rho R^3$  blijft behouden tijdens de evolutie ("massabehoud"), dus

$$\begin{aligned} R'^2 &= \frac{8\pi G \rho_0 R_0^3}{3R} \quad \text{dus} \\ R(t) &= \left( 4\pi G \rho_0 R_0^3 t^2 \right)^{1/3} = R_0 \left( \frac{3}{2} H_0 t \right)^{2/3}, \end{aligned} \quad (24)$$

zodat in zo'n vlak heelal R toeneemt volgens  $t^{2/3}$ , en de ouderdom van het heelal gegeven wordt door  $2/3 H_0 \approx 8.8 \times 10^9$  jaar. Aangezien uit de evolutie van sterren, aarde e.d. het waarschijnlijk is, dat de ouderdom groter is, moeten we denken aan een heelal dat langzamer de huidige straal heeft bereikt, m.a.w. een sferisch heelal. Aan de andere kant lijkt dat minder goed te kloppen met de geschatte waarden voor  $\rho_0$ .

### VI.3. Observationele tests

#### VI.3.1. Roodverschuiving

In principe zou het mogelijk moeten zijn om uit de waargenomen roodverschuivingen en afstanden af te leiden wat de versnellings-

parameter  $q_0$  is; je kunt namelijk laten zien dat

$$z = H \frac{d}{c} + \frac{H^2}{z} (z + q_0) \frac{d^2}{c^2} + \dots \quad (25)$$

waarin  $d$  de afstand is, of liever  $d/c$  de reistijd van het licht van de bron tot ons. Aangezien in de praktijk echter de afstanden juist bepaald worden met behulp van de Hubble wet, dus door aan te nemen dat  $z = H \frac{d}{c}$ , is het duidelijk dat we hiermee  $q_0$  niet kunnen bepalen (zie fig. 50<sup>a</sup> en 49 uit hoofdstuk V).

### VI.3.2. Brontellingen

In een sferisch heelal, dat homogeen gevuld is met sterren, vind ik op afstand  $d$ , relatief minder sterren dan in een vlak heelal, dat op zijn beurt weer minder heeft dan een hyperbolisch heelal. M.a.w. een boloppervlak met straal  $d$  vanuit ons gemeten, heeft in een sferisch heelal een oppervlak kleiner dan  $4\pi d^2$ , in een vlak heelal is dat  $4\pi d^2$ , in een hyperbolisch heelal is het meer dan  $4\pi d^2$ . Door nu brontellingen te doen, zou men in principe kunnen toetsen in wat voor soort heelal we zitten. Daarbij moet natuurlijk rekening worden gehouden met het effect van de expansie, de roodverschuiving, absorptie en de spreiding in absolute magnitude onder de bronnen. Fig. V.51 geeft de waarnemingen vergeleken met de verwachting in een niet expanderend euclidisch heelal. Dicht in de buurt zijn er "te veel" bronnen, verder op "te weinig". Dit is alleen maar te verklaren met een evolutie effect, d.w.z. dat er betrekkelijk kort geleden een periode was met relatief veel sterke radiobronnen, en daarvoor een periode met relatief weinig radiobronnen. M.a.w. we hebben wél bewijzen over de evolutie van radiobronnen gekregen, maar over de structuur weten we nog steeds niets. Hetzelfde geldt ongeveer voor quasi-stellaire objecten, : in de buurt staan er minder dan wat verder op, maar daar voorbij (voor  $z > 2$ ) zijn er opeens wel erg weinig. Dit wordt ook geïnterpreteerd als een evolutieëffect, en niet als een kwestie van expansieverandering, dan wel structuur.

### VI.3.3. De 3K achtergrondstraling

Op het praktikum wordt daar uitvoerig op ingegaan. We volstaan hier met de vermelding dat de straling zeer isotroop is, waaruit we de konklusie kunnen trekken dat het heelal ook als bij benadering isotroop is op te vatten. Verder geeft de 3K straling informatie over de fysische evolutie van de heelal-inhoud, maar vrijwel geen aanknopingspunten over de structuur.

Tenslotte: het is de straling die ons uit het verst waarneembare gebied bereikt, zo'n  $z = 1000$ , en slaat daarmee als informatie over de structuur op grote afstand, alle andere optische of radio-waarnemingen aan bronnen.

#### VI.4. Het "begin" en de grenzen van het spreken daarover

Zoals hiervoor al vermeld is de huidige leeftijd van het heelal  $10^{10} - 10^{11}$  jaar, afhankelijk van het gebruikte heelal-model. We kunnen nu gaan terugrekenen in de hoop zinnige informatie over het begin te krijgen. Daarbij bedenken we dat de massadichtheid  $\rho_M$ , nu geschat wordt op meer dan  $10^{-30} \text{ g cm}^{-3}$ , (rustmassadichtheid van  $10^{-8} \text{ erg cm}^{-3}$ ), de 3K straling (die qua energie-inhoud véél meer is dan de sterstraling) heeft een energiedichtheid  $\rho_R$  van  $3 \times 10^{-13} \text{ erg cm}^{-3}$ . Aangezien de stralingsdruk  $p_R = \frac{1}{3} \rho_R$  is het duidelijk dat de verwaarlozing van  $p/c^2$  in de gebruikte afleidingen korrekt was. Echter terugrekenend naar het begin is dit niet meer waar. Immers:

adiabatische wet geeft:  $\frac{d}{dv} (\rho_R v) = -p_R = -\frac{1}{3} \rho_R$ . Hieruit volgt meteen, dat  $\rho_R \sim R^{-4}$ , waar  $\rho_M \sim R^{-3}$ , zodat in het verleden er een moment was waar de straling overheerste, en dús de druk niet meer verwaarloosd kon worden:

in die periode is

$$\rho = \rho_M + \rho_R \sim \rho_R \quad \text{en} \quad p = p_M + p_R \sim p_R = \frac{1}{3} \rho_R.$$

(Bedenk dat bij het omrekenen van g naar erg steeds een faktor  $c^2$  meedoet!). Nemen we weer  $\Lambda = 0$  en toch maar (uit armoede)

$k = 0$ , dan geldt:

$$8\pi G \rho_R = \frac{3 R'^2}{R^2} \quad (\rho_R \text{ in g}) \quad (26)$$

en

$$8\pi G \rho_R = -\frac{6R''}{R} - \frac{3R'^2}{R^2} \quad (27)$$

Na wat heen en weer schrijven volgt dan dat  $R(t) \sim t^{1/2}$ . Dus, onder de vooronderstelling van  $\Lambda = 0$ ,  $k = 0$ , vinden we dat in het beginstadium  $R(t) \sim t^{1/2}$ , en later  $R(t) \sim t^{2/3}$ , de expansie gaat dus sneller wanneer de straling verwaarloosd kan worden! Dit soort oplossingen is ook wel te maken voor  $\Lambda \neq 0$  en  $k > \pm 1$ , maar dat is erg ingewikkeld! Het tijdstip  $t_1$  waarop het heelal overgaat van een "radiation dominated" naar een "matter dominated" heelal ligt (reken dat zelf na) bij ongeveer  $t_1 = 10^3$  jaar. Bedenken we verder dat  $\rho_R \sim T^4$  en  $\rho_R \sim R^{-4}$ , dan zien we meteen



dat  $T \sim R^{-1}$ . Hieruit volgt (doe dat zelf) dat op  $t_1$ ,  $T \sim 10^5$  K is.

Vervolgen we het heelal terug naar nog grotere dichtheden en temperaturen, waarbij dus de stralingsenergie veruit overheersend is, dan komt een moment waarbij de fysica ontoereikend wordt. Bijvoorbeeld bij  $\rho_M > 10^{15}$  g cm<sup>-3</sup> is de toestandsvergelijking eigenlijk nauwelijks bekend, en zeker niet in het geval van een nog grotere stralingsenergiedichtheid. Dit punt  $t_2$  wordt ongeveer bereikt bij  $T \sim 10^{13}$  K,  $t_2 \sim 10^{-13}$  s,  $R \sim 3 \times 10^{-13} R_{\text{nu}}$ . (Ga dit na). Je kunt nog verder teruggaan, namelijk tot het punt waar de "kromming" van de ruimte vergelijkbaar wordt met de Compton golflengte van de deeltjes. Deze vraag is duidelijk zinloos in het door ons beschouwde geval, waar we immers  $k = 0$  kozen. Beter is: het moment waarop de gravitationele energie van een deeltje binnen zijn eigen Compton golflengte ongeveer gelijk wordt aan de rustmassa energie:-

$$\frac{Gm^2}{\lambda} \sim mc^2 \quad \text{en} \quad \lambda \sim \frac{h}{mc} \quad \rightarrow \quad \lambda \sim \sqrt{\frac{Gh}{c^3}} \sim 1.3 \times 10^{-33} \text{ cm}$$

Wanneer (op  $t_3$ ) dus de onderlinge afstand tussen de deeltjes  $\sim \lambda$  is, dan kan ik de quantummechanika niet meer van de gravitatie-theorie los zien. Op dit moment is de onderlinge afstand  $\sim 10^{+2}$  cm zodat  $R(t_3) / R(t_0) \sim 10^{-35}$  is, ofwel  $t_3 \sim 10^{-56}$  s na het begin.

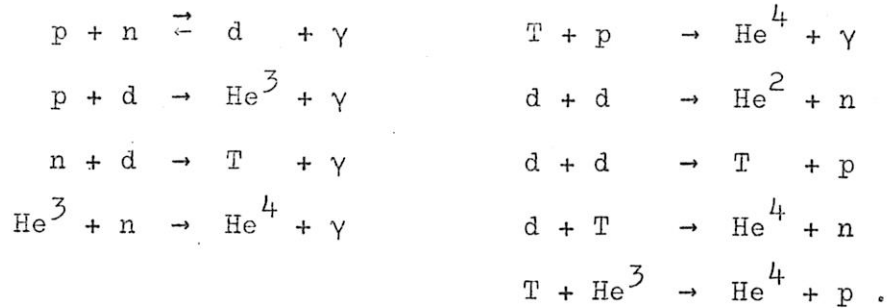
Samenvattend: vóór  $t_3 \sim 10^{-56}$  s faalt de QM en ART  
 vóór  $t_2 \sim 10^{-13}$  s faalt de huidige kernfysika  
 vóór  $t_1 \sim 10^3$  jaar overheerst straling.

Wanneer nu na  $t_1$  de ruimte verder uitdijt, komt een moment dat  $T$  beneden 4000 K zakt, zodat rekombinatie van protonen en elektronen optreedt. Hierdoor neemt de absorptiecoëfficiënt van de materie voor energierijke straling sterk af (in een plasma is die absorptie groot omdat elektronen en protonen direkt de invloed

van het electromagnetische stralingsveld ondervinden; in een neutraal waterstofgas heeft men alleen nog maar met absorptie bij bepaalde lage energieën, overeenkomend met lijnabsorptie en ionisatie te maken). De materie raakt na  $t_2$ , dat is na ca.  $10^5$  jaar, dus losgekoppeld van de straling. Vóór  $t_2$  waren de ionen en electronen zo sterk aan het stralingsveld gebonden, dat individuele onafhankelijke massabewegingen vrijwel onmogelijk waren. Men noemt  $t_2$  het ontkoppelingsstadium. In fig. 1 is een en ander geïllustreerd. De geschiedenis van de materie in het heelal vóór en na  $t_2$  is zeer verschillend.

### 3. De homogene fase (voor ontkoppeling),

Bekijken wij eerst nog even de gebeurtenissen in de beginfase. Om en nabij  $t_0$  was het heelal in een zeer dichte en hete toestand, waarin de energie voor het leeuwendeel als straling aanwezig was. De materie was in zijn aller-elementairste constituenten gesplitst: allerlei soorten elementaire deeltjes en hun antideeltjes waren aanwezig, en misschien, als ze bestaan, zelfs quarks. De expansie verliep uiterst snel en men kan die slechts met een explosie vergelijken; steeds gecompliceerdere "elementaire deeltjes" ontstaan daarbij en reageren met elkaar. Wij moeten verder aannemen dat materie en antimaterie elkaar binnen de eerste microseconde vrijwel volledig geannihileerd hebben (in de vorm van straling). Blijkbaar was er niet precies evenveel van ieder, want we zien nu slechts één soort materie, die dus in dit annihilatieproces moet zijn overgebleven. Ook moet een grote neutrino-dichtheid aanwezig zijn geweest; door de geringe interactie van deze deeltjes met andere materie en straling hebben deze neutrino's reeds zeer spoedig na het allereerste begin als een volledig onafhankelijke component aan de expansie deelgenomen, en evenals er een overblijfsel van de oorspronkelijke straling is waargenomen, moet er thans een overblijfsel van de oorspronkelijke neutrino-component in het heelal aanwezig zijn, eveneens corresponderend met een temperatuur van enkele K. Het zou zeer interessant zijn als men deze "overneutrino's" kon aantonen. Na enkele tientallen microseconden ontstond tengevolge van de diverse elementaire deeltjesprocessen een vrijwel zuiver neutronengas bij een temperatuur van ruim  $10^{11}$  °K; neutronen zijn echter niet stabiel en vervallen in protonen en electronen onder uitzending van neutrino's en natuurlijk straling. Er begonnen zich in dit mengsel allerlei kernreacties af te spelen, waarvan de voornaamste zijn:



Alleen de eerste reactie is reversibel (omdat het evenwicht zich snel instelt), de andere lopen vrijwel in één richting. Het netto-resultaat is dat in enkele minuten de neutronen verdwenen zijn en zich naast protonen en electronen tevens  $\text{He}^4$  kernen hebben gevormd (plus wat minder deuterium, tritium en  $\text{He}^3$  kernen). Er ontstaat zo na ca. 5 minuten een waterstof-helium plasma. Afhankelijk van de keuze van de parameter dichtheid / kritische dichtheid vindt men een  $\text{He}^4$  gehalte (in aantal) tussen 1 en 30%, des te hoger naarmate de dichtheid meer de kritische dichtheid benadert. Deze samenstelling blijft dan tot het ontkoppelingsstadium min of meer gehandhaafd, want de temperatuur wordt snel zo laag en de dichtheid neemt zo snel af dat verdere kernreacties nauwelijks meer optreden.

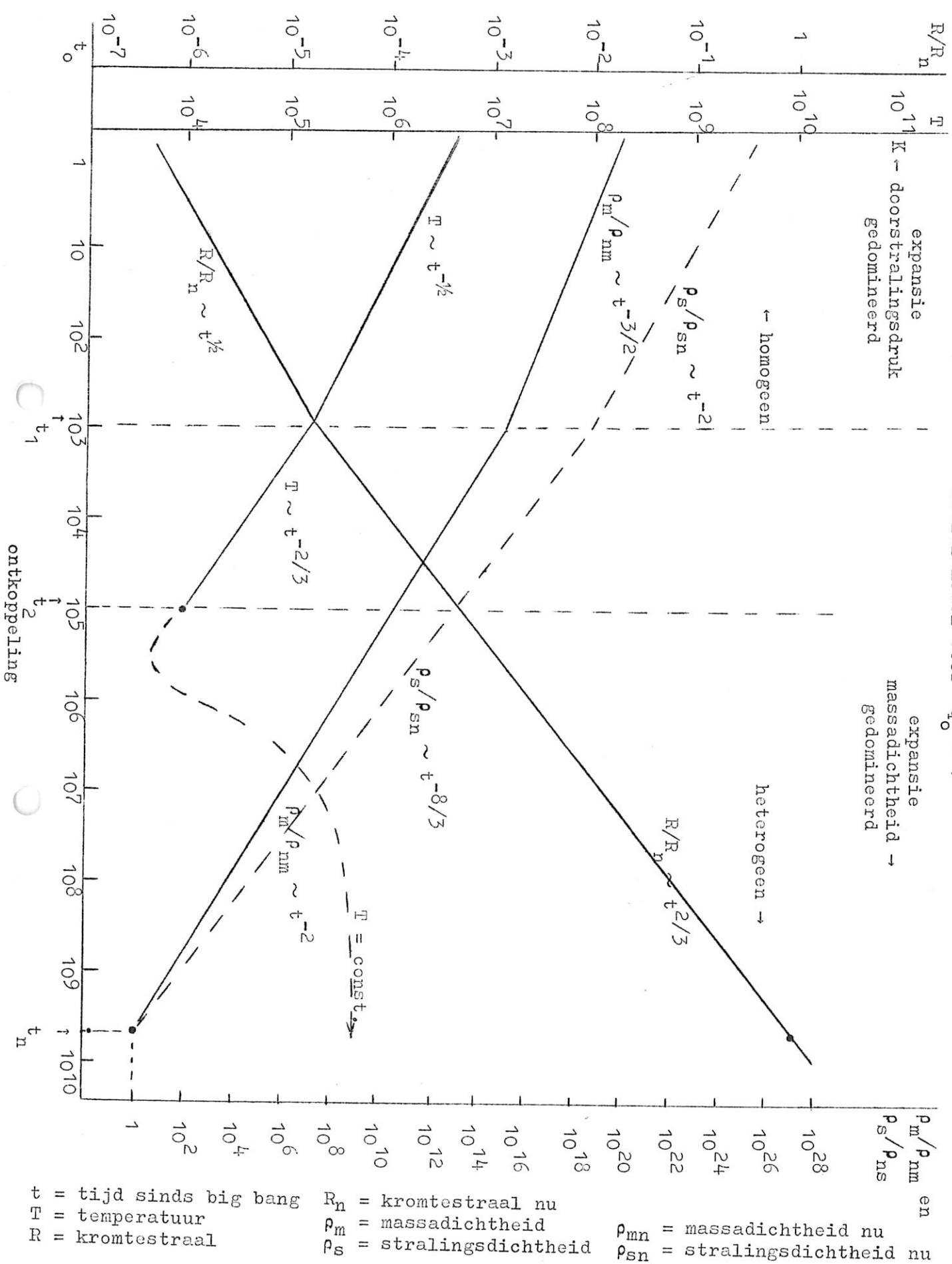
Het is mogelijk dat de samenstelling van het huidige intergalactische plasma overeenkomt met dit oorspronkelijke plasma. Metingen hierover zijn vooralsnog te moeilijk.

#### 4. De ontkoppelingsfase; vorming van melkwegstelsels

Tijdens de ontkoppeling rond  $t_2$  is het heelal gegroeid tot circa  $10^{-3}$  van zijn huidige afmetingen ( $R \approx 10 \text{ M pc}$ ) ; de energiedichtheden van straling en massa zijn resp. ca.  $1 \text{ erg/cm}^3$  en  $10 \text{ erg/cm}^3$ , de temperatuur van het gedeeltelijk gerecombineerde waterstof-helium plasma bedraagt enkele duizenden graden. Tot op dit moment was de interactie tussen straling en materie zo sterk, dat zich volgens de bestaande theorieën geen inhomogeniteiten (opeenhopingen van massa) konden vormen op een schaal kleiner dan  $10^{15} M_{\odot}$ , dat is  $10^4$  maal de massa van de Melkweg; de isotrope stralingsdruk verhinderde dit. De theorie van de vorming van inhomogeniteiten in een stralings-gedomineerd plasma is echter nog lang niet voldoende uitgewerkt om er absoluut zeker van te zijn dat kleinere inhomogeniteiten volstrekt onmogelijk waren. Wij nemen nu maar aan dat het niet kon.

Eventuele inhomogeniteiten die van het eerste begin af aanwezig waren konden zich misschien handhaven, als zij van ondergeschikte betekenis waren ( $\Delta\rho/\rho \ll 1$ ) maar meer ook niet. Gravitationele interactie leidend tot condensatie kreeg niet de kans op te treden,

Heelal model voor  $q_0 = 1$



$t$  = tijd sinds big bang  
 $T$  = temperatuur  
 $R$  = kromtestraal  
 $R_n$  = kromtestraal nu  
 $\rho_m$  = massadichtheid  
 $\rho_s$  = stralingsdichtheid  
 $\rho_{mn}$  = massadichtheid nu  
 $\rho_{sn}$  = stralingsdichtheid nu

de gelijktijdig toenemende stralingsdruk in zo'n beginnende condensatie verhinderde verdere contractie.

Na de ontkoppeling begint de materie zich onafhankelijk van de straling te gedragen, en gravitationele instabiliteiten krijgen wél een kans. Zulk een instabiliteit, d.w.z. de vorming van een verdichting die onder zijn eigen zwaartekracht verder contraheert, kan volgens het criterium van Jeans slechts optreden als voldoende grote massa's  $M$  of afmetingen  $L$  in het geding zijn, en wel geldt

$$M > M_{cr} \sim T^{3/2} \rho^{-1/2}$$

Dit criterium berust op de competitie tussen gravitatiecontractie en gas-kinetische expansie. Men neemt nu aan dat zich inderdaad na de ontkoppeling door toevallige oorzaken een aantal dichtheidsfluctuaties hebben gevormd, met massa's groter dan  $10^5 M_{\odot}$ . Deze "wolken" blijven wel meedoen aan de kosmische expansie. Het hangt nog van de grootte van de dichtheidsfluctuaties af, of de eigen gravitatie deze expansie merkbaar kan gaan tegenwerken. De wolkeexpansie blijft alleen in dat geval zoveel bij de heelal-expansie ten achter, dat in de loop van de tijd een werkelijk "dichte wolk" ontstaat. De fluctuatie moet hiervoor een minimum amplitude hebben, de grootte waarvan sterk afhangt van het heelalmodel. Op basis van deze overwegingen komt men tot minimum condensaties van ca.  $10^{12} M_{\odot}$ , dat is, van de orde van grootte van grote melkwegstelsels. Deze "protogalaxies" zouden oorspronkelijk een afmeting hebben gehad van ca. 50 kpc. Deze schatting gaat uit van de hypothese dat de verhouding tussen stralingsdichtheid en massadichtheid in de condensatie constant blijft. Als dit niet het geval is, maar de straling kan ontwijken, kunnen reeds condensaties van een massa  $10^6 M_{\odot}$  onder hun eigen gravitatie tezamen blijven. Deze zouden dan later aanleiding hebben gegeven tot het ontstaan van bolvormige sterrenhopen. Het is zelfs mogelijk dat deze "kleine" condensaties dan, ongehinderd door de stralingsdruk, in absolute maat véél sneller gaan contraheren onder hun eigen gravitatie dan de expansie kan tegengaan. Er zouden dan supersterren ontstaan, die tijdens hun concentratie zoveel gravitatie-energie in straling omzetten, dat de rest van het heelal daardoor weer opgewarmd werd tot ca.  $10^6$  °K. Het "intergalactische gas" zou daardoor weer volledig worden geïoniseerd, en nieuwe condensaties zouden zich niet kunnen vormen. Hiermee verklaart men het ontstaan van een eindig aantal condensaten, dus melkwegstelsels en bolhopen, tegelijk met het blijven bestaan van een heet ijl intergalactisch gas, in overeenstemming met de huidige waarnemingen.

Deze waarnemingen zijn echter nog niet zo ver gevorderd dat men in staat is de theorieën in detail te testen. Zo weet men nog te weinig van het massaspectrum van de melkwegstelsels, over de clustering en over de oorzaak van de diverse vormen van melkwegstelsels. Evenmin is het gemakkelijk de met deze vorm direct samenhangende rotatie van melkwegstelsels uit het condensatieproces principiëel te begrijpen: hoe komt het dat sommige stelsels zo'n groot impulsmoment hebben? De latere gravitatie-interactie tussen de gevormde stelsels kan dit niet verklaren, daartoe is het nodig iets aan te nemen over de turbulentie van de heelalmaterie juist voor ontkoppeling. Vele vragen blijven hier nog onopgelost.

Om het vervolg van de historie van het heelal te beschrijven laten we de kosmologische theorieën voor wat ze zijn en gaan na hoe de ontwikkeling zal zijn van een aan de kosmologische expansie niet of nauwelijks meer onderworpen protogalaxie.

## 5. Het ontstaan van melkwegstelsels en sterren

### 5.1. Na de ontkoppeling

#### 5.1.1. De vorming van melkwegstelsels

De gravitationele contractie van protogalaxies wordt, zoals reeds gezegd, tegengewerkt door de ongestoord doorgaande expansie van het heelal: er blijft vooreerst een netto expansie bestaan. Naarmate echter de relatieve contractie voortschrijdt gaat zij sneller verlopen - men kan zeggen dat de atomen als in een vrije val naar het midden van de wolk versneld worden - en op een zeker moment is de contractiesnelheid gelijk (doch tegengesteld) aan de universele expansiesnelheid geworden. Vanaf dat moment doet de wolk niet meer mee aan de kosmische expansie, en gaat hij zijn eigen leven leiden. Men neemt redelijkerwijs aan dat dit stadium optrad tijdens die periode uit de geschiedenis van het heelal, waarin gemiddelde dichtheid in het heelal gelijk was aan de thans waargenomen dichtheid in de uiterste gebieden van een gemiddeld melkwegstelsel. Deze bedraagt ca.  $10^{-4} \bar{\rho}_1 \approx 0.1 \text{ at/cm}^3 \approx 10^4 \times$  de gemiddelde heelaldichtheid  $\underline{\underline{\nu}}$ . Daaruit vindt men dat het moment van "melkweg-uitscheiding" bij een heelal-leeftijd van enkele malen  $10^8$  jaar moet hebben gelegen. Toen is dus pas de vorming van melkwegstelsels in eigenlijke zin begonnen. Voor de straal van zulk een, zich verder onafhankelijk van de expansie gedragende protogalaxie

vindt men 20 - 30 kpc<sup>\*</sup>). Deze straal is ongeveer gelijk aan die van de halo, aangegeven door de verdeling van bolvormige sterrenhopen, van ons eigen melkwegstelsel.

De gemiddelde dichtheid in een protogalaxie tijdens zijn "uitscheiding" is slechts enkele procenten groter dan die van het omgevende heelal. Wij kunnen het tijdstip van uitscheiding relateren aan de roodverschuiving die verre stelsels vertonen. Deze roodverschuiving,  $z$ , is gedefinieerd door

$$1 + z = \lambda' / \lambda ,$$

waarin  $\lambda'$  de waargenomen golflengte van een spectraallijn (bijv. de Lyman- $\alpha$  lijn van waterstof) in een ver weg gelegen melkwegstelsel is en  $\lambda$  de in het laboratorium bepaalde golflengte. Deze roodverschuiving is het gevolg van de expansie van het heelal: alle lengten worden langer, dus ook de golflengten (We hebben hiervan bij de  $\beta$ -straling al een ander voorbeeld ontmoet.). Men heeft

$$1 + z = \frac{\lambda'}{\lambda} = \frac{R'}{R} ,$$

waarin  $R'$  de straal van het heelal nu en  $R$  die op het moment van uitzending van de straling was. (Men kan natuurlijk ook de roodverschuiving als een normaal Doppler-effect ten gevolge van de heelal-expansie opvatten.) Bij het ontstaan van de protogalaxies was  $R$  ongeveer 10x kleiner dan de straal van het heelal thans is, hetgeen betekent dat een protogalaxie op het moment van zijn ontstaan, doch nu waargenomen (als dat zou kunnen), een roodverschuiving  $z$  van de orde 10 of meer zou vertonen. De oudste waargenomen melkwegstelsels vertonen een  $z$  van ongeveer 0,5. Er zijn andere objecten (Seyfert galxies, radiogalxies en vooral quasars), die nog ouder moeten zijn; zij vertonen namelijk  $z$ -waarden tot een maximum van ca. 2. Het lijkt er op alsof deze stelsels, dus ook quasars, inderdaad melkwegstelsels zijn in een vroeg stadium van hun ontwikkeling, waarin zij zeer veel intenser straalden dan nu. Hieruit concludeert men dat de ontwikkeling van een (onwaarneembare) protogalaxie tot een melkwegstelsel in een toestand zoals het onze nu, een stadium van zeer grote helderheid moet hebben doorlopen. Men kan dit als volgt begrijpelijk maken. Eenmaal uitgescheiden, contraheert de protogalaxie in versnelde mate. Twee processen gaan nu

---

\*) Alle getallen die hier worden genoemd zijn zeer onzeker. Diverse auteurs geven waarden op die soms een factor 100 uit elkaar liggen. Dit bewijst al hoe weinig wij eigenlijk weten over de vroegste historie van het heelal.

naast elkaar optreden. a) Allereerst contraheert de wolk als geheel, en tengevolge van de aanwezigheid van een zekere hoeveelheid rotatie (= impulsmoment) treedt een afplatting op, zodat een afgeplatte massa-verdeling ontstaat na een aantal malen  $10^8$  jaar (waar dat impulsmoment vandaan komt, of het al in de oorspronkelijke fluctuaties aanwezig was, of naderhand tengevolge van getijdewerking tussen protogalaxies is ontstaan, is nog niet duidelijk. Zoals reeds vermeld kan getijdewerking alléén de waargenomen rotaties <sup>niet</sup> verklaren.). Al naar gelang de aanwezigheid van veel of weinig impulsmoment en andere, meer onregelmatige bewegingen, ontstaat een dichtheidsverdeling die kan variëren van bolvormig via elliptisch tot een sterk afgeplatte en onregelmatige structuur, waarin zich vaak spiraalarmen ontwikkelen. Dit leidt tot het bekende "stenvorkschemata" van de evolutie van melkwegstelsels, als voorgesteld door Hubble. b) Al zeer spoedig na de uitscheidingsfase (na ruim  $10^7$  jaar) ontstaan uit locale fluctuaties van de dichtheid in de protogalaxie zelf ook protosterren: daar de gemiddelde dichtheid nog klein is, moeten dit zeer zware sterren zijn (volgens het Jeans criterium van ca  $10^4 - 10^6 M_{\odot}$ ).

Beide contractieprocessen leiden tot het vrijkomen van grote hoeveelheden gravitatie-energie, waardoor de materie wordt verhit. In de gevormde zware protosterren neemt de temperatuur zo sterk toe, (en dus ook de straling), dat tenslotte de kernfusiereacties gaan optreden tussen de protonen, waardoor zware elementen worden gevormd. De contractie van het proto-melkwegstelsel gaat dus in den beginne gepaard met de geboorte van sterk stralende sterren, en de creatie van zwaardere elementen. Op basis van wat wij nu weten over de evolutie van sterren kan men schatten dat een typisch stelsel als het onze door een fase moet zijn gegaan waarin de lichtkracht ca. 1000x groter moet zijn geweest dan nu. Men komt tot een schatting van de maximum stralings-energie-productie van enkele malen  $10^{46}$  ergs/sec over het gehele elektromagnetische spectrum; dit is vergelijkbaar met de energieproductie van quasars, zoals thans waargenomen.

De eerstgevormde sterren zijn, zoals gezegd, zeer zwaar. Zij leven daardoor maar kort en leveren een deel van hun materie (die in hun inwendige uit waterstof in zwaardere elementen is omgezet) weer terug aan het "interstellaire gas". Het ontstaan en vergaan van deze zeer zware en heldere sterren speelde zich af in een betrekkelijk korte tijdsperiode, die men schatten kan op  $10^7$  jaar of misschien nog minder. Daarna hebben de zware sterren hun grootste lichtkracht verloren en tegelijk beginnen zich voornamelijk minder zware sterren te vormen, daar de gemiddelde dichtheid is toegenomen en de gastemperatuur ook. Het is niet uitgesloten dat tijdens de contractie van een protogalaxie



het zgn. Seyfert-stadium (wegens de gelijkenis met zgn. Seyfert stelsels) meerdere malen wordt doorlopen, en misschien wel steeds veel korter heeft geduurd dan de bovengenoemde schattingen aangeven. In feite berusten alle bovengenoemde overwegingen op theoretische speculaties, die nauwelijks gefundeerd mogen worden genoemd.

Waarnemingen over het allervroegste ontwikkelingsstadium van melkwegstelsels zijn schaars en moeilijk te verkrijgen. Het Seyfert-stadium speelt zich af op een heelal leeftijd van enkele malen  $10^8$  jaren, corresponderend met een roodverschuiving  $z \geq 10$ . De meeste straling is uitgezonden in het ultraviolette deel van het spectrum (rond  $1000 \text{ \AA}$ ), maar zal dus door ons slechts in het nabije infrarood (rondom een golflengte van  $1 - 10 \mu$ ) kunnen worden gedetecteerd, en dat is moeilijk. Een stelsel met een diameter van 30 kpc tijdens zijn Seyfert-fase zou nu worden waargenomen met een hoekdiameter van ca.  $30''$ . Dat is wel juist voldoende groot voor resolutie in het infrarood, maar de ontvangen stralingsflux bedraagt slechts ca. 1 infrarood foton per (boogsecunde)<sup>2</sup> per micron bandbreedte voor een 2 meter telescoop -  $10^5$ x minder dan de achtergrond van de nachthemel en 10x minder dan de achtergrond van het zodiakale licht. Wel zullen er veel zulke stelsels over de hemel verspreid zijn; in een willekeurige richting bestaat er een kans van 5% er een aan te treffen. Om echter enig detail van het spectrum en de roodverschuiving waar te nemen is een zeer moeilijke opgave bij de huidige stand van de techniek. Ruimtewaarnemingen zullen hierbij een belangrijke rol spelen.

Na het Seyfert-stadium is het stelsel in een fase gekomen die "normaal" kan worden genoemd. Sterren van gemiddelde massa ( $\leq 10 M_{\odot}$ ) vormen zich en sterven weer, waardoor een bevolking ontstaat die wij thans waarnemen. Het interstellair gas krijgt geleidelijk zijn "normale" samenstelling, H I en H II gebieden ontstaan, en de structuur van het melkwegstelsel als geheel ontwikkelt zich. Wij gaan hierop, en op de evolutiegeschiedenis van de individuele sterren, niet verder in. Wel noemen wij nog een aantal bijzondere aspecten.

a) De spiraalstructuur van sommige melkwegstelsels. Het ontstaan

hiervan is nog niet goed begrepen. Het lijkt er op dat de spiraalarmen mee roteren, naijlend op de rotatierichting van het stelsel, ("trailing arms") en een stabiel patroon vormen. Tengevolge van de differentiële rotatie zou zulk een arm binnen enkele rotaties tot een ring opgewonden zijn, dus er moet een genererend en stabiliserend mechanisme optreden om de spiraalstructuur te handhaven. Dit kan bijvoorbeeld een radiële expansie zijn, of het magnetische veld kan een rol spelen. In de spiraalarmen zijn jonge sterren aanwezig, en gas en stof. De jonge sterren worden voortdurend uit het gas gevormd. Een

moderne opvatting is dat de spiraalarmen een stabiel dichtheids-golfpatroon zijn, bestaande uit verdichtingen in het galactische gas, die mee roteren met het stelsel, en waarin zich dan bij voorkeur de sterren vormen. Deze spiraalgolf ontstaat door de wisselwerking tussen gravitationele en centrifugale krachten in het snelheidsveld van de differentiële rotatie: verdichtingspatronen die aan een bepaalde dispersievergelijking voldoen kunnen zich handhaven. Deze dispersievergelijking omvat een relatie tussen de rotatiesnelheid van het patroon, de radiële afstand, de positiehoek en de golflengte, die theoretisch kan worden afgeleid.

b) Het magnetische veld van een melkwegstelsel - en vele observaties in ons eigen stelsel wijzen er op dat zulk een veld ter gemiddelde sterkte van enige malen  $10^{-6}$  gauss aanwezig is - heeft een structuur die nauw samenhangt met de spiraalarmen. Het ontstaan van dit veld is onbekend. Het kan zowel met de materie "mee" gecondenseerd zijn uit de oorspronkelijke vuurbal, alsook ontstaan zijn tengevolge van bewegingen van geïoniseerde materie in ons stelsel. Dit brengt ons op de:

c) Eigenschappen van de kernen van melkwegstelsels. Er is veel evidentie, vooral uit de radioastronomie, dat deze kernen in een toestand van sterke agitatie verkeren, en dat voortdurend, continu dan wel in discrete explosies, materiaal met hoge energie uit de kernen wordt weggeslingerd. Over wat de oorzaak hiervan is bestaan slechts vage speculaties. Het is niet uitgesloten dat de concentratie van een melkwegstelsel leidt tot een dusdanige dichtheidstoename in de kern, dat daar binnen een gebied van de afmeting  $r$  een relativistische grensdichtheid  $3c^2 / 8\pi G r^2$  wordt overschreden. In dat geval gaat de gravitationele interactie overwegen over alle andere, en de materie en straling contraheert tot verdwijnende dimensies. Er ontstaat een "black hole", waaruit geen straling meer kan ontsnappen, doch dat wel gravitationele invloed op zijn omgeving kan uitoefenen. Bij deze uiteindelijke collaps van een massa  $M$  (die dus optreedt als de contractie is voortgeschreden tot de zgn. Schwarzschild straal  $\frac{2GM}{c^2}$ ) komt de helft van de rustenergie  $Mc^2$  vrij (bij thermonucleaire reacties komt in het beste geval slechts 1% van die energie beschikbaar). Deze energie, in de vorm van straling en relativistische electronen en andere deeltjes, bedraagt bijv.  $10^{62}$  ergs bij een collaps van  $10^8 M_{\odot}$ . Dit is ruim voldoende om de explosieve verschijnselen die in ons eigen en vooral in extragalactische stelsels zijn waargenomen (jets!) te verklaren.

Het verschijnsel van de black holes is ook daarom interessant omdat het de "missing mass", nodig om een gesloten heelal te bewerkstelligen, voor zijn rekening zou kunnen nemen. Ook de geweldige uitbarstingen die wij zien als quasars kunnen langs deze weg althans in eerste instantie aannemelijk worden gemaakt.

d) Clusters van melkwegstelsels

In onze oppervlakkige beschrijving van de evolutie van galaxies zijn wij geheel voorbijgegaan aan de aanwezigheid van grote of kleine clusters van melkwegstelsels, zoals die uit de waarnemingen blijkt. Clusters van 10 tot 100 melkwegstelsels, soms in de vorm van ketens, zijn misschien terug te voeren op de aanwezigheid van geringe dichtheidsfluctuaties in de heelalmaterie vóór het ontkoppelingsstadium. Ten gevolge van de stralingsdruk zijn zulke fluctuaties alleen voorstelbaar als zij tenminste  $10^{15} M_{\odot}$  omvatten (de invloed van de stralingsdruk verschuift het Jeans criterium naar veel grotere kritische massa's). Heel langzaam zouden deze concentraties groeien, om na het ontkoppelingsstadium op te breken in een samenhangende groep van individuele melkwegstelsels. Het is opvallend dat de waargenomen clusters theoretisch niet stabiel kunnen zijn (de snelheidsdispersie der leden-galaxies is te groot), tenzij men aanneemt dat 100x zoveel massa als vervat in de leden van de cluster ergens in de cluster aanwezig is (bijv. in de vorm van black holes of "dode melkwegstelsels").

(Dit klopt ook met de bovengenoemde schatting van de clustermassa van  $10^{15} M_{\odot}$ ; 100 normale stelsels vertegenwoordigen slechts  $10^{13} M_{\odot}$ ).

e) Tenslotte is er het probleem van het intergalactische gas. De condensatie van de materie in het heelal was niet volledig; naast de melkwegstelsels zelf is er nog observationele evidentie over de aanwezigheid van geïoniseerde materie tussen de stelsels, met een gemiddelde temperatuur van  $\geq 10^6$  °K en een gemiddelde dichtheid van  $10^{-4}$  at/cm<sup>3</sup>; deze evidentie komt bijv. uit de waarnemingen van de aanwezigheid van een zwakke röntgenachtergrondstraling over de gehele hemel. Als dit gas een overblijfsel is van de oorspronkelijke vulling van het heelal vanaf het ontkoppelingsstadium, waarom heeft het dan zo'n hoge temperatuur? (Op het eerste gezicht zou het ook tot 3 °K moeten zijn afgekoeld). De straling van de gevormde melkwegstelsels is onvoldoende om deze verhitting te hebben bewerkstelligd, daar is zij te verdund voor. Het is mogelijk dat het verval van het primordiale neutronengas in protonen en electronen in de eerste seconden van de "big bang" de nodige energie heeft geleverd. Een andere mogelijke verklaring hebben we al eerder genoemd.

f) Een belangrijke component van de heelalbevolking, die in totale energie-inhoud vergelijkbaar is met de thermische energie-inhoud van het intergalactische gas is de kosmische straling, die voornamelijk bestaat uit zeer energetische protonen (energieën tot aan  $10^{20}$  eV, vgl. de grootste versnellers op aarde die deeltjes versnellen kunnen tot  $10^{11}$  eV). Het is mogelijk dat het ontstaan van deze straling samenhangt met dezelfde oorzaak, die aan de verhitting van het intergalactische gas ten grondslag ligt. Het relativistische kosmische stralings"gas" zou dan zijn energie door equipartitie met dit gas hebben verkregen. Een andere theorie tracht de generatie van kosmische straling te verklaren aan de hand van de waarneming dat supernovae na de explosie tot neutronensterren contraheren, die zeer snel roteren en zeer sterke magnetische velden rondom zich hebben. Wij observeren deze neutronensterren als pulsars, en de kosmische straling ontstaat door versnelling van de door de atmosferen van deze neutronensterren (die slechts enkele cm's dik zijn) uitgezonden deeltjes in het sterke magnetische veld. Het is opvallend dat de afname van de pulsatieperiode zoals waargenomen, indien geïnterpreteerd als een afneming van de rotatiesnelheid dus -energie, juist voldoende energie oplevert om de eveneens waargenomen kosmische stralingsflux van de supernova resten te verklaren.

g) Het evolutieproces van de sterren kan langs verschillende banen verlopen, voornamelijk in afhankelijkheid van de massa van de ster. Bepaalde evolutiepaden leiden tot de mogelijkheid dat planeten worden gevormd. Theorieën over het ontstaan van ons planetenstelsel zijn er vele, en een definitieve keuze eruit maken is nog onmogelijk. Alle theorieën gaan er van uit dat ca.  $3 \times 10^9$  jaar geleden de zon, of liever wat later de zon zou worden, omgeven was door een gasvormig omhulsel, en dat het systeem als geheel een impulsmoment bezat, dus roteerde. In het centrum van de wolk is wel reeds een centrale massa aanwezig. Onder invloed van gravitatie en rotatiekrachten, en misschien ook electromagnetische krachten, brak dit omhulsel, al dan niet na reeds tot een schijf te zijn afgeplat, op in een aantal discrete ringen of schillen, welke dan op hun beurt verder condenseren in planeten. Al naar gelang de initiële aannamen tracht men hieruit de afstandswet van Titius en Bode, en de verschillende massa's en samenstellingen van de planeten te verklaren. Wij gaan hier verder niet op in.

## 6. De belangrijkste problemen van de hedendaagse sterrenkunde

Het spreekt vanzelf dat elke opsomming van de belangrijkste problemen in de sterrenkunde sterk zal afhangen van de persoonlijke belangstelling van de opsteller van zulk een lijst. In feite zijn alle problemen belangrijk, voor zover hun oplossing kan bijdragen aan de vermeerdering van onze astronomische kennis en inzicht. Men kan nooit van te voren weten hoe de vooruitgang in een bepaald deelgebied zal bijdragen tot beter inzicht in een ander gebied. De theorie van neutronensterren werd in de dertiger jaren door een theoretisch fysicus ontwikkeld als een soort theoretische Spielerei, maar is nu bijzonder actueel in verband met o.a. de waarneming van pulsars en de oorsprong van de kosmische straling. Routinemetingen van positie en eigenbewegingen van sterren hebben de basis gevormd van onze kennis over de differentiële rotatie van ons melkwegstelsel en daarmee over de structuur van melkwegstelsels in het algemeen. Radioruismetingen met een louter technische achtergrond stonden om de wieg van de radio-astronomie; de studie van energieproductie-mechanismen in sterren heeft geleid tot het thermonucleaire onderzoek (en, helaas, de waterstofbom). Het onderzoek van veranderlijke sterren heeft ons de afstandsschaal in het heelal leren kennen. - Voor elke wetenschappelijke onderzoeker is het van primair belang dat hij zijn onderzoek-activiteiten richt op een probleem dat hij aan kan, gegeven zijn belangstelling en voorkennis. Het zou zeer onverstandig zijn als ieder zich slechts met de spectaculaire aspecten van het vak zou bezighouden, de grondslagen en hulpmiddelen zijn even belangrijk.

Als wij nu toch enkele probleemgebieden met name noemen, is het dus onder alle voorbehoud. Wij verdelen de astronomie daartoe in een aantal deelgebieden, en kiezen daaruit steeds een aantal onderwerpen, die op dit moment van groot belang lijken. De keuze is zeker niet volledig.

### I. De aarde en de ionosfeer.

Hier is het ontstaan van het aardse magnetische veld, en daarmee het probleem van de fysische toestand van het inwendige van de aarde nog steeds niet bevredigend begrepen. Mogelijk bestaat er tussen dit probleem en dat van het magnetische veld van een ster en van een melkwegstelsel een grote mate van overeenkomst, in die zin dat turbulente bewegingen van geladen deeltjes (dus turbulente elektrische stromen) in beide gevallen aan het veld ten grondslag liggen, waarbij de rotatie van het object een gewichtige rol speelt. Ook is nog niet bekend of het magnetische veld voortdurend wordt "bijgegenerereerd" of dat het

tijdens het ontstaan van de aarde (of het melkwegstelsel) is "ingebouwd". De ionosfeerstudie (vooral met ruimtevaartuigen) levert ons een middel om dynamische verschijnselen in het interplanetaire gas te leren kennen (zoals de zonnwind). Interessant is in het bijzonder het systeem van schokgolven, dat zich rondom de aarde heeft gevormd, en de zgn. sectorstructuur van het magnetische veld rondom de zon.

## II. Het planetaire stelsel.

Wat over de aarde is gezegd geldt mutatis mutandis voor alle planeten. De verschillen in samenstelling en fysische eigenschappen tussen de planeten, die voortdurend beter bekend worden dankzij o.a. het infrarood-onderzoek en het ruimteonderzoek, moeten samenhangen met de wijze van ontstaan van ons zonnestelsel - die nog lang niet bevredigend is verklaard. Dit onderwerp houdt direct verband met het probleem van het bestaan van leven elders in het heelal.

## III. De zon.

Terwijl over de stralende eigenschappen van in het bijzonder de zichtbare fotosfeer van de zon (een laag van slechts enkele honderden kilometers dikte) zeer veel bekend is, is het met ons inzicht in wat zich daarboven en daaronder afspeelt, nog droevig gesteld. De mechanismen, verantwoordelijk voor het ontstaan van zonnevlekken, zonnevlammen, protuberansen en andere afwijkingen van de homogeniteit van de zonne-atmosfeer vormen urgente onderwerpen van onderzoek. De structuur en eigenschappen van de corona van de zon zijn nog slechts zeer oppervlakkig bekend. De differentiële rotatie en de 11-jarige cyclus zijn nog onverklaard. Het gaat hier voornamelijk om magneto-hydrodynamische en plasmafysische verschijnselen, die gekarakteriseerd zijn door zeer complexe mathematische verbanden, die meestal numeriek moeten worden behandeld, en die weinig directe aangrijpingspunten vinden in de waarneming. De radioastronomie vormt hierbij een zeer belangrijk hulpmiddel.

## IV. De sterren.

Wat voor de zon geldt, geldt ook voor de sterren. In de algemene stralende eigenschappen van steratmosferen bestaat veel inzicht - hoewel onze kennis ophoudt kwantitatief te zijn zodra ernstige afwijkingen van thermodynamisch evenwicht ("non LTE") in de atmosfeer optreden, en dat is misschien wel vaker het geval dan men denkt, en zeker in ijle steratmosferen is het laatste woord nog niet gezegd. Maar bijna niets weten we van de magneto-hydrodynamische eigenschappen van steratmosferen. De studie hiervan is ook zeer moeilijk, omdat wij

hier vrijwel geen directe waarnemingsgegevens bezitten. Wel indirecte, zoals van magnetische sterren, sterren met afwijkende abundanties, het zeer vaak optreden van meervoudige sterren, etc. Het beschrijven van steratmosferen in termen van temperatuur, dichtheid en samenstelling, zoals die tot uiting komt in de bekende spectrale klassificatie, vormt nog slechts het begin van een werkelijk begrijpen van deze complexe systemen.

De energieproductie in sterren geschiedt door nucleaire processen. Het optreden daarvan hangt af van de evolutie van een ster, van het ogenblik van zijn condensatie uit het interstellair gas tot zijn dood als witte dwerg of neutronenster. De studie van deze evolutie met als onderdeel de creatie van zware elementen zal nog lang een hoofdonderdeel van de stellaire astronomie vormen. Het bestuderen van bijzondere sterren vormt hiervoor een goed aanknopingspunt. Sterk uiteenlopende condities, zoals in zeer zware, doch ijle hete sterren (superreuzen) of zeer dichte sterren met al dan niet zeer sterke magnetische velden (pulsars), of snel roterende sterren komen voor en de studie van het gedrag van de materie en de straling onder deze condities is van groot belang. Atmosfeer-modellen voor deze extreme condities ontbreken vooralsnog bijna volledig. De uitwisseling van materie tussen sterren en interstellair gas is nog slechts in grote lijnen beschreven.

#### V. De interstellair materie.

De samenstelling van het interstellair gas stelt ons heden ten dage voor steeds grotere raadsels. Tallose bi- en multi-atomaire moleculen zijn radioastronomisch ontdekt, en hoe deze zich gevormd hebben is nog volkomen onbegrepen. Er blijkt een chemie van de interstellair materie te bestaan. De aanwezigheid van interstellair stof met weinig bekende samenstelling en eigenschappen speelt in deze chemie, evenals de aanwezigheid van straling, een belangrijke rol.

Gestimuleerde stralingsprocessen (maserwerking) evenals katalytische processen liggen ten dele ten grondslag aan de waargenomen verschijnselen.

#### VI. Ons melkwegstelsel.

Dit bestaat uit sterren van allerlei soort, ondergebracht in zogenaamde populaties, en uit gas en stof. De wisselwerking tussen al deze componenten (gravitatiekrachten zowel als electromagnetische spelen een rol) leidt tot een ruimtelijke en snelheidsverdeling van de materie die zeer inhomogeen is. De differentiële rotatie van ons melk-

wegstelsels brengt enig systeem in deze inhomogeniteiten, een systeem dat wij als spiraalarmen zien. Deze moeten waarschijnlijk worden opgevat als het gevolg van het optreden van roterende dichtheidsgolven van gas en sterren. De theorie hiervan is nog slechts gebrekkig ontwikkeld. In gebieden van grote dichtheid vormen zich sterren, maar eerst na enige tijd, zodat de "sterarmen" iets achter roteren bij de "gasarmen". Meer hierover kunnen wij te weten komen bij de bestudering, met radioastronomische methoden (Westerbork!) van andere melkwegstelsels. De situatie in de kern van ons melkwegstelsel (en van andere stelsels) vormt heden ten dage nog een enigma. Snelle rotatie en expansie, explosieve verschijnselen en sterke radio- en infraroodstraling wijst op een hevig actief gebied, waarin condities heersen die wij nu nog niet fysisch kunnen beschrijven.

In de uiterste delen van het melkwegstelsel, in het bijzonder buiten de schijf, dus in de halo, vindt men speciale objecten zoals bolvormige sterrenhopen en hoge snelheidswolken. De eerste zullen nauw samenhangen met de wijze van ontstaan van ons melkwegstelsel, de hoge snelheidswolken kunnen zowel door de kern zijn uitgestoten, als ook "opgeveegd" zijn geworden tijdens de beweging van ons stelsel door het intergalactische gas. Een en ander vraagt om intensieve theoretische en observationele studie - en meer waarnemingen.

#### VII. Extragalactische stelsels.

De veelheid van objecten en de veelvormigheid van hun voorkomen: diverse soorten extragalactische stelsels, radiogalaxies, quasars, is ons pas sinds kort bekend geworden, en mogelijk zullen er in de naaste toekomst nog vele nieuwe objecten bijkomen (o.a. dankzij het infrarood- en röntgenonderzoek). Ook hier moet als basis van de veelvormigheid aan evolutieprocessen worden gedacht. De natuurkunde, nodig om de processen van vorming van melkwegstelsels, zowel als van de soms extreem hoge emissie van stralingsenergie door deze objecten te begrijpen, staat nog in de kinderschoenen. Een belangrijk onverklaard aspect is ook het soms zeer grote impulsmoment van extragalactische stelsels. Voorlopig zijn wij nog in het beschrijvende stadium, de observationele ontdekkingen volgen elkaar op en het hoeft geen verbaazing te wekken dat dit gebied van de astronomie thans wel het meest spectaculaire vormt. De studie ervan levert uiterst interessante gegevens over de kosmologische ontwikkeling van het heelal.

#### VIII. Intergalactische straling.

Hieronder vatten wij samen de kosmische straling (ultra relativistische deeltjes), de intergalactische röntgen- en gammastraling,



de 3K-straling, en de neutrino-straling. Deze vullen het gehele heelal en het ontstaan ervan is nog slechts ten dele begrepen. Steeds gevoeliger waarnemingsmethoden zijn nodig om de eigenschappen van al deze soorten straling zo nauwkeurig te kunnen beschrijven dat men een betrouwbaar inzicht in de fundamentele achtergronden van deze verschijnselen kan verkrijgen. (Dit vak heet hoge-energie astrofysica.) Op dit moment kan men nog slechts speculeren.

#### IX. Kosmologie.

Hiervoor geldt hetzelfde, zij het dat de grondgedachten van de kosmologie wel reeds zijn uitgekristalliseerd. Om een keuze tussen de verschillende theoretische mogelijkheden te kunnen maken zijn echter meer en beter samenhangende waarnemingen een eerste vereiste. Deze variëren van radarmetingen der planeten tot tellingen van verre melkwegstelsels.

X. Wij komen hiermee op de categorie van de techniek van de astronomische waarnemingen. Hier ligt een zeer breed veld van experimenteel onderzoek, waarvan de ontginning nog slechts is begonnen. Dit vormt een aspect van de zgn. laboratorium-astrofysica. Betere detectiemethoden in extreme golflengte- en energiegebieden, groter ruimtelijk en spectraal scheidend vermogen zijn de trefwoorden waarmee men de instrumentele ontwikkeling kan kenschetsen. Parallel hiermee lopen de verdere ontwikkeling van de astronomische ruimteonderzoek-techniek alsmede die van dataverwerkende methoden. Voor de technisch aangelegde astronoom valt nog veel te doen.

XI. Maar ook de theoreticus behoeft niet stil te zitten. Het toepassen van de in de moderne fysica verworven inzichten op astrofysische problemen wordt van steeds wijder betekenis. Kon men vroeger met de wetten van Planck en Saha al een hele astrofysica opbouwen, tegenwoordig heeft men theoretische en experimentele atoom- en moleculspectroscopie, plasmafysica, magnetohydrodynamica, elementaire deeltjesfysica en quantumelectrodynamica (stralingstheorie) nodig, om van de moderne inzichten in de structuur der gecondenseerde materie, in het bijzonder onder extreme condities, maar niet te spreken. Dit alles vormt een ander onderdeel van de reeds genoemde laboratorium-astrofysica.

Wij leven in een opwindende tijd, waarin de grenzen tussen astronomie, fysica en chemie vervagen, en waarin gedurende de komende decennia vele opwindende ontdekkingen en theoretische doorbraken zijn te verwachten.

## 7. Astronomische organisaties en onderzoekprogramma's

### 7.1. De belangrijkste internationale overkoepelende organisaties, waaraan ons land deelneemt.

#### Internationale Astronomische Unie

(I.A.U., ca. 2000 leden uit ca. 100 landen; Secr. Gen. thans Prof. Dr. C. de Jager

wereldorganisatie

- Organiseert:
1. Algemene Vergadering 1x per 3 jaar met overzichtsvoordrachten, symposia en commissiebijeenkomsten.
  2. Symposia en colloquia in vele landen, meestal met publicatie van de voordrachten.
  3. Verspreiding van documentatie en informatie, bijv. astronomische telegrammen.
  4. Standaardisering astronomische constanten. etc.

Commissies I.A.U. op een 40-tal vakgebieden, zoals Commissie 10: Zonneactiviteit; Commissie 40: Radioastronomie; etc.

Deze bestaan uit 10 - 50 leden; de voorzitter bereidt voor elke Algemene Vergadering een rapport over verricht werk en toekomstplannen voor. Meestal worden de IAU-Symposia en -colloquia door een of meer Commissies georganiseerd.

#### Europese Astronomische Vereniging in oprichting (E.A.S.)

1. Zal in Europa wetenschappelijke bijeenkomsten organiseren. (vooral ook voor jongere astronomen, niet-leden I.A.U. inbegrepen, van belang).
2. Zal wellicht tijdschriftenwezen saneren.

#### Divisie Fysica en Astronomie van Europese Fysische Vereniging (EPS)

Onderdeel van de E.P.S., dat zich speciaal op de typisch fysische aspecten van de astronomie richt. Organiseert symposia.

#### European Southern Observatory

(E.S.O., 9 deelnemende landen. Directeur: Prof. A. Blaauw

Europese organisaties

De Raad van deze organisatie

1. bestuurt E.S.O.-observatorium in Chili.
2. stelt bouwprogramma vast.
3. stelt waarnemingsprogramma vast.

Europese organisaties

Astronomy and Astrophysics, an European Journal

A and A, bundelt een vijftal oorspronkelijk nationale astronomische tijdschriften. Voorzitter Board: Prof. A. Blaauw; hoofdredacteur: Prof. S. Pottasch

1. Geeft maandelijks Europees astronomisch tijdschrift uit.

Joint Organisation for Solar Observatory in Europe  
(J.O.S.O., in oprichting; Secr.: Prof. C. de Jager)

1. Zal trachten in Zuid-Europa zonne-observatorium te stichten voor gemeenschappelijk gebruik.

E.S.R.O. (European Space Research Organisation)

Overkoepelende organisatie met het doel het Europese ruimteonderzoek in de ruimste zin, dus naast astronomisch gericht ook technisch gericht onderzoek voor navigatie en telecommunicatiedoeleinden, te bevorderen.

ESTEC  
(Noordwijk)

ESRIN  
(Frascati)

Ontwikkeling satellieten

Laboratorium

## 7.2. Nationale overkoepelende organisaties.

Nederlandse Astronomen Club (N.A.C.)

ca. 200 leden, afgestudeerden op enigerlei wijze werkzaam op astronomisch gebied, ook leraren. Voorz.: Prof. C. de Jager.

1. Organiseert 3x per jaar een wetenschappelijke vergadering over bepaald thema.
2. Onderhoudt tijdschriftenverzending aan leden die niet aan een der instituten verbonden zijn.

Sectie Sterrenkunde van de Akademische Raad; 15 leden (vertegenwoordigers van de vijf instituten). Voorz.: Prof. H.G. van Bueren

Heeft tot taken:

1. Coördinatie sterrenkunde-onderwijs.
2. Beleidsvoorbereiding sterrenkundig onderzoek.
3. Contact met internationale organisaties.

De Sectie wordt geleid door een Nationaal Comité Astronomie van 5 leden, dat het dagelijks bestuur vormt en het beleid voorbereidt.

Door de Sectie Sterrenkunde van de Akademische Raad zijn gevormd:

Onderwijscommissie

Tracht samenhangende collegeregelingen te bereiken en organiseert interuniversitaire colleges.

Evaluatiecommissie

Bestudeert voor- en nadelen van concentratie der astronomische inspanningen in een instituut.\*)

NESOS-commissie

Beheert Nederlands waarnemingsstation in Griekenland en bereidt groter station in Spanje voor

\*) De mogelijkheid van concentratie van het Nederlandse astronomische onderzoek in één instituut, het Astronomisch Centrum, wordt thans overwogen. Een beslissing hierover is nog niet in zicht.

Stichting Radiostraling van Zon en Melkweg = S.R.Z.M.

Voorz.: Prof. H.C. van de Hulst

1. Coördineert het radioastronomisch onderzoek in de radioobservatoria te Dwingeloo, Westerbork en Nederhorst den Berg; en de laboratoria te Dwingeloo, Leiden en Utrecht.
2. Stelt het waarnemingsprogramma vast.
3. Verdeelt de financiën, afkomstig van Z.W.O.

Commissie Geofysica en Ruimteonderzoek van de Koninklijke Akademie van Wetenschappen = G.R.O.C. - Voorz.: Prof. H.C. van de Hulst

1. Coördineert het ruimteonderzoek, o.a. in de laboratoria te Leiden, Utrecht en Groningen.
2. Verdeelt de financiën, afkomstig van de Ministeries van Onderwijs en Wetenschappen en Economische Zaken.

7.3. Instituten en onderzoekprogramma's in Nederland.

7.3.1. Sterrenwachten.

Verreweg de meeste astronomen in Nederland zijn in een van de vijf sterrekundige instituten, verbonden aan de universiteiten te Leiden, Utrecht, Amsterdam, Groningen en Nijmegen, werkzaam. (Ca. 140 medewerkers.) Deze instituten zijn autonoom, d.w.z. zij stellen hun eigen onderzoekprogramma vast, zij het dat de Sectie Sterrenkunde en andere genoemde organisaties daarin enigermate trachten te coördineren. Hetzelfde geldt voor het astronomisch onderwijs, dat geheel aan de instituten plaats vindt. De financiering van onderwijs en onderzoek loopt via de universitaire begrotingen met steun van Z.W.O. voor bepaalde onderzoeken hetzij in de vorm van beurzen ("promotiebeurzen"), hetzij als bijdrage in de materiële kosten. Ook zijn een aantal SRZM- en GROC-medewerkers aan de instituten verbonden. De voornaamste onderzoekprogramma's zijn:

Leiden (inclusief laboratoria van SRZM en Ruimteonderzoek)

1. Positionele astronomie van kleine planeten.
2. Fotometrie van sterren (inclusief veranderlijken), meest uitgevoerd in het Leidse station te Hartepoortbeestdam in Zuid-Afrika, en te Leiden bewerkt.
3. Dynamica van sterren en clusters.
4. Structuur van ons melkwegstelsel. (Voornamelijk radioastronomisch onderzoek, uitgevoerd in Dwingeloo, en uitgewerkt en theoretisch behandeld te Leiden.)
5. Structuur van extragalactische stelsels. (Voornamelijk radioastronomisch onderzoek, uitgevoerd in Dwingeloo en Westerbork, en uitgewerkt en theoretisch onderzocht te Leiden, in nauwe samenwerking met Groningen.)
6. Röntgenastronomie, in samenwerking met Leidse werkgroep ruimteonderzoek.
7. Kosmische straling, in samenwerking met Leidse werkgroep ruimteonderzoek.
8. Interstellaire materie, vooral de eigenschappen van het interstellaire stof. (In samenwerking met het Kamerlingh Onnes Laboratorium te Leiden.)
9. Optische instrumentatie.
10. Radioastronomische instrumentatie (door Leids laboratorium SRZM).

Utrecht (inclusief werkgroep Zon van SRZM en Laboratorium voor Ruimteonderzoek).

1. Optisch onderzoek van de fysische verschijnselen in de fotosfeer en chromosfeer van de zon.
2. Optisch en radioastronomisch onderzoek van de fysische verschijnselen in de corona.
3. Ruimteonderzoek van zon in UV en röntgengebied (door Utrechts Laboratorium voor Ruimteonderzoek).
4. Theorie van zonnevlekken, zonnevlammen en andere processen in de zonneatmosfeer.
5. Spectroscopie en fotometrie van sterren, observationeel en theoretisch. De waarnemingen worden aan grote buitenlandse sterrenwachten en in ESO verricht.
6. Evolutie en theorie van het inwendige van sterren.
7. Ruimteonderzoek (UV en röntgen) van sterren. (Utrechts Laboratorium voor Ruimteonderzoek)
8. Sterinterferometrie in het zichtbare en infrarode spectrum.
9. Theorie van stralingsprocessen, voornamelijk in de zonnecorona.
10. Plasmafysica en magnetohydrodynamica van de zonnecorona (theoretisch).
11. Optische en electronische instrumentatie, met inbegrip van laseroptica.
12. Radioastronomische instrumentatie (uitgevoerd in PTT-laboratorium te Kootwijk onder auspiciën van SRZM).
13. Spectroscopische en teller-instrumentatie t.b.v. ruimteonderzoek (Utrechts Laboratorium voor Ruimteonderzoek).

Groningen (inclusief werkgroep GROOC en Kapteyn Sterrewacht te Roden).

1. Astrofysische theorie van steratmosferen, zonnecorona en interstellaire materie.
2. Veranderlijke sterren.
3. Interstellaire absorptie, waarnemingen en theorie.
4. Structuur van extragalactische stelsels (voornamelijk radio-astronomisch onderzoek in Dwingeloo en Westerbork, en uitgewerkt te Groningen in nauwe samenwerking met Leiden).
5. Infraroodfotometrie (o.a. onder auspiciën van Gronings Laboratorium voor Ruimteonderzoek).
6. Ontwikkeling optische instrumentatie, o.a. ten behoeve van het ruimteonderzoek (onder auspiciën van het Gronings Laboratorium voor Ruimteonderzoek).

Amsterdam

1. Kosmologische theorie.
2. Spectroscopie van steratmosferen.
3. Evolutie van sterren en theorie van sterinwendige.
4. Sterdynamica.

Nijmegen

1. Positionele astronomie.
2. Veranderlijke sterren.

7.3.2. =====  
Radiosterrenwachten  
=====

Veel van hetgeen hier gebeurt is reeds eerder genoemd in het kader van het werk aan de sterrenwachten.

Dwingeloo

De 25-meter radiotelescoop wordt gebruikt voor:

1. Waarnemingen van het ruimtelijk snelheidsveld in ons eigen melkwegstelsel.
2. Onderzoek van bijzondere objecten.
3. Radioastronomie van de zon.

Daarnaast vindt in het laboratorium op uitgebreide schaal plaats:

4. Radioastronomische instrumentatie voor Dwingeloo en voor Westerbork.

Westerbork

De synthese-radiotelescoop, bestaande uit 10 vaste en 2 verrijdbare 25-meter radiotelescopen wordt gebruikt voor de studie van de structuur van allerlei radioastronomische objecten. Er is een uitgebreid waarnemingsprogramma opgesteld om het instrument zo efficiënt mogelijk te benutten. Dit omvat o.a. het structuur-onderzoek van diverse extragalactische stelsels, van bijzondere radiobronnen en van röntgenbronnen. Incidenteel worden zulke objecten als novae, witte

dwergen, rode sterren, pulsars, planeten en H II gebieden waargenomen.

De waarneemprogramma's van Westerbork en Dwingeloo vormen een integrerend onderdeel van het onderzoek aan de sterrenwachten te Leiden en Groningen, en (voor een veel kleiner deel) te Utrecht.

### 7.3.3. Ruimteonderzoeklaboratoria

Het hierin verrichte werk is reeds onder het hoofd "Sterrenwachten" genoemd, waarmee die laboratoria nauw zijn verbonden.