

Dit vel pas uit te reiken, wanneer de studenten aan dit punt toe zijn (na eigen discussie over 4).

#### 4. Geschiedenis van het heelal

- 4.1 Beschouw een foton (golf) dat door het expanderende heelal trekt. Op ogenblik  $t$  is hij in  $r$ . (heelalstraal  $R(t)$ ) en wordt waargenomen met golflengte  $\lambda(r)$ . Op  $t + dt$  is hij in  $r + dr$  (heelalstraal  $R(t) + dR$ ) en wordt waargenomen met  $\lambda(t) + d\lambda$ .

Gebruik Hubble en Doppler om het verband tussen de roodverschuiving

$$z = \frac{\lambda_{\text{obs}} - \lambda_{\text{em}}}{\lambda_{\text{em}}}$$

en de straal van het heelal bij  $t_{\text{obs}}$  en  $t_{\text{em}}$  af te leiden:

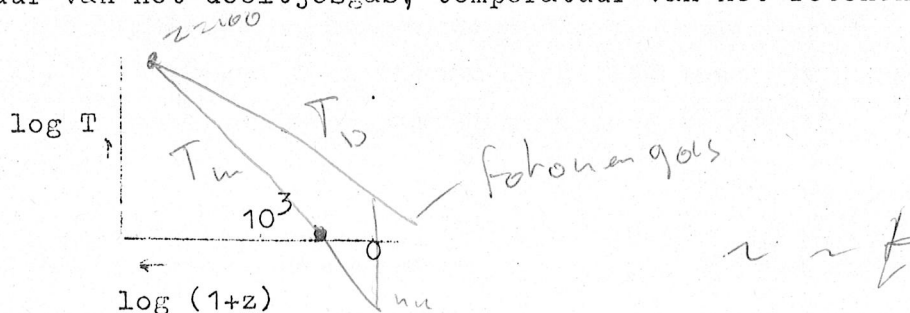
Bepaal uit Doppler  $d\lambda$ , als functie van de verwijderingssnelheid  $du$  van  $r$  t.o.v.  $r + dr$ , druk  $du$  via Hubble uit in  $dR$ . Vindt het verband tussen  $\lambda$  en  $R$  op één ogenblik.

Druk  $R$  (ten tijde  $z$ ) uit in  $R$  (nu) en  $z$ .

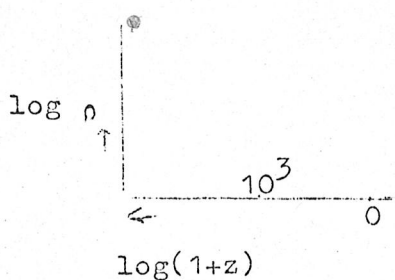
Bedenk dat het verband tussen  $t$  en  $z$  waarschijnlijk monotoon is, we gebruiken liever  $z$  als tijdscoördinaat dan  $t$ , omdat voor  $t$  expliciet een heelalmodel nodig is.

- 4.2 Hoe hangt de massa dichtheid in energiemaat  $\rho_m$  samen met de straal van het heelal en hoe is de relatie tussen  $\rho_m$ , die we waarnemen bij  $z$ , en  $z$ ?
- 4.3 Hoe hangt het aantal fotonen bij frequentie  $\nu$  per ruimte-eenheid  $n_\nu(z)$  samen met de straal van het heelal en de roodverschuiving, en de energiedichtheid  $\rho_\nu(z)$ ? Vergelijk dat met het resultaat in 4.2 !
- 4.4 Hoe verandert het spektrum van de achtergrond-straling met de straal van het heelal?  
Hoe hangt de temperatuur van de straling af van de roodverschuiving?
- 4.5 Hoe hangt de temperatuur van de materie af van de roodverschuiving?
- 4.6 Wanneer, bij welke temperatuur en bij welke roodverschuiving zijn de straling en de materie gekoppeld? Wat zou de gastemperatuur op dit moment zijn?
- 4.7 Hoe is op dat moment de verhouding tussen de energiedichtheid van het stralingsgas en de termiese energiedichtheid van de materie? Welke komponent zal vóór dit tijdstip overheersen?

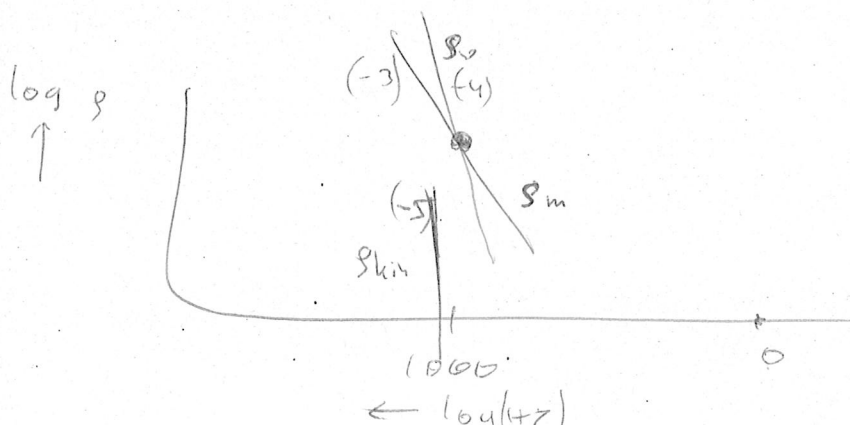
- 4.8 Vergelijk de rustmassaenergiedichtheid met de stralingsenergiedichtheid? Als je verder terug gaat in de geschiedenis verandert die verhouding; wanneer overheerst de straling?
- 4.9 Bij welke roodverschuiving kennen we de fysika niet meer?
- 4.10 Bij welke roodverschuiving hebben we een quantummechanika nodig die rekening houdt met de kromming van het heelal?
- 4.11 Teken in een figuur de geschiedenis van de volgende fysiese parameters van het heelal, als functie van de roodverschuiving, geef daarbij ook de korresponderende straal van het heelal aan: temperatuur van het deeltjesgas, temperatuur van het fotonengas.

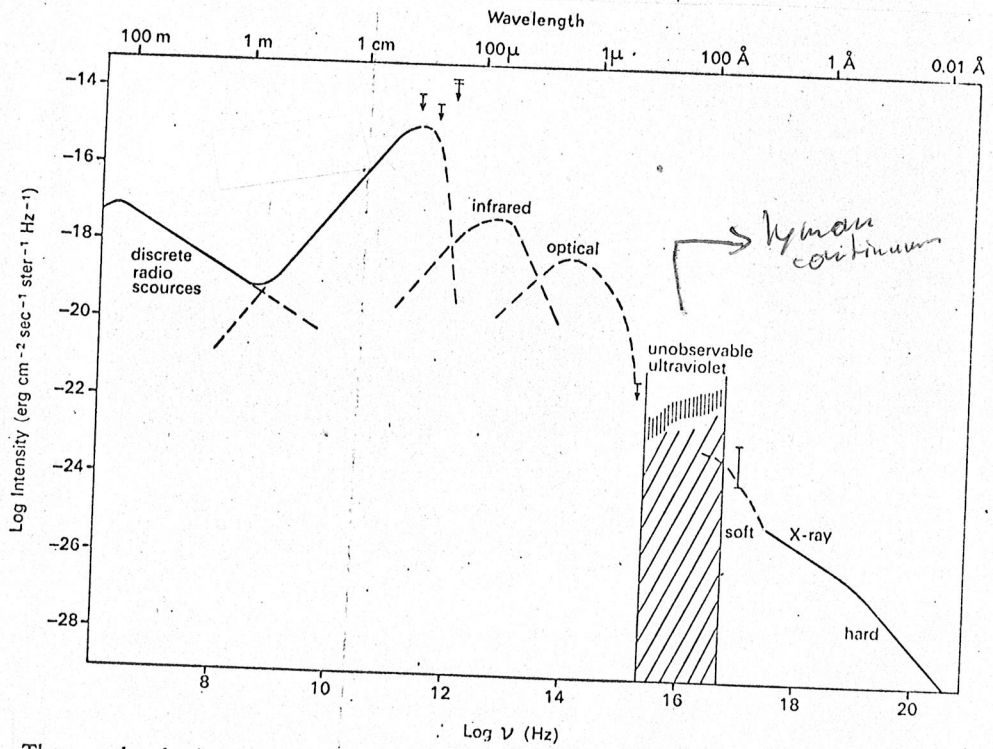


- 4.12 Idem, maar nu voor de stralingsenergiedichtheid, de rustmassaenergiedichtheid, en de kinetische energiedichtheid van het gas.



Geef in beide figuren de "belangrijke" ogenblikken aan.





The complete background spectrum in the range  $10^8 < \nu < 10^{21}$  Hz. Where direct observations are available full lines are drawn. Where only theoretical estimates are available, these are drawn with a dashed line.

M.S. LONCAR & R.A. SUNYARV *Ap J* 151, 66, 1969

W  
X