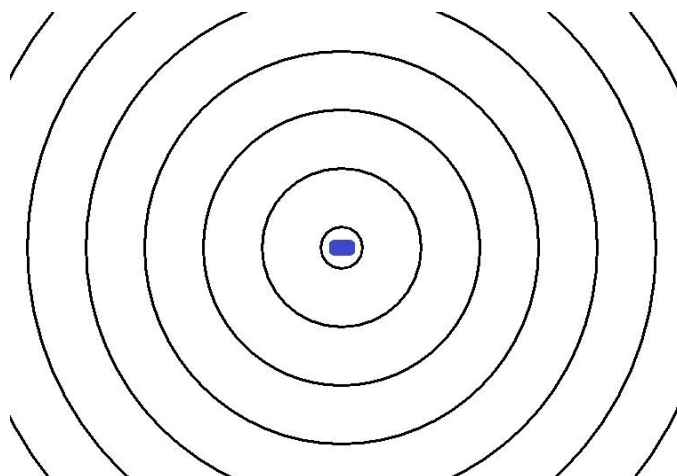


# Opgaver i kosmologi - fra [www.borgeleo.dk](http://www.borgeleo.dk)

## Opgave 1 - Dopplereffekt - eksempel

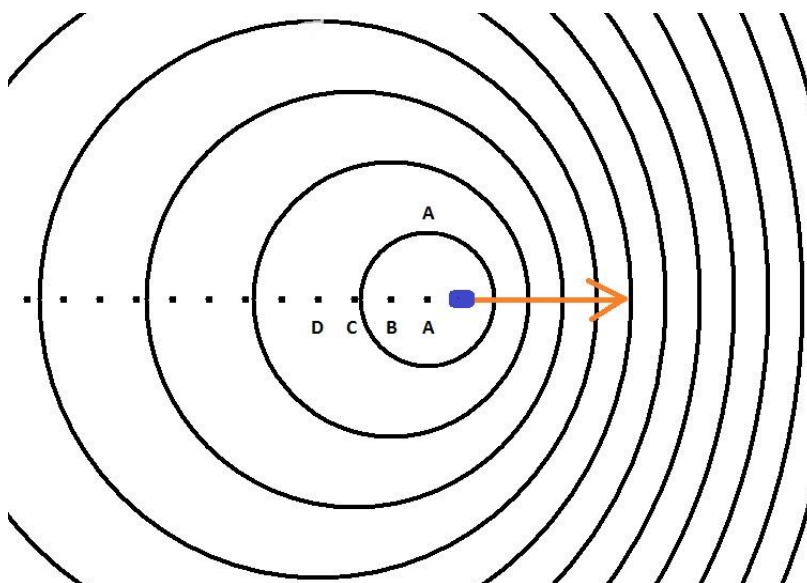
Et bilhorn i hvile udsender lydølger, og bølgetoppene udbreder sig med lydølens fart  $v = 340 \text{ m/s}$  i alle retninger med bølgelængden  $\lambda_0$ , der er afstanden mellem cirkelbølgerne, se figur 4. Tidsrummet mellem udsendelsen af bølgetoppene kaldes  $T$ , denne tid kaldes også bølgenes periode. Her er  $T = 0,01\text{s}$ .

a) Begrund, at  $\lambda_0 = 3,4 \text{ m}$



Figur 4: Bilhorn i hvile. Bølgetoppe udbreder sig med lydølens fart  $v = 340\text{m/s}$  med afstanden  $\lambda_0 = 3,4 \text{ m}$

Nu tildeles bilen en fart  $u = 20\text{m/s}$ . Herved ændres centrum for cirkelbølgerne hele tiden, fordi bilhornets placering er ændret for hver ny bølge, der udsendes, se figur 5.



Figur 5: Bilhorn i bevægelse, med farten  $u$ . Bølgecentrene D C B A ændres hele tiden pga. bevægelsen

Afstanden mellem cirkelbølgerne *til venstre* for lyd giveren er nu længere end på figur 4 på grund af bilens bevægelse. Denne ændrede bølgelængde betegnes  $\lambda$ .

- b) Begrund, at bilen har bevæget sig stykket  $|AB| = 0,20\text{m}$  for hver bølge, der udsendes.
- c) Begrund, at  $\lambda = 3,6\text{m}$  bilhorns bevægelse væk fra dig giver længere bølger

Når du befinder dig på højre side af lyd giveren på figur 5, vil bølgerne blive kortere fordi bilhornet bevæger sig mod dig.

- d) Begrund, at  $\lambda = 3,2\text{m}$  bilhorns bevægelse mod dig giver kortere bølger

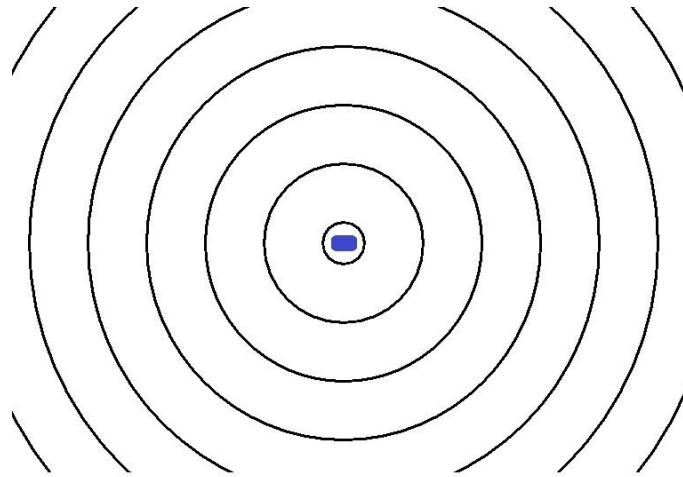
Når bilen bevæger sig væk fra dig:

- e) Brug værdierne af  $\lambda$  og  $\lambda_0$  til at vise, at brøken  $\frac{\lambda - \lambda_0}{\lambda_0} = 0,0588$   
Bølgelængden er altså forøget med 5,88% i forhold til  $\lambda_0$
- f) Brug værdierne af bilens fart  $u$  og lydets fart  $v$  til at vise at  $\frac{u}{v} = 0,0588$   
Bilens fart udgør altså 5,88% af lydets fart
- g) Brug dine udregninger i e) og f) til at begrunde, at  $\frac{\lambda - \lambda_0}{\lambda_0} = \frac{u}{v}$   
Denne formel kaldes Dopplerformlen for en lydkilde, der bevæger sig bort fra dig.

## Opgave 2: Dopplereffekt - med bogstaver

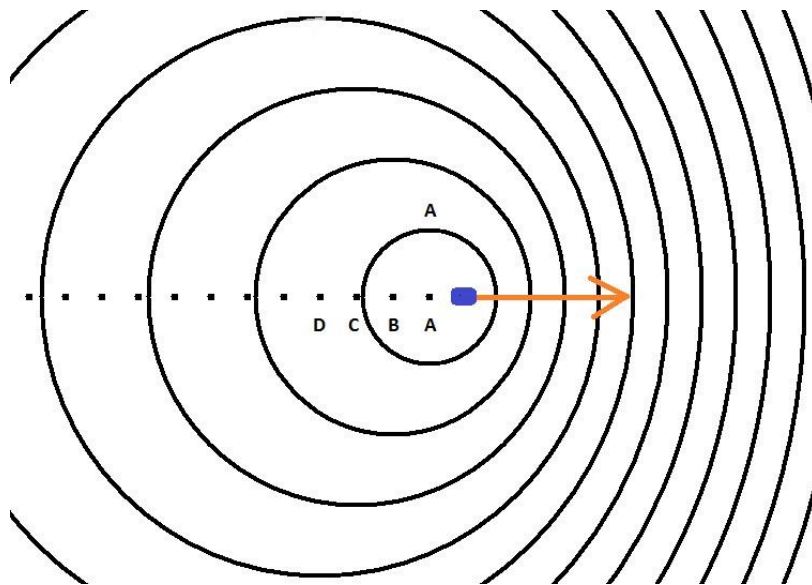
En (blå) lyd giver i hvile udsender lydbølger, og bølgetoppene udbreder sig med lydets fart  $v$  i alle retninger med bølgelængden  $\lambda_0$ , der er afstanden mellem cirkelbølgerne, se figur 6. Tidsrummet mellem udsendelsen af bølgetoppene kaldes  $T$ , denne tid kaldes også bølgens periode.

- a) Begrund, at  $\lambda_0 = v \cdot T$



Figur 6: Blå lyd giver i hvile. Bølgetoppe udbreder sig med lydets fart  $v$  med afstanden  $\lambda_0$

Nu tildeles lyd giveren en fart  $u$ . Herved ændres centrum for cirkelbølgerne hele tiden, fordi lyd giverens placering er ændret for hver ny bølge, der udsendes, se figur 7.



Figur 7: Blå bølge giver i bevægelse, med farten  $u$ . Bølgecentrene D C B A ændres hele tiden pga. bevægelsen

Afstanden mellem cirkelbølgerne *til venstre* for lyd giveren er nu *længere* end på figur 6 på grund af lyd giverens bevægelse. Denne ændrede bølgelængde betegnes  $\lambda$ .

- b) Begrund, at  $\lambda = \lambda_0 + |AB|$  bevægelse væk fra dig giver længere bølger
- c) Begrund, at  $|AB| = u \cdot T$  afstand mellem cirkelcentre
- d) Benyt b) og c) til at begrunde, at  $\lambda - \lambda_0 = u \cdot T$

e) Benyt svaret i d) sammen med svaret i a) til at begrunde, at

$$\frac{\lambda - \lambda_0}{\lambda_0} = \frac{u}{v} \quad \text{Dopplerformlen når lyd giver bevæger sig væk fra dig - længere bølger}$$

Den relative tilvækst i bølgelængden er altså lig med (minus) lyd giverens fart, delt med lydens fart.

Når du befinder dig på højre side af lyd giveren på figur 7, vil bølgerne blive kortere.

f) Gennemgå de ændringer, der sker i b), c), d) og e) i dette tilfælde

Du skulle gerne herved nå frem til formlen

$$\frac{\lambda - \lambda_0}{\lambda_0} = -\frac{u}{v} \quad \text{Dopplerformlen når lyd giver bevæger sig mod dig - kortere bølger}$$

### Opgave 3 - rødforskydning og fart

Rødforskydningen er det fænomen, at en galakses spektrallinjer alle er forskudt mod længere bølgelængder, altså mod rødere farver, end linjerne i de samme grundstoffer i laboratoriet. Rødforskydningen  $z$  er givet ved formlen

$$z = \frac{\lambda - \lambda_0}{\lambda_0} \quad \text{rødforskydning } z$$

hvor  $\lambda_0$  er spektrallinjens bølgelængde målt i laboratoriet, og  $\lambda$  er linjens bølgelængde i galaksespektret. I lyset fra galaksen NGC 1068 ses en spektrallinje fra grundstoffet calcium med bølgelængden 398,3 nm. I laboratoriet er bølgelængden 396,8 nm.

a) Beregn galaksens rødforskydning.

Når rødforskydningen  $z$  er mindre end 0,1, kan den tolkes som en Dopplerforskydning, der skyldes, at galaksen bevæger sig bort fra os og derved forøger afstanden mellem bølgetoppene.

Dopplerformlen fortæller os, at galaksens fart - i enheder af lysets fart - er lig med den relative ændring i lysets bølgelængde, altså rødforskydningen  $z$ .

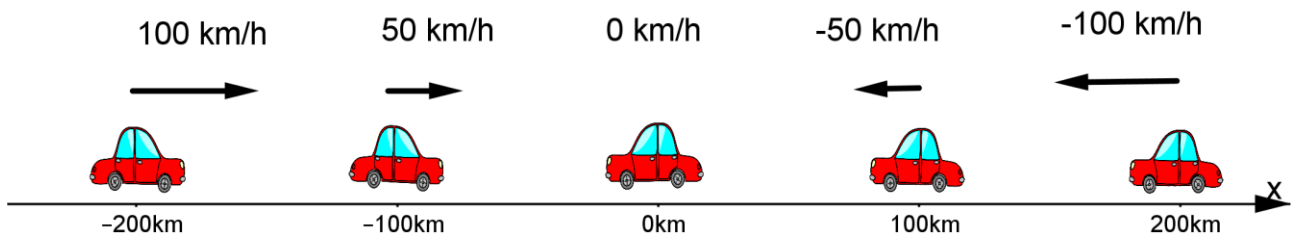
$$\frac{v}{c} = z \quad \text{eller} \quad v = z \cdot c \quad \text{Dopplerformlen}$$

b) Beregn den fart, hvormed NGC 1068 bevæger sig bort fra os

c) Brug Hubble-relationen til at beregne galaksens afstand fra os - hvis du har lært om Hubbles lov

Resultatet af den sidste beregning kan være lidt upålideligt, da galaksen er 'ret tæt' på os - galaksen kan være påvirket af gravitationskraften fra andre nærliggende galakser, der kan ændre på galaksens bevægelse.

## Opgave 4 - Holgers bil-univers og Holgers lov



### Holgers bilunivers

Du er deltager i Holgers bil-race, og er fører i en af de viste biler ovenfor. Bilerne kører med konstant hastighed. Bilerne er forsikrede, da der er en risiko for harmonikasammenstød (Big Crunch).

- Begrund, at bilernes fart  $v$  og deres afstand til bilen i hvile  $r$  er proportionale:  $v = H_0 \cdot r$  hvor  $H_0$  er Holgers konstant.
- Bestem  $H_0$  for Holgers bilunivers - med enheder
- Hvornår sker 'Big Crunch' i Holgers bil-univers?
- Kan du beregne hvor lang tid, der er til 'Big Crunch' udelukkende ved hjælp af Holgerkonstanten?

For de mere nørdede:

I en smart beskrivelse af hændelsesforløbet i Holgers Univers siger vi, at alle bilerne har faste positioner på x-aksen, fx de viste positioner. Men så lader vi 'rummet' - dvs. x-aksen med kilometermærkerne - skrumpe som en elastik i stedet.

- Ville du med denne smarte beskrivelse afbestille din bilforsikring? Med den nye beskrivelse støder bilerne måske ikke rigtigt sammen, da de har faste positioner, det er jo bare rummet mellem bilerne, der bliver mindre?

## Opgave 5 - Hubbles lov

I tabellen nedenfor ses data for nogle galakser i de nævnte galaksehobe, hvortil man mener at have bestemt afstanden med nogenlunde sikkerhed ud fra bl.a. cepheidemetoden. Hastighederne er bestemt ud fra rødforskydningerne, målt ud fra galaksens spektrum.

Galakse	Afstand $r$	Hastighed $v$
	Mlysår	$10^3$ km/s
UMa	80,1	1,27
Fornax	78,2	1,38
Centaurus	203	3,39
Hydra I	242	3,49

Pegasus	215	3,88
Cancer	298	4,90
Pisces	283	5,11
Perseus	323	5,47
Zw 74-23	375	6,23
A1367	394	6,64
MOO	461	6,99
Coma	411	7,10
A539	524	8,50
A2634/66	450	8,61
A1185	724	10,5
A2147	697	10,5
Hercules	648	11,2

a) Afsæt datapunkterne i et koordinatsystem med afstanden  $r$  på x-aksen og hastigheden  $v$  på y-aksen.

b) Vis ved en passende regression, at der er en proportionalitet mellem hastigheden  $v$  og afstanden  $r$ , altså  $v = konst \cdot r$ . Opskriv regressionsligningen.

Proportionalitetskonstanten kaldes Hubblekonstanten og betegnes med  $H_0$ . Sammenhængen mellem hastighed  $v$  og afstand  $r$  kan så skrives:

$$v = H_0 \cdot r \quad \text{Hubbles lov}$$

c) Sammenlign din værdi for Hubblekonstanten med

$20,8 \frac{\text{km}}{\text{s}} / \text{Mlysår}$ , der er den værdi, Planck-satellitens data har

givet (2014)

### Opgave 6 - Hubbletiden og et estimat for Universets alder

Vi ser på to galakser, hvis hastigheder bort fra os antages at være hhv. 1.000 km/s og 3.000 km/s.

- a) Brug Hubble's lov til at bestemme de to galaksers nuværende afstande fra os. Brug værdien af Hubblekonstanten fra Planck-data, se forrige opgave.

Gå ud fra at de to galaksers hastigheder ikke har ændret sig i tidens løb.

- b) Brug så de beregnede afstande og hastighederne ovenfor til at beregne den tid, der er gået siden afstanden fra de to galakser til os var 0.

Dette resultatet kaldes Hubbletiden  $T_0$

- c) Gør rede for at  $T_0 = \frac{1}{H_0}$  ved at bruge Hubbles lov

Forudsætningerne ovenfor om, at galaksernes hastighed hele tiden har været konstant, viser sig ikke at holde. Derfor giver Hubbletiden kun et skøn over Universets alder (= tiden siden Big Bang).

Bruger man Universets nuværende udvidelsehastighed (Hubblekonstanten) og tager hensyn til at Universet indeholder stof, der ved gravitationskræfter har bremset galaksernes bevægelse (og stadig gør det), og indeholder sort energi, der har accelereret galakserne (og stadig gør det), kan man beregne Universets alder til 13,82 Går.

- d) Sammenlign Hubbletiden med den bedre værdi for Universets alder. Hvor stor er afvigelsen i procent?

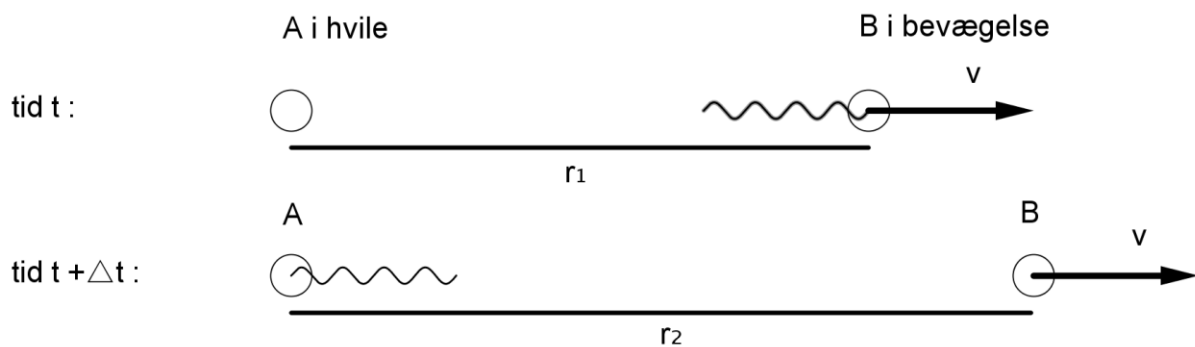
## Opgave 7 - rødforskydning af lys og Universets udvidelse - sidste del mest for lærere

Pointe: bølger strækkes i samme forhold som længder - se også opgave 6

Som vi skal se viser det sig, at lys på sin vej til os fra en fjern galakse 'strækkes' i bølgelængde i samme forhold som afstandene strækkes.

Årsagen til dette er den løbende Dopplereffekt, lyset undergår på sin vej mod os. Forestiller vi os, at lyset undervejs passerer en række galakser, vil lyset - set fra den næste galakse - komme fra en galakse, der er på vej væk modsat lysets bevægelse, og lyset vil derfor være rødforskydet på grund af Dopplereffekten. Yderligere rødforskydning sker mellem de to næste galakser, osv.

Argumentet for at bølgelængden strækkes med afstanden mellem galakserne, gennemgås nedenfor.



Figur 1: B-galaksen udsender under sin bevægelse lys i retning af galakse A

Af figuren ovenfor fremgår det, at galakse B klokken  $t$  udsender lys (med bølgelængden  $\lambda_2$ ) mod galakse A.

Når lyset efter tiden  $\Delta t$  når frem til galakse A, har lyset bevæget sig ( $c$  er lysets fart i det tomme rum):

$$r_1 = c \cdot \Delta t \quad \text{lysets vej} \quad (1)$$

Galakse B har i samme tid  $\Delta t$  bevæget sig:

$$\Delta r = r_2 - r_1 = v \cdot \Delta t \quad \text{galakse B's vej} \quad (2)$$

Af disse afstande danner vi forholdet og får ( $\Delta t$  forkortes bort):

$$\frac{\Delta r}{r_1} = \frac{v}{c} \quad \text{relativ tilvækst i afstanden mellem A og B} \quad (3)$$

Bølgelængden  $\lambda_2$  er Dopplerforskuet på grund af galakse B's bevægelse væk fra A. Kalder vi hvilebølgelængden (målt fra galakse B) for  $\lambda_1$ , har vi Dopplerformlen

$$\frac{\Delta\lambda}{\lambda_1} = \frac{v}{c} \quad \text{Dopplerformlen, når } \frac{v}{c} < 0,1 \quad (4)$$

hvor  $\Delta\lambda = \lambda_2 - \lambda_1$ .

Af (3) og (4) ser vi, at

$$\frac{\Delta\lambda}{\lambda_1} = \frac{\Delta r}{r_1} \quad \text{den relative tilvækst i } \lambda \text{ og } r \text{ er ens!} \quad (5)$$

a) Idet du benytter, at  $\Delta\lambda = \lambda_2 - \lambda_1$  og at  $\Delta r = r_2 - r_1$ , skal du begrunde, at

$$\frac{\lambda_2}{\lambda_1} = \frac{r_2}{r_1} \quad \text{Bølgelængden strækkes i samme forhold som afstanden} \quad (6)$$

Dette er en direkte konsekvens af Dopplerformlen (der i øvrigt kan begrundes med et helt tilsvarende argument som anvendt ovenfor)

*Sværrere:*

Denne ligning gælder ikke bare lokalt, men *også globalt*.

Argumentet for dette kræver integralregning - som du sikkert ikke har lært endnu.

Udgangspunktet er (5):

$$\frac{\Delta\lambda}{\lambda_1} = \frac{\Delta r}{r_1}$$

Vi går til den grænse, hvor tilvæksterne er differentielt små, og integrerer:

$$\int_{\lambda_1}^{\lambda_2} \frac{d\lambda}{\lambda} = \int_{r_1}^{r_2} \frac{dr}{r}$$

der medfører at

$$\ln\left(\frac{\lambda_2}{\lambda_1}\right) = \ln\left(\frac{r_2}{r_1}\right) \quad \text{eller} \quad \frac{\lambda_2}{\lambda_1} = \frac{r_2}{r_1}$$

Denne ligning er tilsyneladende identisk med (6), men her er der ingen forudsætninger om små tilvækster. Derfor gælder (6) også globalt.

### Opgave 8 - elastikforsøg - skalaforhold og rødforskydning - pararbejde

Skaf nogle ca. 0,5 cm brede elastikker, og klip dem over. Tegn så med lidt strakt elastik sorte 'galakse'-mærker med fx 10 cm's afstand. Mellem 'galakserne' tegnes sorte bølger (bugtede linjer), fx med bølgelængden 2 cm. Måske er det nemmest at sætte mærkerne for bølgetoppene først og så indtegne bølgerne bagefter. Marker med rødt nu to galakser, ikke nødvendigvis nabo-galakser. Marker ligeledes med to røde mærker to 'bølgetoppe', fx med 2 bølgelængder imellem stregerne.

Mål så galakseafstanden og bølge-topafstanden med en lineal. Noter resultaterne.



Stram elastikken og mål de to omtalte afstande måles igen. Noter resultaterne.

Beregn så forholdet mellem de to målte galakseafstande og forholdet mellem de to målte bølgetopafstande. Sammenlign de to forhold.

Beregn rødforskydningen fra dine talforhold.

Bemærkning: fotonerne (de tegnede bølger) burde bevæge sig samtidig med at 'Universet' (elastikken) udvider sig. Men placeringen af bølgen er ikke afgørende for, hvor meget bølgelængden er vokset!

Se evt. ballon-udgaven af denne model på linket [her](#).

### Opgave 9 - Kvasarspektrum

I et kvasarspektrum (en kvasar er en galakse, hvorfra der udsendes voldsomt meget lys - derfor kan den 'ses' selv om den er meget langt væk) måles bølgelængden af den såkaldte Lyman-alfa linje fra grundstoffet hydrogen til 1023 nm. I laboratoriet er denne bølgelængde målt til 121,6 nm.

- a) Beregn rødforskydningen for denne kvasar
- b) Hvor mange gange mindre end nu var Universet i udstrækning da lyset blev udsendt?

En beregning med en kosmologisk model viser, at kvasarens nuværende afstand til os er 29 Glysår.

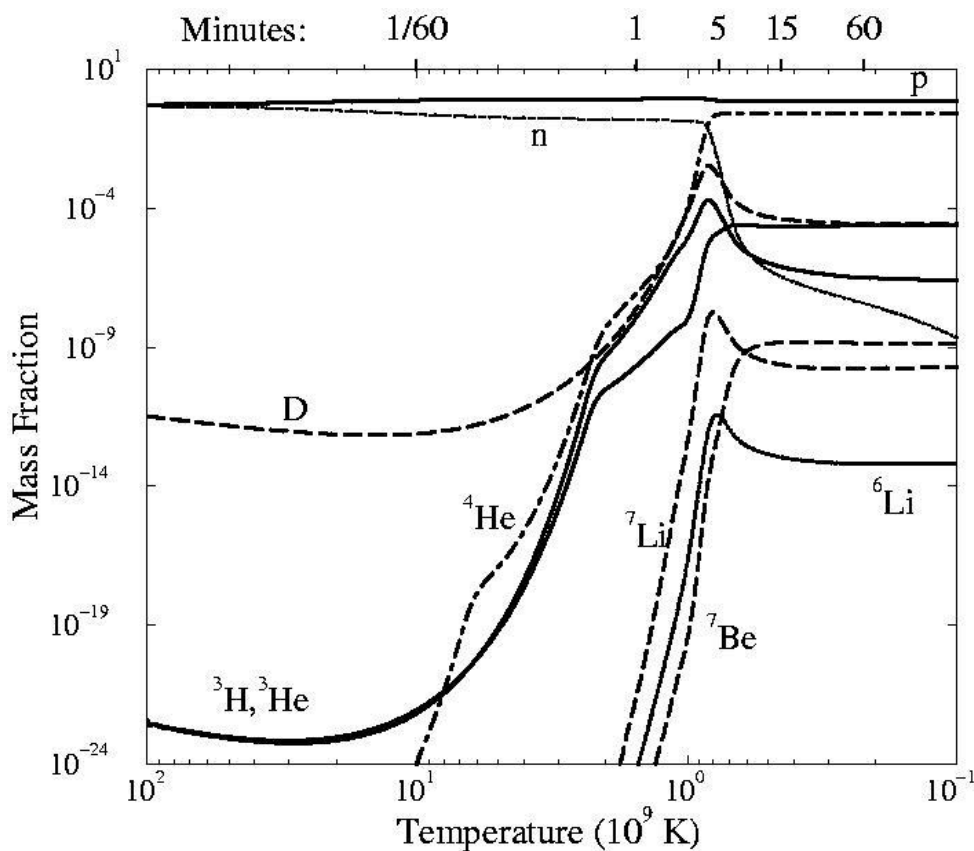
- c) Hvilken afstand var der mellem Jorden og kvasaren, da lyset blev udsendt?

Samme beregning viser, at lyset har været undervejs til os i 13,1 Går

- d) Eksisterede Jorden egentlig på dette tidspunkt?

(Beregningen kan laves via linket <http://www.astro.ucla.edu/~wright/CosmoCalc.html> - du kan bare indtaste din værdi for rødforskydningen, de øvrige parametre er opdaterede med den nyeste viden om Universet. Tryk så på knappen *flat*, så beregner modellen fx de tal, der er nævnt i opgaven)

## Opgave 10 - kernesyntese i Big Bang - dannelse af He-4



Figur 2: Kernesyntese i Big Bang - fra [https://ned.ipac.caltech.edu/level5/Tytler2/Tytler3\\_2.html](https://ned.ipac.caltech.edu/level5/Tytler2/Tytler3_2.html)

På figuren ovenover kan vi se en beregning af, hvordan de første atomkerner opstår især ca. 5 minutter efter Big Bang (mass fraction betyder masse-andel)

- a) Som det fremgår af figuren er antallet af neutroner svagt faldende op til ca. 5 min. efter Big Bang, samtidig med, at antallet af protoner er svagt stigende. Hvad kan være årsagen til det? Vink: er neutronen stabil?

Ud over neutroner og protoner er der i det tidlige Univers også massevis af fotoner til stede. Fotonernes energi ændres hurtigt på grund af Universets hastige udvidelse, fordi udvidelsen 'strækker' fotonernes bølgelængde.

- b) Hvad sker med fotonernes energi, når bølgelængderne bliver større?

Ved temperaturen en milliard Kelvingrader er fotonernes energi så lav, at de ikke længere kan slå nydannede atomkerner i stykker. Derfor er der kortvarigt åbnet for dannelsen af atomkerner.

- c) Find ud af hvor på figuren finder du har temperaturen en milliard grader (Vink:  $10^0 = 1$ )
- d) Ved tiden 5 minutter efter Big Bang (hvor temperaturen er 'nede' på en milliard grader Kelvin) sker der et voldsomt dyk i antallet af neutroner, samtidig med at andelen af protoner også går ned. Hvad er forklaringen på det? Vink: der er samtidig en voldsom vækst i He-4!

Neutronerne har en masseandel lige før 5 minutter på ca. 12%. Resten er næsten udelukkende protoner, som det fremgår af figuren.

- e) Hvilken masseandel giver det for He-4 kort tid efter 5 minutter, hvis vi regner med, at næsten alle neutroner bruges til dannelsen af He-4? Regn her med, at neutroner og protoner har ca. samme masse.
- f) Hvilken masseandel giver det for protonerne?
- g) Mængden af He-4 er lille før 5 minutter, men vokser så hurtigt op til en masseandel på ca. 24% - hvordan kan det lade sig gøre, når det ikke kunne ske før 5 minutter? Vink: det handler om størrelsen af foton-energie

Efter 5 minutter er fotonernes energi - og dermed temperaturen - så lav, at der næsten ikke dannes flere grundstoffer/atomkerner.

Grundstofsammensætningen efter 5 minutter efter Big Bang svarer fint til grundstofsammensætningen i de ældste stjerner, man har fundet, fx i de kugleformede stjernehober, der kredser om Mælkevejen.

- h) Hvor er mon resten af grundstofferne dannet? (kræver viden om stjerner og deres endeligt!). Søg evt. på nettet efter nucleosynthesis

### Opgave 11 - den kosmologiske baggrundsstråling

På side 208 i din lærebog står der, at baggrundsstrålingen kraftigst ved bølgelængderne 1 - 2 mm. Det er et bølgelængdeområde hvor bølgerne kaldes mikrobølger.

- a) Find på nettet ud af - fx via denstoredanske.dk - hvad grænserne for mikrobølgeområdet er. Stemmer det med din fysikbog side 107 (Vejen til Fysik C 1. udgave)?
- b) Har mikrobølgerne i en mikrobølgeovn samme bølgelængde, altså 1-2 mm?

Det oplyses, at mikrobølgerne ved det såkaldte rekombinationstidspunkt 380.000 år efter big Bang var kraftigst ved bølgelængden 970 nm, svarende til temperaturen 3000 K.

- c) Stemmer det med oplysningen, at rødforskydningen for bølgerne er ca. 1100?
- d) Hvor mange gange er fotonernes energi i strålingen formindsket siden rekombinationen?

Ved rekombinationstidspunktet 380.000 år efter Big Bang var temperaturen i stof og stråling ca. 3000 K. Det svarer til overfladetemperaturen på en rød stjerne. Så det var altså muligt at se noget, selvom lyset var rødt.

- e) Var det mon muligt at se Jorden eller Månen i den rødlige belysning den gang? Eller i det røde skær at se enkelte huse i Stenløse?

## Opgave 12 - Kritisk massetæthed i Universet. Stof- og energi-tætheder

Ifølge Einsteins teori for Universet er der en såkaldt kritisk massetæthed for Universet, og formelen er

$$\rho_{krit} = \frac{3 \cdot H_0^2}{8 \cdot \pi \cdot G} \quad \text{kritisk massetæthed for Universet}$$

Her er  $H_0$  Hubblekonstanten og  $G$  er gravitationskonstanten i Newtons gravitationslov. Gravitationskonstanten har værdien  $G = 6,67 \cdot 10^{-11} \text{ m}^3/(\text{kg} \cdot \text{s}^2)$ .

Den bedste værdi, vi har for Hubbles konstant er

$$H_0 = \frac{20,8 \frac{\text{km}}{\text{s}}}{\text{Mlysår}} \quad \text{Hubbles konstant fra Planck-data}$$

- a) Vis at  $H_0 = 2,20 \cdot 10^{-18}/\text{s}$  (ved at udnytte, at 1 lysår =  $9,47 \cdot 10^{15} \text{ m}$ )
- b) Vis så, at den kritiske middel-massetæthed er

$$\rho_{krit} = 8,66 \cdot 10^{-27} \text{ kg/m}^3$$

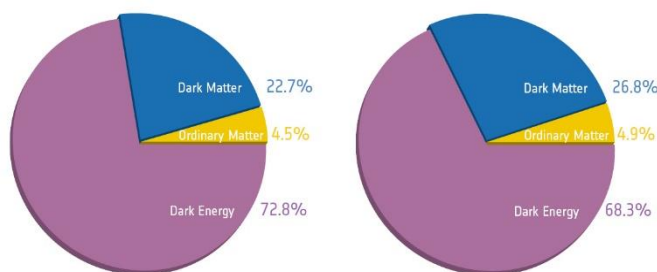
Dette ville svare til at hver kubikmeter indeholder 5,2 hydrogenatomer, idet et hydrogenatom har massen  $1,67 \cdot 10^{-27} \text{ kg}$

- c) Begrund denne påstand!

*Målingerne, som Planck-satellitten har foretaget på den kosmiske mikrobølgebaggrundsstråling tyder på, at Universet har netop denne massetæthed.*

Det har den betydning, at rummet adlyder Euklidisk geometri ('rummet er fladt'), sådan at vi kan bruge fx Pythagoras' sætning også på trekanter med sidelængder på Glyså! Eller bruge den sædvanlige formel for overfladen og rumfanget af en kugle osv.

Men middelmassetætheden udgøres langt fra af protoner eller andet atomart stof alene!



Before Planck

After Planck

Figur 3: Universets stoftætheder i enheder af den kritiske tæthed, før Planck-satellittens målinger - og efter (til højre)

Nedenfor ses et [lagkagediagram](#) over Universets indhold af stof/energi - i andele af den kritiske tæthed.

Som det fremgår af figuren, udgør det almindelige stof i form af atomer kun 4,9% af stoftætheden! Resten (det mørke stof og den sorte energi) udgør tilsammen næsten det hele, altså 95,1% af stoftætheden.

- d) Hvis vi antager at det meste af det almindelige stof er hydrogen, hvor mange hydrogenatomer er der så pr. kubikmeter?

Din beregning viser, hvor næsten uendeligt tomt rummet er - i middel!

- e) Hvis du skulle samle stof ind til en kop kaffe (200g) i middeluniverset, hvor stor skal så kantlængden på en kubisk kasse være, for at du har nået de 200g når du har tømt kassen for protoner? (vi regner her med, at kaffen kun består af protoner!). Kan Jord-Måne systemet være inde i kassen?

Om det mørke stof ved vi kun, at det ikke udsender lys - deraf navnet. Dog ved vi også, at det mørke stof kan påvirke lys med gravitationskræfter og afbøje og forstærke lyset (gravitationslinse-effekt), som det er set i et [galaksesammenstød](#).

Ellers er der mange gæt på hvad det mørke stof kunne være - men endnu ingen sikker viden.

Det almindelige stof og det mørke stof har en opbremsende virkning på Universets udvidelse, men fortyndes i takt med udvidelsen, så bremsevirkningen formindskes.

- f) Hvor stor en andel af hele stoftætheden udgøres af almindeligt stof og mørkt stof?

Den sorte energi ved vi endnu mindre om. Den fylder hver kubikmeter med en konstant mængde energi, og den har en accelererende virkning på Universets udvidelse.

Som det fremgår af dine beregninger og figuren, har den sorte energi vundet slaget om Universets udvidelse! Og det vil den i stigende grad gøre, når Universet udvider sig yderligere.

- g) Hvorfor vil den sorte energi fremover 'vinde' endnu mere over almindeligt stof og det mørke stof, når det gælder Universets udvidelse? Overvej fx hvad der sker med stoftæthederne når Universet har nået den dobbelte størrelse i forhold til nu.