

Norwegian University of Science and Technology  
Department of Physics

**EXAMINATION IN FY3201/FY8902 ATMOSPHERIC PHYSICS AND CLIMATE CHANGE**

Faculty for Natural Sciences and Technology

31 May 2013

Time: 09:00-13:00

Number of pages: 4

Permitted help sources: 1 side of an A5 sheet with printed or handwritten formulas permitted  
Bi-lingual dictionary permitted  
All calculators permitted

You may take:

Molar mass of water vapour:  $\sim 18 \text{ kg/kmole}$   $g=9.8 \text{ m s}^{-2}$  and constant in  $z$   
Molar mass of dry air:  $\sim 29 \text{ kg/kmole}$   $1 \text{ hPa} = 10^2 \text{ Pa} = 10^2 \text{ N m}^{-2}$   
 $273.15 \text{ K} = 0 \text{ }^\circ\text{C}$  Scale Height:  $H=R\cdot T/g$   
Stefan–Boltzmann constant:  $\sigma = 5.67 \times 10^{-8} \text{ W}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{K}^{-4}$   
Solar constant at Earth's orbit (1 au) =  $1367 \text{ W}\cdot\text{m}^{-2}$   
Latent heat of vaporization water:  $L_v=2.5 \times 10^6 \text{ J}\cdot\text{kg}^{-1}$   
Gas constant for water vapour:  $R_v=461 \text{ J}\cdot\text{K}^{-1}\cdot\text{kg}^{-1}$   
Values for dry air:  $C_p=1004 \text{ J}\cdot\text{K}^{-1}\cdot\text{kg}^{-1}$   $C_v=718 \text{ J}\cdot\text{K}^{-1}\cdot\text{kg}^{-1}$   $R_d=287 \text{ J}\cdot\text{K}^{-1}\cdot\text{kg}^{-1}$   
 $\gamma = C_p / C_v$   $\kappa = R_d / C_p$   $R_d=C_p - C_v$   $\Gamma_{da}=9.8 \text{ K/km}$

Clausius–Clapeyron relation:  $e_s = 6.112 \text{ hPa} \cdot \exp\left[\frac{L_v}{R_v}\left(\frac{1}{273 \text{ K}} - \frac{1}{T}\right)\right]$

***Answer all questions (and good luck!):***

- 1) (20%) The atmospheric pressure as a function of altitude is given by the expression:

$$P = P_0 \cdot (1 - z/L), \quad \text{where } L = 8.5 \text{ km and } P_0 = 1000 \text{ hPa} .$$

- a) At  $P=950 \text{ hPa}$ , what is the atmospheric temperature and density (8%)  
b) A hot-air tourist balloon is at hydrostatic equilibrium at an altitude of  $950 \text{ hPa}$ . The balloon equipment (but not the air inside the balloon) weighs  $600 \text{ kg}$ . If the balloon volume is  $3000 \text{ m}^3$ , what is the temperature of the air inside the balloon? (If you have not solved part A, assume the temperature at  $950 \text{ hPa}$  is  $15 \text{ }^\circ\text{C}$ ) (12%)

- 2) (20%) The Voyager I spacecraft observed Titan, a moon of Saturn. It discovered a hydrocarbon aerosol layer at a pressure of 1000 hPa, where the atmospheric temperature was measured to be 88 K. Even though the surface temperature could not be measured, the surface pressure was measured to be 1500 hPa. For the dry Titan atmosphere, which is 80% nitrogen, the gas constant is  $R_T=290 \text{ J}\cdot\text{K}^{-1}\cdot\text{kg}^{-1}$ ,  $C_{PT}=1044 \text{ J}\cdot\text{K}^{-1}\cdot\text{kg}^{-1}$ , and  $g_T \ll g_{\text{Earth}}$ .
- Estimate the maximum surface temperature assuming the atmosphere is stable with respect to vertical motions. (7%)
  - The true surface temperature was measured later by Voyager II to be 94 K. Do you expect convection in Titan's atmosphere? Why or why not? (6%)
  - Assuming isothermal conditions, how many scale heights above the surface was the hydrocarbon aerosol layer? (7%)
- 3) (20 %) An air parcel at a pressure of 1000 hPa has a temperature of 15°C and a relative humidity of 58%.
- What is the partial pressure of water vapour in the parcel, and what is the water vapour mass mixing ratio in the parcel? (5%)
  - What is the dew-point temperature of the parcel? (3%)
  - If the parcel is blown up a mountainside, at what pressure level can clouds begin to form? (Note, as stated the problem is too difficult to solve. Information was given at the exam that they should assume that the dew point temperature when condensation began was the same as at the parcel's starting point) (4%)
  - If it blows higher than this and it snows and rains such that the parcel loses  $\frac{1}{4}$  of its water mass, what temperature does the parcel have when it comes back down to 1000 hPa? (5%)
  - If it did not snow and rain, and the parcel kept all of its water vapour, what temperature would the parcel have had when it came back down to 1000 hPa? Why? (3%)
- 4) (20 %) Jupiter, with a radius of 71490 km, has an albedo of 0.34 and is 5.203 AU (Astronomical Units) from the Sun (the Earth is 1 AU from the Sun).
- What is the radiative equilibrium temperature of Jupiter. (12%)
  - The observed blackbody temperature of Jupiter is 124 K. Compare with your radiative equilibrium temperature from part A, and estimate the power emitted from the top of the atmosphere that is generated internally by processes on the planet. (8%)

- 5) (20 %) In class we calculated the radiative equilibrium temperature of the Earth using a single layer to represent the atmosphere and observed a greenhouse effect. To simulate both a boundary layer and the free tropopause, we can expand the model by taking two layers at 0.5 km and 2 km height. Each layer absorbs all infrared radiation ( $\text{Transmission}_{L\lambda}=0$ ) and is transparent to solar radiation ( $\text{Transmission}_{S\lambda}=1$ ).
- Calculate the surface temperature and the temperature of the two layers assuming a surface albedo of 0.3 and radiative equilibrium. (12%)
  - If the dry adiabatic lapse rate is taken to be 9.8 K/km, is the air between layer 1 and layer 2 stable? Why or why not? (4%)
  - What will happen to the air between layer 2 and layer 1? How will this affect the power radiated to space from the uppermost layer? (4%)

## VEDLEGG

Bokmål oversettelse (tilnærmet) av eksamen hvis det er spørsmål om terminologi.

- 1) Relasjonen mellom det atmosfæriske lufttrykket og høyden,  $z$ , er gitt som:
 
$$P = P_0 \cdot (1 - z/L), \text{ der } L = 8,5 \text{ km og } P_0 = 1000 \text{ hPa.}$$
  - a) Hva er atmosfærens temperatur og tetthet ved høyden der lufttrykket er 950 hPa?
  - b) En varmluft turistballong er i hydrostatisk likevekt ved høyden der lufttrykket er 950 hPa. Ballongens utstyr (men ikke luften inne i ballongen) veier 600 kg. Dersom ballongens volum er  $3000 \text{ m}^3$ , hva er temperaturen i luften inne i ballongen? (Hvis du ikke har løst del a), anta at temperaturen er  $15 \text{ }^\circ\text{C}$ )
  
- 2) Romfartøyet Voyager-I observerte Titan, en av Saturns måner. Det oppdaget et sjikt med hydrokarbon aerosoler ved et lufttrykk på 1000 hPa, hvor den atmosfæriske temperaturen ble målt til 88 K. Selv om overflatetemperaturen ikke kunne måles, ble overflatetrykket målt til 1500 hPa. For Titans tørre atmosfære, som består av 80% nitrogen, er gasskonstanten  $R_T = 290 \text{ J} \cdot \text{K}^{-1} \cdot \text{kg}^{-1}$ ,  $C_{pT} = 1044 \text{ J} \cdot \text{K}^{-1} \cdot \text{kg}^{-1}$ , og  $g_T \ll g_{\text{Earth}}$ .
  - a) Beregn den maksimale overflatetemperaturen forutsatt at atmosfæren er stabil med hensyn til vertikale bevegelser.
  - b) Senere ble den sanne overflatetemperaturen målt til 94 K av Voyager-II. Forventer du konveksjon i Titans atmosfære? Begrunn svaret.
  - c) Forutsatt isoterme forhold, hvor mange skalahøyder over overflaten finnes hydrokarbon-aerosolsjiktet?
  
- 3) En luftpakke har trykk  $p = 1000 \text{ hPa}$ , temperatur  $T = 15^\circ\text{C}$  og relativ fuktighet på 58%.
  - a) Hva er luftpakkens partialtrykk for vanndamp og blandingsforhold for vanndamp?
  - b) Hva er luftpakkens duggpunktstemperatur?
  - c) Hvis luftpakken blir ført langs fjellsiden, ved hvilket lufttrykknivå kan skyer dannes?
  - d) Luftpakken i del (c) stiger opp over fjelltoppen der det snør og regner slik at pakken mister  $\frac{1}{4}$  av sin vannmasse. Hvilken temperatur vil pakken ha når den kommer ned igjen høyden der lufttrykket er 1000 hPa?
  - e) Dersom det ikke snødde eller regnet, og luftpakken i del (c) beholdt all sin vanndamp, hvilken temperatur ville luftpakken ha hatt da den kom ned igjen til høyden der lufttrykket var 1000 hPa?
  
- 4) Jupiter har en radius på 71.490 km, en albedo på 0,34 og ligger 5,203 AE (astronomiske enheter) fra Solen (Jorden ligger 1 AE fra Solen).
  - a) Hva er Jupiters strålingsbalansetemperatur?
  - b) Den observerte luminanstemperatur (et sort legemes temperatur) fra Jupiter er 124 K. Sammenlign med strålingsbalansetemperaturen fra del A, og anslå effekten som slippes ut fra toppen av atmosfæren, generert av interne prosesser på planeten?
  
- 5) I løpet av kurset beregnet vi jordens strålingsbalansetemperatur ved å la et enkelt sjikt representer atmosfæren og ut fra det bestemte en drivhuseffekt. For å simulere både et atmosfærisk grensesjikt og troposfæren kan vi utvide modellen til to lag, ett på 0.5 km og ett på 2 km. Hvert lag slipper gjennom synlig lys fra sola ( $\text{Transmisjon}_{S,\lambda} = 1$ ) men absorberer all varmestråling ( $\text{Transmisjon}_{L,\lambda} = 0$ )
  - a) Beregn overflatetemperaturen og temperaturen av de to lagene. Anta strålingsbalanse og at overflatealbedoen er 0,3.
  - b) Hvis vi antar at den tørradiatiske temperaturendringen er  $9,9 \text{ K/km}$ , er luften mellom lag 1 og lag 2 stabilt? Begrunn svaret.
  - c) Hva vil skje med luften mellom lag 1 og lag 2? Hvordan vil dette påvirke utstrålt effekt fra det øverste laget mot verdensrom?