

Förberedande baskurs i
matematik och fysik för kurserna

Orienteringskurs i astronomi
och
Universums
Byggnad

Författade av Kjell Olofsson

(Sidhänvisningar till Astronomi - en bok om universum,
Lagerkvist och Olofsson, Bonnierutbildning)

Mindre och mindre...

(OBS! Ungefärliga storlekar och massor)

Bladlus	1 mm = 0.001 m = 10^{-3} m
Kvalster	0.1 mm = 0.0001 m = 10^{-4} m
Bakterie och cell	0.001 mm = 10^{-6} m
Virus	0.1 μ m = 10^{-7} m (μ = mikro)
Vattenmolekyls radie	1 nm = 10^{-9} m (n= nano)
Vattenmolekyls massa	10^{-25} kg
Kolatoms radie	10^{-10} m
Kolatoms massa	10^{-26} kg
Atomkärnas radie	10^{-14} m
Atomkärnas massa	10^{-26} kg
Protons radie	10^{-15} m
Protons massa	10^{-27} kg
Elektrons radie	10^{-15} m
Elektrons massa	10^{-30} kg
Kvarks radie	10^{-18} m

Gravitationen frigjordes vid tiden 10^{-43} sekunder efter Big Bang....

Aritmetik med tiopotenser (sid. 10)

Man räknar med tiopotenser, precis som med vanliga tal.

$10^0 = 1$ (per definition), $10^1 = 10$, $10^2 = 10 \times 10$, $10^3 = 10 \times 10 \times 10$, ..., $10^6 = 10 \times 10 \times 10 \times 10 \times 10 \times 10$

$$10^{-1} = \frac{1}{10} = 0.1, \quad 10^{-2} = \frac{1}{10 \times 10} = 0.01, \quad 10^{-3} = \frac{1}{10 \times 10 \times 10} = 0.001 \text{ o.s.v.}$$

Multiplitera: $100 \times 1000 = 10^2 \times 10^3 = 10^{2+3} = 10^5 = 100\,000$

$$\text{Dividera: } \frac{10\,000}{1\,000\,000} = \frac{10^4}{10^6} = 10^4 \times 10^{-6} = 10^{4-6} = 10^{-2} = 0.01$$

Vi kan beräkna den kraft, F , som verkar mellan jorden och solen med hjälp av Newtons gravitationslag: (G = gravitationskonstanten= $6.67 \times 10^{-11} \text{ Nm}^2/\text{kg}^2$, M_{jord} = jordens massa= $5.98 \times 10^{24} \text{ kg}$, M_{sol} = solens massa= $1.99 \times 10^{30} \text{ kg}$, r = avståndet jorden-solen= $1.50 \times 10^{11} \text{ m}$) (ofta skrivs inte "x" ut framför tiopotensen, t.ex. 6.67×10^{-11}).

$$F = G \frac{M_{\text{Jord}} M_{\text{Sol}}}{r^2}, \quad F = 6.67 \times 10^{-11} \frac{5.98 \times 10^{24} \times 1.99 \times 10^{30}}{(1.50 \times 10^{11})^2} = 3.53 \times 10^{22} \text{ N}$$

Beräkningarna görs naturligtvis med miniräknare. Lär dig använda den!

Annat värt att veta...

Alla storheter, som kraft, längd, massa etc. har en enhet (man använder s.k. SI-enheter). I räkneexemplet ovan beräknades kraften, F , ur gravitationslagen. Enheten för kraft är Newton (N), längd (m), massa (kg). Enheten för gravitationskonstanten, G , är Nm^2/kg^2 (Newton kvadratmeter *per* kilogramkvadrat). Man kan också skriva: $\text{Nm}^2\text{kg}^{-2}$, det är ju samma sak, d.v.s.:

$$\frac{\text{Nm}^2}{\text{kg}^2} = \text{Nm}^2\text{kg}^{-2} = \text{Nm}^2 / \text{kg}^2$$

På samma sätt skriver man ofta av utrymmesskäl t.ex.:

$$F = GM_{\text{jord}}M_{\text{sol}}/r^2 \quad \text{och} \quad \text{för tiopotenser: } 1/10 \text{ istället för } \frac{1}{10}$$

Prefix för tiopotenser

Man kan använda s.k. prefix för tiopotenser, många använder vi ju dagligen utan att tänka på det:

p= pico, t.ex. pF= picofarad= 10^{-12} F
 n= nano, t.ex. nm= nanometer= 10^{-9} m
 μ = mikro, t.ex. μm = mikrometer= 10^{-6} m
 m= milli, t.ex. mm= millimeter= 10^{-3} m
 c= centi, t.ex. cm= centimeter= 10^{-2} m
 d= deci, t.ex. dm= decimeter= 10^{-1} m
 da=deca, används sällan, vi säger tio kort och gott= 10^1
 h= hekto, t.ex. hg= hektogram= 10^2 g
 k= kilo, t.ex. kg= kilogram= 10^3 g
 M= mega, t.ex. Mbyte= megabyte= 10^6 byte
 G= giga, t.ex. Gbyte= gigabyte= 10^9 byte
 T= tera, t.ex. TWh= terawattimme= 10^{12} Wh

Grekiska alfabetet

Av tradition används grekiska alfabetet (skrivna med versaler respektive gemena, "ph" uttalas "f"):

A= α = Alpha, B= β = Beta, Γ = γ = Gamma, Δ = δ = Delta, E= ϵ = Epsilon, Z= ζ = Zeta, H= η = Eta, Θ = θ = Theta, I= ι = Iota, K= κ = Kappa, Λ = λ = Lambda, M= μ = Mu, N= ν = Nu, Ξ = ξ = Xi, O= $\omicron$ = Omicron, Π = π = Pi, P= ρ = Rho, Σ = σ = Sigma, T= τ = Tau, Y= υ = Upsilon, Φ = ϕ = Phi, X= χ = Chi, Ψ = ψ = Psi, Ω = ω = Omega

Vi kommer att stöta på en hel del av dessa under kursens gång. Lite annat:

" $\approx$ " betyder "ungefär lika med"

" $<$ " betyder "mindre än"

" $\leq$ " betyder "mindre än eller lika med"

" $>$ " betyder "större än"

" $\geq$ " betyder "större än eller lika med"

$M_{\odot}$, $R_{\odot}$, $L_{\odot}$ står för solens massa, radie respektive luminositet. En massa av $10 M_{\odot}$ betyder att kroppen väger 10 ggr. mer än solen.

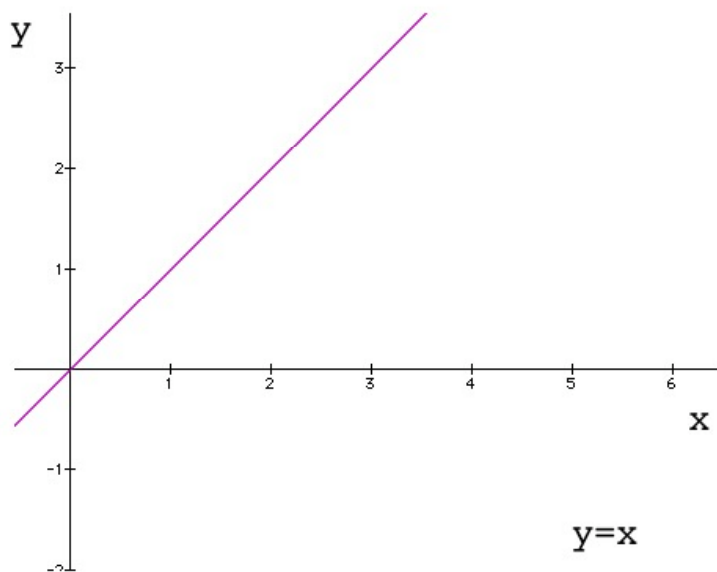
Hur man "läser" en ekvation (sid. 10)

Ekvationer används för att på ett smidigt sätt uttrycka fysikaliska samband. Exempelvis kan gravitationslagen uttryckas "kraften, F , är direkt proportionell mot gravitationskonstanten, G , massorna, M och m , samt omvänt proportionell mot avståndet i kvadrat". Med hjälp av en formel skrivs enklare:

$$F = G \frac{M m}{r^2}$$

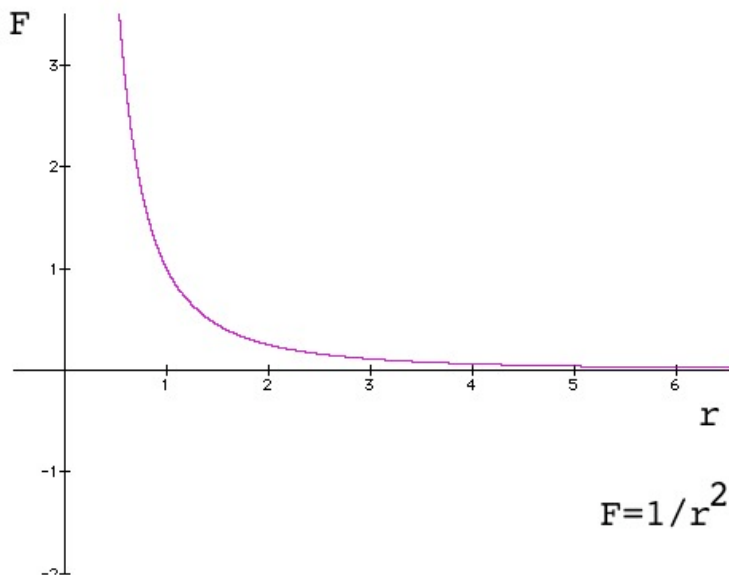
Variabler:

Ekvationer beskriver hur en storhet, i detta fall kraften, beror av andra storheter som massan och avståndet. Uttrycket säger att kraften, F , är direkt proportionell mot massorna M och m , som också kan skrivas: $F \propto M$ och $F \propto m$. Det betyder kort och gott att när massan, M (eller m) ökar eller minskar så ökar respektive minskar kraften F proportionellt lika mycket. Man säger att detta är ett exempel på en linjär funktion. Figuren nedan visar detta grafiskt.



Kraften är också omvänt proportionell mot avståndet i kvadrat, vilket kan skrivas $F \propto 1/r^2$. Nu gäller istället att när avståndet, r , ökar eller minskar så minskar respektive ökar kraften. Dessutom, eftersom vi har "r i kvadrat" så innebär t.ex. en liten avståndsökning en avsevärd minskning av kraften (sätt in siffror och kolla!). Figuren nedan visar detta grafiskt.

6

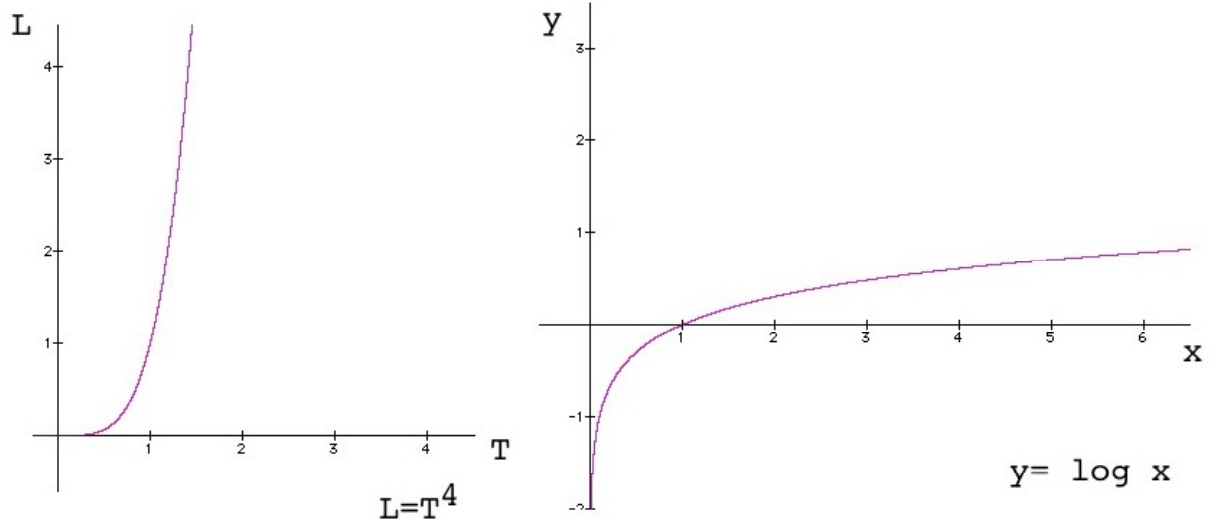


Ett annat mer dramatiskt exempel:

Effekten som avges från en lysande himlakropp, den s.k. luminositeten, L , är beroende av kroppens temperatur, T , på följande sätt: $L \propto T^4$. En liten ökning eller minskning av temperaturen medför oerhörda konsekvenser för kroppens ljusstyrka.

Magnitudbegreppet används inom astronomin som mått på ljusstyrka. Detta mått är logaritmiskt.

Grafiska exempel på dessa två funktioner visas nedan.



De tre senare funktionerna kallas icke-linjära. M , m och r i ekvationen ovan kallas variabler eftersom deras värden varierar beroende på de fysikaliska omständigheterna.

Konstanter:

I gravitationslagen ingår, precis som i de flesta ekvationer en konstant, i detta fall gravitationskonstanten, G . Dessa antar, såvitt vi vet, samma värden oberoende av tid och rum och kallas naturkonstanter och finns tabulerade i fysikhandböcker. Ett annat exempel:

Relationen mellan energiinnehållet, E , hos den s.k. kosmiska mikrovågsbakgrundstrålningen och temperaturen, T_r (indexet, r , står för "radiation", d.v.s. strålning, för att inte förväxlas med andra eventuellt förekommande temperaturer), skrivs: $E = kT_r$. D.v.s. energin är direkt proportionell mot temperaturen. k kallas Boltzmanns konstant och har värdet $k = 1.3806 \times 10^{-23} \text{ JK}^{-1}$. Konstanter kan bestämmas genom att, rent generellt, genomföra en mätserie; man mäter E , inom en given volym, för ett antal olika värden på T . Konstanten, k , kan då bestämmas genom att dividera E med T_r eftersom $k = E/T_r$.

Mekanik

Mekanik betyder läran om krafterns verkan på kroppar i rörelse eller vila och involverar den s.k. gravitationskraften. Gravitationskraften är en av fyra kända naturkrafter, de övriga är elektromagnetiska krafter, den svaga kärnkraften och den starka kärnkraften.

Gravitationskraften är den klart svagaste av dessa men den verkar över mycket stora avstånd. Den håller oss kvar på jordytan vare sig vi befinner oss i Sverige eller Australien eftersom den, för en sfärisk kropp, är riktad mot jordens centrum. Alla kroppar som har massa påverkas gravitationellt, vi dras mot varandra vare sig vi gillar varandra eller inte... Gravitationen håller planeter, asteroider, kometer och annat kvar i sin bana runt solen. Jorden rör sig runt solen med en hastighet av $\approx 108\,000 \text{ kmh}^{-1}$. Att vi upplever det som att kropparna rör sig runt solen beror på att solens massa är så mycket större, egentligen rör de sig kring sin gemensamma tyngdpunkt.

Solen, i sin tur, rör sig runt vår galax (Vintergatan) centrum tillsammans med 100-200 miljarder andra stjärnor. P.g.a. den gravitationella påverkan från "närliggande" stjärnor vaggas solen (och allt annat i solsystemet) fram i sidled såväl som upp och ned. Det innebär att vi aldrig kommer tillbaka till samma plats när ett varv, ett kosmiskt år, är fullbordat. Vintergatan, tillsammans med andra galaxer, rör sig kring en gemensam tyngdpunkt som i sin tur rör sig.....

Newtons lagar

Kraften som verkar mellan två kroppar beskrivs av Newtons gravitationslag (1687):

I ett system som exempelvis en galax med miljarder individuella stjärnor är kraften på en kropp lika med summan av krafterna från alla ingående stjärnor (och annat).

$$F = G \frac{M m}{r^2}$$

Newton fann också tre andra lagar som vi påverkas av dagligen:

I. En kropp förblir i vila eller likformig rörelse om inga yttre krafter verkar på den.

- II. Accelerationen som verkar på en kropp är proportionell mot kraften som verkar på den, uttrycks: $F = ma$, där m är massan och a accelerationen.
- III. Närhelst en kropp påverkar en annan med en kraft påverkas den första kroppen med en lika stor, men motriktad kraft (lagen om verkan och motverkan).

Keplers tre lagar (sid. 62)

Johannes Kepler (1571-1630) fann, på basis av Galileo Galileis och Tycho Brahes studier att:

- I. En planets bana runt solen är en ellips med solen i ena brännpunkten (fokus). Himlakropparnas banor kan vara olika mycket elliptiska, exempelvis är jordens bana nästan cirkulär.
- II. En linje som sammanbinder solen med en planet sveper över lika stora ytor på lika tider. Detta betyder exempelvis att en komet, om den har mycket elliptisk bana, rör sig väldigt fort nära solen och mycket långsamt långt från densamma.
- III. Kvadraterna på en planets omloppstid runt solen förhåller sig som kuberna på medelavståndet. Om man uttrycker omloppstiden, i år, med P och halva storaxelns längd (ungefär banans radie), i Astronomiska Enheter (en A.E. = 149.6 miljoner km = medelavståndet jorden-solen), med a så gäller att $P^2 = a^3$. Lagen innebär att ett år på planeten Merkurius, som ligger närmare solen, är kortare än ett jordår eftersom Merkurius rör sig snabbare.

Rörelse spårar massa

Används för att bestämma massor i vårt planetsystem samt multipelstjärnesystem.

* Hastigheten, v , ökar med massan innanför banan.

* v minskar då avståndet, r , ökar.

Om solen vore dubbelt så tung skulle vårt år bara vara 260 dagar långt.

Ett Marsår är ca 686 dagar långt eftersom planeten ligger längre från solen.

Hur bestäms stjärnornas massor (sid. 160)?

Två metoder:

Antingen direkt:

Två- eller flerkropparsproblemet, utnyttjar hur kroppar påverkar varandra genom gravitationen. Tex. jorden-solen, månar och andra planeter i vårt solsystem. Kan också utnyttjas för dubbelstjärnor.

Eller indirekt:

- 1) Jämförelse med stjärnmodeller. 2) Mass-luminositetsrelationen kan användas för huvudseriestjärnor, $L \propto M^{3.5}$.

Hur bestäms galaxernas massor?

Fås ur stjärnornas och gasens dynamik (deras rörelse under gravitationell påverkan).

Hur bestäms galaxhoparnas massor?

Fås ur galaxernas dynamik.

Strålningslära (sid. 131)

Den mesta strålning vi mottar från universum är i form av s.k. elektromagnetisk strålning. Den utsänds från olika typer av objekt i olika typer av processer.

Elektromagnetisk strålning kallar vi kort och gott för ljus, t.ex. synligt ljus, radiostrålning och röntgenstrålning.

Ljus kan betraktas både i form av partiklar, s.k. fotoner, eller som vågor. Man kallar detta för ljusets våg-partikel dualism. I denna kurs ska vi behandla ljus både som partiklar och som vågor.

Ljus rör sig med "ljusets hastighet", d.v.s. med $300\,000\text{ km s}^{-1}$. Under en sekund hinner en foton (eller ljusvåg) ca. 7.5 varv runt ekvatorn. En partikel som rör sig med ljusets hastighet är masslös. Har den massa kan den inte röra sig med ljusets hastighet.

Elektromagnetiska strålningen, har stort omfång i våglängd (frekvens).

Relationen mellan ljushastigheten c (mäts i meter per sekund), frekvensen ν (mäts i "per sekund" alt. Hertz) och våglängden λ (mäts i meter) kan skrivas:

$$c = \nu \lambda$$

Relationen mellan energi (mäts i Joule), våglängd och frekvens kan skrivas:

$$E = \frac{hc}{\lambda} \quad \text{och} \quad E = h\nu \quad (h = \text{Plancks konstant})$$

Strålningen spänner från gamma (kortvågig, energirik), via röntgen, ultraviolett, visuellt (synligt ljus), infrarött till radio (långvågig, energifattig).

D.v.s. gammastrålning, synligt ljus, radiovågor etc. är samma typ av strålning, endast energin (alt. ν eller λ) skiljer dem åt. Alla föremål sänder ut elektromagnetisk strålning. Strålningens våglängd (alt. frekvens) beror av föremålets temperatur.

Exempel: En spisplatta som upphettas antar olika färg beroende på temperaturen:

Svart → Djupröd → Röd → Gul → Vit → Blåvit → Violett

D.v.s.: Låg T → låg E → låg frekvens → lång våglängd
 hög T → hög E → hög frekvens → kort våglängd

Man talar om strålning från en svart kropp (svartkroppsstrålning). Med svart kropp menas:

En hypotetisk kropp som inte reflekterar någon strålning utan absorberar all inkommande strålning → den strålning en svart kropp emitterar beror endast av dess temperatur. Stjärnor kan sägas vara "goda svarta kroppar" med tanke på de stora avstånden mellan dem.

Relationen mellan utstrålad energi från en svart kropp och dess temperatur (och våglängd, λ) ges av Plancks strålningslag:

$$E_{\lambda}(T) = \frac{2hc^2}{\lambda^5} \frac{1}{e^{(hc/\lambda kT)} - 1}$$

där k = Boltzmanns konstant, c = ljushastigheten, h = Plancks konstant.

Ur Plancks strålningslag kan man härleda några användbara relationer:

Wiens lag:

$$\lambda_{\max} T = 2.898 \times 10^7$$

λ ges i Ångström (Å) och T i Kelvin (K).

D.v.s., ju hetare desto blåare, ju svalare desto rödare. En stjärnas färg skvallrar om dess temperatur i dess yttre lager den s.k. fotosfären, den del av solytan som vi kan se optiskt.

Stefan-Boltzmanns lag:

$$F = \sigma T^4$$

σ kallas Stefan-Boltzmanns konstant. Den totala energiutstrålningen från en stjärna (eller svart kropp) per ytenhet kallas flux och betecknas med F .

Den totala energiutstrålningen, L , från en stjärna med radien R fås då eftersom fluxen också kan skrivas:

$$F = \frac{L}{4\pi R^2}$$

och:

$$L = 4\pi R^2 \sigma T^4$$

där L är luminositeten och anges i Watt.

En stjärnas temperatur bestämmer vilken färg den har. Om man mäter intensiteten hos strålningen vid två olika våglängder kan man bestämma dess temperatur.

Atomfysik

Atomerna är byggstenarna i allting i universum, inklusive oss själva. Atomerna är ingalunda de minsta partiklarna som finns, de är istället uppbyggda av mindre partiklar, protoner, neutroner och elektroner.

I en enkel s.k. Bohrmodell (efter den danske atomfysikern Niels Bohr) består en atom av positivt laddade protoner och neutrala neutroner. Dessa partiklar utgör atomens kärna. Kring kärnan snurrar de negativt laddade elektronerna. Neutronen är något tyngre än protonen medan elektronen är ca. 1000 ggr. lättare. Protonens vilomassa är 1.67×10^{-27} kg.

En väteatom, det lättaste av våra grundämnen, består enbart av en proton och en elektron. Det finns dock tungt väte, s.k. deuterium, som förutom dessa partiklar också innehåller en neutron. Ännu tyngre väte, s.k. tritium, innehåller ytterligare en neutron. En atom av ett visst grundämne som har olika antal neutroner kallas en isotop.

Antalet protoner utgör det s.k. atomnumret och bestämmer vilket grundämne det gäller. De tre olika väteatomerna kan skrivas: ${}_1\text{H}^1$, ${}_1\text{H}^2$ och ${}_1\text{H}^3$ (det finns även andra skrivsätt).

Det undre indexet anger atomnumret, det övre anger den s.k. atomvikten (antalet protoner + neutroner). Det näst lättaste grundämnet är helium och skrivs ${}_2\text{He}^4$ (två protoner + två neutroner), det finns även lätt helium s.k. ${}_2\text{He}^3$, d.v.s. helium med en neutron mindre. Litium, Li, består av tre protoner samt neutroner, Beryllium, Be, av fyra protoner och neutroner o.s.v.

Det tyngsta grundämnet som kan bildas i en vanlig stjärna är järn ${}_{26}\text{Fe}^{56}$ och består då av 26 protoner och 30 neutroner och är en isotop av järn. Totalt känner vi till över hundra olika grundämnen.

Atomerna som har lika många protoner som elektroner kallar man neutrala. Om en elektron "rycks" loss säger vi att atomen är en gång joniserad. Om en atom förlorar två elektroner är den två gånger joniserad o.s.v. Hur många gånger kan väteatomen joniseras?

Under vissa omständigheter kan atomer av samma eller olika grundämnen slå sig samman. Konfigurationen kallas då för en molekyl, t.ex. vatten, H_2O , som består av två väteatomer och en syreatom.

Protonerna och neutronerna (samt även andra partiklar) består i sin tur av mindre partiklar s.k. kvarkar. Det finns olika typer av kvarkar, protonen är sammansatt av två uppkvarkar + en nerkvark, neutronen av två nerkvarkar + en uppkvark. Vad består kvarkarna av?

Uppkomst av atomspektra i gaser (sid. 133)

En övergång mellan två energinivåer i atomen kallas en bunden-bunden övergång och resulterar i en absorptions- eller emissionslinje.

ABSORPTIONSLINJESPEKTRUM:

Fotonen för med sig energi som är mindre än jonisationspotentialen. En elektron "hoppas" till en högre energinivå och språnget motsvarar energin hos den "infallande" fotonen.

Resultat?

Vi får reduktion av ljus vid en given våglängd som motsvarar energin hos fotonen, d.v.s. en absorptionslinje.

EMISSIONSLINJESPEKTRUM:

Elektronen hoppar, nästan omedelbart, från den energirikare övre nivån till en lägre energifattigare nivå. Elektronen strävar alltid efter att hamna i grundtillståndet, d.v.s. den lägsta nivån. Då emitteras en foton med en energi motsvarande skillnaden mellan nivåerna.

Resultat?

Vi får en emissionslinje vid en våglängd som motsvarar energin hos den utsända fotonen.

KONTINUERLIGT SPEKTRUM:

En foton för med sig energi som är minst lika stor som atomens jonisationspotential (för väte ≥ 13.6 eV), d.v.s. atomen joniseras, elektronen är fri och en s.k. bunden-fri övergång har skett. Elektronen kan sedan "slå sig samman" med en atomkärna, dock inte nödvändigtvis samma atomkärna. Detta kallas rekombination och är en s.k. fri-bunden övergång. Även s.k. fri-fria övergångar kan ske, d.v.s. elektronen lämnar en del av sin energi till atomen utan att rekombination sker.

I båda processerna emitteras en foton med godtycklig energi (alt. godtycklig våglängd, eftersom $E = hc/\lambda$) och vi får ett kontinuerligt spektrum.

Varför?

Den rekombinerande elektronen kan ha godtycklig rörelseenergi.

Resultat?

Vi får ett kontinuerligt (sammanhängande) band av emissionslinjer i spektret.

Absorption och emission är ju samma process fast "omvänt", d.v.s. absorption av en foton följs omedelbart av emission av en foton med samma energi (våglängd alt. frekvens) om övergången skett mellan samma energinivåer. Varför ser vi överhuvudtaget en absorptionslinje i spektret? De två processerna borde ju "ta ut varandra" och inte ge någon linje alls.

Svar:

Kollisioner mellan atomerna i en stjärnatmosfär sker så ofta att atomen i allmänhet inte hinner skicka ut en ny foton innan den exciteras eller de-exciteras i en kollisionsprocess. Även om den hinner emittera en foton, genom att elektronen de-exciteras till samma energinivå, så behöver den inte skickas ut i samma riktning.

Hos stjärnor är den viktigaste orsaken att gasen blir kallare längre ut. I en absorptionslinje kommer inte ljuset ut så lätt vilket innebär att vi enbart ser den ytligare och kallare lagren. Eftersom strålningens intensitet är starkt temperaturberoende ser linjen mörk ut i spektret.

Kärnfysik

Den starka kärnkraften, en av de fyra naturkrafterna, håller ihop atomkärnan. Denna kraft är ca. 10^{40} ggr. starkare än gravitationskraften! Dock verkar den över väldigt korta avstånd, ca. 10^{-15} m. Om man kan utvinna energi ur en atomkärna leder det till frigörelse av oerhörda mängder energi, vilket sker i atom- och vätebombsexplosioner.

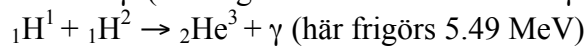
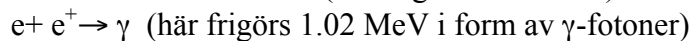
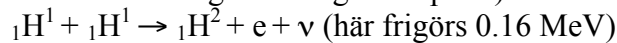
Det finns två tillvägagångssätt. Antingen genom s.k. fission, klyvning av atomkärnor, vilken sker i atombombsexplosioner, eller sammanslagning av atomkärnor. Detta sker i en vätebombsexplosion och i stjärnors inre. En stjärna (som solen) är en kontrollerad vätebomb;

om fusionsprocesserna går för fort utvidgar sig stjärnans kärna, där processerna mestadels äger rum, och sammanslagningarna sker i långsammare takt eftersom temperaturen då minskar. Om det sker för få sammanslagningar drar kärnan ihop sig och fusionen går snabbare eftersom temperaturen ökar.

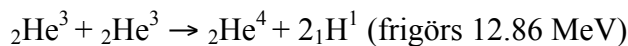
OBS! De flesta grundämnen vi känner till som är tyngre än helium bildas genom fusionsprocesser i stjärnors inre, de övriga bildas genom supernovaexplosioner. Vi människor består alltså till stor del av stjärnmateri!!

Det finns flera olika fusionsprocesser, dessa ska behandlas under kursens gång. En av dessa är den s.k. proton-proton kedjan och är den process som dominerar i solens inre. Nettoreaktionen ger att fyra vätekärnor (${}_1\text{H}^1$) slår ihop sig till helium (${}_2\text{He}^4$) + energi (d.v.s. fotoner). För solen innebär det 600 miljoner ton väte omvandlas till helium varje sekund. 4,2 miljoner ton omvandlas till energi ($E = mc^2$ enligt Einstein och motsvarar 3.86×10^{26} W) som möjliggör livet på jorden.

Hela kedjan (sid. 146), som kräver att temperaturen i kärnan är ca. 10^{10} K, kan uttryckas på följande vis (huvudregeln är att totala energin till vänster om pilen ska vara lika med totala energin till höger om pilen):



Dessa tre reaktioner måste upprepas en gång till eftersom det behövs två lätta heliumkärnor (${}_2\text{He}^3$) för att avsluta kedjan:



MeV är ett energimått. $1 \text{ eV} = 1.6 \times 10^{-19} \text{ J}$ (Joule), en liter standardmjölk innehåller 260 kJ. e^- är en elektron (betecknas ibland e^-). e^+ är en positivt laddad elektron, en s.k. positron och är elektronens antipartikel (se nedan). ν står för neutrinen, den kan ha stor betydelse för universums utveckling.

Totalt frigörs alltså: $2 \times (0.16 + 1.02 + 5.49) + 12.86 = 26.20 \text{ MeV}$, dessutom frigörs $2 \times 0.26 \text{ MeV} = 0.52 \text{ MeV}$ av de två neutrinerna.

Elementarpartiklar

Partiklar som protoner, neutroner, elektroner, fotoner etc. går under beteckningen elementarpartiklar. De har olika egenskaper; massor laddningar, spinn, livstider etc. En partikel har i regel en antipartikel, en partikel med samma massa men omvänd laddning. I proton-proton kedjan ovan ser man att en elektron, e^- , kan slå sig ihop med en positron, e^+ , (antielektron), då förintas de och ljus (fotoner) sänds ut. Detta kallas annihilation. Det omvända är också möjligt, energirika fotoner kan omvandlas till partikel+antipartikel. Detta kallas parbildning och ska diskuteras i slutet av kursen.

Det finns ett stort antal elementarpartiklar. En del av dessa kommer vi att stöta på och man kan notera att de "vanligaste" partiklarna, protonen och neutronen tillhör gruppen baryoner medan elektroner, neutriner och myoner tillhör leptonerna.