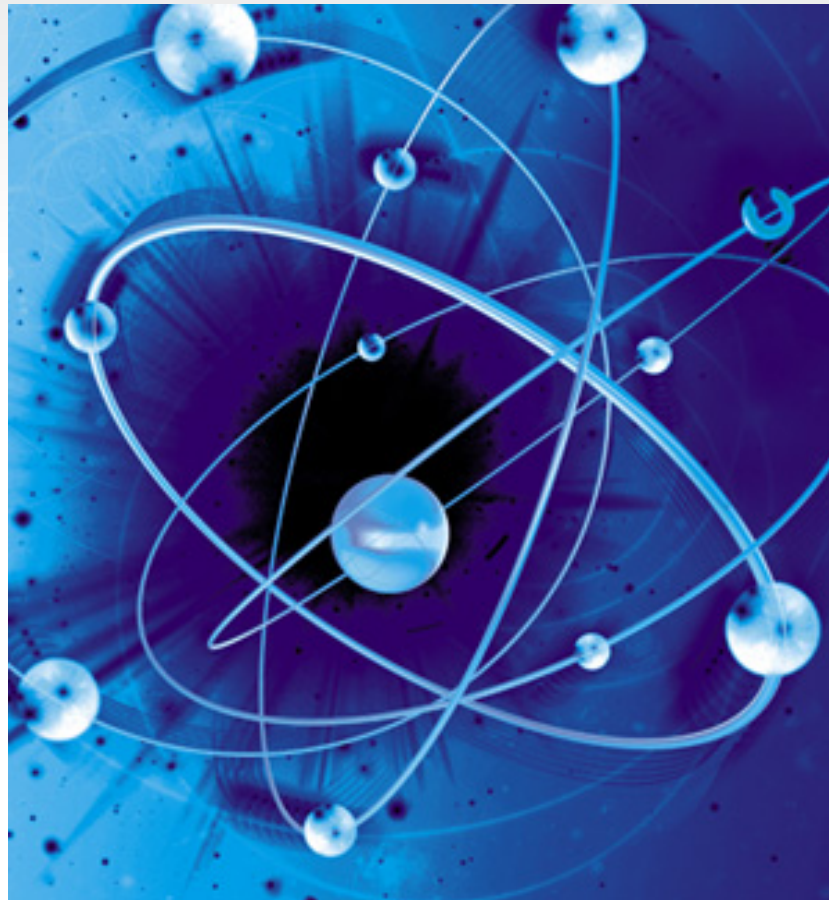


# L1 Grundläggande fysik



# Motivation

- För att förstå de astronomiska objekten i kursen behöver vi lite **grundkunskaper i fysik**.
- Denna lektionen blir därför vår introduktion och referens till när vi analyserar stjärnutveckling, vita dvärgar, neutronstjärnor och svarta hål längre fram.

# Krafter

- Anledningen till att det händer något världen är **krafter** (F): en storhet som enligt Newtons lagar är det som orsakar **accelerationer**.

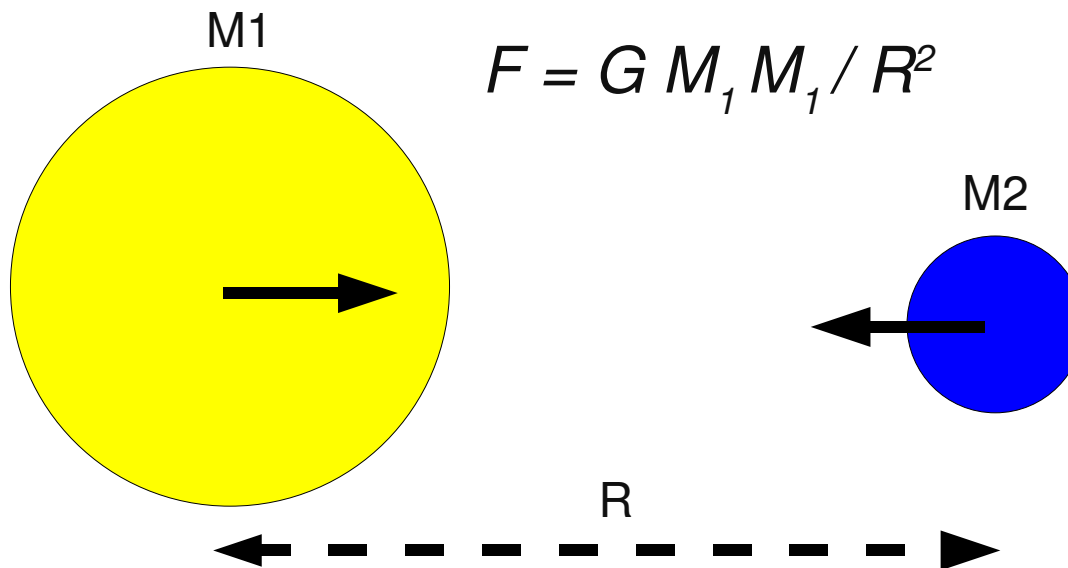
$$F = m * a$$

- Newton introducerar här också begreppet **massa** : ett föremåls 'motstånd' till att låta en kraft ändra dess rörelse ( $a = F/m$ ).



# Krafter

- Men att bara kalla  $m \cdot a$  för ”kraft” betyder ingenting om man inte kan säga hur kraften *verkar*.
- Newton gav oss den första formeln för en kraft :  
**gravitationskraften:**

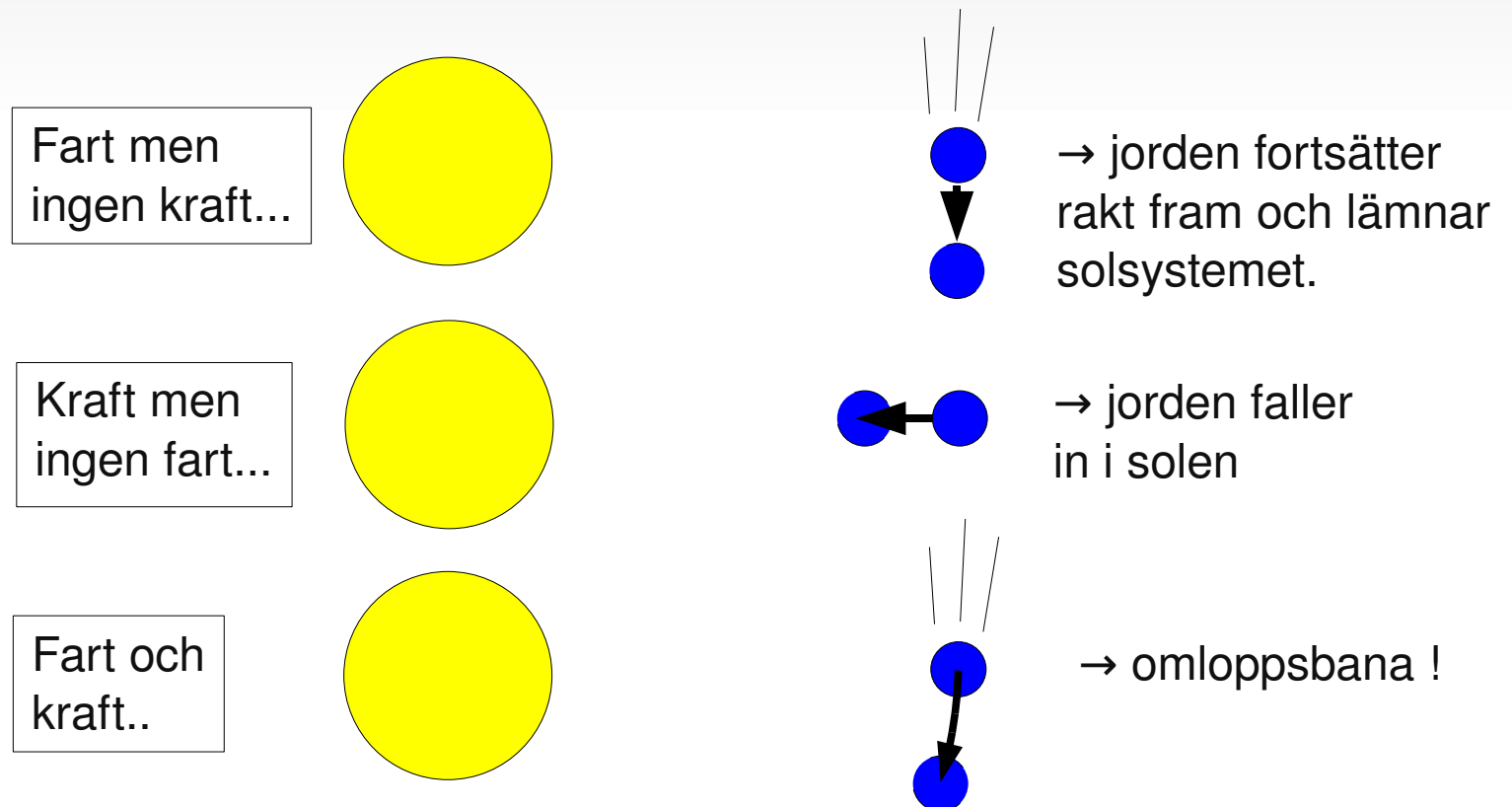


$$F = G M_1 M_2 / R^2$$

*G är en naturkonstant  
vars värde Newton  
inte visste.*

# Planeterna rörelser förklarade

- Man kunde nu förstå att planeternas rörelser var en kombination av **hög fart** och **gravitationskraft mot solen**:



# Andra krafter

- Inklusiv gravitationskraften känner man idag till **fyra st fundamentala krafter** i vårt universum:

*Gravitationskraft*

*Elektromagnetisk kraft*

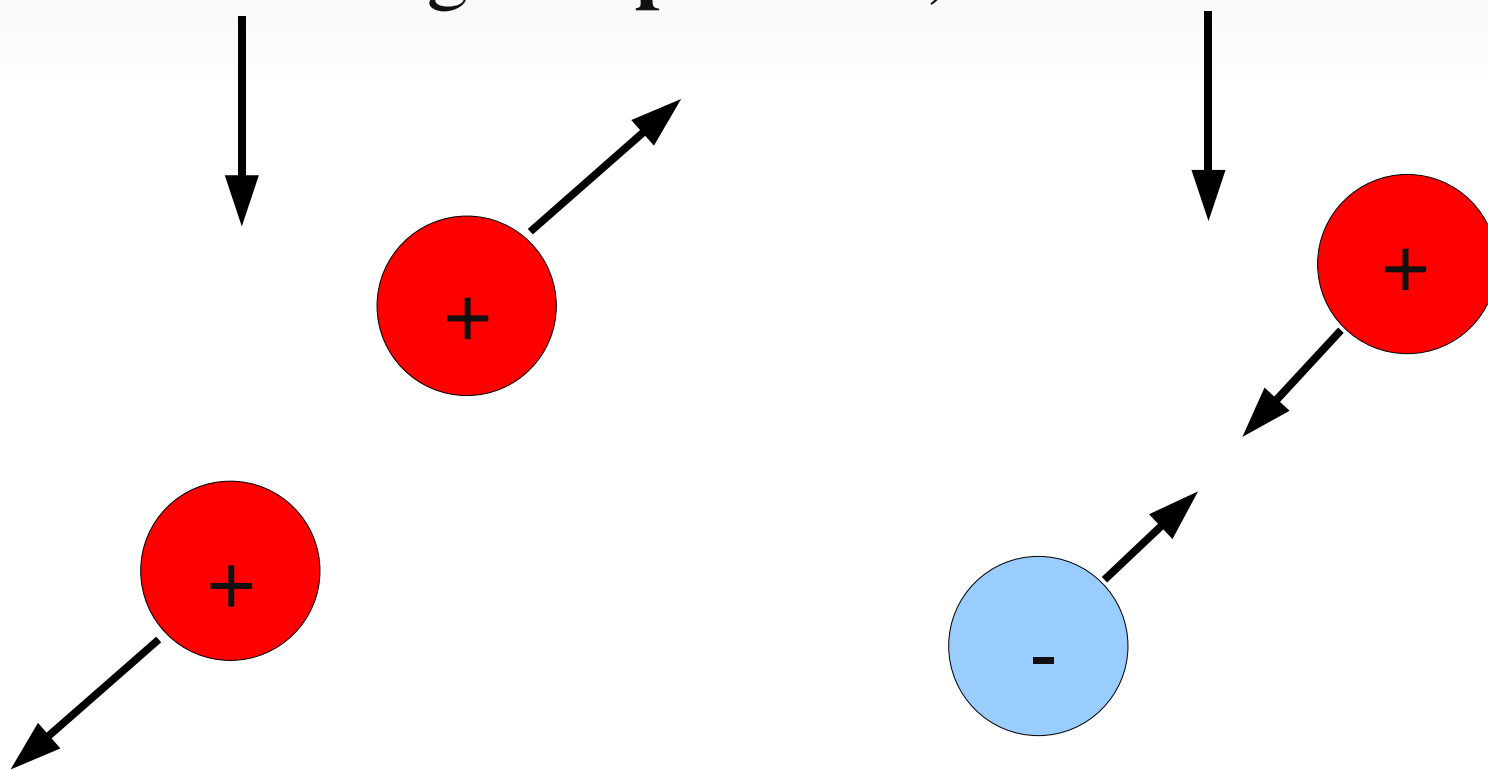
*Stark kärnkraft*

*Svag kärnkraft*

- Alla andra krafter, tex friktion, beror i grund och botten på någon av dessa fundamentala krafter.

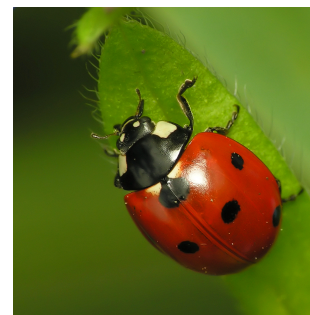
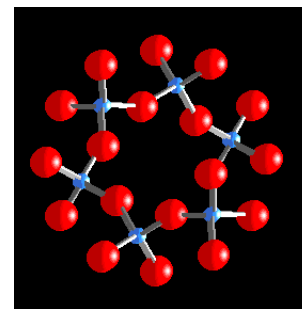
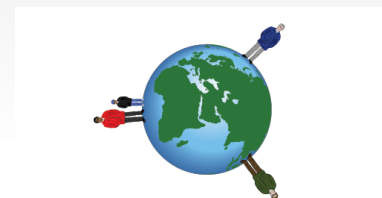
# Elektromagnetisk kraft

- Verkar mellan alla **elektriskt laddade partiklar** (vanligtvis **elektroner** (minus) och **protoner**(plus))
- Lika laddningar **repellerar**, olika **attraherar**.



# Elektromagnetisk kraft

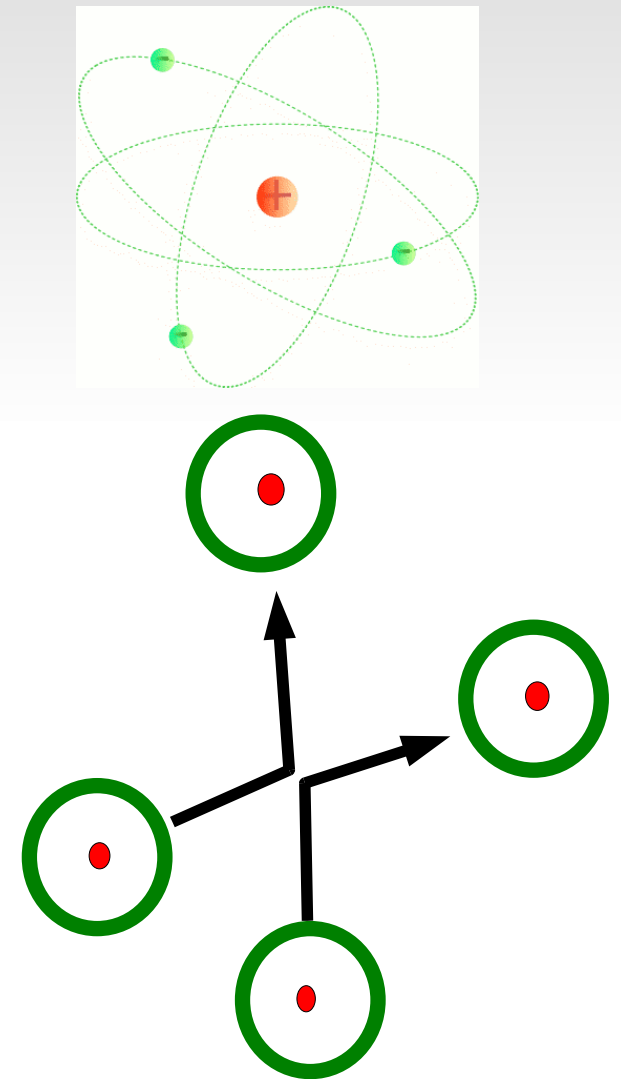
- Ansvarar för de flesta fenomen på jorden:
  - Är den kraft som balanserar gravitationen och undviker att jorden kollapsar.
  - Styr strukturen av atomer, molekyler och material.
  - Ansvarar för alla kemiska reaktioner : förbränning, fotosyntes, livets kemi, ...





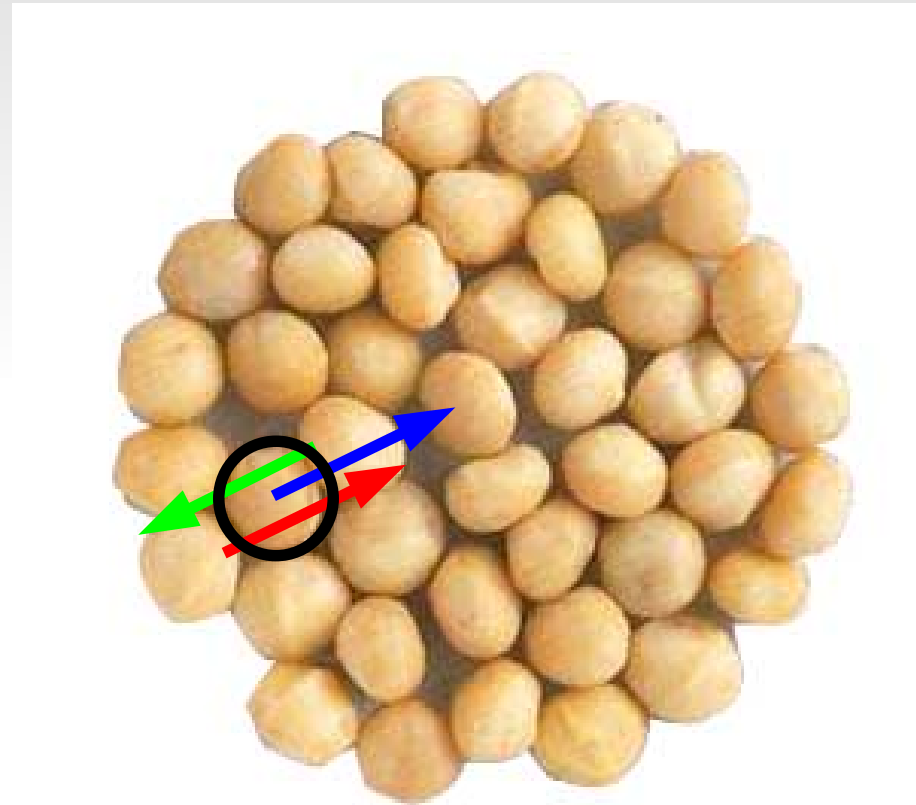
# Hur balanserar den EM kraften gravitationen?

- En **atom** kan beskrivas som en **positivt laddad kärna** omgiven av ett **negativt laddat skal** (vi återkommer till atomen).
- Eftersom lika laddningar repellerar så stöter två atomer bort varandra som två nötter när de negativa skalen kommer för nära varandra.



# Jorden som graviterande nöthög

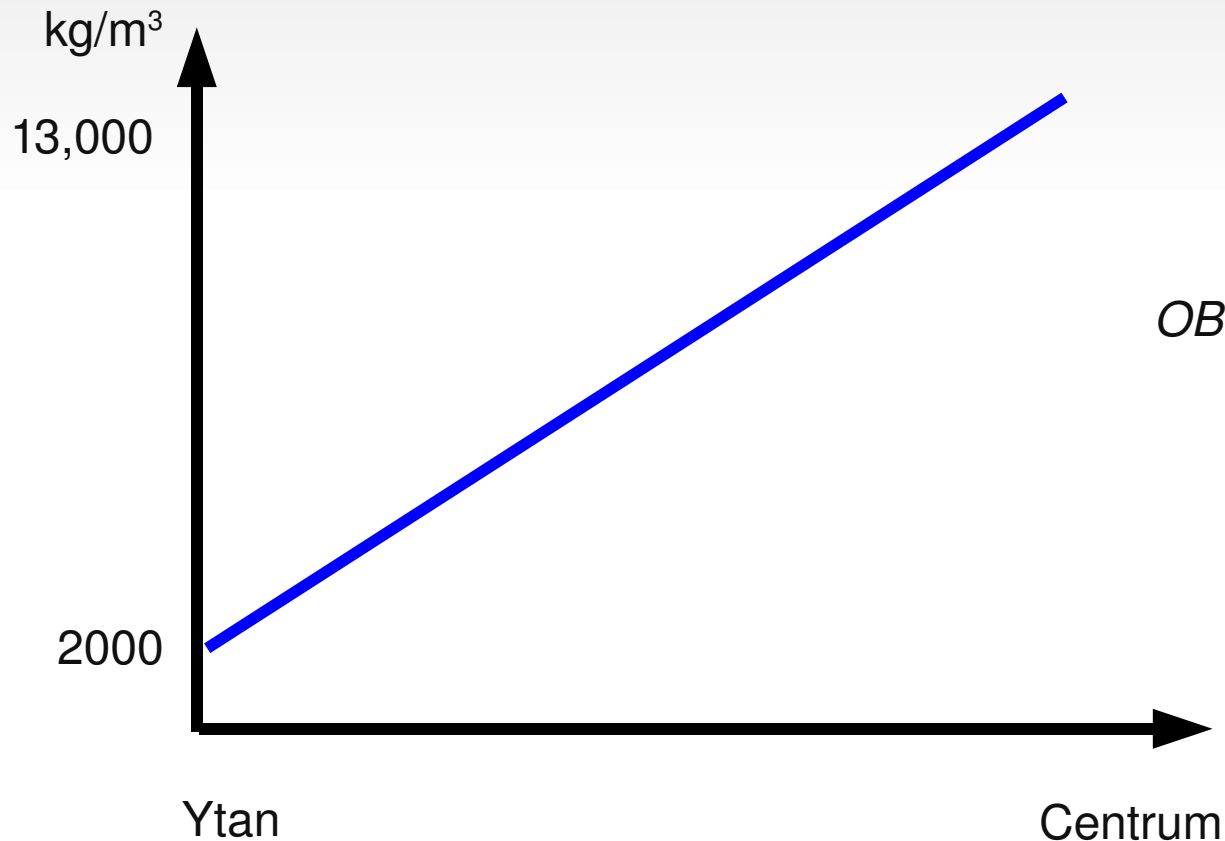
- Varje atom dras in mot centrum av
  - Gravitationskraften
  - Trycket från atomerna ovanför.
- Summan av dessa måste balanserar av trycket från atomerna innanför.



→ *Trycket måste därför **öka inåt** vilket betyder att atomerna måste bli tätare och tätare packade!*

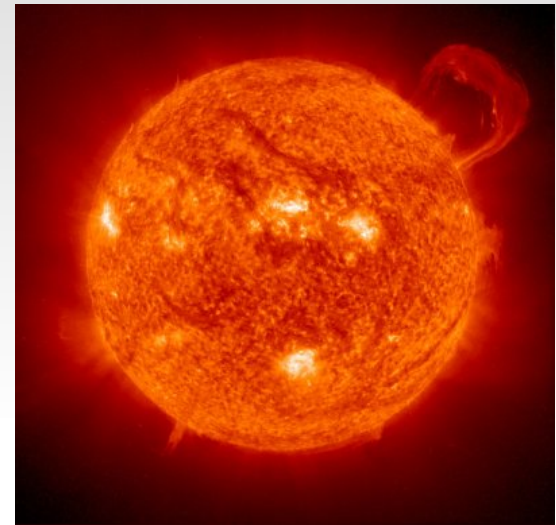
# Jordens densitet

- Jordens och alla andra graviterande kroppars **densitet** ökar därför stadigt inåt.



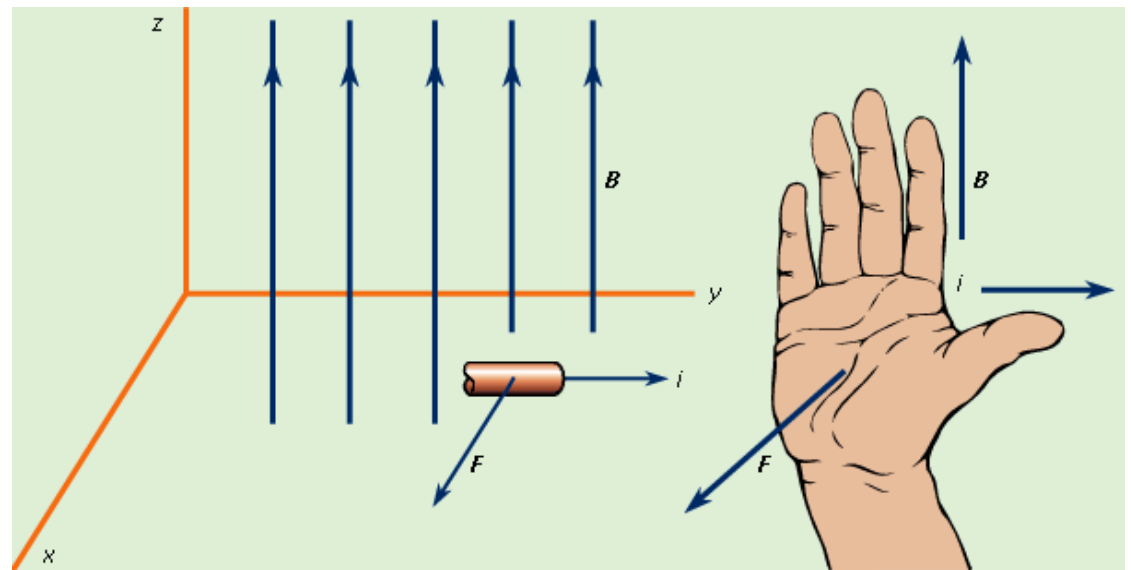
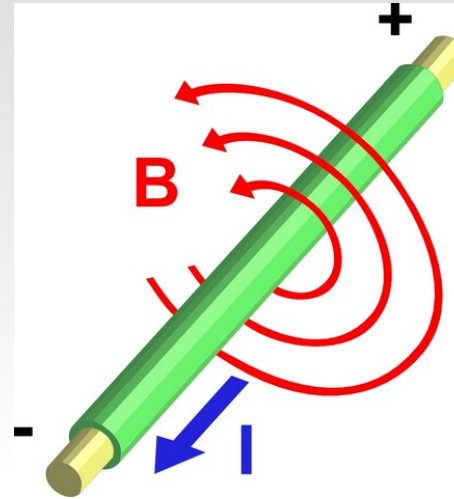
# Solen som graviterande plasma

- Men blir det tillräckligt tätt och varmt övergår materia från atomform till **plasmaform** : atomkärnorna och elektronerna är då fria och ingen skalstruktur finns.
- Detta tillstånd råder i solen. Hur lyckas de elektriska krafterna stå emot gravitationen i detta fall?
- Vi återkommer till detta i slutet av lektionen.



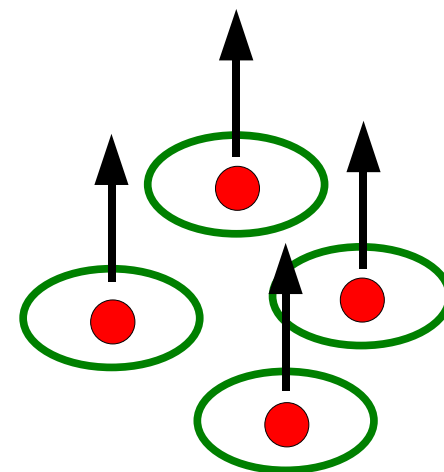
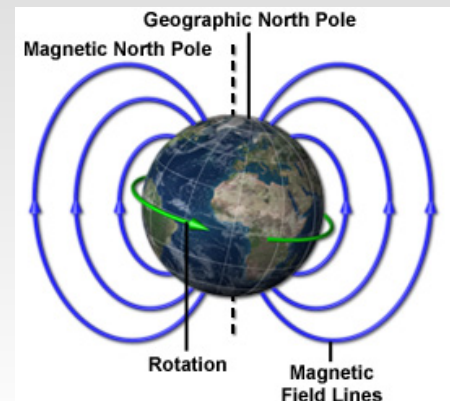
# Magnetfält

- När en elektrisk laddning **rör sig** alstrar den ett **magnetfält**.
- Ett **existerande magnetfält** ger upphov till en kraft på andra laddningar som **rör sig** i det.



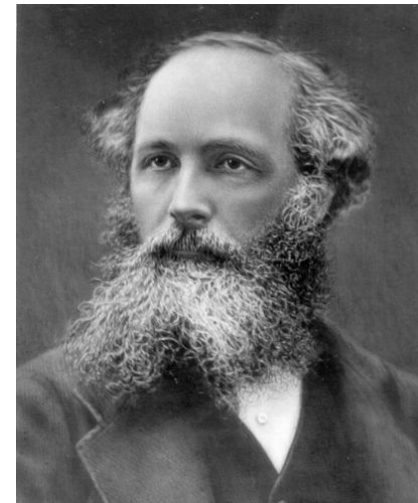
# Magnetfält

- Jordens magnetfält uppkommer pga att laddningar rör sig i jordens inre.
- Men hur funkar en **magnet**, den rör sig ju inte?
- Jo, *inuti* atomerna rör sig laddningarna, och i magnetiska material är atomerna ordnade så att denna rörelse är **synkroniserad**.



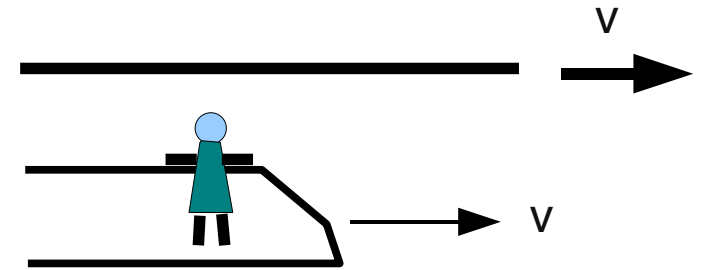
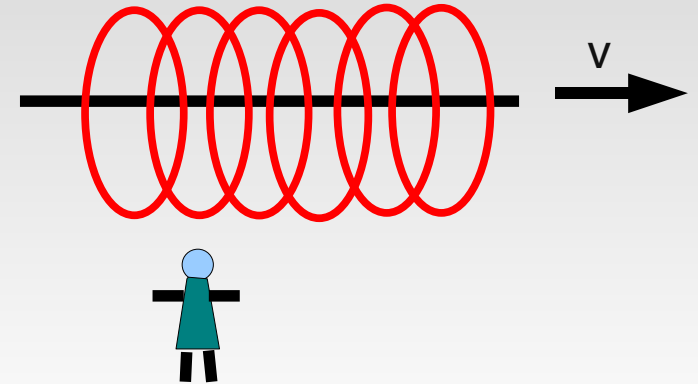
# Elektromagnetism

- Eftersom den elektriska och den magnetiska kraften har samma ursprung (den elektriska laddningen) pratar man om en enda kraft : **elektromagnetismen**.
- Teorin för denna utvecklades av **James Clerk Maxwell** på 1860-talet.



# Magnetfält ligger i betraktarens öga!

- Antag att laddningar åker förbi dig med en viss hastighet  $v$ : de ger upphov till ett **magnetfält**.
- Men om du åker efter i samma riktning med samma hastighet så har laddningar inte längre någon fart relativt dig.  
*Magnetfältet försvinner!*



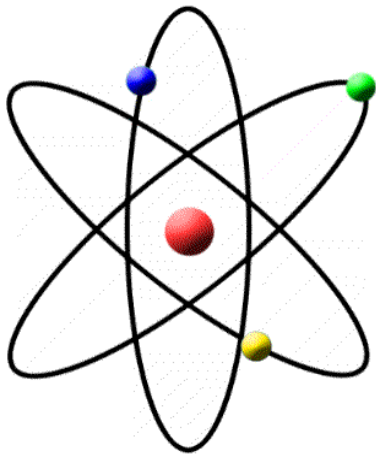


# Magnetfält ligger i betraktarens öga!

- Faktum är att det magnetiska fältet har omvandlats till ett elektriskt fält.
- Elektriska fält kan omvandlas till magnetfält och tvärtom beroende på hur du rör dig; de är två sidor av samma mynt.
- Idag vet vi att den magnetiska kraften är den *relativistiska* ”delen” av den elektriska kraften.

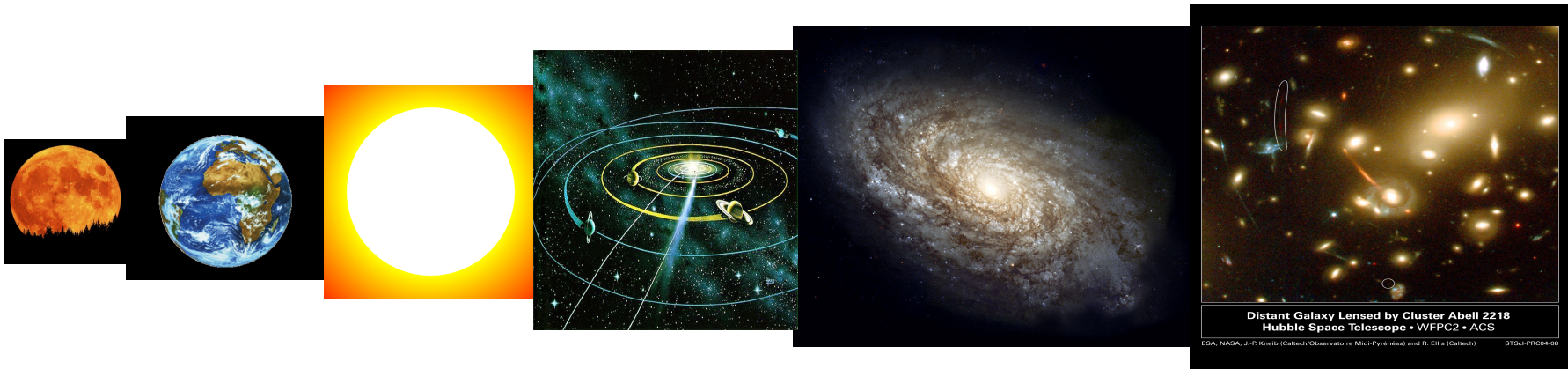
# Elektromagnetisk kraft vs gravitationskraft

- Partikel för partikel är den EM kraften är mycket, *mycket starkare* än gravitationskraften.
- I många sammanhang spelar därför gravitationen ingen roll.



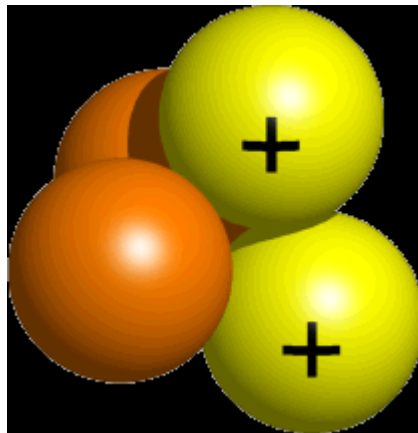
# Elektromagnetisk kraft vs gravitationskraft

- Men, medan de elektriska laddningarna ofta tar ut varandra ju fler partiklar man tittar på så är ”gravitationsladdningen” (dvs massan) *ständig* *växande*.
- Gravitationskraften blir därför viktig på **stor skala**, och håller ihop strukturer som månar, planeter, stjärnor, solsystem, galaxer och galaxhopar.



# Stark kärnkraft

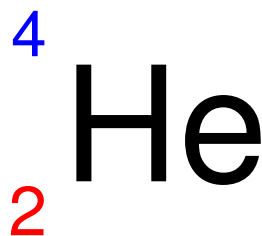
- På mycket korta avstånd ( $\sim 10^{-15}$  m) uppstår en attraherande kraft mellan kärnpartiklar som neutroner och protoner som kallas **stark kärnkraft**.
- Den kan balansera den frånstötande elektromagnetiska kraften och tillåter då **atomkärnor** att bildas.



*Två (positivt laddade) **protoner** kan slå sig ihop med två (neutrala) **neutroner** och bilda en **heliumkärna**. Lägg märke till att den starka kraften balanserar den repulsiva elektromagnetiska kraften mellan protonerna.*

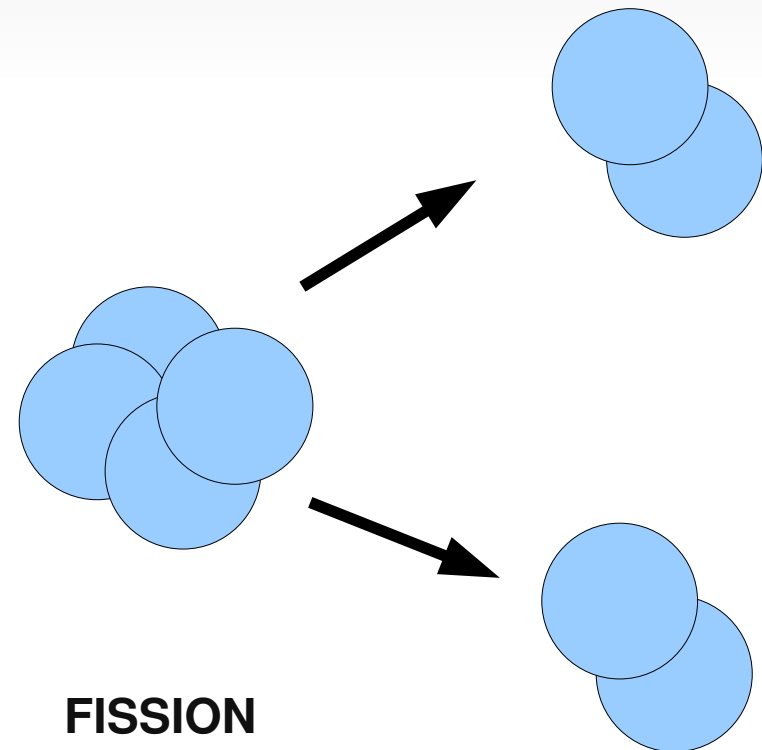
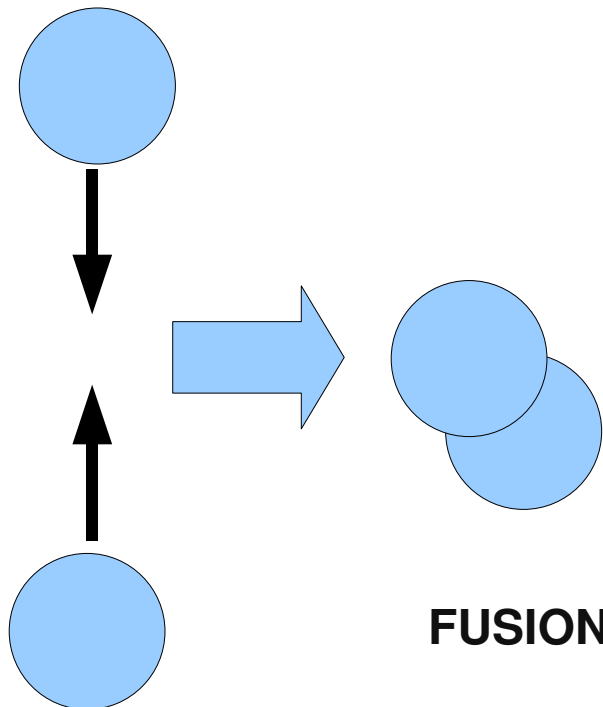
# Atomkärnor

- Alla atomkärnor består av ett visst antal protoner (=protontalet) och ett visst antal neutroner (=neutrontalet).
- **Protontalet** bestämmer kärnans laddning och namn.
- **Neutrontalet** bestämmer isotopen.
- Summan av deras antal kallas **masstalet**.



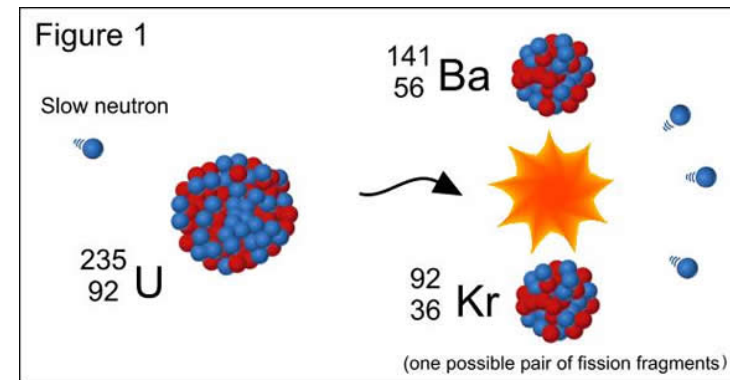
# Stark kärnkraft

- Den starka kärnkraften ger upphov till kärnreaktioner : **fusion** (två kärnor slås ihop) och **fission** (en kärna delas i två).



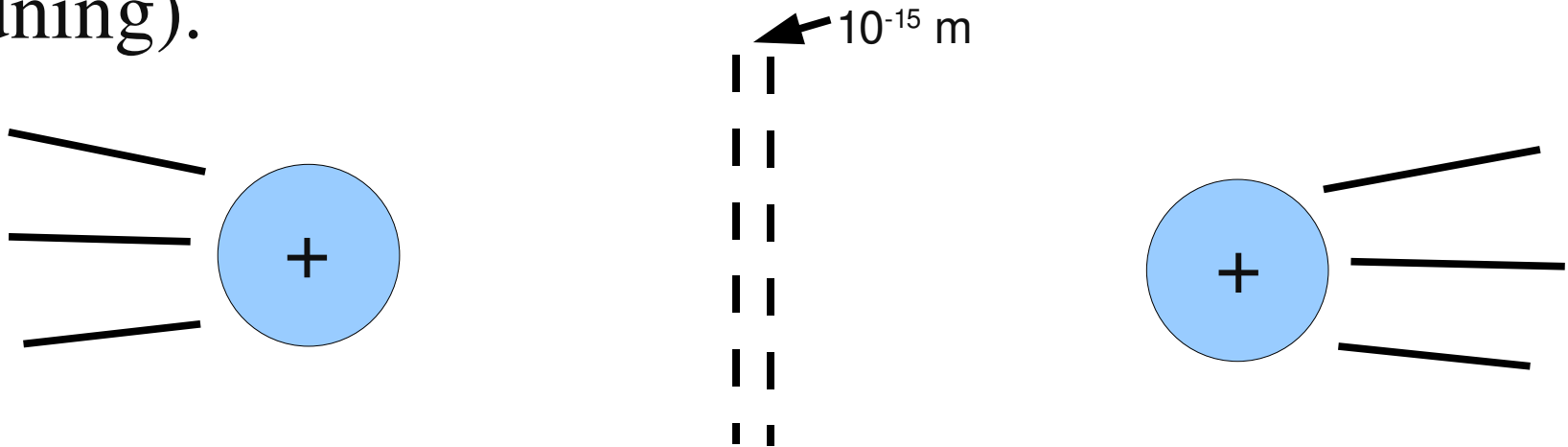
# Fission

- **Fission** är det som sker i kärnkraftverk.
- Neutroner skjuts mot urankärnor, som vid kollisionen delar sig (till en krypton och en bariumkärna), varvid också energi frisläpps.
- I astronomiska sammanhang spelar fission en ganska liten roll.



# Fusion

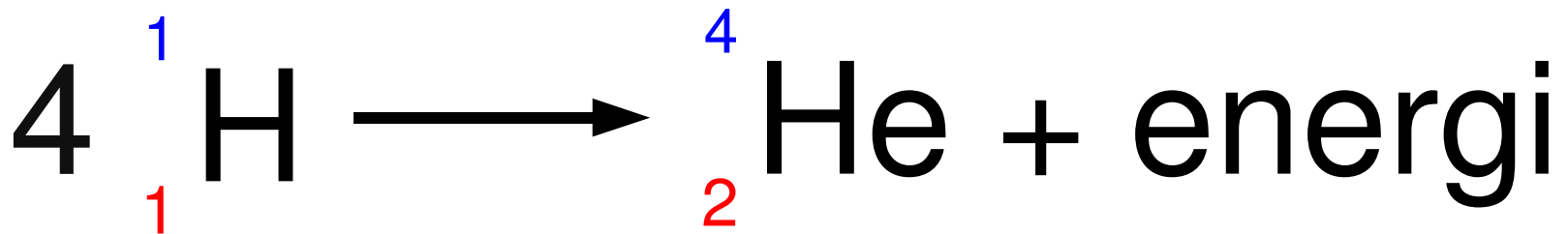
- Vid **fusion** måste kärnorna ha mycket hög fart för att inte stötas isär av den elektromagnetiska kraften innan det kritiska avståndet nås där den starka kraften tar vid.
- Det krävs därför en **hög temperatur** på  $\sim 10$  miljoner grader eller mer (beroende på partiklarnas laddning).





# Fusion

- På 1930-talet insåg man att stjärnorna antagligen är såpass varma inuti och att det är fusion av väte till helium som alstrar deras energi.
- I denna **vätefusion** slås fyra st vätekärnor ihop sig till en st heliumkärna (i flera steg).



# Svag kärnkraft

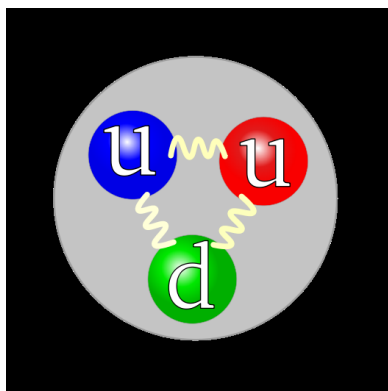
- Den sista av de fyra krafterna, den **svaga kraften**, orsakar vissa reaktioner där ofta en proton omvandlas till en neutron.
- Vi kommer inte säga speciellt mycket mer om denna kraften i den här kursen.

# Partiklar

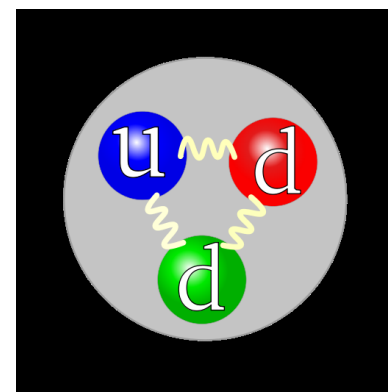
- De olika partiklar som finns i universum kan interagera med en, flera eller alla de krafter som finns.
- En vanlig typ av uppdelning är efter om partikeln känner av den *starka* kraften eller ej : **kvarkar** känner av och **leptoner** känner inte av.

# Kvarkar

- De vanligaste kvarkarna heter **upp** (u) och **ner** (d). De sätter alltid ihop sig tre-och-tre (via den starka kraften) och bildar **protoner** och **neutroner**.



*En proton (till vänster) innehåller två u och en d-kvark, medan en neutron innehåller två d och en u-kvark.*



# Leptoner

- Av leptonerna ('de snabba') är **elektronen** den viktigaste.
- En annan viktig lepton är **neutrino** som vi kommer stöta på i samband med supernovor. Neutrino interagerar vare sig med den starka eller den elektromagnetiska kraften och är därför extremt bra på att ta sig ur knipiga situationer i universum som tex kollapsande stjärnor.

# Partiklarnas massa

- **Protoner och neutroner** väger nästan exakt lika mycket :  $1.67 \cdot 10^{-27}$  kg (neutronen väger lite mer).
- **Elektronen** väger cirka 2000 gånger mindre.
- Eftersom rörelseenergin är proportionell mot massan och hastigheten (i kvadrat) brukar därför elektroner ha de högsta hastigheterna.

# Antipartiklar

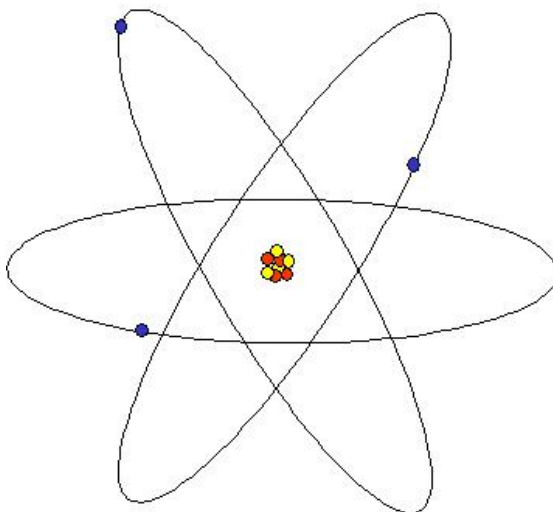
- För varje vanlig partikel existerar också dess **antipartikel**, som är identiska i alla avseenden utom att laddningen är tvärtom.
- Tex har antipartikeln till elektronen  $+1$  i laddning istället för  $-1$ . Den kallas för **positron**.

$e^-$        $e^+$

- När partiklar och anti-partiklar möts annihileras de och bildar strålning.
- I universum totalt sett är anti-partiklarna mycket mer ovanliga än de vanliga partiklarna.

# Atomer

- All vanlig materia är gjord av atomer som består av en **kärna med protoner och neutroner**, samt ett skal med en eller flera **elektroner**.
- För vanliga neutrala atomer måste antalet elektroner vara lika med antalet protoner så laddningen blir noll.



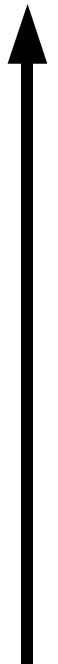


# Elektromagnetisk strålning

- När elektriska laddningar utsätts för en kraft och accelereras skickar de iväg **elektromagnetisk strålning**.

- Denna kan ha olika våglängd:

$\lambda$

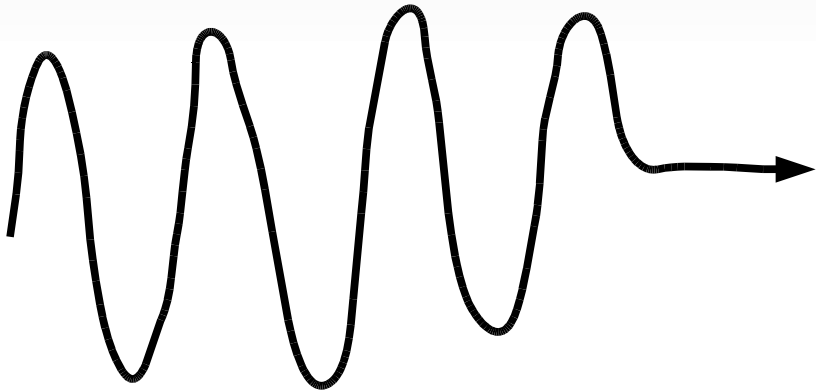


- Radio ~ 0.3 mm och längre
- Infrarött ~ 750 nm - 0.3 mm
- Synligt ljus ~ 400 nm - 750 nm
- UV ~ 10 nm – 400 nm
- Röntgen ~ 0.01 nm – 10 nm
- Gamma ~ 0.01 nm och kortare

m(milli) =  $10^{-3}$   
u (mikro) =  $10^{-6}$   
n (nano) =  $10^{-9}$   
  
Atom ~ 0.1 nm

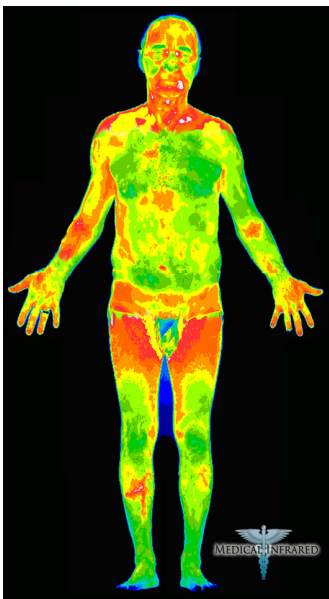
# Elektromagnetisk strålning

- Den elektromagnetiska strålningen utövar i sin tur en kraft på laddningar som den träffar.

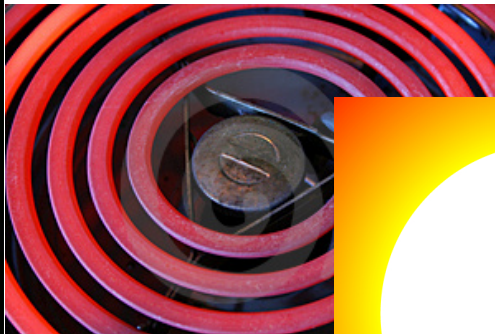


# Emitterad strålning

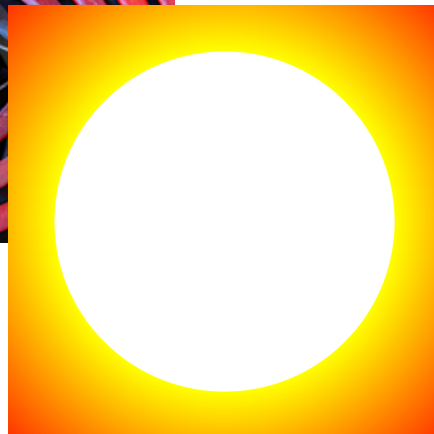
- Energin i strålningen ökar ju *kortare* våglängden är.
- I allmänhet gäller därför att **varmare föremål** skickar ut strålning av **kortare våglängd**.



Din kropp ~ 300 K → **infrarött**



Varm platta ~ 1000 K → **rött**



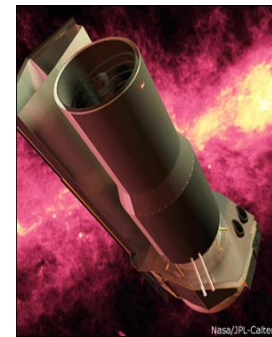
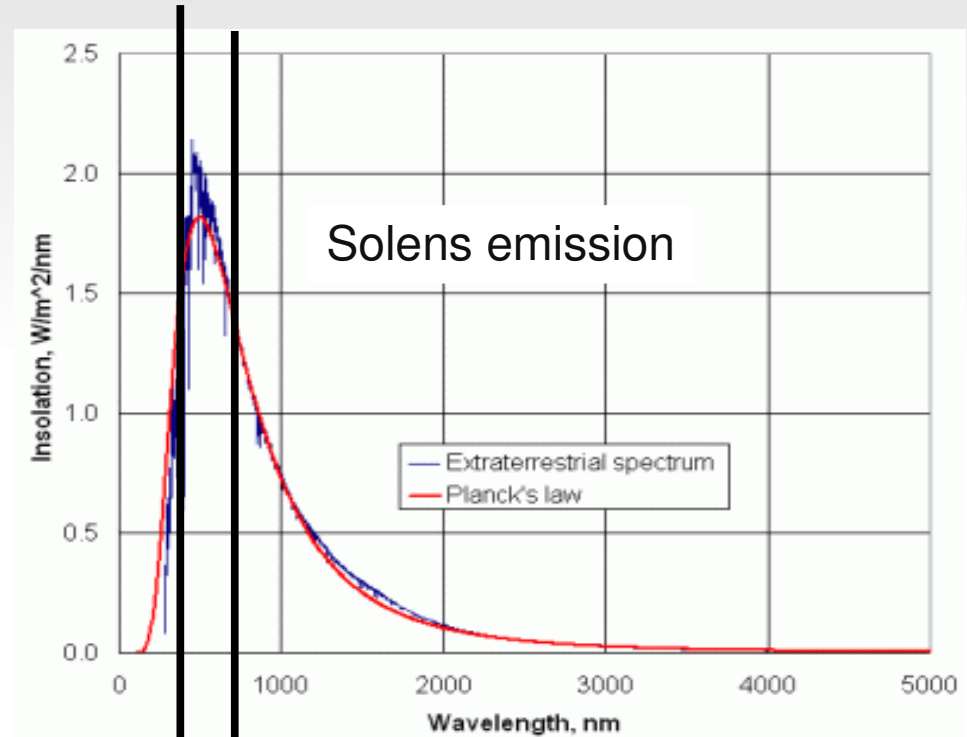
Solens yta ~ 6000 K → **gult**



Heta sjärnor ~ 20,000 K → **blått**

# Elektromagnetisk strålning

- Våra **ögon** är anpassade att detektera den elektromagnetiska strålning som just vår sol skickar ut *mest* av.
- Idag finns astronomiska teleskop för alla de andra våglängderna också.



# Övrig strålning

- Elektromagnetisk strålning består av partiklar som heter **fotoner**. De färdas alltid med ljusets hastighet  $c$ .
- Man brukar även räkna in andra partiklar som rör sig mycket snabbt ( $v \sim c$ ) som strålning.
- Vid radioaktiva sönderfall sänds ofta snabba elektroner, protoner, neutroner och heliumkärnor ut och räknas som strålning.
- **Kosmisk strålning** består av partiklar som kommer farande med mycket höga hastigheter från yttre rymden.

# Energi

- **Energi** är kanske det enskilt viktigaste begreppet i fysiken.
- Ingen vet vad energi egentligen *är*. Vad vi vet är att den kan anta olika former och att:

*Energi kan vare sig skapas eller förstöras, den kan bara omvandlas.*

- Om energi plötsligt ”dyker upp” någonstans, måste man därför alltid fråga sig : vart kom den ifrån?

# Energiformer

- **Rörelseenergi** : Ju snabbare nånting rör sig desto större energi har det (energin ökar med hastigheten i *kvadrat*).
- **Värmeenergi** : består av den atomernas slumpmässiga rörelseenergi. Mäts som en *temperatur* i antingen Celsius eller Kelvin (Celsius -  $273^{\circ}$ ).



# Energiformer

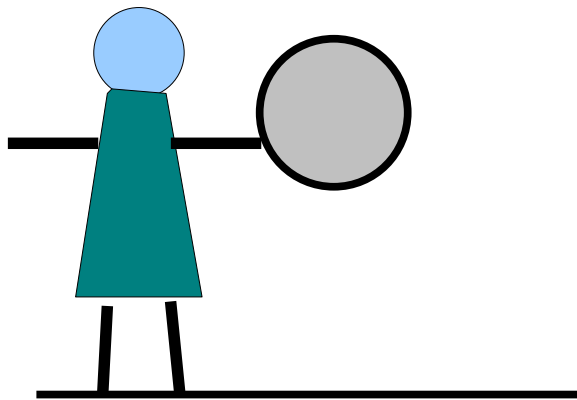
- **Strålningsenergi** : Ljus och all annan elektromagnetisk strålning innehåller energi.
- **Massenergi** : Enligt Einsteins  $E = mc^2$  innehåller partiklar energi bara genom sin massa.





# Energiformer

- **Potentiell energi** : Antag att du håller en boll en bit över marken. Bollen har *potentialen* att falla och få en rörelseenergi om du släpper den. Vi säger därför att bollen har en potentiell energi.



# Potentiell energi

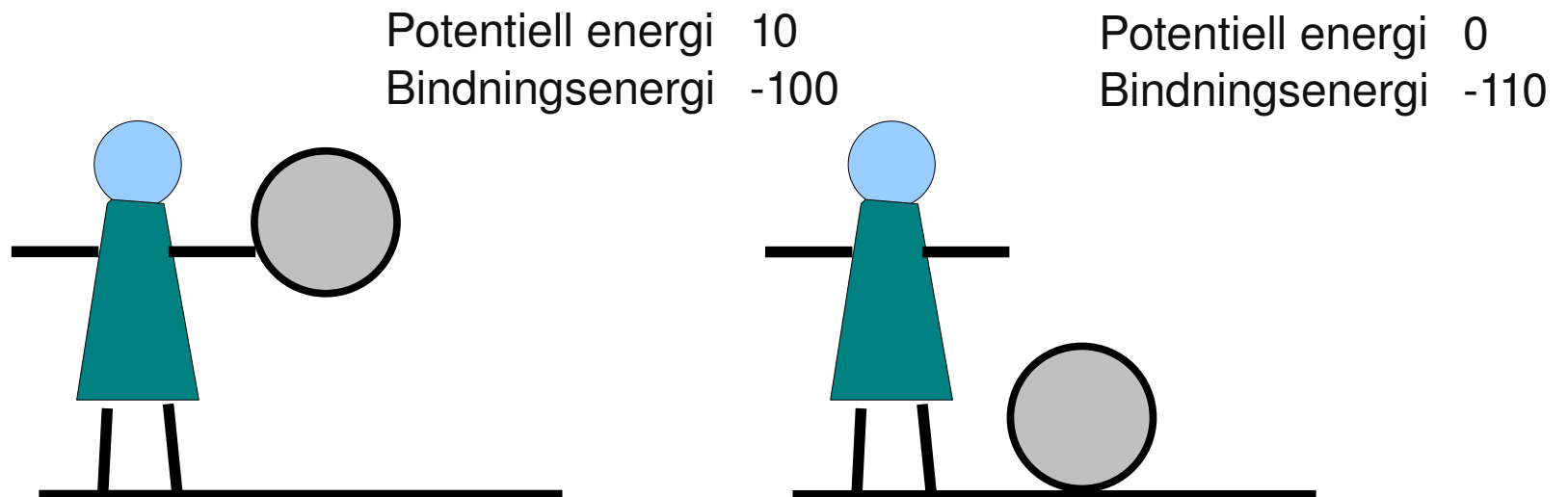
- Den potentiella accelerationen kan ske med vilken som helst av de fyra krafterna. Då får vi
  - **Gravitationell** potentiell energi.
  - **Elektromagnetisk** potentiell energi (tex elektrisk spänning, kemisk energi)
  - **Stark** potentiell energi.
  - **Svag** potentiell energi.

# Bindningsenergi

- Ibland används begreppet **bindningsenergi**. Detta är ett alternativt sätt att bokföra potentiella energier.
- Bindningsenergi är ”*den energi som måste tillföras för att bryta upp ett bundet tillstånd*”.
- När den potentiella energin *minskar* så *ökar* bindningsenergin. För att bokföringen då ska bli rätt måste man sätta ett minus framför alla bindningsenergier.

# Bindningsenergi

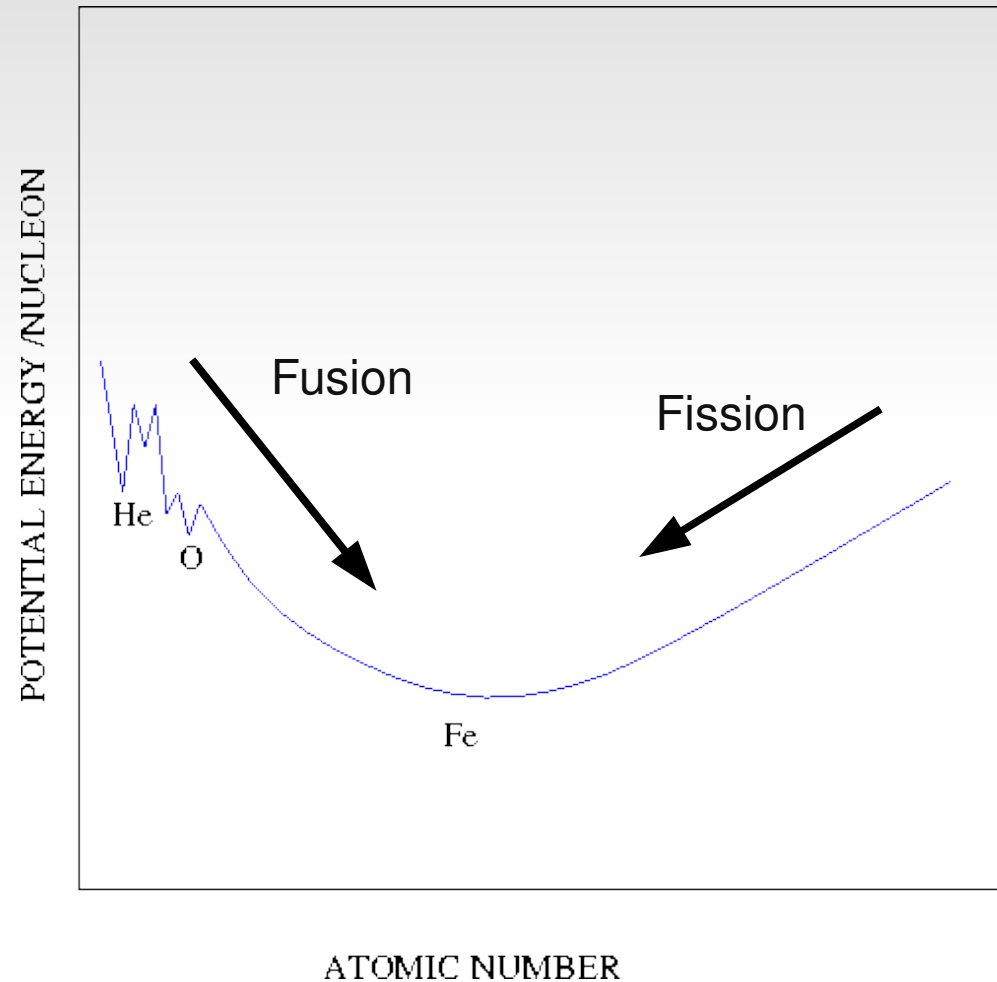
- Bollens (gravitationella) bindningsenergi är den energi som krävs för att sparka iväg den från jordens gravitationsfält.



# Potentiell kärnenergi

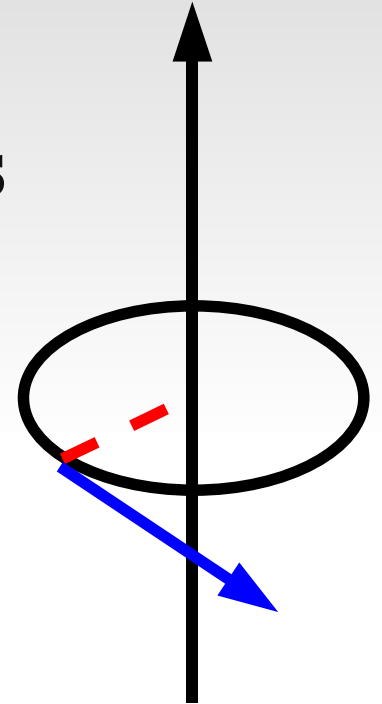
Potentiell kärnenergi per partikel

- Den potentiella energin för olika atomkärnor visar att **järn** (Fe) har det minsta möjliga värdet (per partikel).
- Potentiell energi släpps alltså loss om kärnor *lättare* än järn **slås ihop** (**fusion**) eller om kärnor *tyngre* än järn **klyvs** (**fission**).



# Rotation

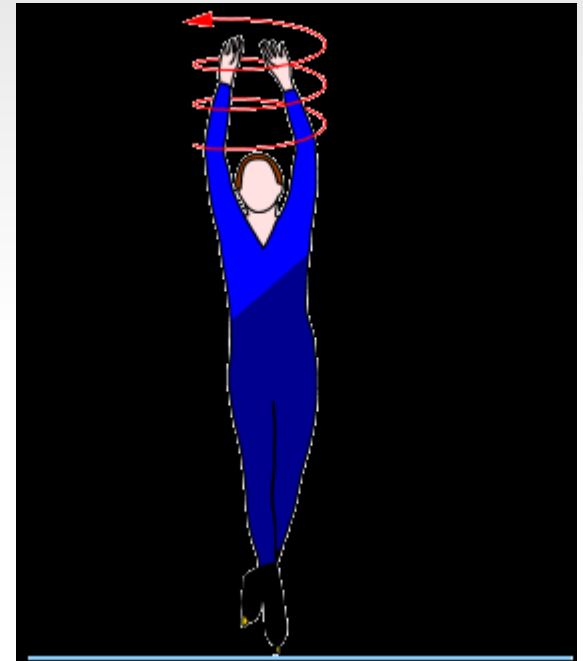
- Precis som det finns en lag om energins bevarande, finns det en lag om **rotationers bevarande**.
- Den exakta kvantitet som bevaras är *produkten* av **rotationshastigheten** och **avståndet från rotationsaxeln**. Denna kvantitet kallas **rörelsemängdsmomentet**.



*Rörelsemängdsmoment kan varken skapas eller förstöras.*

# Rotation

- Ett exempel är när en skridskoåkare drar in armar och ben : kroppens (genomsnittliga) avstånd från rotationaxeln *minskar* då, och därför måste rotationshastigheten *öka*.
- Samma princip gäller när **stjärnor drar ihop sig** : de börjar snurra *fortare*.



# Kvantfysik

- **Kvantfysiken** är teorin för hur partiklar beter sig på **liten skala** : hur atomer är uppbyggda och hur strålning och partiklar interagerar.
- I de mycket täta tillstånd som vi kommer studera är det framförallt två kvantfysiklagar som vi behöver kunna :
  - **Paulis uteslutningsprincip**
  - **Heisenbergs osäkerhetsrelation**



# Paulis uteslutningsprincip

- Vanliga elektroner, protoner och neutroner kallas (tillsammans med en del andra partiklar) för **fermioner**.
- **Paulis uteslutningsprincip** säger att

*Två fermioner kan inte samtidigt uppta samma kvanttillstånd.*
- Fermioner är alltså mycket 'osociala'; de vill inte vara på samma ställe och i samma tillstånd som någon annan fermion.



# Bundna tillstånd : Atomstruktur

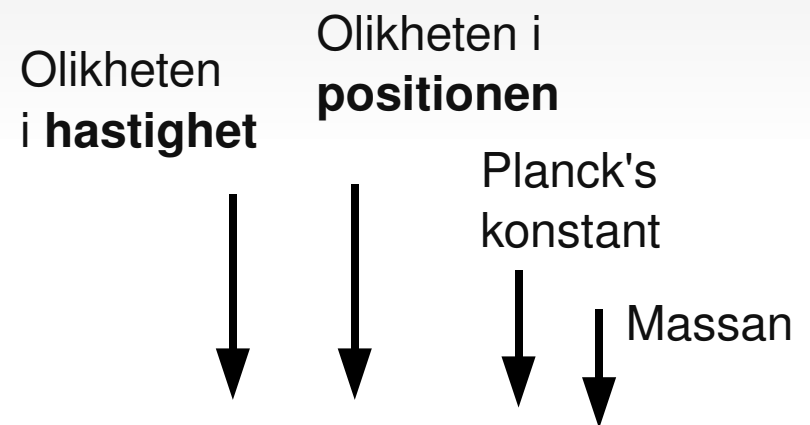
- Paulis uteslutningsprincip leder till att elektronerna inuti atomer måste fördela sig i **olika banor**.
- Det är mestdels den *sista* elektronen som ger en atom dess **kemiska egenskaper**. Väte (1 elektron) är helt annorlunda mot syre (8 elektroner) som är helt annorlunda mot uran (92 elektroner) pga att den sista elektronen ligger i olika banor.
- Uteslutningsprincipen förklarar framgångsrikt hela **periodiska systemet**.

# Fria tillstånd

- En *fri* fermions kvanttillstånd består av en specifikation av dess **position** och dess **hastighet**.
- Ett vara i samma tillstånd som en annan fermion kräver att man har *både* samma position *och* samma hastighet.
- Det är alltså tillåtet för två fermioner kan vara på precis samma ställe under förutsättning att de har **olika hastighet**.

# Heisenbergs osäkerhetsrelation

- *Hur* olika måste hastigheterna vara?
- Svaret ges av **Heisenbergs Osäkerhetsrelation:**



*Ett fritt kvanttillstånd har storleken  $dv \cdot dx = h/m$  och en partikel kan aldrig lokaliseras mer noggrant än så.*

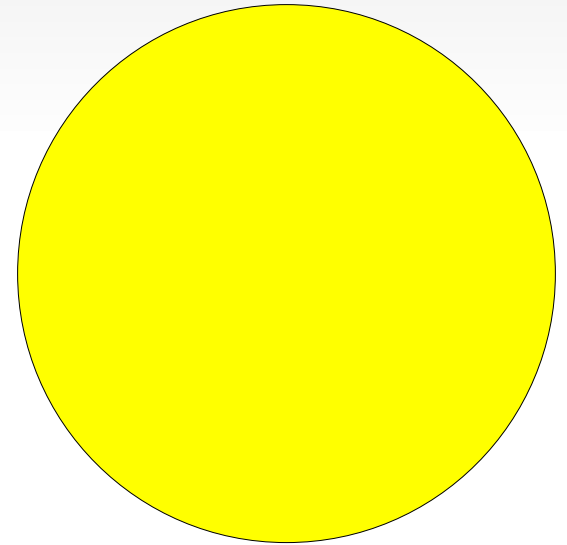
# Degeneration

- När material trycks ihop tillräckligt tätt kan uteslutningsprincipen tvinga partiklarna till höga hastigheter.
- När detta tillstånd nås säger man att objektet blivit **degenererat**.
- Vi kommer se att både **vita dvärgar** och **neutronstjärnor** har hamnat i denna situationen.



# Solens jämvikt

- Åter till frågan vi ställde i början, hur kan soppan av plus och minusladdningar i solen ge dess tryck?
- Elektroner och protoner har i snitt **samma rörelseenergi**. Men eftersom rörelseenergin är proportionell mot massan och hastigheten i kvadrat rör sig de lätta elektronerna mycket **snabbare** än de tunga protonerna.



# ( Solens jämvikt )

- Elektronerna krockar därför mycket **oftare** och **kraftigare** med varandra än vad de gör med protonerna.
- De ger ett **frånstötande tryck** precis som när de ligger i atomskal.
- Precis som i jordens fall måste trycket inifrån balansera *både* trycket utifrån och gravitationskraften. Trycket måste därför även här **öka inåt**.

# Solens jämvikt

- Interaktionen på partikelnivå i ett plasma är komplicerad, men man kan visa att en **inåt ökande densitet och temperatur** leder till att elektronerna och protonerna i snitt kollideras utåt lite mer än de kollideras inåt.
- Även i ett tillstånd utan skalstruktur kan därmed den gravitationella kraften balanseras.



# Gravitationell jämvikt

- Skillnaden mellan planeter och stjärnor är att hos planeterna balanseras gravitationen främst av en **ständigt ökande densitet** inåt, medan för stjärnor balanseras den främst av en **ständigt ökande temperatur** inåt.
- Närvaron av **fusion** är den fundamentala skillnaden som gör stjärnor stora, varma och lysande, och planeter små, kalla och mörka.

# Gravitationell jämvikt

- Gravitationen kämpar ständigt för att saker och ting ska kollapsa.
- Det finns bara två fundamentala sätt den kan hållas i schack på:
  - Ett **inåt ökande tryck** (→ planeter, månar och stjärnor)
  - **Hastigheten** är för stor (→ solsystem, galaxer och galaxhopar)
- Mycket av astronomins skådespel bottnar i kampen mellan dessa krafter.