

Big Bang til naturfag

GRUNDSTOFFERNE

Hydrogen og helium bliver produceret i det tidlige univers efter Big Bang. Grundstoffer med atomnummer til og med jern (nr. 26) bliver produceret i fusionen i stjerner. Tungere grundstoffer end jern bliver skabt i supernovaer (eksplosioner ved afslutningen af ekstra store stjerners liv).

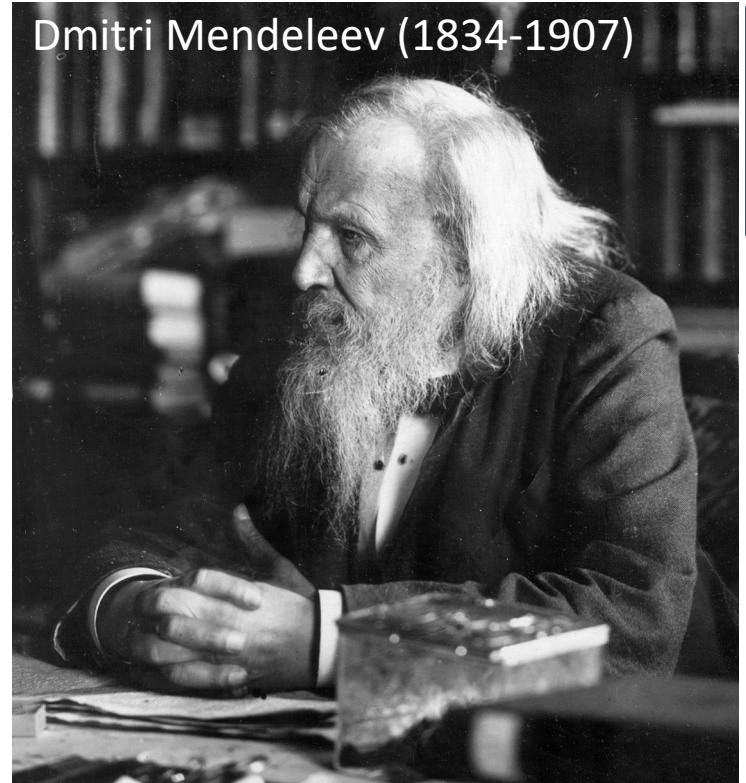
En stor del af forståelsen af hvordan grundstoffer skabes er tæt koblet med stjerners udvikling, som er beskrevet i materialet om 'Galakser, stjerner og planeter'. Grundstoffernes omskiftelighed gennem radioaktivitet har ikke fået så meget plads i materialet, og der henvises til andre kilder for dette.

Det Periodiske System

”Orden” i grundstofferne

I 1800-tallet opdagede Dmitri Mendeleev, at flere af grundstofferne (man kendte 56 af dem dengang) havde **samme egenskaber!** Hvorfor?

Det vidste Mendeleev ikke, men han kunne dog sætte grundstofferne i system, hvilket blev udgangspunktet for det, vi i dag kalder **det periodiske system.**



Dmitri Mendeleev (1834-1907)

[Wikimedia Commons](#)

Science Photo Library

T a b e l l e I.

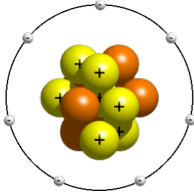
			K = 39	Rb = 85	Cs = 133	—	—
			Ca = 40	Sr = 87	Ba = 137	—	—
			—	?Yt = 88?	?Di = 138?	Er = 178?	—
			Ti = 48?	Zr = 90	Ce = 140?	?La = 180?	Th = 231
			V = 51	Nb = 94	—	Ta = 182	—
			Cr = 52	Mo = 96	—	W = 184	U = 240
			Mn = 55	—	—	—	—
			Fe = 56	Ru = 104	—	Os = 195?	—
			Co = 59	Rh = 104	—	Ir = 197	—
			Ni = 59	Pd = 106	—	Pt = 198?	—
			Cu = 63	Ag = 108	—	Au = 199?	—
			Zn = 65	Cd = 112	—	Hg = 200	—
			—	In = 113	—	Tl = 204	—
			—	Su = 118	—	Pb = 207	—
			As = 75	Sb = 122	—	Bi = 208	—
			Se = 78	Te = 125?	—	—	—
			Br = 80	J = 127	—	—	—

Typische Elemente		
H = 1	Li = 7	Na = 23
	Be = 9,4	Mg = 24
	B = 11	Al = 27,3
	C = 12	Si = 28
	N = 14	P = 31
	O = 16	S = 32
	F = 19	Cl = 35,5

Her er vist det periodiske system, som han offentliggjorde i 1863.

Det periodiske System

Group



Period	I	II											III	IV	V	VI	VII	VIII	
1	1 H																		2 He
2	3 Li	4 Be											5 B	6 C	7 N	8 O	9 F	10 Ne	
3	11 Na	12 Mg											13 Al	14 Si	15 P	16 S	17 Cl	18 Ar	
4	19 K	20 Ca	21 Sc	22 Ti	23 V	24 Cr	25 Mn	26 Fe	27 Co	28 Ni	29 Cu	30 Zn	31 Ga	32 Ge	33 As	34 Se	35 Br	36 Kr	
5	37 Rb	38 Sr	39 Y	40 Zr	41 Nb	42 Mo	43 Tc	44 Ru	45 Rh	46 Pd	47 Ag	48 Cd	49 In	50 Sn	51 Sb	52 Te	53 I	54 Xe	
6	55 Cs	56 Ba	*	72 Hf	73 Ta	74 W	75 Re	76 Os	77 Ir	78 Pt	79 Au	80 Hg	81 Tl	82 Pb	83 Bi	84 Po	85 At	86 Rn	
7	87 Fr	88 Ra	**	104 Rf	105 Db	106 Sg	107 Bh	108 Hs	109 Mt	110 Ds	111 Rg	112 Cn	113 Nh	114 Fl	115 Mc	116 Lv	117 Ts	118 Og	
8	119 Uun																		

* Lanthanides	57 La	58 Ce	59 Pr	60 Nd	61 Pm	62 Sm	63 Eu	64 Gd	65 Tb	66 Dy	67 Ho	68 Er	69 Tm	70 Yb	71 Lu
** Actinides	89 Ac	90 Th	91 Pa	92 U	93 Np	94 Pu	95 Am	96 Cm	97 Bk	98 Cf	99 Es	100 Fm	101 Md	102 No	103 Lr

Alkali metals	Alkaline earth metals	Lanthanides	Actinides	Transition metals
Poor metals	Metalloids	Nonmetals	Halogens	Noble gases

Wikimedia Commons

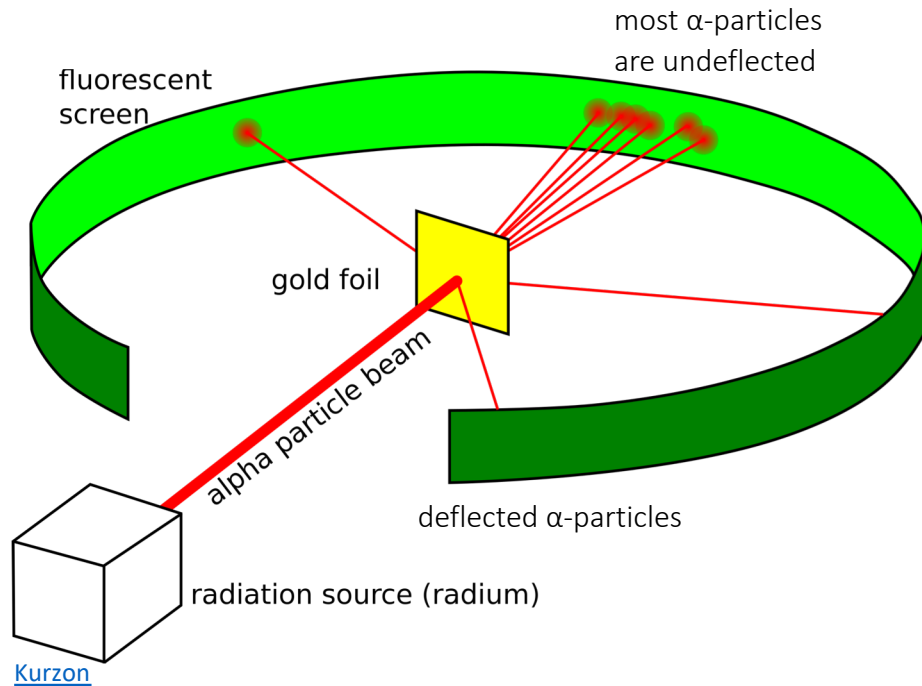
Der er sket en del siden Dmitri lavede system i de første grundstoffer. Vi har klassificeret mange forskellige atomer, grundstoffer. I dag kender vi til 118 grundstoffer og vi ved, at grunden til at grundstoffer i samme gruppe har lignende egenskaber, er fordi de i deres yderste 'skal' af elektroner har det samme antal elektroner, og det er disse, som afgør hvilke kemiske egenskaber et stof har.

Linjetypen angiver grundstoffets naturlige forekomst

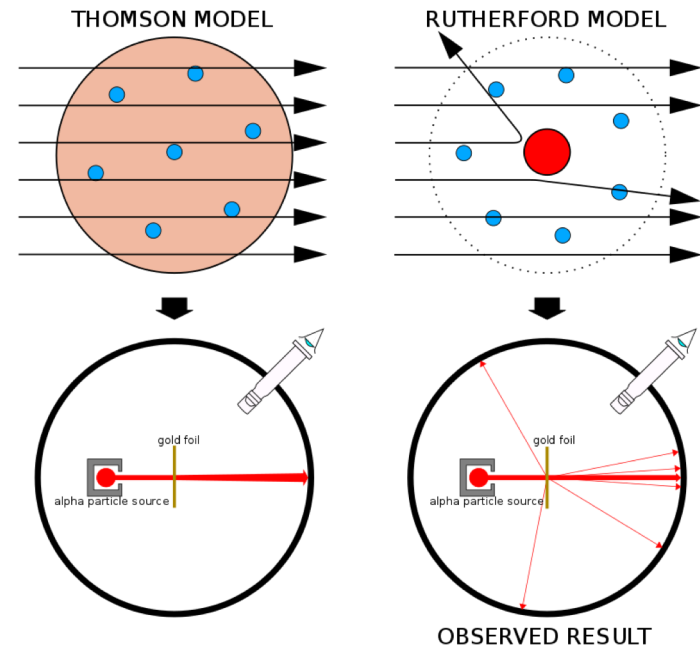
- + Fuldt optrukket linje: Skabt i stjernerne
- + Lange stiplede linjer: Skabes i henfald af andre radioaktive grundstoffer
- + Korte stiplede linjer: Skabt syntetisk i laboratorier

Rutherford's experiment

Hvad er der inde i atomerne?



Hvordan finder man overhovedet ud af, hvad der er inde i et atom? Jo, man skyder noget småt (her alfa-partikler) ind på det, og ser hvad der sker!



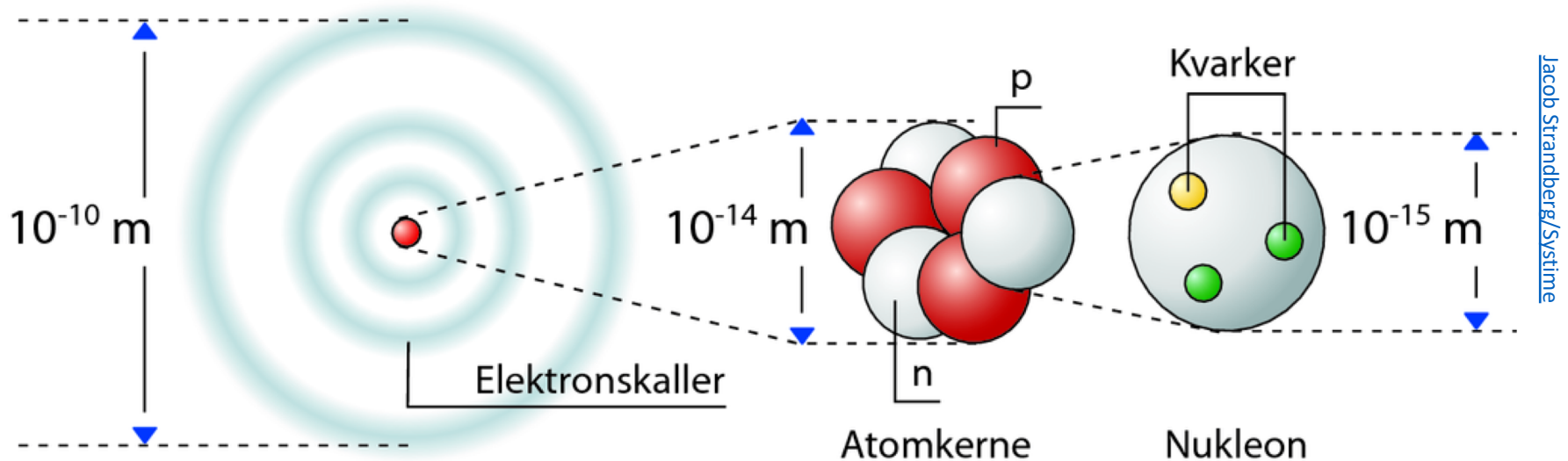
I Rutherford's eksperiment blev en lille del af alfapartiklerne (1/8000) skudt tilbage, mens resten fløj lige igennem foliet. Det fik Rutherford til at lave en atommodel, hvor der var en kerne i midten, mens elektronerne fløj rundt om i stor afstand fra kernen.

Tidligere havde man troet, at både protoner, neutroner og elektronerne måtte ligge tæt sammen i en stor budding (kendt som Thomson modellen). men det ville i så fald betyde, at alfapartiklerne ikke ville kunne komme igennem foliet. Rutherford's eksperiment og følgende atommodel var derfor banebrydende for forståelsen af atomets opbygning.

"Det var helt sikkert det mest utrolige, der nogensinde skete i mit liv: Det var næsten lige så utroligt, som at skyde en stor kanonkugle imod en papirserviet, og så få kanonkuglen tilbage i hovedet!" (Citat fra Rutherford).

Den underliggende opbygning

Hvad består stof af, når vi zoomer ind på det?



Jacob Strandberg/Systeme

Atomer består af en kerne med elektroner omkring. Kernen består igen af protoner (som afgør hvilket grundstof og dermed grundstofnummer det er) og neutroner, og disse består igen af kvarker.

Elektronerne lægger sig i bestemte skaller omkring atomkernen, og når en skal er fyldt op, så lægger de sig i den næste. Der kan være to elektroner i den første skal, mens de resterende skaller hver kan have op til otte elektroner.

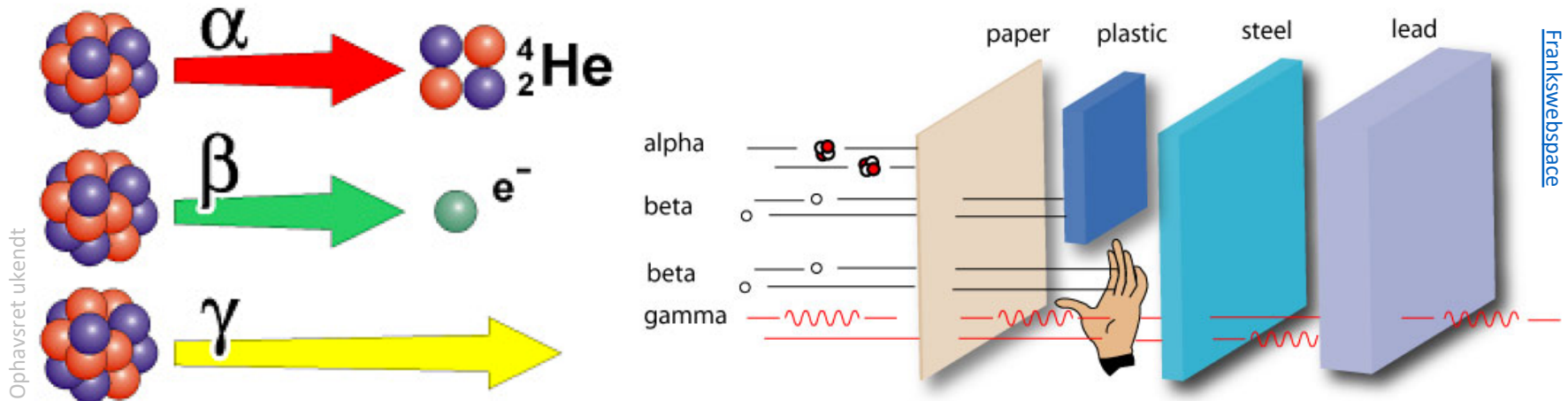
Den viden, som vi i dag har om atomer, atomkerner, og alle de mindre bestanddele inde i disse, kommer fra at fortsætte eksperimenter af samme type, som Rutherford's eksperiment, blot med højere og højere energier på de partikler, som vi skyder ind på dem.

CERNs LHC-accelerator i Schweiz er det mest kendte eksempel i denne udvikling.

Radioaktivitet

Der er tre former for radioaktivt henfald:

- Alpha: Udsendelse af helium-kerne, som standses af papir.
- Beta: Udsendelse af elektron, som standses af lidt metal.
- Gamma: Udsendelse af en foton, som standses af meget metal (bly).



Ophavsret ukendt

Frankswebspacer

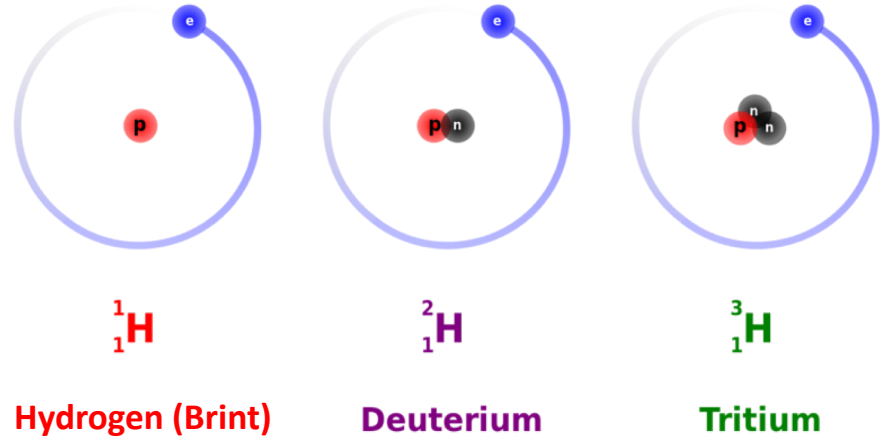
Radioaktivt henfald er atomkernernes måde at reagere på, hvis de ikke er bygget stabilt. Ligesom at en sten ruller ned ad en bakke, hvis den ikke ligger stabilt, så går en atomkerne også i stykker hvis den ikke er stabil.

Hvad bestemmer, om en atomkerne er bygget stabilt? Det gør alene antallet af protoner og neutroner, og hvis det er muligt at komme til en mere stabil tilstand (rulle ned ad bakken), så gør den det – ved at henfalde radioaktivt.

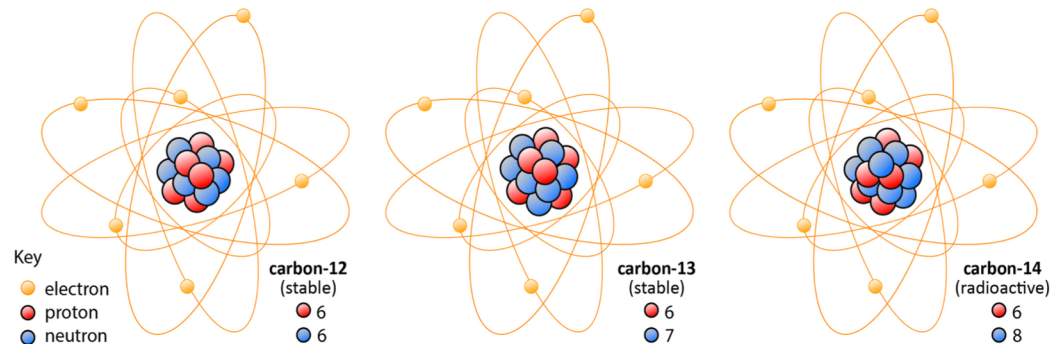
Isotoper

Er der flere versioner af samme grundstof? Ja!

- Hvilket grundstof, der er tale om, bestemmes af antallet af *protoner* inde i kernen.
- Antallet af protoner bestemmer også antallet af elektroner, idet disse to skal matche.
- **Antallet af neutroner bestemmer hvilken isotop** (dvs. "version") af et bestemt grundstof, der er tale om.



[Wikimedia Commons](#)

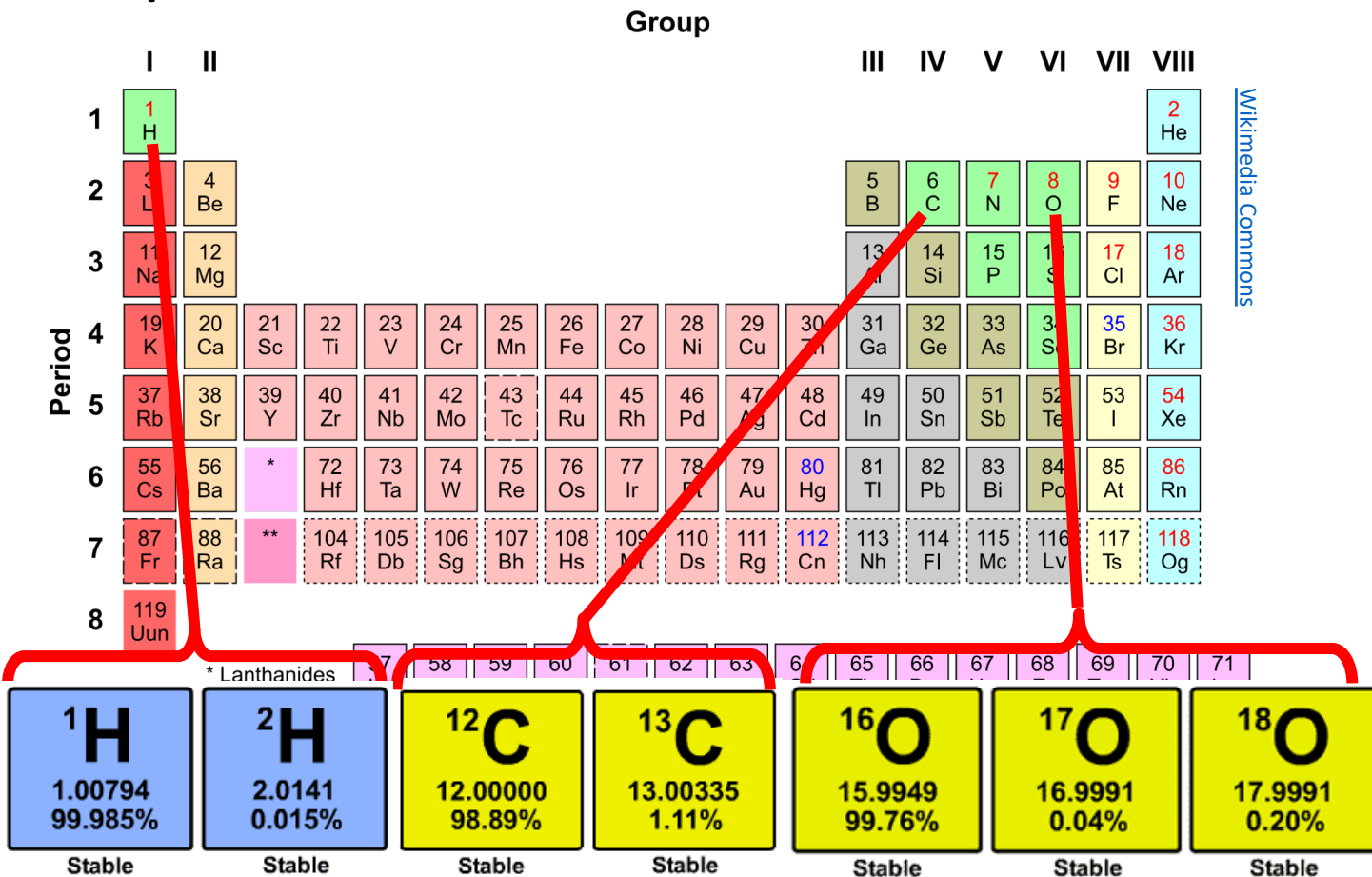


[Tessa Koumoundouros](#)

Isotoper spiller en stor rolle i udforskningen af verden, idet forskellige isotoper har forskellige levetider (hvis de er radioaktive). De fungerer som en slags markør for alder. Et godt eksempel er kulstof-14, som er den isotop af kulstof, der er radioaktiv og henfalder over tid (halveringstiden er 5700 år). Dette giver muligheden for at datere ting, som tidligere har været levende (mennesker, dyr, træ, etc.), idet de pga. henfald har mindre kulstof-14 i sig, desto ældre de er.

Oftentimes er det ikke os mennesker, der laver de forskellige isotoper (og dermed markerer disse atomer), men naturlige processer, som vi dermed kan få indsigt i. Faktisk er især datering, men også mange andre opdagelser gjort ved at betragte fordelingen af isotoper. Isotoper spiller ikke nogen stor rolle i kemi, idet forskellige isotoper af det samme grundstof stort set har samme kemiske egenskaber.

Isotop-andele



For liv på jorden er det særligt isotoperne af hydrogen (H), carbon (C) og oxygen (O), som har den største betydning. Det er desuden nogle af de markører man kan lede efter for at finde tegn på liv i undergrunden.

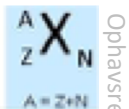
Procentsatserne angiver forekomsten af hvert isotop for det givne grundstof.

Et kort over isotoper

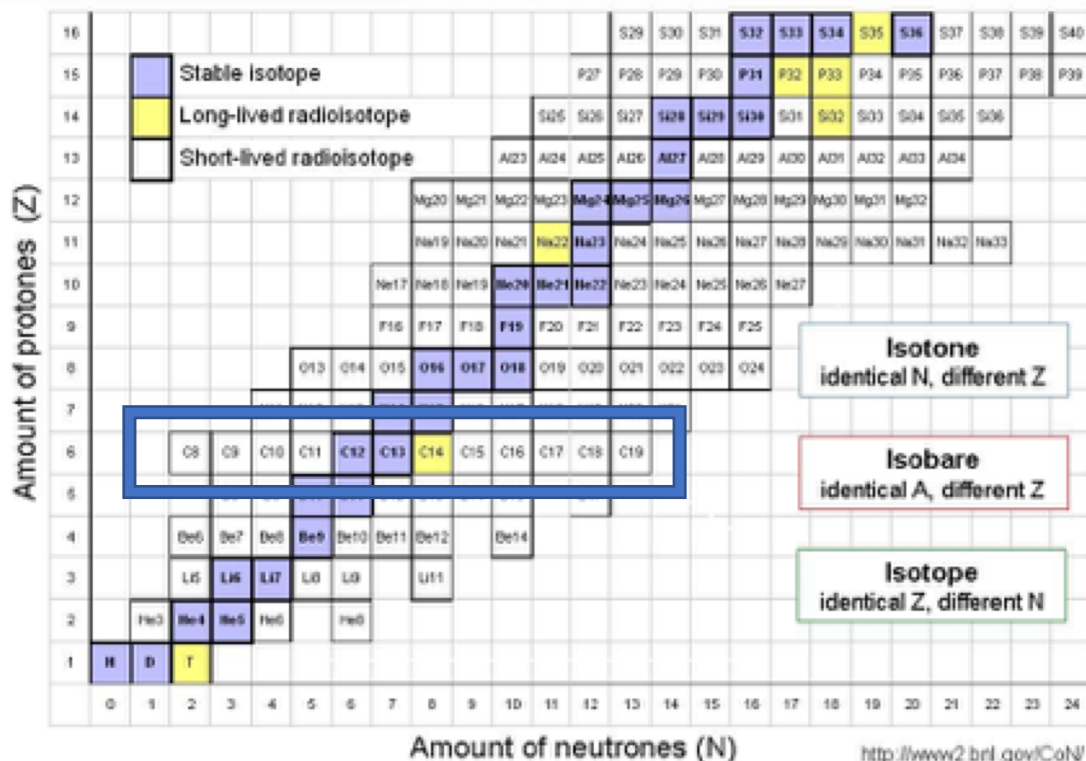
...og deres radioaktive henfald



Isotopes



- Den blå kasse viser alle de forskellige isotoper af carbon, C
- ^{12}C og ^{13}C (kulstof-12 og -13) er stabile
- ^{14}C (kulstof-14) er ikke stabilt, men henfalder med en halveringstid på omkring 5700 år.
- Derudover er der en del kortlevede isotoper (de hvide).



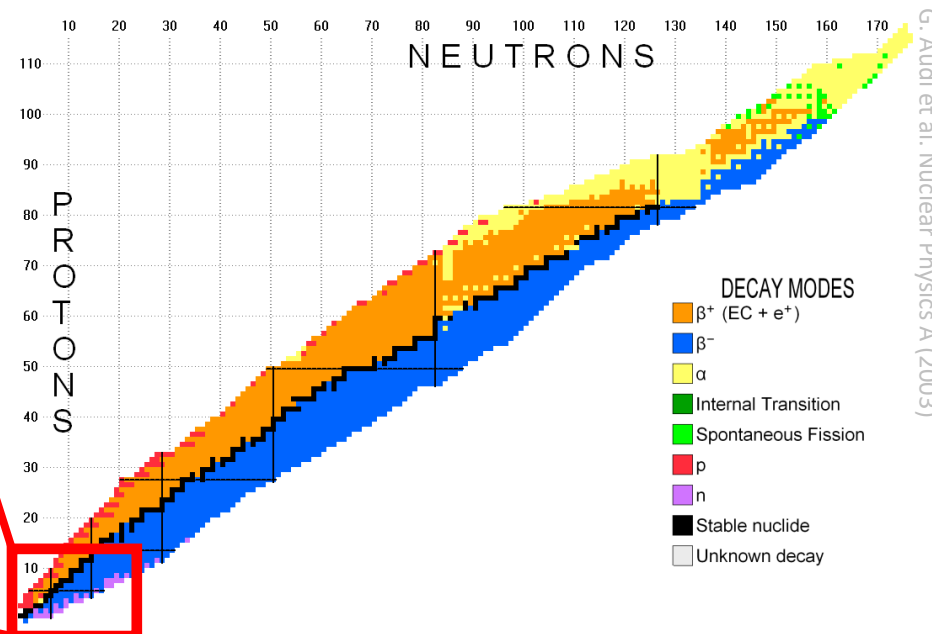
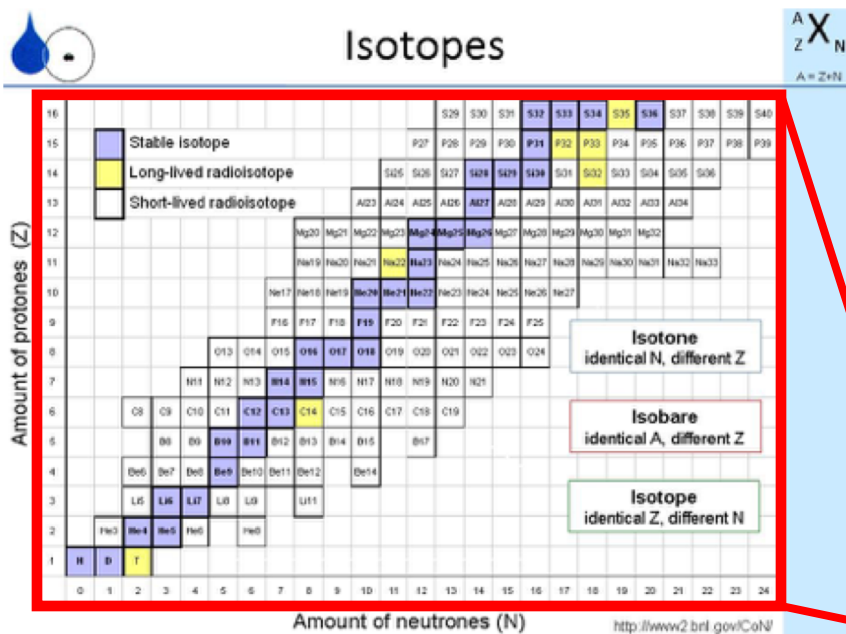
Det viste isotopkort er kun en lille del af det samlede kort, som vises på næste side. På de forgangne sider så vi også, hvad den relative forekomst af de forskellige kulstof-isotoper er, som absolut ikke er ligeligt fordelt (ca. 99% er ^{12}C og ca. 1% er ^{13}C).

De grå isotoper på kortet ovenfor er stabile og viser stabilitetslinien eller rettere stabilitetsdalen (Eng: "Valley of stability"). Dette udtryk illustrerer de ustabile isotoper liggende op ad en bjergkrænt, fra hvilke de "ruller ned i dalen" når de henfalder til stabile isotoper.

Et kort over isotoper

...og deres radioaktive henfald

Det første isotopkort var kun en lille andel af det fulde kort over isotoper, vist til højre:

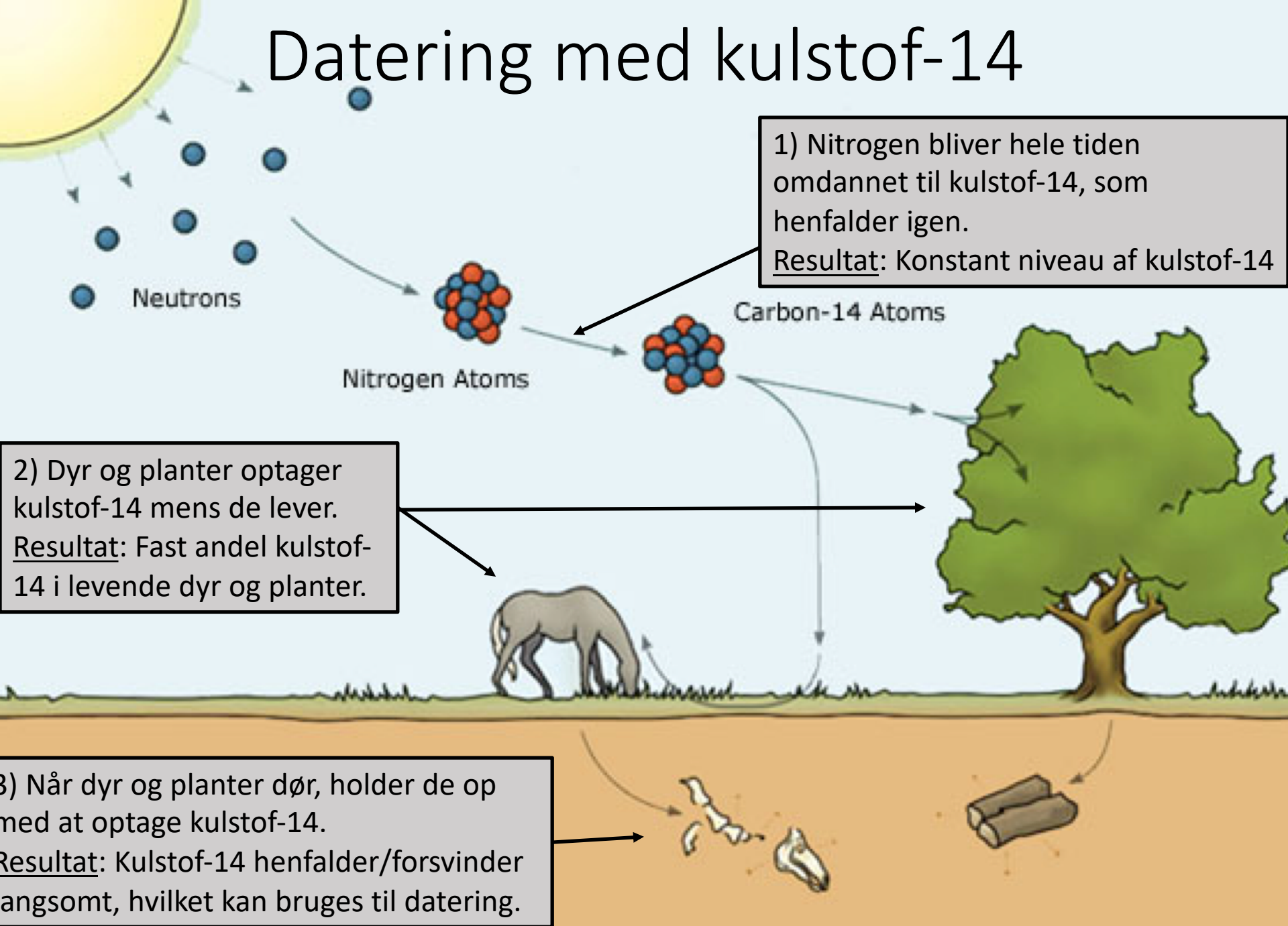


Det fulde kort viser stabilitetsdalen i sort, samt de forskellige typer henfald, som isotoper udenfor dalen har.

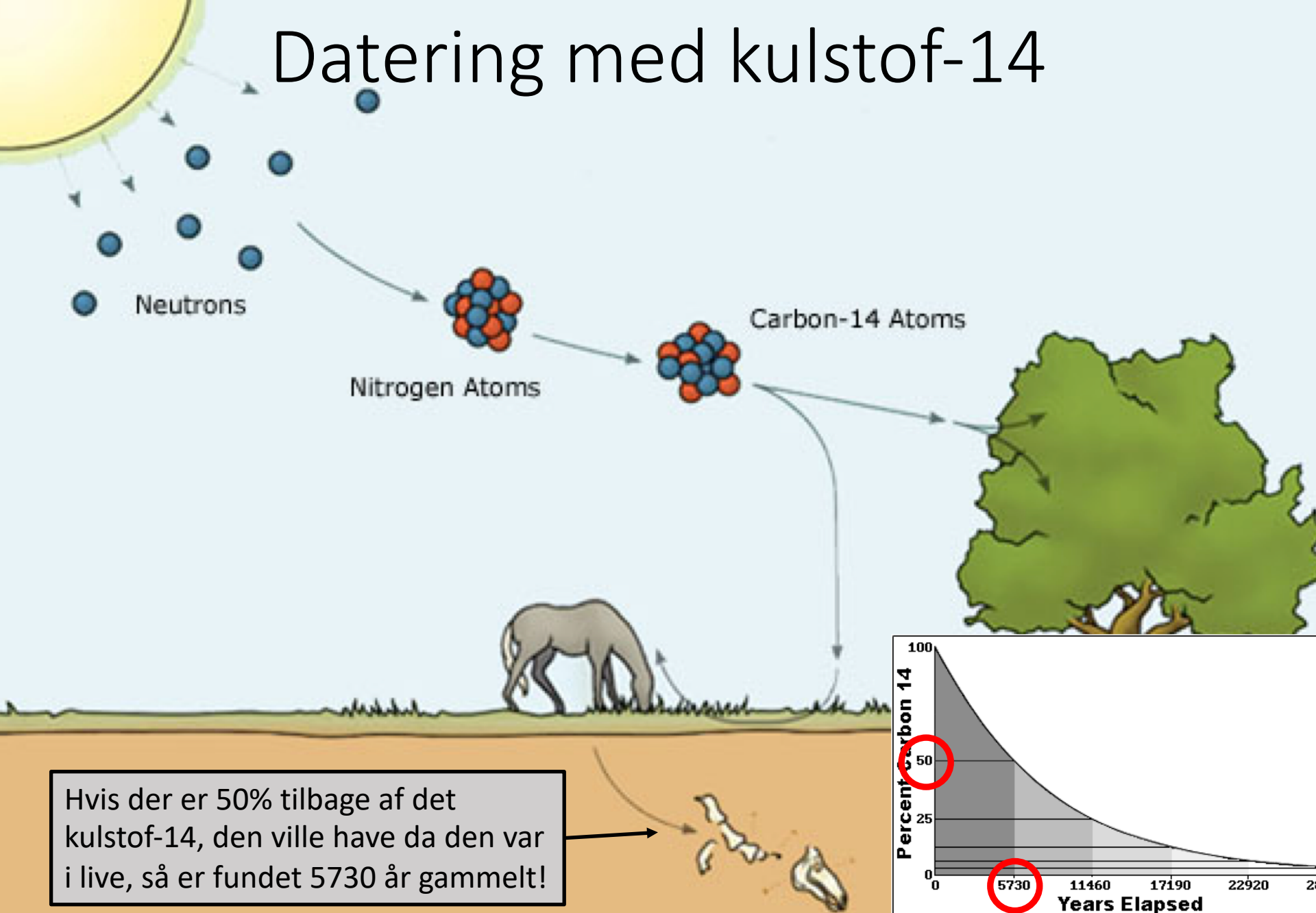
Det fulde isotopkort er stort og viser tydeligt stabilitetsdalen (mørk lilla). Hvis man har flere neutroner end de stabile atomkerner (blåt), så henfalder isotopen ved at omdanne en neutron til en proton i et betahenfald (udsendelse af en elektron). Hvis man har "for mange" protoner (orange), så omdannes en af disse til en neutron og man udsender en anti-elektron! Hvis man har for mange protoner og neutroner i alt (gult område), så henfalder atomkernen med alpha-henfald, dvs. der udsendes en alpha-partikel, så isotopen kommer af med to protoner og to neutroner.

Grunden til, at disse henfald sker er, at det er energimæssigt favorabelt, der er energi i overskud, før atomkernen bliver stabil.

Datering med kulstof-14



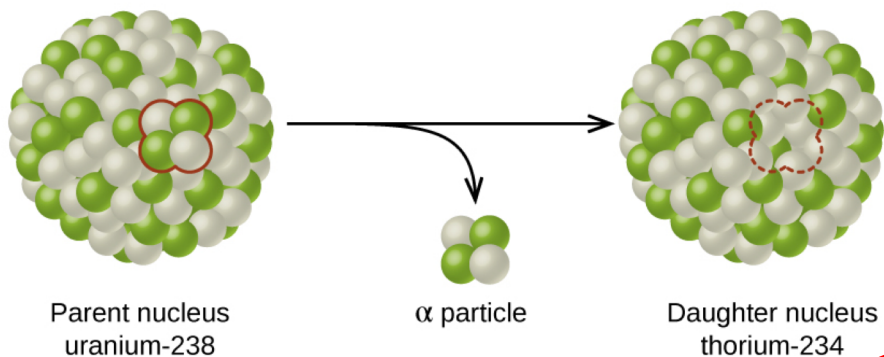
Datering med kulstof-14



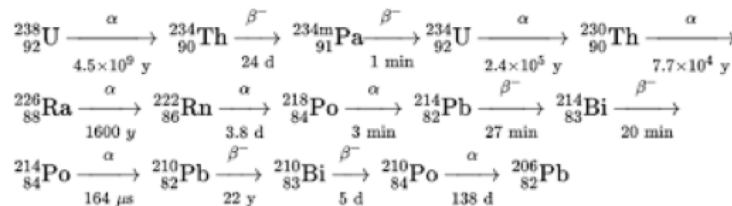
Hvis der er 50% tilbage af det kulstof-14, den ville have da den var i live, så er fundet 5730 år gammelt!

Uran238s henfaldskæde

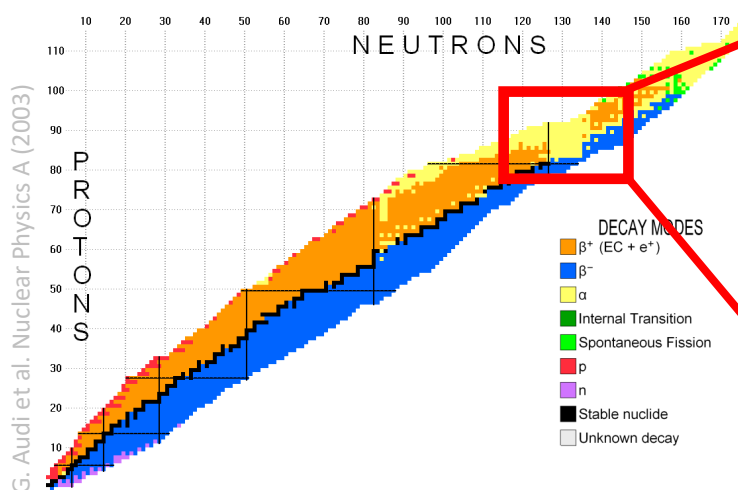
Uran-238 henfalder ved alpha-henfald til thorium-234 med en halveringstid på 4,5 milliarder år, og derfra videre gennem en lang henfaldskæde til bly-206 (^{206}Pb), hvilket er vist nedenfor.



Rice University



Nuclear-power.net



G. Audi et al. Nuclear Physics A (2003)

Uranium Series															
parent nuclide	decay mode	half-life	daughter nuclide												
238U	α	4.47E9 a	234Th												
234Th	β^-	24.10 d	234mPa												
234mPa	β^-	1.159 min	234U												
234U	α	2.45E5 a	230Th												
230Th	α	7.54E4 a	226Ra												
226Ra	α	1600 a	222Rn												
222Rn	α	3.82 d	218Po												
218Po	α	3.1 min	214Pb												
214Pb	β^-	26.8 min	214Bi												
214Bi	β^-	19.9 min	214Po												
214Po	α	164 μs	210Pb												
210Pb	β^-	22.20 a	210Bi												
210Bi	β^-	5.012 d	210Po												
210Po	α	138.4 d	206Pb												
206Pb	stable														

Uran-238 er den isotop af uran, som har 238 protoner og neutroner i alt, hvoraf 92 er protoner, da uran er grundstof nummer 92. Den er ustabil, men har en levetid på omkring 4.5 milliarder år!

Henfaldskæden slutter med bly-206. Ved at måle mængden af uran-238 og bly-206 (og ved at antage, at man ved hvor meget bly-206 der var fra starten) kan man derfor datere ting, som er milliarder år gamle, såsom Jordens ældste sten.

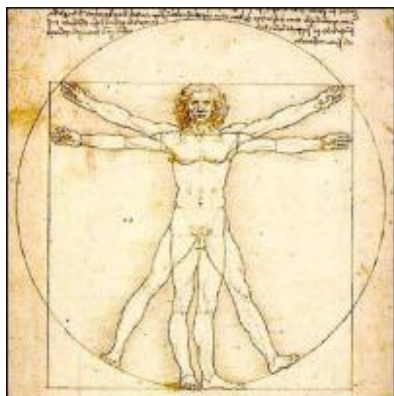
Datering ved hjælp af Uran-238



Her er vist en sten ("Acasta Gneiss" fra det nordlige Canada), som er fra starten af Jordens eksistens, og som er dateret ved hjælp af uran-238 og bly-206! Den er omkring 4.0 milliarder år gammel, hvilket vil sige at den har omkring halvdelen af sin oprindelige uran-238 i sig.

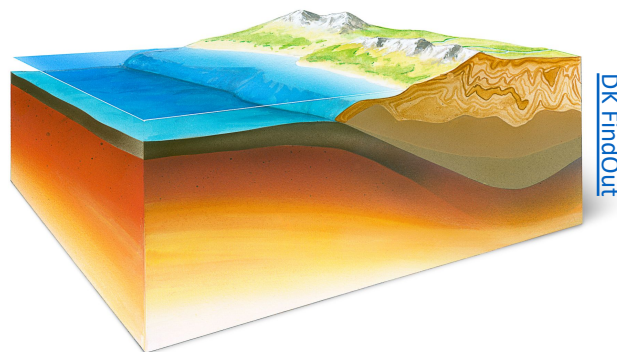
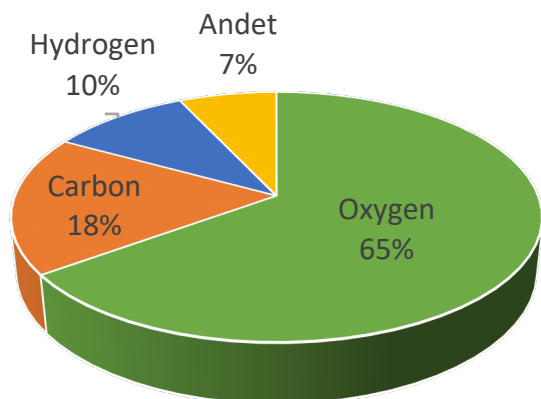
Stenen er meget sjælden idet stort set alt Jordens materiale har været eroderet væk (slidt ned af vind, vand og vejr) og/eller er smeltet i Jordens indre og ført tilbage. Krateret fra den meteor, der for 66 millioner år siden resulterede i dinosaurernes uddøen, var 180 km i diameter, men er i dag helt væk, og kun geologer kan med borer se, at der har været et krater. (Og det sket 'for nyligt', i den sidste 1.5% af Jordens historie).

Fordelingen af grundstoffer



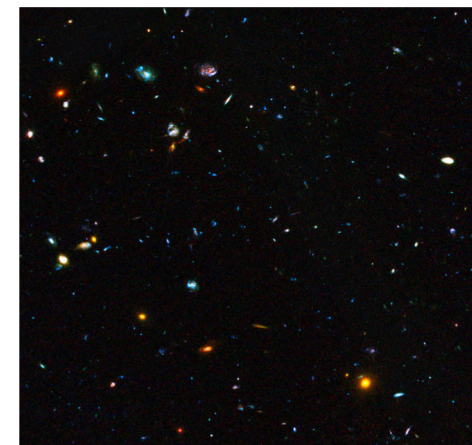
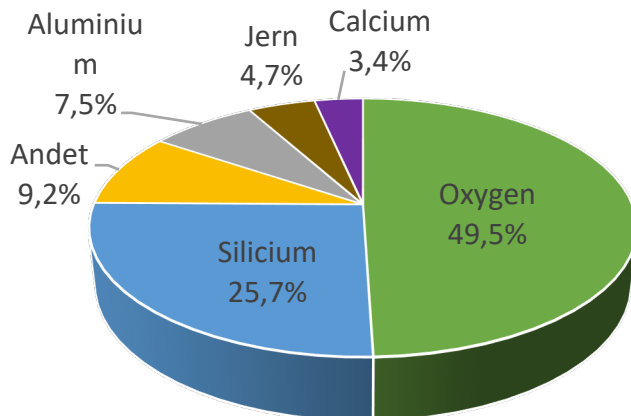
Wikimedia Commons

Menneskekroppen



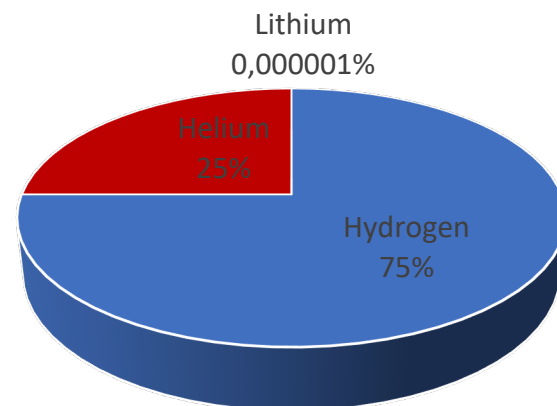
DK FindOut

Jordens skal



Hubble/ESA

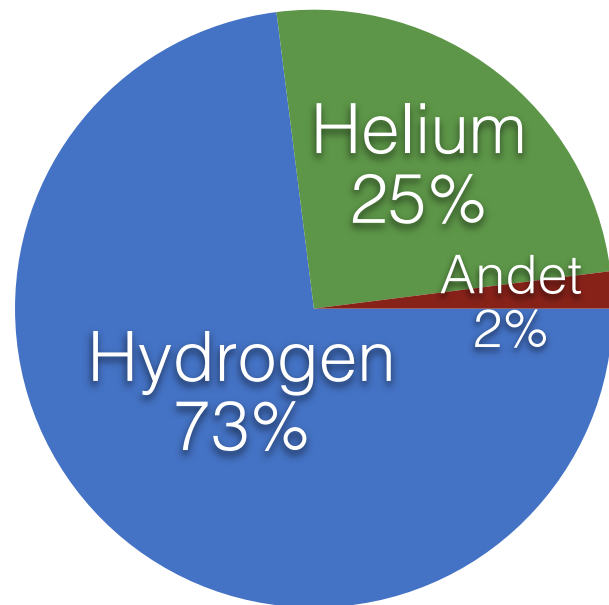
Tidlige stjerner



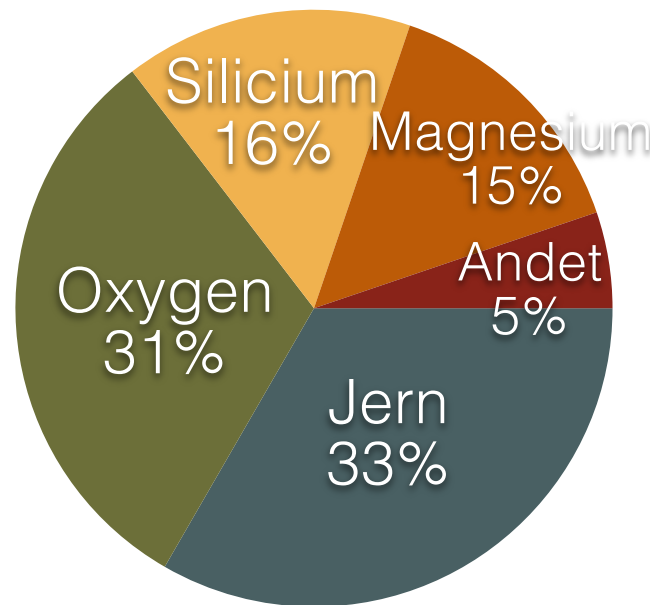
Det, at vi og jordens skal er så forskellige fra universets oprindelige sammensætning, er en effekt af kerneprocesser i store stjerner, solsystemets dannelse og livets mekanismer

Fordelingen af grundstoffer

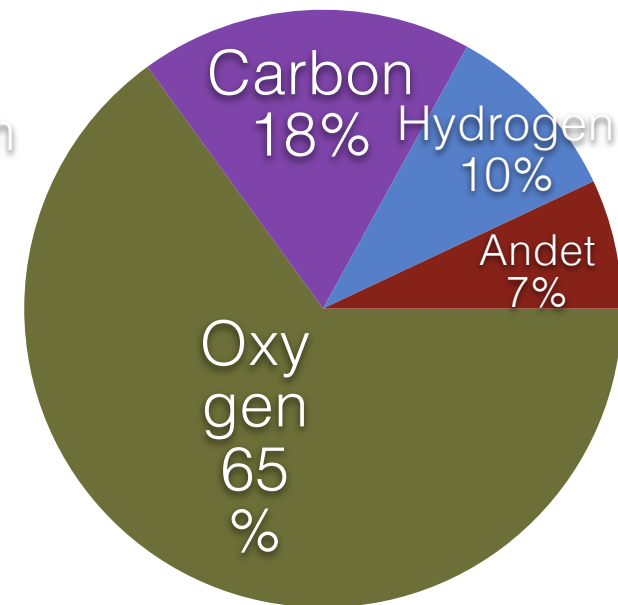
Universet



Jorden



Mennesker



Det, at vi og jordens skal er så forskellige fra universets oprindelige sammensætning, er en effekt af kerneprocesser i store stjerner, solsystemets dannelse og livets mekanismer.

Arbejdsspørgsmål - 1

- Kendsgerning: Der er 118 grundstoffer i naturen med op mod 300 isotoper.
- Spørgsmål:
 - Hvordan finder vi dem?
 - Hvor finder vi dem?
 - Hvad finder vi?
 - (Avanceret) Hvorfor er der ikke mere end 118 grundstoffer? Kan man ikke bare blive ved med at putte protoner ind i kernen?

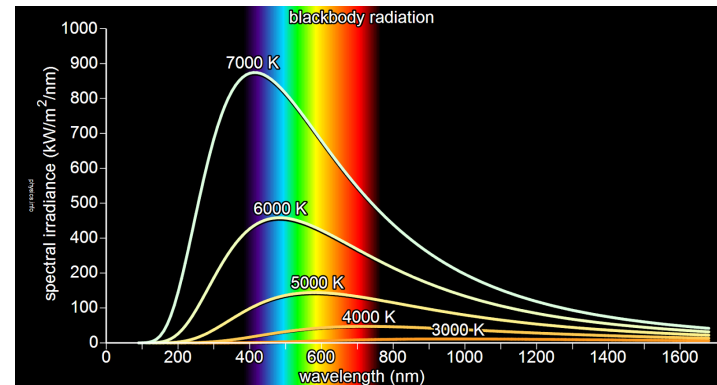
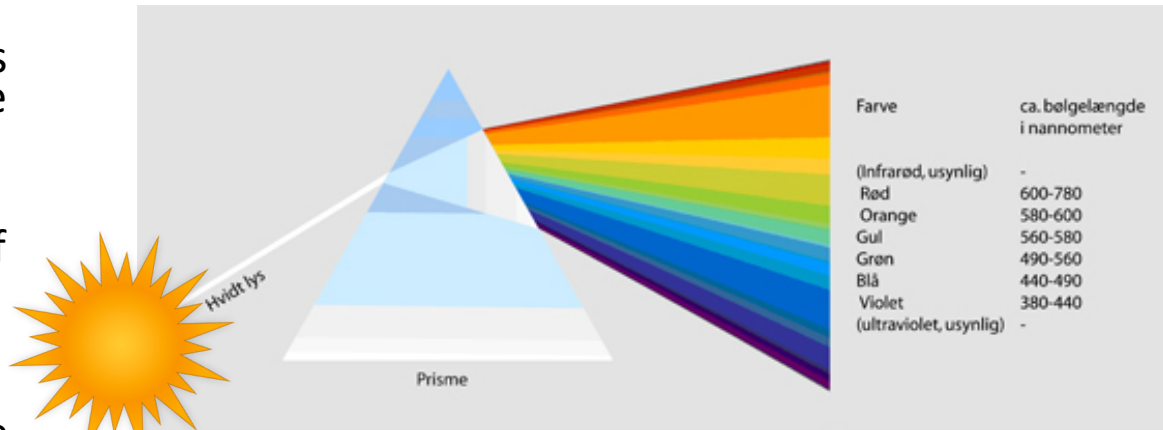
Vi kender det periodiske system, hvor grundstofferne er sat i system. Men hvordan kan det være, at grundstofferne findes, og hvorfor findes netop de udgaver, vi ser.

Først skal vi dække, hvordan vi ved, hvilke grundstoffer der findes, og hvordan vi ved, hvilket forhold de findes i.

Grunden til, at der ikke er uendeligt mange forskellige grundstoffer er, at ved store atomkerner kan den stærke kernekraft, som holder sammen på kernen og har en meget kort rækkevidde (hvad der svarer til en afstand på ca. 1-2 protoner/neutroners), ikke "vinde" over den elektromagnetiske kraft, som rækker længere. Man kan også se på isotopkortet, at når man når langt ud, så er der ikke flere stabile atomkerner tilbage!

Lysets spektrum og grundstoffernes fingeraftryk 1

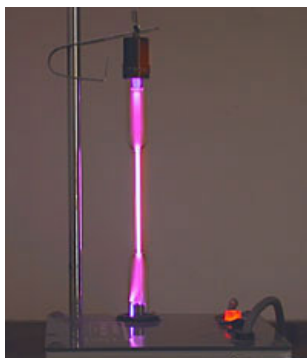
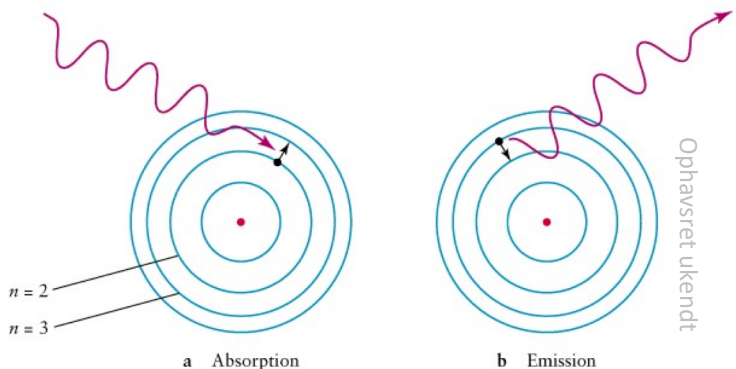
- Newton opdagede at sollys (hvidt lys) bestod af mange forskellige farver
- Dette ved vi nu er forskellige bølgelængder af elektromagnetisk stråling
- Sollys kan brydes op i dets kombination af bølgelængder ved at sende det gennem en prisme
- Varme objekter udsender lys i et kontinuert spektrum som afhænger af overfladetemperaturen



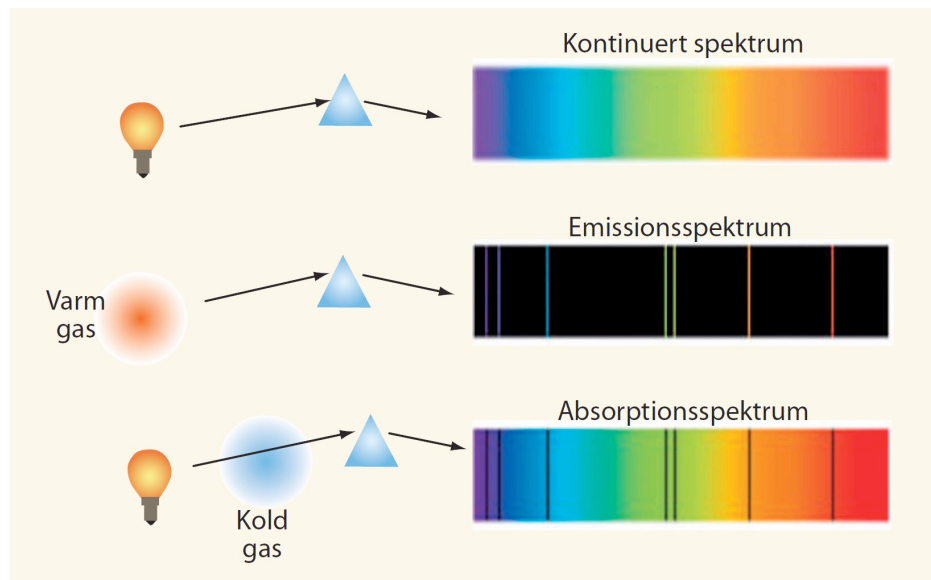
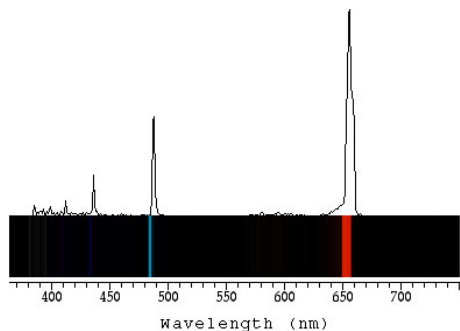
Det lys varme objekter udsender kaldes sortlegemestråling (black-body radiation). Et eksempel på sådan et objekt er solen eller en glødepære. Spektret er effektivt set kontinuert, da de mulige kvantiserede energiniveauer ligger uendelig tæt (til forskel for energiniveauerne i et enkelt atom – se næste slide).

Er kilden kold, vil det lyse med relativt mindre UV- og blå lys, og relativt mere rødt lys og infrarødt end en varmere kilde. (Her er naturligvis plads til en længere fortælling om bølgelængder fra radiobølger ved lange bølgelængder over synligt lys til røntgen og gammastråling ved meget korte bølgelængder). Mere materiale i ["kvantekassen"](#) og [video om Balmer-serien](#).

Lysets bestanddele og grundstoffernes fingeraftryk 2



Emilio Falco, CFA

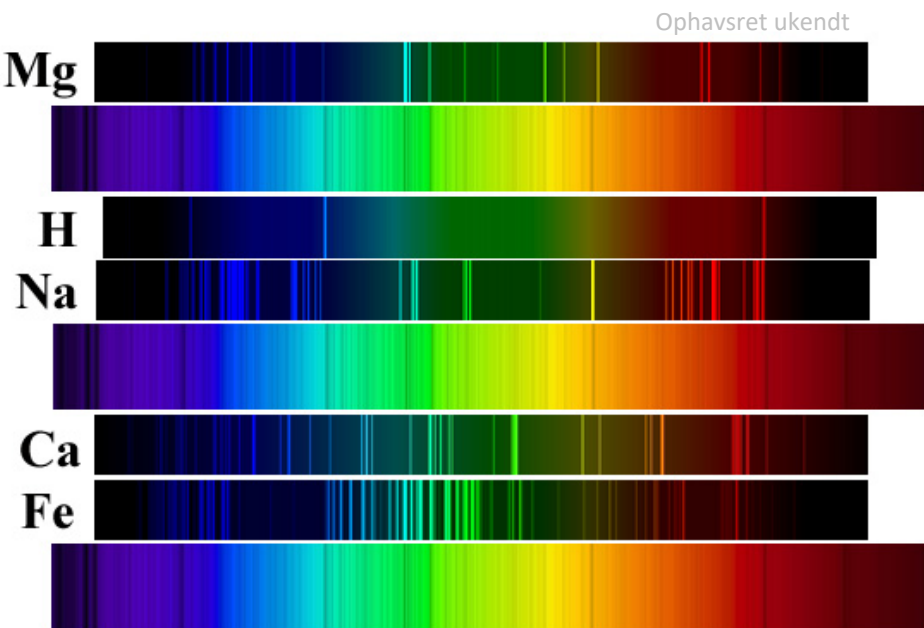


Ophavsret ukendt

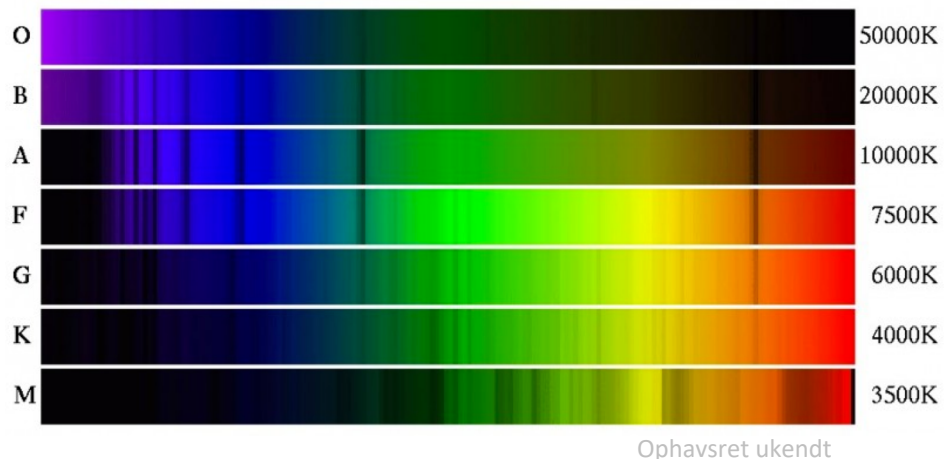
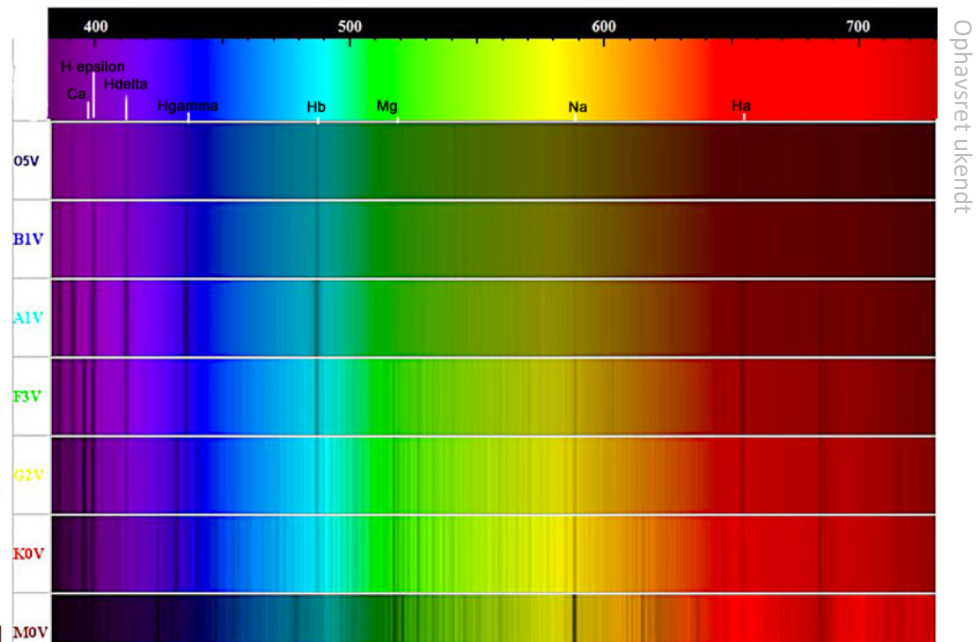
Atomer kan absorbere og emitte fotoner, hvis fotonernes energi svarer til energiforskellen mellem to baner (orbitaler) omkring atomkernen. Dette sker eksempelvis i skyer af gas i rummet samt i sparepærer og speciallamper. Det er derfor, man eksempelvis kun ser enkelte bølgelængder blive udsendt fra en hydrogenlampe, som lyser ved at excitere hydrogen (hvor elektroner bliver "slået op" i højere orbitaler) ved hjælp af en stærk strøm. Man kan vise de atomare overgange i en bestemt gas (som f.eks. hydrogen) ved at indtegne linjer svarende til bølgelængderne fra overgangene i hvad der kaldes et emissionsspektrum (eller linjespektrum), som der ses flere eksempler på ovenfor. I fysikemi-lokalet kan man også brænde sprit af for at se nogle fine emissionslinjer.

Det betyder også, at hvis varmestråling sendes igennem en sky af hydrogen (eller et andet grundstof), vil den del af lyset med bølgelængder svarende til hydrogens emissionsspektrum blive absorberet og udsendt i alle retninger, hvormed den del af lyset vil blive fjernet. Det resulterende absorptionsspektrum fortæller altså det samme som emissionsspektret, men omvendt. (se billeder ovenfor)

Eksempler



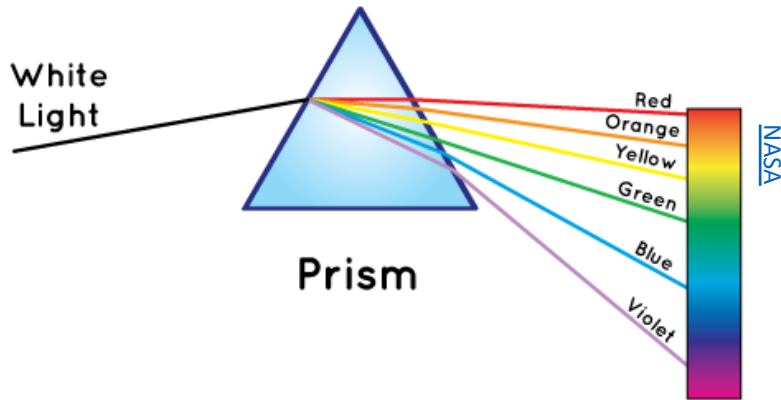
Eksempel på absorptionsspektrum, med emissionsspektre fra forskellige grundstoffer til sammenligning.



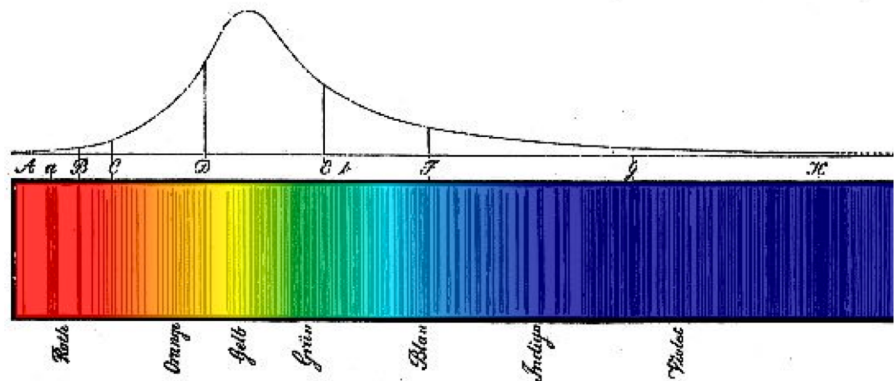
Ved at kigge på emissions- eller absorptionsspektre kan vi altså bestemme hvilke grundstoffer, der er til stede, når vi ikke har mulighed for at kigge på andet end lyset derfra, hvilket oftest er tilfældet, når vi undersøger ting i rummet. Det skyldes, at hvert grundstof har forskellige orbitaler, og spektrene derfor fungerer som et slags fingeraftryk for dets specifikke grundstof.

Til højre: Spektrum fra stjerner af forskellig størrelsesorden (se mere under 'Stjerner, Galakser & Planeter'), med typiske temperature for de forskellige størrelsesklasser angivet på nederste figur. De refereres faktisk til som spektralklasser, netop fordi deres spektre er forskellige – angiver forskellig kemisk sammensætning – hvilket eksemplet øverst til højre viser rigtig flot. Derudover illustrerer spektret nederst til højre fint pointen om sort-legeme stråling: Jo relativt koldere objekt (her stjerne) jo relativt mere rød ser den ud.

Fraunhofer-linjerne

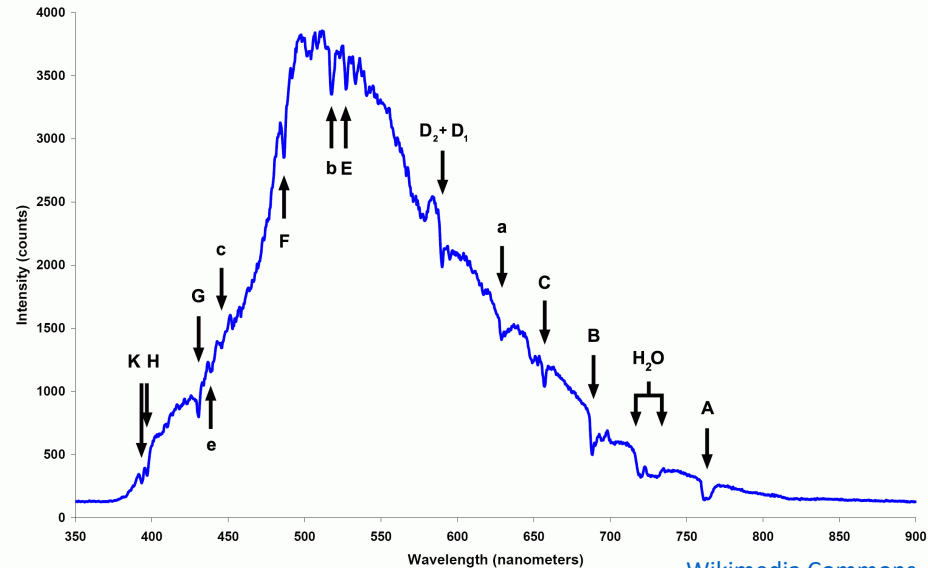


Ophavsret ukendt



Ophavsret ukendt

Zu Fraunhofer's Abh. Denkschr. 1814-15.



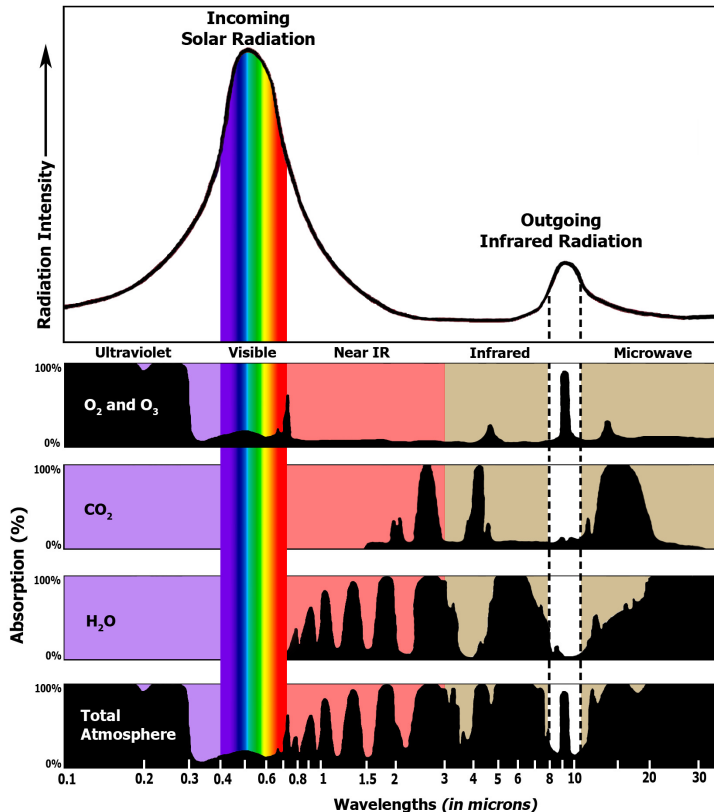
[Wikimedia Commons](#)

W. Wollaston havde i 1805 opdaget mørke linjer i solens spektrum, men Joseph von Fraunhofer (1787-1826) var den første, som observerede og beskrev absorptionslinjer i lyset fra solen i detaljer. Særligt kobledede han en af absorptionslinjerne sammen med den emissionslinje han også så, når han brændte NaCl (salt) af i en ren flamme.

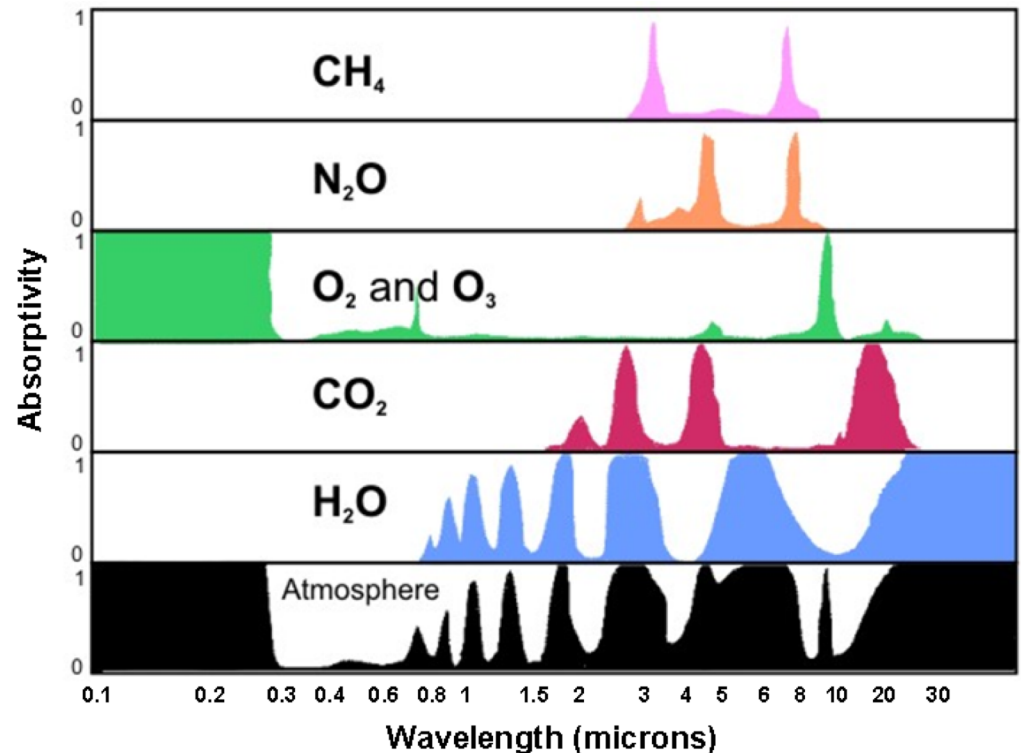
Disse absorptionslinjer skyldes hovedsageligt absorption af grundstofferne i solens atmosfære, hvor de tilstedeværende gasser er relativt koldere end gasserne tættere på solens midte, men der er også enkelte absorptionslinjer fra oxygen fra Jordens atmosfære.

Spektret og absorptionslinjer kan undersøges i fysiklokalet ved brug af prismer eller diffraktionsgitter (som giver samme information, dog ved et andet fysikfænomen).

Hvad kommer der igennem atmosfæren?



Ophavsret ukendt



Ophavsret ukendt

En interessant observation i forbindelse med at atmosfæren stort set ikke absorberer synligt lys. På figurene fremgår det, at det er bølgelængderne svarende til synligt lys, der hovedsageligt kommer gennem atmosfæren. Det er nok derfor, at mennesker og mange dyr hovedsageligt har udviklet sig til at se synligt lys og ikke eksempelvis røntgenstråling, da dette bliver absorberet, inden det når til Jordens overflade.

Man kan også se på figuren til venstre, at vi ikke kun får lys fra solen, men også ekstra varmestråling (i forhold til hvad solen producerer), hvilket skyldes, at drivhusgasserne i atmosfæren (særligt oxygen-molekylerne) absorberer varmestråling fra Jordens overflade og sender det tilbage til Jorden.

Disse overvejelser er relevante i forhold til at forstå fotosyntese, der også har et interessant absorptionspektrum (se mere i materialet om 'Fotosyntese').

Grundstoffer i stjernerne

ASTROPHYSICAL DATA BEARING ON THE RELATIVE ABUNDANCE OF THE ELEMENTS

BY CECILIA H. PAYNE

HARVARD COLLEGE OBSERVATORY

Communicated February 5, 1925

1. The physical interpretation of stellar spectra has recently yielded interesting results under the combined attack of thermodynamics and spectrum theory. The extension, by Fowler and Milne,¹ of Saha's original application² of the laws of thermal ionization, has been subjected by Menzel³ and by the writer⁴ to an extensive observational test. The agreement with observation is in general satisfactory, and the deviations are such as to suggest the necessity of improving an essentially valid theory by a second approximation.⁵



Ophavsret ukendt

AT. NO.	/ATOM	RELATIVE STELLAR ABUNDANCE	TERRESTRIAL ABUNDANCE (EARTH'S CRUST)
14	Si	5.7	16.2
11	Na	5.7	2.02
12	Mg	4.2	0.42
13	Al	3.6	4.95
6	C	3.6	0.21
20	Ca	2.9	1.50
26	Fe	2.5	1.48
30	Zn	0.57	0.0011
22	Ti	0.43	0.241
25	Mn	0.36	0.035
24	Cr	0.29	0.021
19	K	0.11	1.088
23	V	0.05	0.0133
38	Sr	0.002	0.0065
54	Ba	0.0005	0.0098
3	Li	0.0000	0.0829

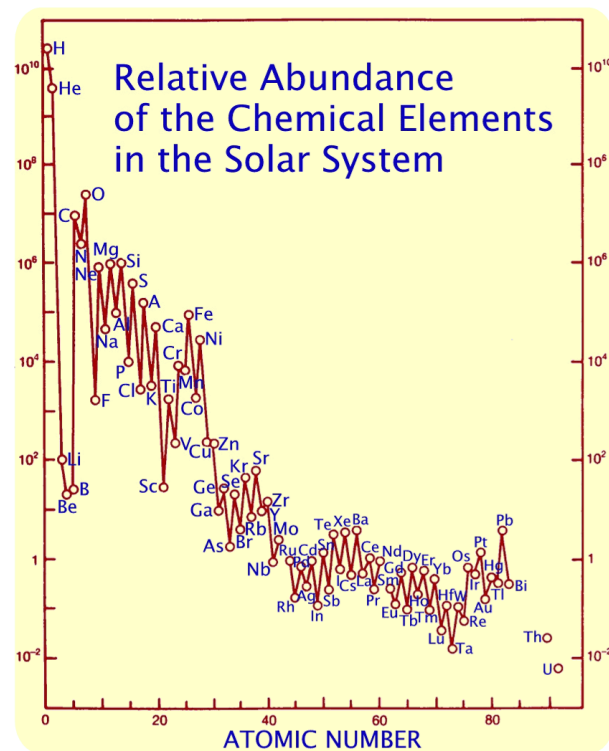
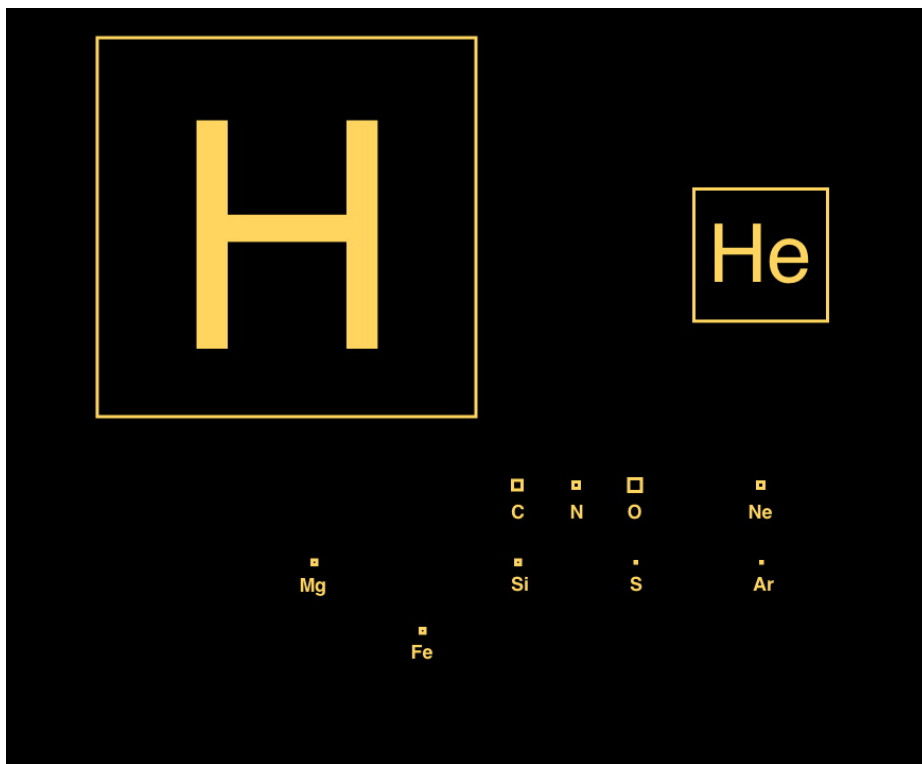
Hydrogen and helium are omitted from the table. The stellar abundance deduced for these elements is improbably high, and is almost certainly not real. Russell and Compton¹⁷ have suggested that the anomalous astrophysical behavior of the Balmer lines may be attributed to metastability, an interpretation which would also explain the great apparent abundance of the element in stellar atmospheres. The abundance of helium has been shown by H. H. Plaskett,¹⁸ in his investigation of class O stars, to be surprisingly great. The cause of the discrepancy is unexplained. Aston¹⁸ and Jeffreys¹⁹ have commented on the terrestrial deficiency of the rare gases.

Ved hjælp af absorptionsspektre fra fjerne stjerner arbejdede Cecilia Payne-Gaposchkin i 1920'erne med at bestemme andelen af grundstoffer i stjernerne.

Hun fandt ud af, at der fandtes eksempelvis silicium og karbon, som vi også har på Jordens overflade, hvilket passede ind i den daværende forestilling om, at de samme grundstoffer fandtes i universet og på Jorden.

Hvad der er endnu mere interessant, er at hun også bemærkede at der var en ekstraordinært stor mængde hydrogen og helium i stjernerne, hvilket var noget hun forestillede sig, var en fejl i målingerne. Men det var helt rigtigt! Det var den første opdagelse af, at universet hovedsageligt består af hydrogen og helium, og den første indikation af den store forskel i sammensætning af grundstoffer i stjerner og på Jorden.

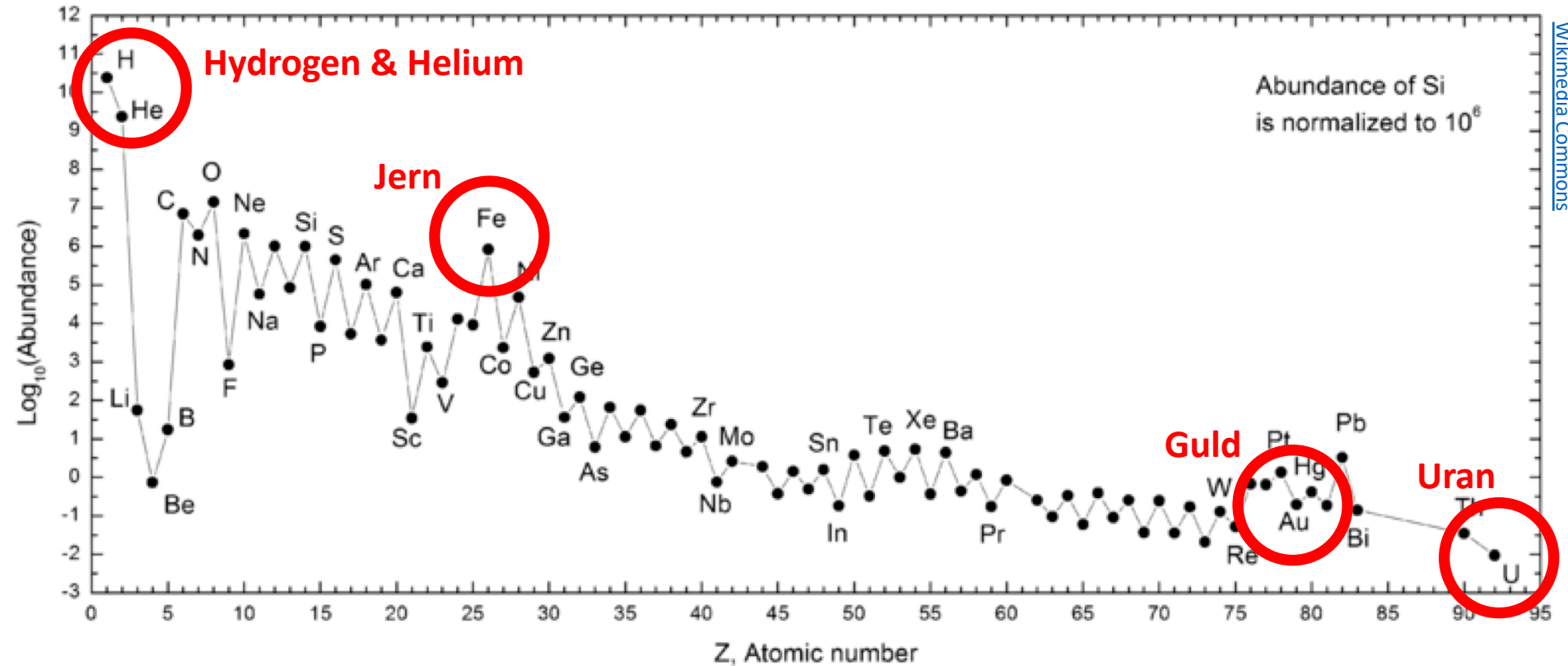
'Korrekt' periodisk system



Til venstre er en illustration, der viser, hvordan det periodiske system skulle se ud, hvis det skulle afspejle fordelingen af grundstofferne i universet. Alle andre grundstoffer end dem indikeret kan samles i en enkelt pixel på figuren. Til højre er et eksempel på en mere komplet beskrivelse af hyppigheden ("abundance" på figuren) af grundstoffer i vores solsystem (bemærk at y-aksen er logaritmisk).

Hyppigheden er angivet som masseandel, dvs. hvor stor del af den samlede masse der er af henholdsvis, H, He, etc. En anden angivelse kunne være den molære hyppighed, altså det relative antal af atomer. Eks. er 89% af al masse i rent vand (H_2O) udgjort af oxygen, men den molære hyppighed er naturligvis kun 1/3. Så i stjerner vil den molære andel af hydrogen blot være endnu mere ekstrem end masseandelen.

Grundstoffernes hyppighed



Ovenfor er angivet grundstoffernes hyppighed i universet, her vist relativt til andelen af silicium (Si). Bemærk den logaritmiske y-akse. Hyppigheden er angivet i forhold til deres massefordeling.

I det følgende materiale skal det beskrives hvordan hydrogen og helium er de mest talrige grundstoffer, jern er det grundstof med den største bindingsenergi, og de tungere grundstoffer (som guld og uran) det eneste universet producerer på samme måde som vi ville producere det.

Arbejdsspørgsmål - 2

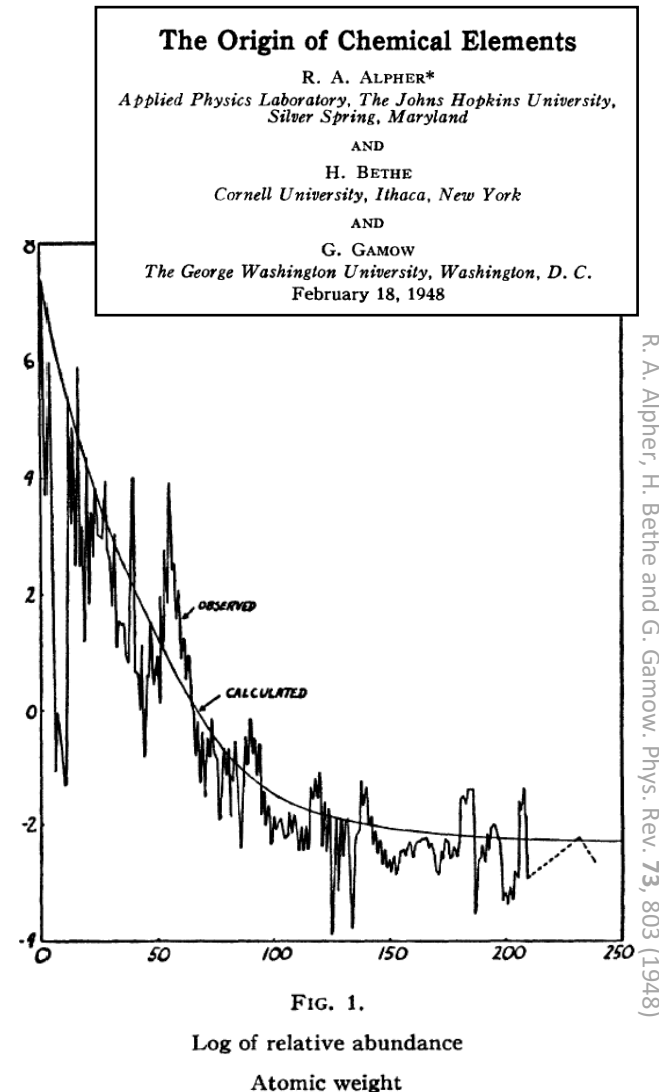
- Kendsgerning: På trods af, at der eksisterer mange forskellige grundstoffer, er hydrogen og helium de langt mest hyppige i universet.
- Spørgsmål:
 - Hvorfor er langt det meste stof i universet H eller He?
 - Hvordan bliver grundstoffer dannet?
 - Hvornår blev de dannet?

Nu har vi fundet ud af, at universet mest består af hydrogen og helium, men ved at se på jorden og mennesket, er det tydeligt de trods alt ikke er de eneste grundstoffer. Hvor blev de andre grundstoffer skabt? Hvordan og hvornår?

Processerne er beskrevet på de næste par slides, men mere information kan også findes i [hæftet om Niels Bohr](#), hvor første artikel af H.B. Nielsen og E. Andersen, samt artiklen af A. Andersen, som netop beskriver dannelsen af grundstoffer.

Big Bang-kernesyntese

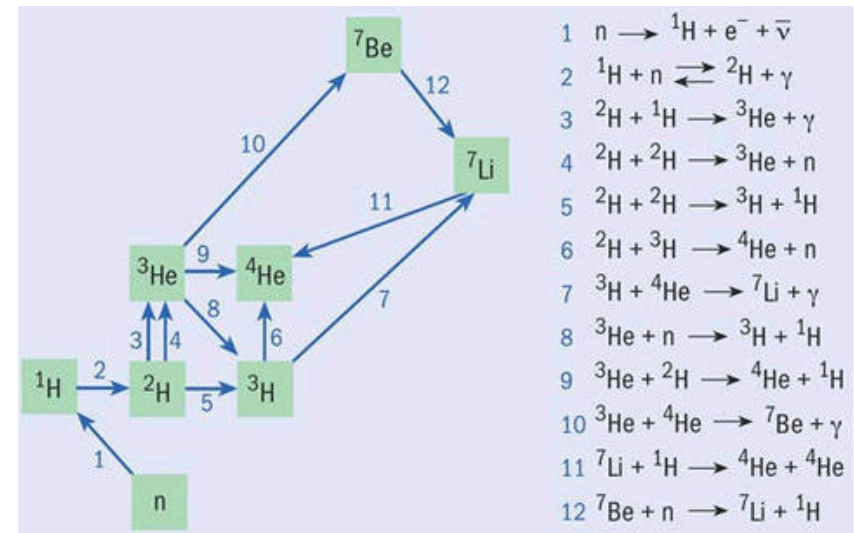
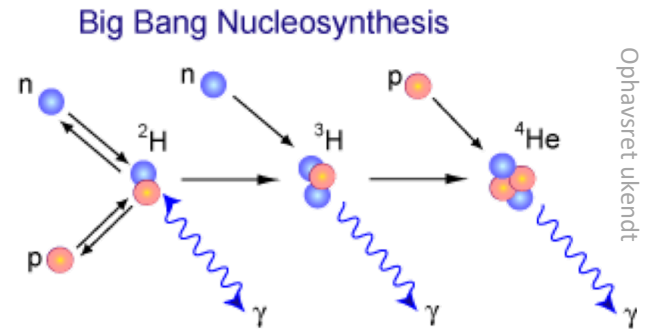
- Alpher-Bethe-Gamow (1948):
"The Origin of Chemical Elements"
- Teori: Alle grundstoffer blev dannet i løbet af fem minutter fra protoner og neutroner til stede i ursuppen fra Big Bang (hvilket de kaldte Ylem)
- Teorien passede umiddelbart til observationerne (figuren til højre stammer fra deres artikel)



Artiklen var skrevet af Gamow og hans Ph.D-studerende, Alpher. Gamow inkluderede Bethe som en joke, for at forfatterrækken skulle passe til det græske alfabet. Bethe deltog dog i diskussionerne efter artiklen udkom, og arbejdede selv efterfølgende videre med kernesyntese med flere relevante resultater.

Big Bang-kernesyntese

- I starten af Big Bang må der være skabt lige mange protoner og neutroner. Men neutroner udenfor en atomkerne henfalder til protoner
- For at omdanne protoner til neutroner skal der bruges en energi på 1,29 MeV = temperatur på 15 mia. K. Når temperaturen falder, vil neutronernes henfald derfor resultere i færre neutroner end protoner
- For at splitte deuterium (en atomkerne med en proton og en neutron) skal der bruges en energi på 2,2 MeV = temperatur på 25,5 mia. K. Da temperaturen falder under dette niveau (hvilket sker ca. to minutter efter Big Bang) kan neutronerne forblive bundet i deuterium. Så alle tilbageblevne neutroner er dem der blev bundet i deuterium
- Forholdet mellem protoner og neutroner er herefter 7:1
- Herefter kan diverse fusionsprocesser forløbe for at producere (hovedsageligt) helium-4 kerner (med et overskud af energi som udsendes som fotoner)



Det øvre billede viser en af de reaktionssekvenser, der producerer helium-4 kerner fra protoner og neutroner. Første skridt er reversibelt, hvis en foton med samme energi interagerer med hydrogen-2.

Nedenunder er to udgaver af samme figur. De beskriver alle de processer, der kan ske, og de ender alle med at producere helium-4. Med reaktanterne angivet i parentes: $p+n \rightarrow {}^2\text{H}+\gamma$ skrives som $p(n,\gamma){}^2\text{H}$. Det fulde reaktionsskema er angivet på nederste udgave.

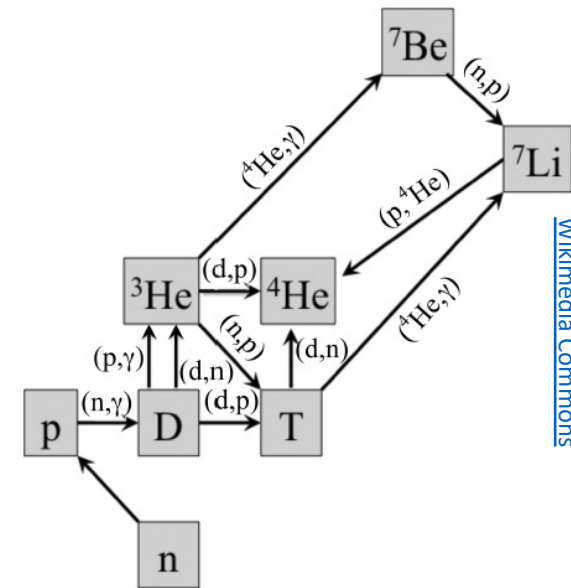
Big Bang-kernesyntese: Udfordring

1. Der er ikke den rette temperatur i langt nok tid

- Lige efter Big Bang er der MEGET varmt i universet, nemlig 100 mia. K, og den resulterende sort-legeme stråling giver ophav til fotoner med samme energi. Men universet udvider sig hurtigt, og dermed falder temperaturen også hurtigt
- Temperaturen bliver lav nok til at mere komplekse kerner end protoner og neutroner ikke bliver slået i stykker, men også for lav til at danne isotoper med massetal over 7. (Massetallet angiver summen af protoner og neutroner)

2. Der er ingen stabile isotoper med et massetal på 5 eller 8.

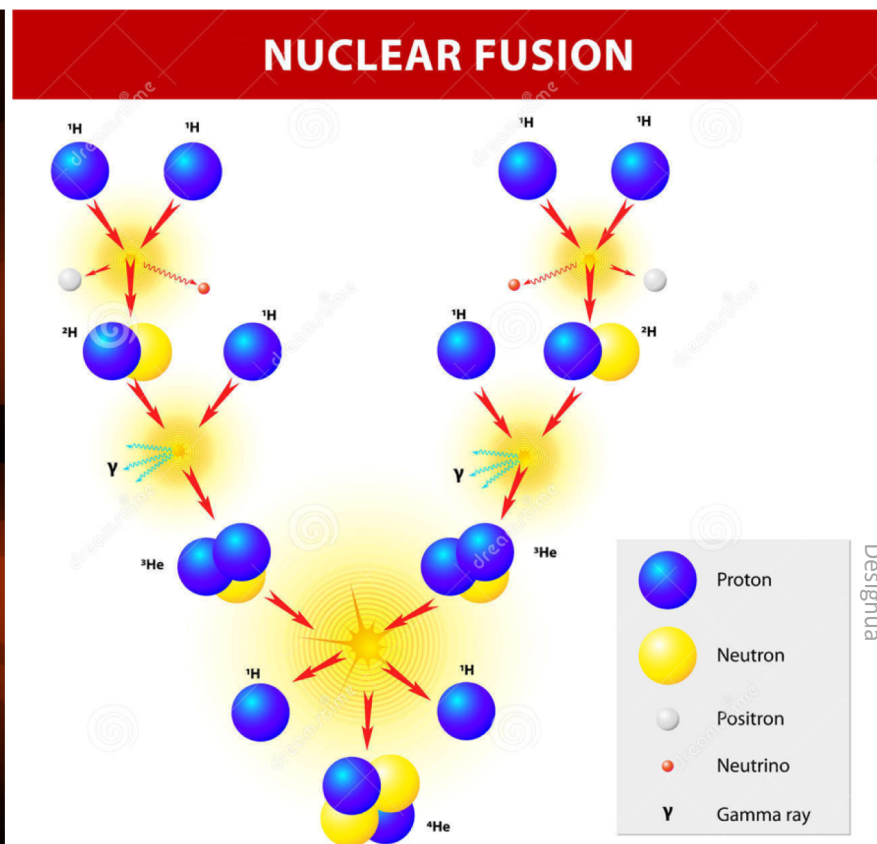
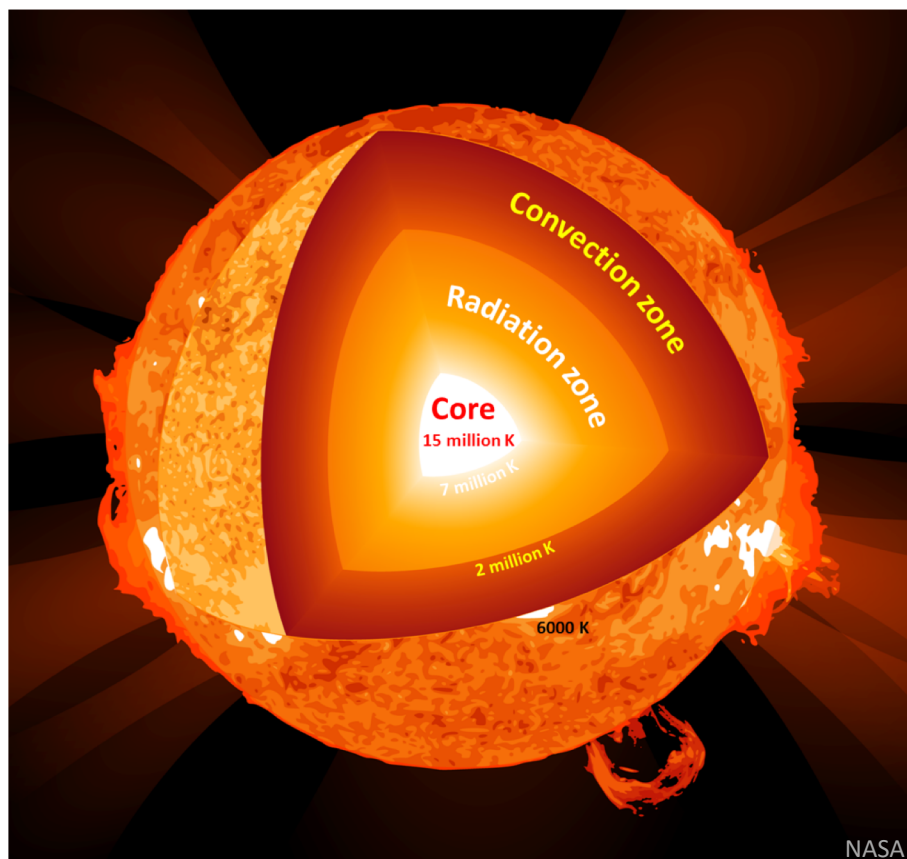
- Da deres teori krævede, at hver ny atomkerne blev skabt ved at indfange én masseenhed ad gangen, så betød hullet ved massetallet 5, at man aldrig ville kunne kreere tungere grundstoffer end helium.
- Konklusion: Der må altså en mekanisme mere til!



Så i varmen efter Big Bang bliver der kun dannet H og He, og givet at forholdet mellem protoner og neutroner er 7:1, kan man hurtigt overbevise sig selv om at det må resultere i en fordeling på ca. 75% Hydrogen og 25% Helium (angivet som masseprocent) i universet efter Big Bang er sket.

Der er en forsvindende lille andel af lithium, men ingen tungere atomer findes i universet i et par hundrede millioner år efter Big Bang. De bliver nemlig først dannet i stjernerne.

Hvorfor/hvordan brænder solen?

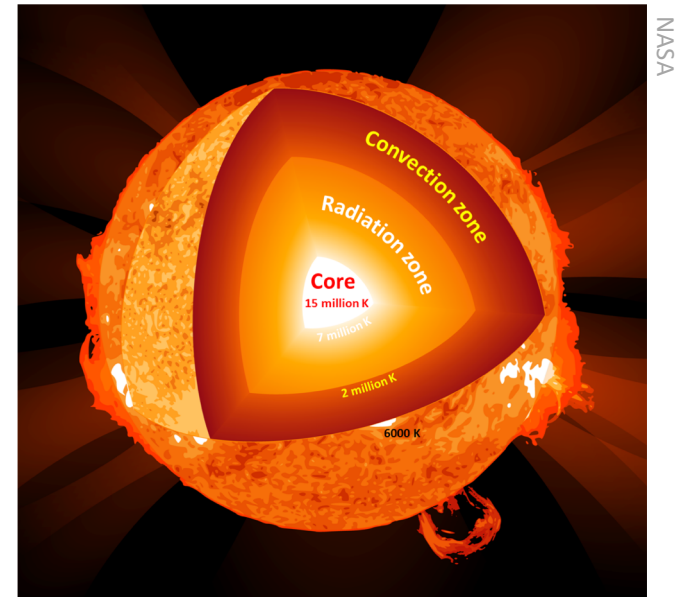


Solen (og andre stjerner) brænder IKKE på samme måde, som ting gør her på jorden, hvor det sker via en kemisk proces, der er afhængig af oxygen. I solen sker det vha. en proces beskrevet i følgende tre trin:

- Brintkerner (dvs. protoner) smelter sammen til Deuterium ("tung" brint, dvs. den isotop af brint, med en neutron i kernen).
- Deuterium smelter videre sammen med en ny proton til Helium-3 (dvs. "let" helium).
- To Helium-3 smelter parvis sammen til Helium-4 (dvs. "normal" helium) og to protoner (som så igen kan deltage i forbrændingen).

Stjerne-kernesyntese

- Burbidge, Burbidge, Fowler and Hoyle (1956): "Synthesis of the Elements in Stars"
- Teori: Stjerner (ligesom solen) er ekstremt varme og har en enorm massetæthed, det giver mulighed for fusionsprocesser
- I solens centrum:
 - Temperatur = ~ 15 mio. grader K (eller celcius, det gør ingen forskel her)
 - Densitet = ~ 150 kg/L (150 gange vand)

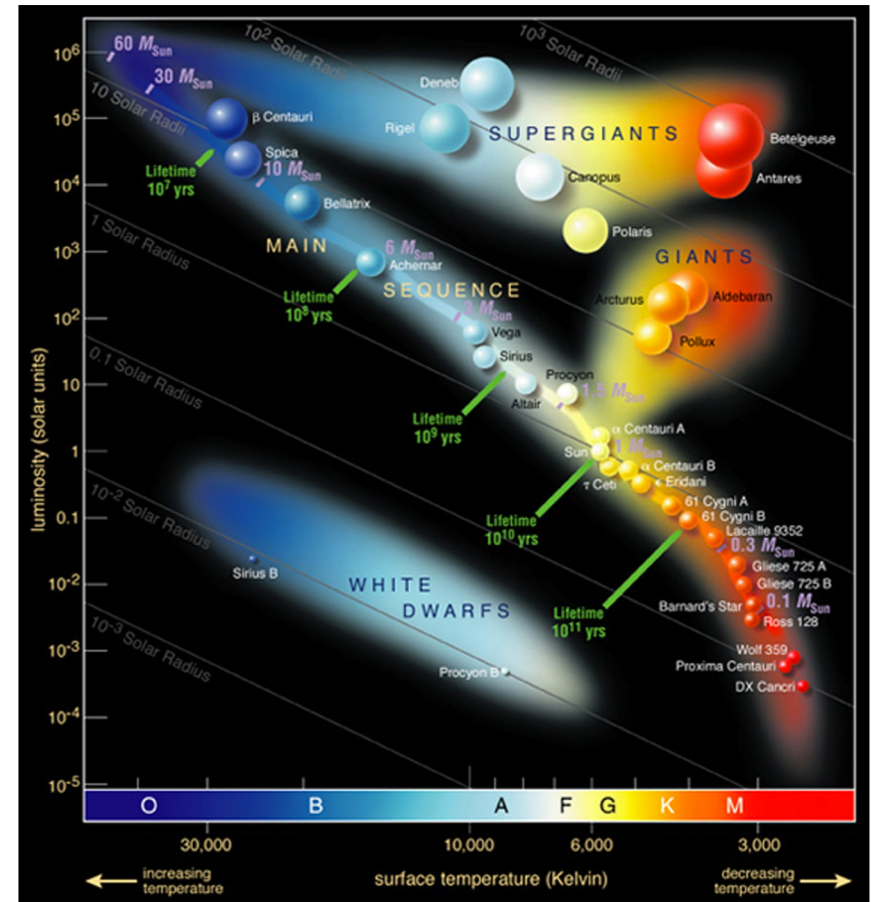


F. Hoyle var en af de store fortalere for steady state-teorien (og ikke Big Bang-teorien) og blev ekspert inden for kernesyntese i stjerner (muligvis fordi han undersøgte om masse kunne opstå i et 'Mini Bang' fra stjerner, hvilket var en nødvendig præmis for steady state-teorien).

Det tungeste grundstof i stjernerne er Osmium med en densitet på ~ 22 kg/L.

Mange forskellige stjerner

- Hvad, der kan dannes i fusionsprocesserne i stjernerne, er afhængigt af stjernernes temperatur og alder, og forskellige stjerner danner derfor forskellige grundstoffer
- Se nærmere under afsnittet om stjerner
- På de følgende slides vil de mest relevante reaktioner til produktion af energi, og dermed lys blive beskrevet

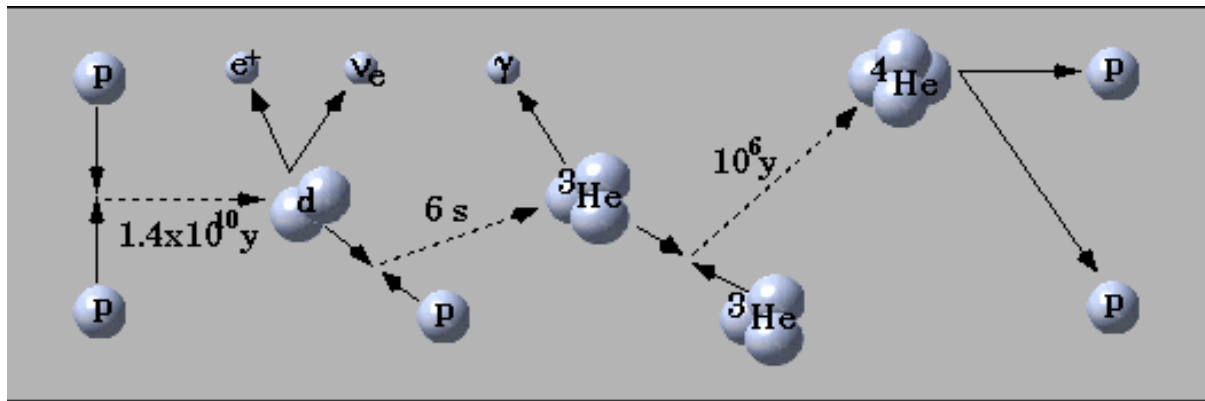


Der findes mange mulige fusionsprocesser, som kan producere mange forskellige grundstoffer på flere forskellige måder.

Mange af disse processer, afhænger af bl.a. temperatur, densitet, og alderen af en given stjerne. Der vil være enkelte kommentarer til at beskrive hvilke forhold der skal være opfyldt for at en given proces kan forløbe.

Forbrænding af hydrogen: PP-kæden

- PP-kæden (Proton-proton): Forbrænder protoner fra hydrogen-kerner og producerer helium-kerner samt energi i form af fotoner = lys
- Da der også produceres protoner, kan processen forløbe som en kædereaktion (heraf navnet PP-kæden)
- På figuren er det noteret hvor længe der typisk går, før en reaktion sker i kernen. Det første skridt tager utrolig lang tid, og illustrerer hvor mange protoner, der må være til stede.
- PP-kæden sker i alle stjerner, men er især dominerende i stjerner på størrelse med solen eller mindre (starter ved temperaturer over 4 mio. Kelvin)

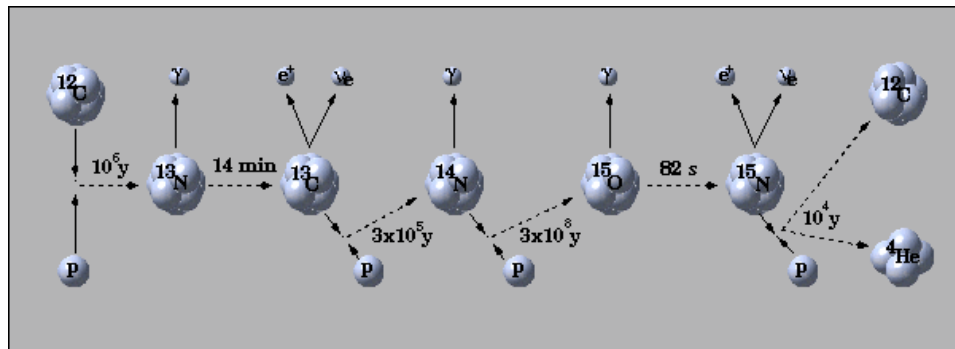


I PP-kæden bliver der produceret helium samt en energi på $26,7 \text{ MeV} = 4,28 \times 10^{-12} \text{ J}$, hvoraf ca. 2% går til neutrinoer, mens resten af energien bliver fotoner dvs. der sker en produktion af lys og i sidste ende varme.

Særligt det første skridt har lille sandsynlighed for at ske, og sker dermed meget sjældent (det er den begrænsende faktor). Men da der er så stort et antal protoner i en stjerne, er der alligevel hele tiden protoner der fusionerer i PP-kæden. Faktisk sker PP-fusionen omkring 10^{37} gange per sekund, hvilket forbruger omkring 10^{12} kg protoner hvert sekund! Af dette bliver under en procent til energi i form af lys. Det svarer dog stadig til ca. 10^{26} W !

Forbrænding af hydrogen: CNO-kæden

- CNO-kæden (Carbon, Nitrogen, Oxygen): Forbrænder protoner fra hydrogen og producerer helium
- Som diagrammet nedenfor viser, starter processen fra en C-kerne og slutter med en C-kerne samt den He-kerne, der produceres af de fire protoner, som samles op løbende i processen.
- Energien produceret i CNO-kæden svarer til den produceret i PP-kæden, men reaktionen forløber langt hurtigere ved høje temperaturer, og er derfor vigtig i stjerner med en masse mindst $\sim 30\%$ større end solen



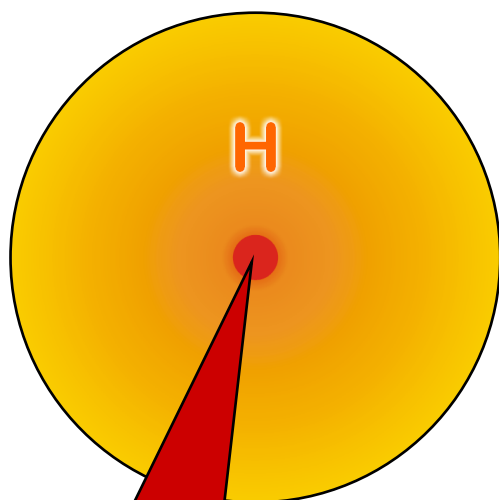
Produktionen kan forløbe ved brug af C, N, og O som katalysatorer for processen. Tilstedeværelsen af carbon er altså nødvendigt, for at processen kan forløbe. Processen er altså kun mulig i yngre stjerner, som er dannet af resterne fra ældre stjerner, som allerede har produceret carbon i senere stadier af deres forbrænding (se følgende slides)

CNO-kæden foregår derfor også i solen, men producerer ca. 10-100 gange mindre energi end PP-kæden. CNO-kæden dominerer først ved temperaturer over 20 mio. Kelvin.

CNO-kæden blev først foreslået af H. Bethe (ham der som en joke blev inkluderet i Alpher og Gamows artikel om Big Bang-kernesyntese).

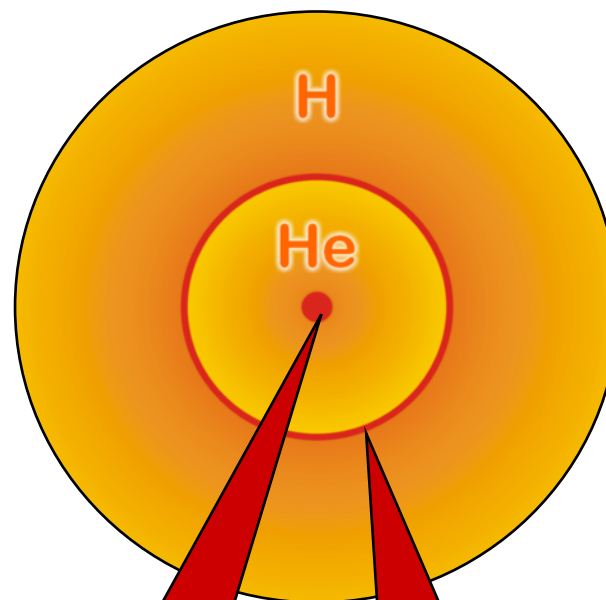
Når stjerner løber tør for hydrogen

Solen nu



Hydrogen-
forbrænding

Solen i fremtiden



Helium-
forbrænding

Hydrogen-
forbrænding

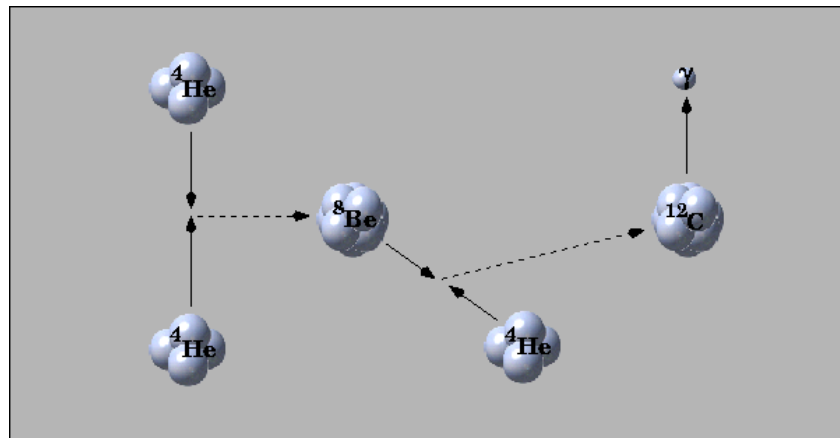
Det producerede helium falder til 'bunds' i stjernen som en form for 'aske' fra fusionsprocessen. Efterhånden som hydrogenet forbruges, og der produceres mindre lys (og varme), kan trykket fra tyngdekraften ikke opretholdes, og stjernen skrumper ind.

Dette sker indtil trykket (og dermed temperaturen) er høj nok til, at fusionen af de tungere elementer kan lade sig gøre. Det overskydende hydrogen 'svømmer da ovenpå' og fortsætter forbrændingen i en skal udenom helium-forbrændingen.

Da energien produceret i helium-forbrændingen er højere end nødvendigt for at opretholde trykket fra tyngdekraften, svulmer den ydre skal af helium op.

Forbrænding af helium: Triple-alfa-processen

- Triple-alfa-processen: Forbrænder tre Heliumkerner (alfa-partikler) og producerer en carbonkerne
- Foregår over to skridt, hvoraf den midlertidige ^8Be -kerne historisk set er mystisk, da dens levetid er 7×10^{-17} s, og selv med et enormt stort antal af He-kerner virker det ikke muligt for en He-kerne at kolliderer med ^8Be -kerne, inden den henfalder
- Det viser sig dog, at ^{12}C har en exciteret tilstand ($^{12}\text{C}^*$), med en energi, som passer med energien af $^8\text{Be} + ^4\text{He}$. Dermed bliver processen mere favorabel og sker derfor med en rate høj nok til, at en reel forbrænding kan finde sted.
- Når den exciterede tilstand, $^{12}\text{C}^*$, henfalder til grundtilstanden, udsendes en foton som tilføjer energi (varme) til omgivelserne




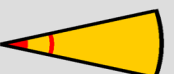




Vik Dhillion

Før 1952 var den exciterede tilstand af carbon ikke kendt, men F. Hoyle forstod at kun ved eksistensen af den exciterede tilstand af carbon ville triple-alfa-processen være hyppig nok til at producere det observerede niveau af carbon. Med denne forudsigelse var det en lettelse, at den exciterede tilstand blev observeret af en gruppe under ledelse af W. Fowler.

Triple-alfa-processen starter, når temperaturen er over 100 mio. Kelvin. Energien produceret i triple-alfa-processen er ca. $7,3 \text{ MeV} = 1,2 \times 10^{-12} \text{ J}$

I stil med triple-alfa-processen kan ^{12}C indfangne ^4He og producere den stabile oxygen-isotop, ^{16}O . Dette sker dog meget langsommere, men der produceres så en lignende mængde energi.

Yderligere forbrændingsprocesser

Fase	Proces	Varighed [år]	
	Hydrogen	$H \rightarrow He$	1.2×10^7
	Helium	$He \rightarrow C, O$	1.3×10^6
	Carbon	$C \rightarrow Ne, Mg$	6.3×10^3
	Neon	$Ne \rightarrow O, Mg$	7.0
	Oxygen	$O \rightarrow Si$	1.7
	Silicium	$Si \rightarrow Fe, Ni$	6 dage

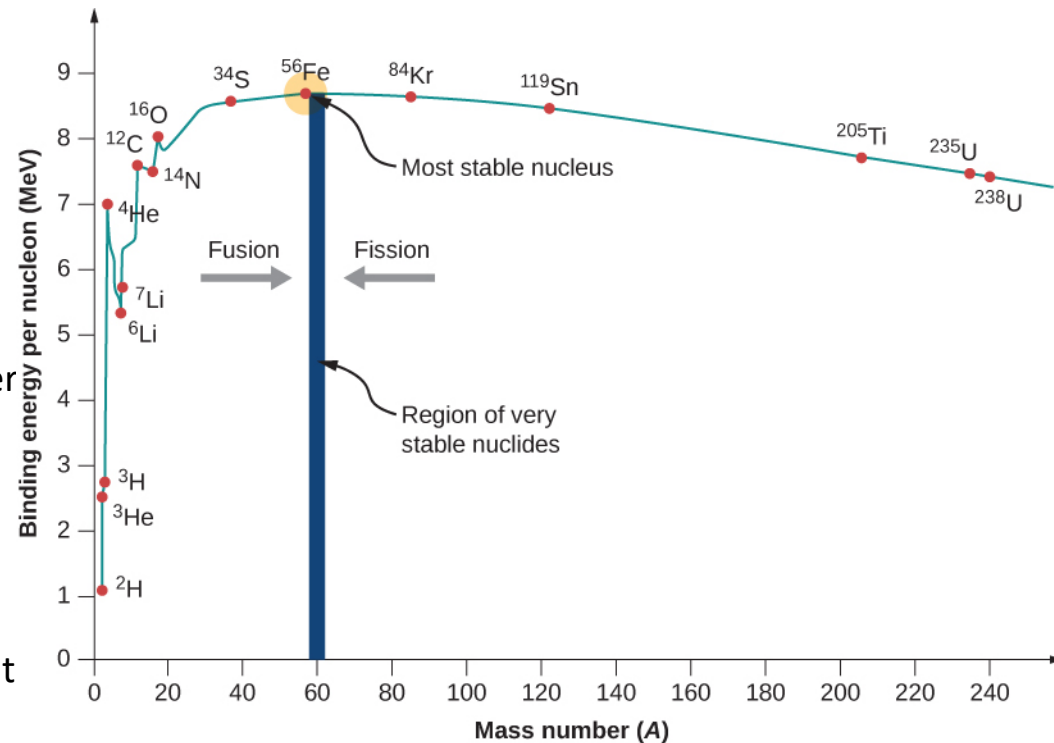
Processer, der producerer grundstoffer tungere end oxygen, sker kun i stjerner med en masse højere end ~ 10 gange solens masse.

Varigheden af de enkelte faser varierer med stjernens masse og er her angivet for en stjerne med 15 gange solens masse.

Processerne ender med en produktion af Fe og Ni med 56 nukleoner, da der derefter ikke kan frigives mere bindingsenergi (se næste slide).

Kerners bindingsenergi

- Hidtil har fusionen i stjernen kunne lade sig gøre, da tungere kerner er bundet mere tæt, og det er derfor favorabelt energimæssigt for mindre kerner at fusionere.
- At fusionsprocessen samtidig frigiver energi, gør det blot muligt at opretholde en temperatur, så processen kan fortsætte.
- Fusion i stjernerne sker dog kun indtil produktionen af ^{56}Ni (nikkel). De henfalder derefter hurtigt videre til det stabile ^{56}Fe (jern).
- Mere komplekse kerner har en lavere bindingsenergi, og dermed kan der **ikke** vindes energi ved at fortsætte fusion.
- Derimod kan der vindes energi ved at splitte kernerne (fission). Dette er relevant for atomkræftværker, men ikke for denne fortælling.



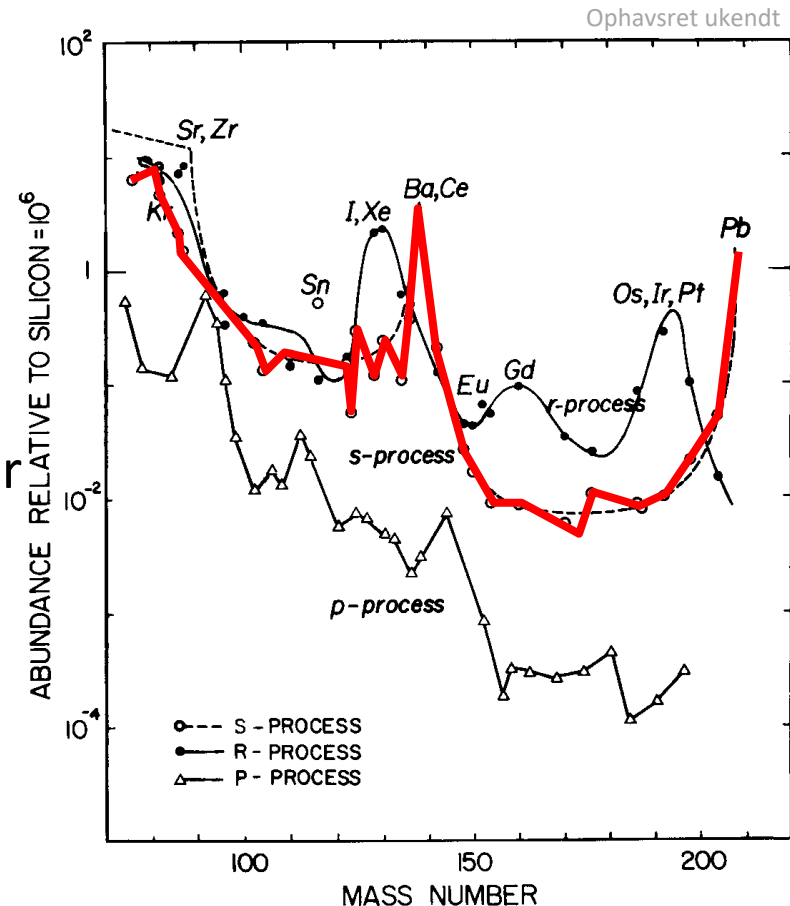
[Rice University](#)

For at producere tungere grundstoffer skal der tilføres mere energi. Dette sker, når atomerne bombarderes med neutroner i supernova-eksplosioner eller fusion af neutronstjerner. Den opbyggede energi i de tungere grundstoffer bruges af os til at producere energi ved fission/henfald.

Se fx [video med en fin illustration af bindingsenergien af alle isotoper](#). Videoen præsenterer også mange andre koncepter relateret til grundstofferne. Se også [Godt interaktivt isotopkort](#).

Tungere grundstoffer skabes ved neutronindfangning

- De tungere grundstoffer skabes hovedsageligt ved neutronindfangning gennem to forskellige processer:
 - s-proces (slow = langsom): Indfangning af neutroner i stjerner over lang tid.
 - r-proces (rapid = hurtig): Indfangning af neutroner i eksplosive omgivelser (fx i supernovaer) over utrolig kort tid

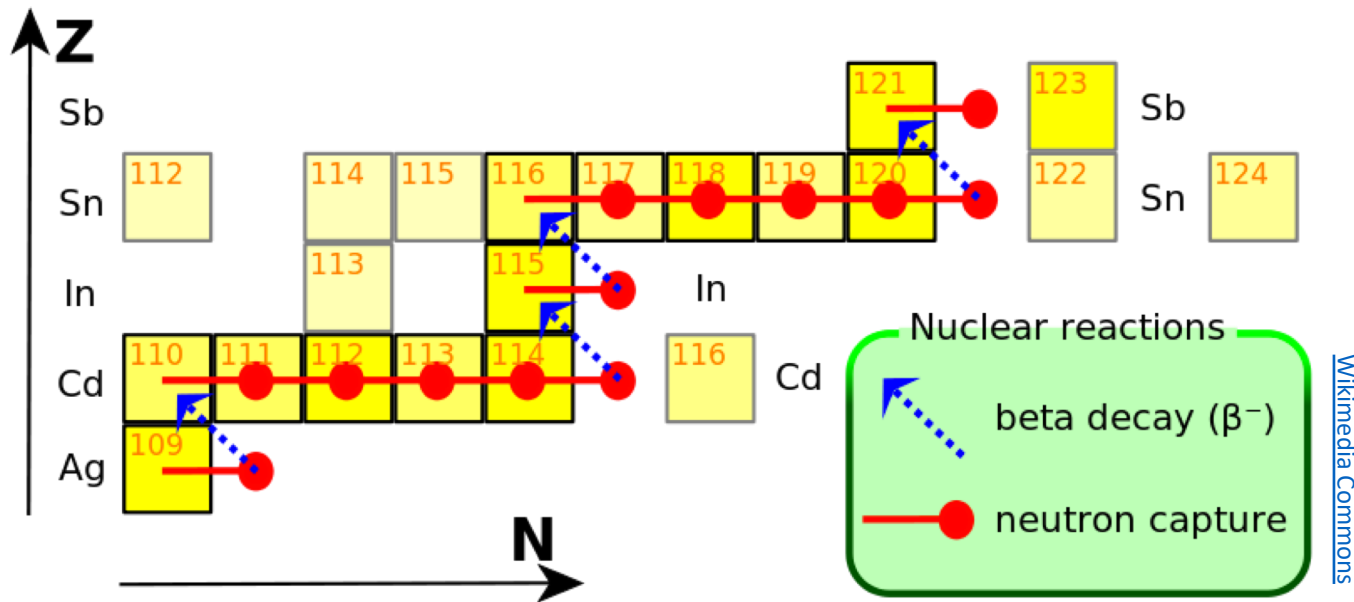


Derudover er der den sub-dominante p-proces: Proton-indfangning i kerner tungere end jern, som kun finder sted i stjerner, hvor der allerede er tungere kerner til stede.

Dermed kan denne proces ikke have skabt de første tungere grundstoffer, men bidrager til den fortsatte produktion af tungere grundstoffer

S-proces (simpel proces)

- Indfangning af neutroner i stjerner over lang tid
- Hvis der er tunge metaller til stede i en stjerne (^{56}Fe eller tungere), vil der over tid dannes nye grundstoffer, men kun nogle bestemte af slagsen

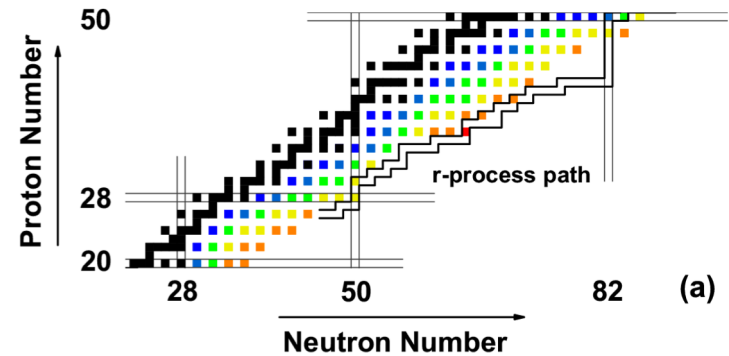


En del af processen er illustreret på figuren, der viser hvordan neutronindfangning producerer tungere isotoper af samme grundstof. Dette fortsætter, hvis der dannes en stabil isotop (gule kasser).

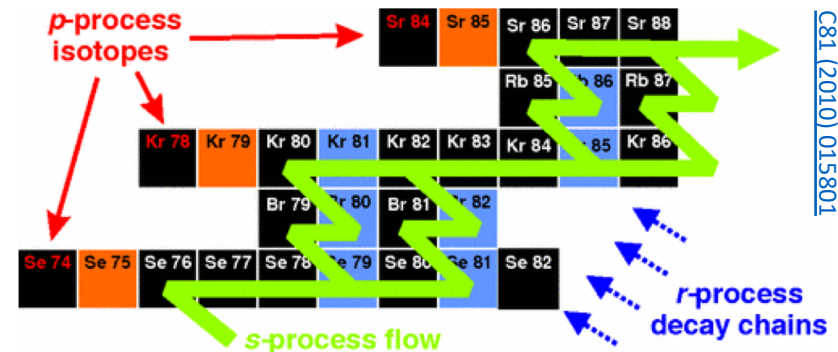
Men når s-processen når en radioaktiv isotop, vil den henfalde ved betahenfald til et andet grundstof, og dermed er der nogle (stabile) isotoper som ikke nås. S-processen kan fortsætte indtil ^{209}Bi er skabt.

R-proces (producerer tungeste elementer)

- Indfangning af neutroner i eksplosive omgivelser ($\sim 1-2$ mia. K) over utrolig kort tid ($\sim 0,2 \mu\text{s}$)
- Dette dækker reelt over alle astrofysiske eksplosioner, hvor neutrontætheden er tilstrækkelig høj. Eksempelvis i en supernova.
- Da tidsskalaen er så kort, fortsætter neutron-indfangningen ved denne proces selv for radioaktive isotoper
- R-process er den primære produktion af de tungeste grundstoffer, og kan starte fra ^{56}Fe



Niu et al. Phys. Lett. B 723 (2018) 172



Dillmann et al. Phys. Rev. C 81 (2010) 015801

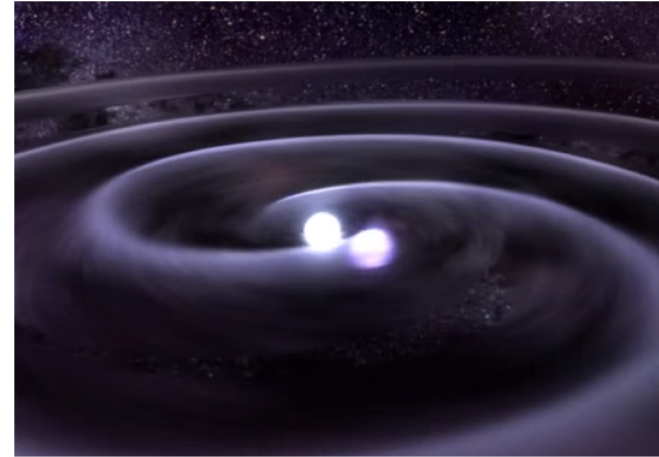
Lige inden supernovaeksplosionen er massen i centrum af stjernen så tæt pakket, at neutroner ikke kan henfalde ved betahenfald (da alle mulige pladser for elektroner er udfyldt (Paulis udelukkelsesprincip)). Under eksplosionen bliver de eksisterende kerner bombarderet med så stor en mængde neutroner, og så hurtigt, at de intermediære radioaktive kerner ikke har tid til at henfalde, og det er derfor muligt at nå til stabile isotoper af tungere kerner selv via de radioaktive kerner.

Processen kan altså nå længere til 'højre' på isotopkortet indtil den når en radioaktiv isotop med en halveringstid væsentligt kortere end $0,2 \mu\text{s}$, som sender processen et skridt op.

Eksempelvis er det gennem r-processen, at guld er blevet skabt. Vi ved, at r-processen forløber under et gammaglimt (et af de fjerneste, og dermed tidligste, objekter vi kan se klart i universet - se separat materiale), og dermed kan vi regne os frem til, hvornår det første guld blev skabt.

Neutronstjerneekollision

- Der bliver ikke dannet nok tungere grundstoffer i supernovaer, og det sker rent faktisk i sammenstød mellem neutronstjerner!
- I august 2017 detekterede man en kollision mellem to neutronstjerner, der fusionerer og producerer en 'Kilonova'.
- Kollisionen skabte alt fra x-rays og gamma-rays, til synligt lys og radiobølger, samt en masse tunge grundstoffer



NASA

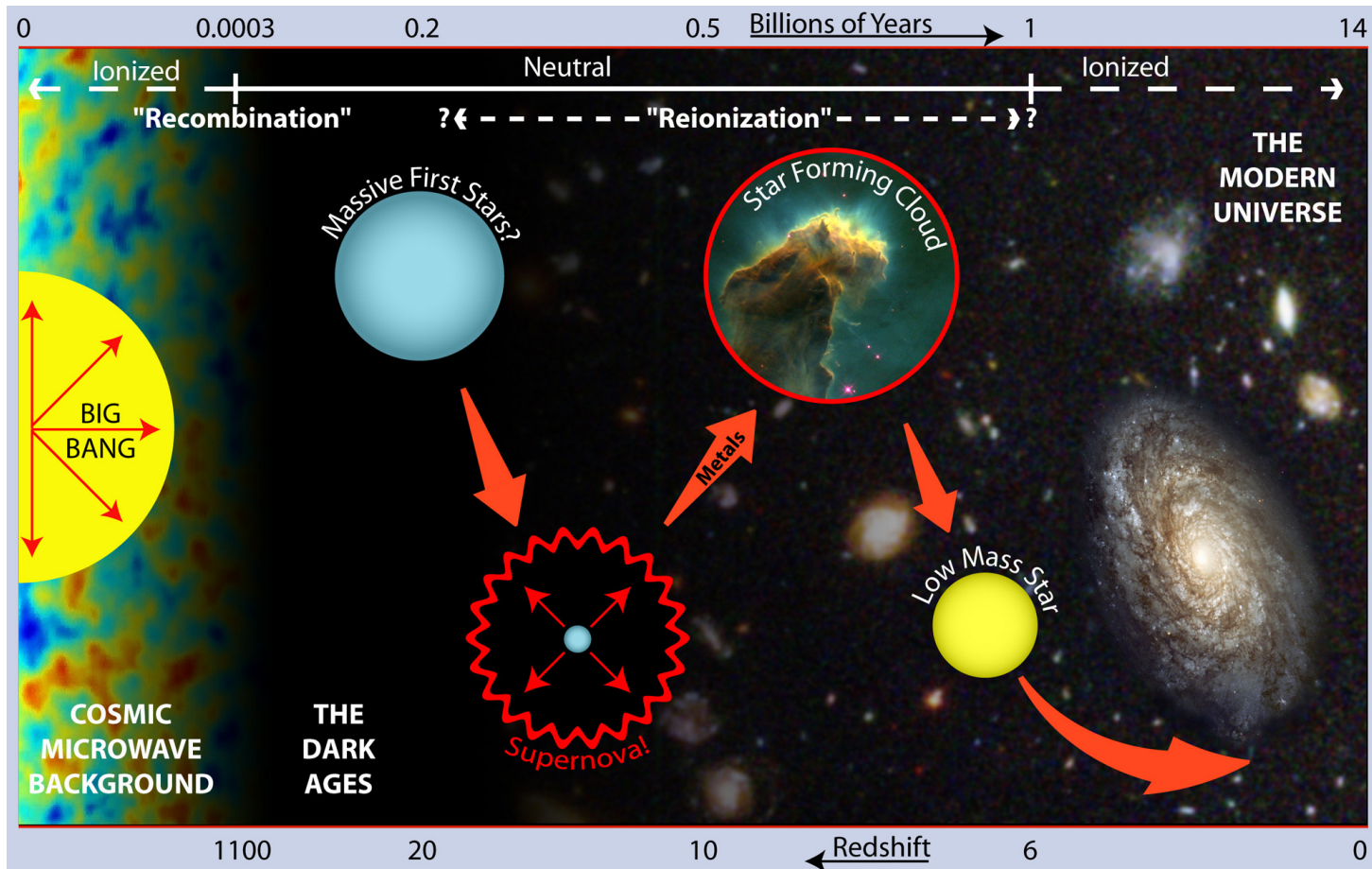


NASA

Før kollisionen havde man forudsagt, at neutronstjerneekollisioner vil kunne skabe tungere elementer såsom guld og platinum, men man havde ingen beviser på det. Observationer af kollisionen i 2017 bekræfter teorien, og det er estimeret, at den ene kollision skabte op mod 100 gange mere guld end vi har her på jorden. Det blev også opdaget, at stort set alle de tungere grundstoffer (atomnummer større end jern) kommer fra sådanne kollisioner og ikke fra supernovaer, som man tidligere har troet.

Man så den forventede enorme mængde stråling fra den store mængde af producerede radioaktive tunge grundstoffer, som hurtigt henfalder igen og giver et voldsomt glimt af elektromagnetisk stråling (se mere i materialet om 'Galakser, Stjerner og Planeter').

Grundstoffers dannelse (1 billede)



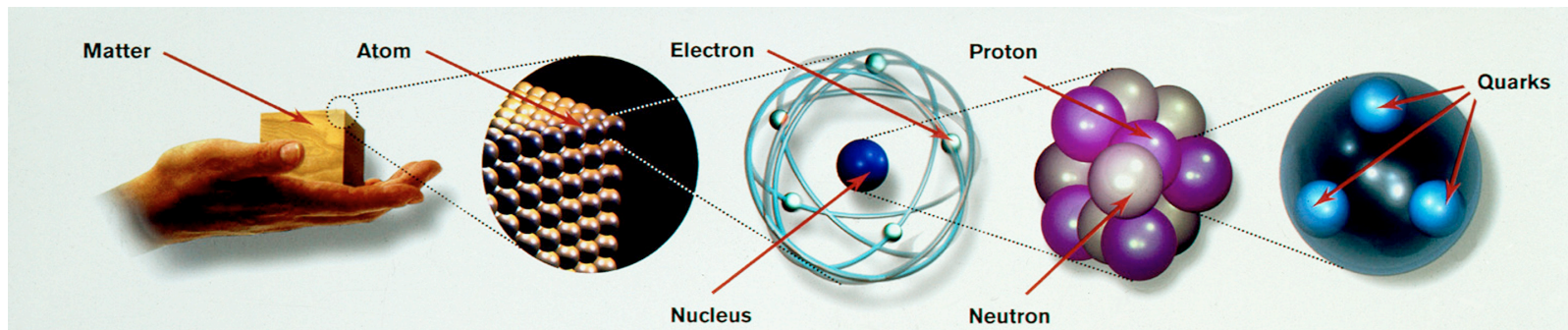
University of Chicago

Hydrogen og helium skabt i minutterne efter Big Bang samles i de første stjerner, som ikke bare producerer grundstofferne op til jern, men også tungere kerner i eksplosive supernovaer. Metallerne herfra ('Metals' refererer her til alle grundstoffer tungere end helium) er da tilstede i de galaktiske skyer, hvorfra nye stjerner dannes - bl.a. en stjerne med relativ lille masse i udkanten af Mælkevejen, som vi til hverdag refererer til som 'Solen'. Solen ser vi i dag i det moderne univers, hvor indholdet af stjerner ikke blot er hydrogen og helium, men også grundstoffer tungere end jern.

'Recombination' beskriver det øjeblik, CMB bliver skabt, hvorefter den mørke tid ("The Dark Ages") begynder, da der ikke er andet lys i universet end CMB. Først med dannelsen af stjerner kommer der igen lys i universet. 'Reionization' referer til, at gassen mellem stjerner og galakser er ioniseret, hvilket gør, at lys kan rejse længere (se materiale om 'Galakser, Stjerner og Planeter').

Elementarpartikler

- Indtil nu har vi snakket om dannelsen af grundstofferne ud fra protonen og neutronen som de mindste bestanddele af al stof.
- Men i virkeligheden kan protoner og neutronen opdeles i endnu mindre bestanddele: Kvarker (quarks)
- Kvarker findes i flere udgaver, hvoraf de vigtigste er 'up' og 'down' (som ikke angiver en retning her, men simpelthen er navnet på kvarken, på samme måde som at en proton kaldes en proton)



CERN

Koncept: Protoner og neutroner er faktisk ikke fundamentale partikler. I stedet mener vi, at alt stof omkring os er opbygget af kvarker og elektroner.

Protoner består af tre kvarker (up, up og down), og neutroner består af tre kvarker (up, down og down). Det er disse kvarker, der giver protoner og neutroner deres egenskaber i form af ladning, stabilitet, masse, etc.

Ved at beskrive stof ved hjælp af kvarker i stedet for protoner og neutroner er det også muligt at beskrive andre sammensatte partikler, eks. pioner, som også består af kvarker (dog kun to kvarker). For at beskrive de relevante naturvidenskabelige egenskaber, er det naturligvis afgørende hvilken størrelsesorden (eller nærmere energiniveau) man arbejder med. Det afgør nemlig, hvorvidt man kan arbejde med en klump bly, blyatomer, eller kvarkerne i protonerne i blyatomkernen.

De mindste partikler

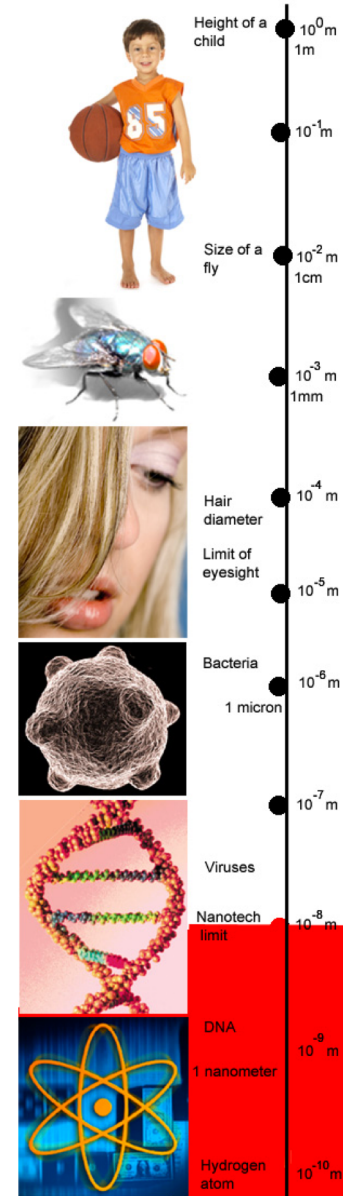
- Det er ikke ligetil at beskrive, hvor lille elementarpartiklerne er.
- Det er i forvejen svært at forstå, hvor lille et atom er. Men man kan se et atom som et planetsystem med elementarpartikler som tennisbolde i hele dette planetsystem for at få en ide om størrelsen.



Atom = planetsystem



Elementar partikel = tennisbold



Koncept: Elementarpartikler er rigtig små!

Da størrelserne, vi snakker om, er så små må mange af de relaterede fænomener nødvendigvis beskrives af kvantemekanik (dette er igen en god historie som må gemmes til en anden gang, omhandlende eksempelvis Heisenbergs usikkerhedsprincip, tunnelering og beskrivelsen af elektroner i et atom).

Det 21. århundredes periodiske system: Standardmodellen

Group

Period	I	II	III	IV	V	VI	VII	VIII										
1	1 H							2 He										
2	3 Li	4 Be						10 Ne										
3	11 Na	12 Mg						18 Ar										
4	19 K	20 Ca	21 Sc	22 Ti	23 V	24 Cr	25 Mn	26 Fe	27 Co	28 Ni	29 Cu	30 Zn	31 Ga	32 Ge	33 As	34 Se	35 Br	36 Kr
5	37 Rb	38 Sr	39 Y	40 Zr	41 Nb	42 Mo	43 Tc	44 Ru	45 Rh	46 Pd	47 Ag	48 Cd	49 In	50 Sn	51 Sb	52 Te	53 I	54 Xe
6	55 Cs	56 Ba	*	72 Hf	73 Ta	74 W	75 Re	76 Os	77 Ir	78 Pt	79 Au	80 Hg	81 Tl	82 Pb	83 Bi	84 Po	85 At	86 Rn
7	87 Fr	88 Ra	**	104 Rf	105 Db	106 Sg	107 Bh	108 Hs	109 Mt	110 Ds	111 Rg	112 Cn	113 Nh	114 Fl	115 Mc	116 Lv	117 Ts	118 Og
8	119 Uun																	

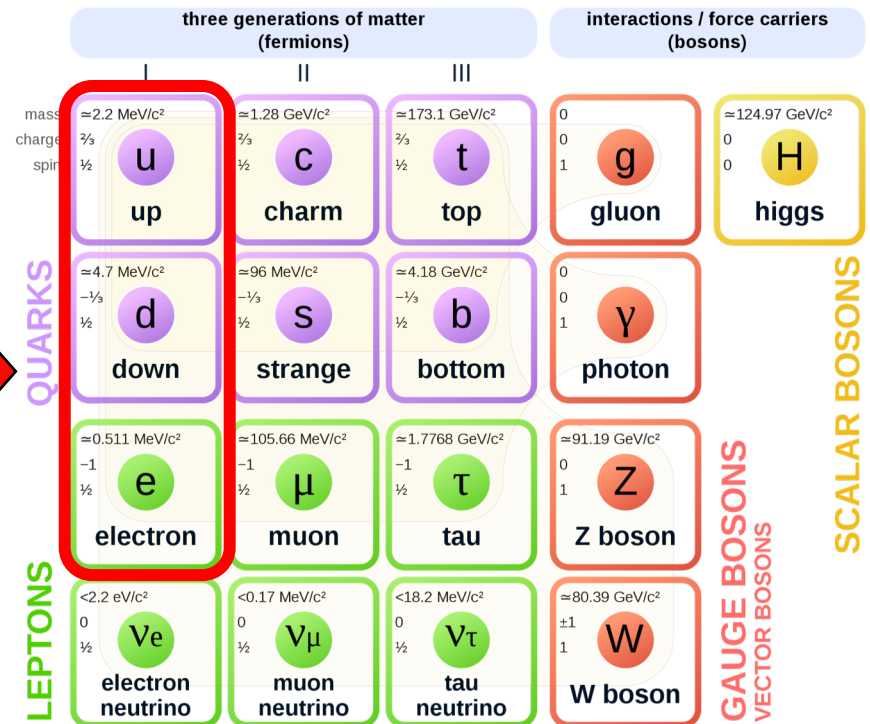
* Lanthanides: 57 La, 58 Ce, 59 Pr, 60 Nd, 61 Pm, 62 Sm, 63 Eu, 64 Gd, 65 Tb, 66 Dy, 67 Ho, 68 Er, 69 Tm, 70 Yb, 71 Lu

** Actinides: 89 Ac, 90 Th, 91 Pa, 92 U, 93 Np, 94 Pu, 95 Am, 96 Cm, 97 Bk, 98 Cf, 99 Es, 100 Fm, 101 Md, 102 No, 103 Lr

Alkali metals, Alkaline earth metals, Lanthanides, Actinides, Transition metals, Poor metals, Metalloids, Nonmetals, Halogens, Noble gases

[Wikimedia Commons](#)

Standard Model of Elementary Particles



[Wikimedia Commons](#)

Standardmodellen består af 3 grupper af elementarpartikler: kvarker ("Quarks") og leptoner ("Leptons"), partiklerne som medierer naturkræfterne (kraftpartikler, "Forces"), samt Higgs bosonen. Kvarker og leptoner eksisterer i flere 'generationer' (e.g. u=1. gen, c=2. gen, t=3. gen), hvor 3. generation er tungest og henfalder hurtigere til de lettere generationer. Det er derfor protoner og neutroner består af up- og down-kvarker, og leptonen omkring atomkernen er elektronen – de andre henfalder for hurtigt.

I princippet kan det periodiske system (til venstre) simplificeres med partiklerne i standardmodellen (til højre), da vi ud fra bare de tre partikler angivet i den hvide kasse (up, down og elektronen) kan beskrive alle grundstofferne.

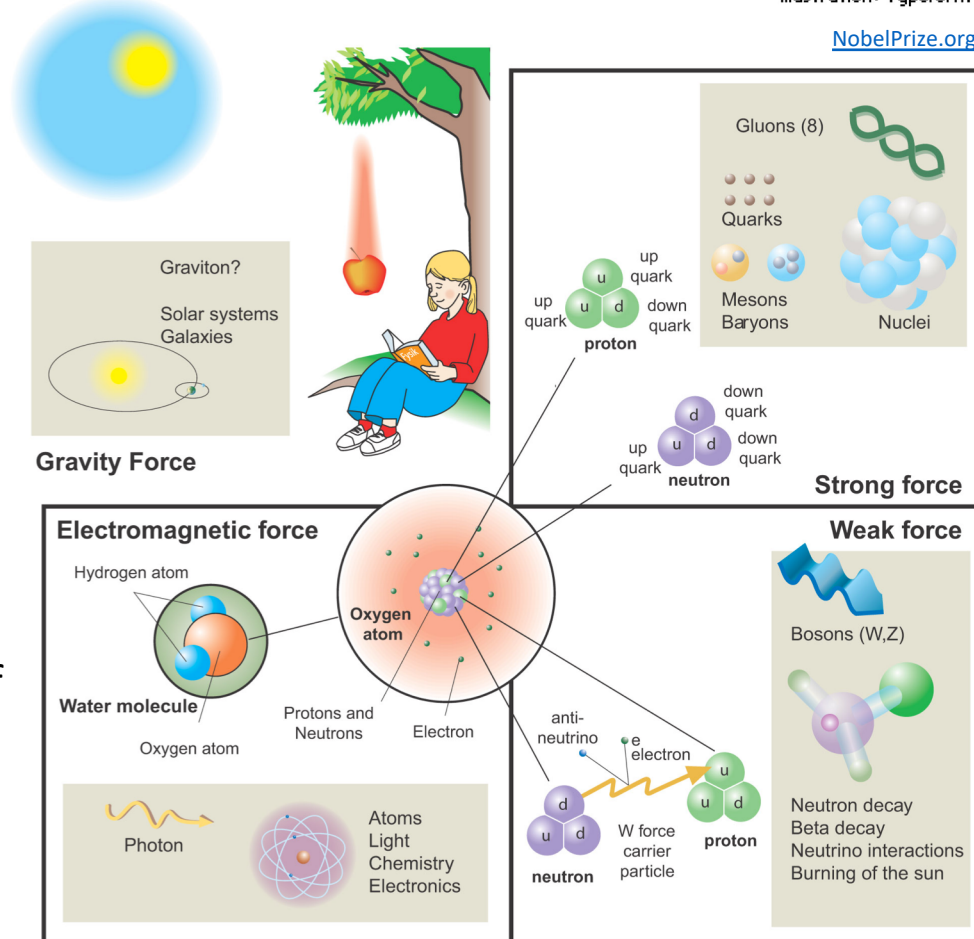
Med alle 17 elementarpartikler kan vi dog beskrive alle kendte fænomener, som vi observerer på partikelniveau (dette må blive en fortælling til en anden gang om at forstå detaljerne i eksempelvis radioaktivitet, bestanddelene i kosmiske stråler, neutrinooscillationer og Higgs-partiklen).

Fundamentale kræfter

Illustration: Typoform

NobelPrize.org

- Ved at indføre de fundamentale kræfter i standardmodellen kan vi forstå
 - Elektromagnetisme og lys (kraftbærer: foton)
 - Den stærke kernekraft: Sørger for at protoner kan hænge sammen med neutronerne i atomkerner, selvom de er positivt ladede (kraftbærer: gluon)
 - Den svage kernekraft: Radioaktive henfald, eks. beta-henfald, hvor en neutron omdannes til en proton (kraftbærer: W- og Z-boson)
- Tyngdekraften er endnu ikke en del af standardmodellen, da dens foreslåede kraftbærende partikel, gravitonen, endnu ikke er observeret



Særligt den stærke og svage kernekraft er svært at beskrive uden brug af elementarpartikler beskrevet med standardmodellen.

Her er ligeledes rigtig mange fænomener, som kan beskrives, men er udeladt da de ikke direkte er en del af historien fra Big Bang til det Moderne Menneske.

Yderligere ressourcer

- Hæftet om Niels Bohr (særligt første to artikler): http://fysik-kemi.dk/kbhsj/NielsBohr100aar/Niels_Bohr_jubilaeumsskrift.pdf
- Grundstoffernes historie: [Aktuel Naturvidenskab 6 2007 side 18.](#)
- Video med en fin illustration af bindingsenergien af alle isotoper. Videon præsenterer også mange andre koncepter relateret til grundstofferne (produceret af Frankrigs Atomenergiagentur): https://www.youtube.com/watch?v=UTOp_2ZVZmM
- Avanceret: R-processen forekommer også i eksplosionen som følger af sammenstødet og den efterfølgende fusion af neutronstjerner. En detaljeret animation over de producerede isotoper kan findes her (produceret af forskere til forskere, så ingen koncepter er forklaret, men stoffernes vandring over isotopkortet er interessant: <http://compact-merger.astro.su.se/movies.html> (under "r-Process nucleosynthesis"))
- Det periodiske system med angivelse af oprindelsen for grundstoffernes navne: <http://www.compoundchem.com/wp-content/uploads/2016/06/The-Periodic-Table-Element-Name-Origins-L.png>

Om materialet

Big Bang til naturfag

- Materialet er udarbejdet af projektet 'Big Bang til Naturfag' (et samarbejde mellem Københavns Universitet og Aarhus Universitet)
- Denne del af materialet er udarbejdet med særligt bidrag fra:
 - Hans Fynbo, Lektor (Aarhus Universitet)
 - Jonatan Selsing, PostDoc (Københavns Universitet)
- Big Bang til Naturfag er støttet af A.P. Møller Fonden

