

Naturlove og muligheden for liv. Del 1

Af Michael Cramer Andersen og Svend Erik Rugh

Vi vil skitsere nogle principper og resultater i et omfattende projekt, der prøver at undersøge sammenhænge mellem muligheden for liv, som vi kender det, og fysikkens naturlove, som vi kan forestille os dem.

Introduktion

Naturlovene er både et *fængsel* og en kilde til *frihed*. Naturlovene har virketrang overalt på vor scene af tid og rum og naturlovene er noget som vi og alt andet må adlyde. Samtidig muliggør naturlovene en opbygning af *livet* som i vore livsformer har udviklet begreber om vilje og frihed (fængslet muliggør friheden). Som levende væsener puster vi liv i et fængslende spil med spilleregler, herunder nogle vi p.t. drister os til at kalde naturlove, som er blevet beskrevet i et stadigt mere nuanceret og forfinet sprog. Ikke mindst i forrige århundrede blev sproget udviklet så skørt og mærkeligt [1] at ingen science fiction forfatter nogensinde ville have haft fantasi til at formulere tanker så ekstremt bizarre og vilde. Dette er sjovt illustreret i George Gamows historier om “Mr. Tompkins i drømmeland” [2]



Figur 1. Mr. Tompkins cykler rundt i “Einstein stad”, hvor lysets hastighed er sat ned med en faktor ca. 100 millioner, til $c = 15$ km/time (og de øvrige naturkonstanter er uændrede). Han ser en mand på en cykel som bliver kortere jo hurtigere han kører. Mr. Tompkins tager en cykel og følger efter manden. Til hans store overraskelse bliver han ikke selv kortere men bygningerne og gaden bliver kortere idet han prøver at indhente manden. Mr. Tompkins ræsonnerer: “Alt hvad der bevæger sig relativt til mig bliver forkortet!” Tegning af John Hookham fra [2].

Mr. Tompkins kommer til verdener hvor naturkonstanterne antager radikalt andre værdier end de sædvanlige (fx er lysets hastighed i “Einstein Stad” sat til $c = 15$ km/timen). De hverdags-fremmede og kontra-intuitive konsekvenser af vort (moderne) fysiske verdensbillede bliver derved fremhævet så meget, at de bliver umiddelbart fremtrædende (Mr. Tompkins oplever effekterne af relativitetsteorien, urene går anderledes osv., mens han cykler!).

Til den danske udgave af “Mr. Tompkins i drømmeland” (1942) skrev Niels Bohr et forord, hvor vi ikke er i tvivl om at Bohr satte Gamow, og hans festlige fantasi og humor, meget højt. Det er imidlertid velkendt at Bohr udtrykte (dog ikke i selve forordet) at man skal passe på med at lege med fysikken på denne måde. Hvis man ændrer på én naturkonstant – fx leger sig ind i et univers med en radikalt lavere værdi af lysets hastighed – så vil en sådan ændring også udbrede sig bredt hen over fysikkens mangeartede discipliner, fx atomernes verden. Der vil, muligvis, slet ikke være stabile atomer, og derfor slet ingen Mr. Tompkins, ingen cykel at cykle på, ingen luftmolekyler at indånde, og ingen ure at se på! Selvom vi er mange, i dag, der, sammen med George Gamow, fornøjeligt spiller med og leger os ind i kontrafaktuelle konstruerede universer (som teatergæster der *helt udefra* får lov til at få et kig ind i radikalt anderledes konstruerede universer) så foregriber denne anke, fremsat af Niels Bohr, et projekt som har interesseret flere og flere fysikere:

- Hvad er samspillet mellem naturlovene og muligheden for at konstruere liv?
- Er det fx muligt (hvordan og hvor meget?) at ændre på naturlovene og stadig have mulighed for at konstruere liv?

George Gamow satte i sin historie lysets hastighed ned med – hold fast! – *en faktor på knap 100 millioner*, fra 300.000 km/s til 15 km/time. Hvis alle andre naturkonstanter fastholdes bliver den elektromagnetiske finstrukturkonstant og den stærke kernekraft derfor skaleret op med en tilsvarende faktor (se tabel 1). Sammenhold evt. dette med, at en ændring på blot *nogle få procent* i styrken af disse kræfter vil forårsage overmåde drastiske ændringer af strukturen af stoffet i Universet. Helt uden mulighed for at konstruere Mr. Tompkins. Vi vil i denne artikel prøve at ridse problemet op om hvad det vil sige at “ændre på naturlovene” og i en senere del 2, forsøge at give et overblik over nogle vigtige resultater i projektet.

Naturlovene og naturkonstanterne

Formuleringen af naturlovene benytter sig af en række – i kvantesproget udviklede – “frihedsgrader”. Nogle har halvtalligt spin (fermioner) og andre har heltalligt spin (bosoner). Lidt groft kan vi sige, at frihedsgraderne med halvtalligt spin refererer til en række partikler (byggeklodser) – kvarker og leptoner – mens frihedsgraderne

med heltalligt spin refererer til de kræfter, der virker imellem byggeklodserne (og kræfterne virker også på sig selv). Endvidere er der, muligvis, en (eller flere) Higgs boson(er) med spin nul.

I den Standardmodel, som siden 1980'erne har været accepteret, af de fleste, som standardteori for det lag af (effektive) naturlove, der gælder ved de mindste afstande og højest tilgængelige energier (som vi har kunnet udsætte for et eksperimentelt pres, ca. $\sim 10^3$ GeV $\sim 10^{-7}$ J pr. frihedsgrad), gælder:

- **Byggeklodserne** er kvarker og leptoner, der findes i tre ens kopier (generationer), som kun varierer mht. masserne af partiklerne.
- **Kræfterne** er udformet i overensstemmelse med det helt afgørende væsenstræk, at der både er frastødende og tiltrækkende kræfter. Mere detaljeret er disse udfoldet i form af fire forskellige kræfter: gravitationskraften, den elektromagnetiske kraft, den svage og den stærke kernekraft. Kun de sidste tre har kunnet beskrives i kvantesproget.

Naturlovene, eller "spillereglerne", der gælder for disse byggeklodser og kræfter, i "spillet", udtrykkes i et matematisk sprog som vi, lidt groft, her inddeler i to forskellige strukturelle kategorier¹:

1) Formen af naturlovene. Fx skal teorien være formuleret i overensstemmelse med relativitetsteorien (dvs. respektere den uhyre mærkelige – og stærkt kontraintuitive – egenskab at noget der udbreder sig med lysets hastighed har den samme hastighed i alle reference systemer, $c' = c$). Teorien skal være formuleret i kvantesproget (inkl. fx spin og Paulis udelukkelsesprincip), der i relativistisk form bliver til en kvantefeltteori (som skal være renormerbar, så den giver håndterbare forudsigelser). Teorien skal have indre (gauge-) symmetrier baseret på grupper, som fx U(1), SU(2), SU(3), og der er mange andre morfologiske (formmæssige) strukturtræk ved teorien.

2) Parametre der indgår i naturlovene. Efter at have 'lagt sig fast på formen af naturlovene', indgår der yderligere i alt godt 25 parametre (naturkonstanter) i den præcise formulering af naturlovene. Disse parametre² angiver fx masserne af partiklerne, styrken af vekselvirkningerne, og parametriseringer af andre (mere eller

mindre spekulative) sagsforhold i Standardmodellen. Blandt disse mange parametre i Standardmodellen (og gravitationsteorien, som udgør en selvstændig teori) kan man fx nævne de *dimensionsløse*³ *koblingskonstanter* (eller *finstrukturkonstanter*), der angiver styrken af de fire kendte kræfter, se tabel 1:

Symbol	Formel	Talværdi
α	$e^2/4\pi\epsilon_0\hbar c$	$\approx 1/137$
α_G	$Gm_p^2/\hbar c$	$\approx 6 \cdot 10^{-39}$
α_W	$G_F m_p^2 c/\hbar^3$	$\sim 10^{-5}$
α_S	$g_s^2/\hbar c$	~ 1

Tabel 1. Dimensionsløse koblingskonstanter (fra Uzan (2003) [12]), der er et mål for den relative styrke af de fire kendte naturkræfter: 1) *Elektromagnetismen* (α eller α_{EM} , hvor e er elementarladningen og $1/4\pi\epsilon_0$ er Coulombkonstanten) 2) *Gravitationen* (angivet af en gravitationel finstrukturkonstant, α_G , hvor m_p er protonens masse) 3) *Den svage kernekraft* (α_W , hvor G_F er Fermi-konstanten fra Fermis teori for den svage kernekraft) og 4) *Den stærke kernekraft* (α_S).

Den svage og stærke kernekraft har uhyre kort rækkevidde (hhv. $\sim 10^{-18}$ m og $\sim 10^{-15}$ m) og de virker kun indenfor en atomkernes udstrækning. I modsætning hertil falder den elektromagnetiske og gravitationelle kraft som en potenslov, $1/r^2$, så de virker over store afstande. I tabel 1 ses, at gravitationskraften (her angivet af α_G , med protonens masse som karakteristisk masse) er *uhyre svag*: Vi kan som små levende væsener overvinde hele Jordens gravitationskraft og (ikke mindst med en passende vilje og kontrol over elektromagnetiske kræfter) løfte os selv – og andre genstande – op fra jordoverfladen. Selvom alle Jordens bestanddele trækker denne genstand ned mod jordoverfladen. Så svag er gravitationskraften!⁴

Liv og andre objekters forankring i naturlovene

Hvis man afbilder masse og radius (dvs. karakteristisk størrelse) af stabile objekter i Universet vil man se noget i stil med figur 2. Nogle af objekterne er listet i tabel 2 (hvor et overslag over deres rumlige udstrækning er udtrykt ved fundamentale parametre der indgår i fysikken for disse objekter).

¹Grænsen mellem kategorierne (1) og (2) er lidt flydende. Visse af de formmæssige træk ved teorierne har også i sig nogle karakteristiske parametre. Er fx 1,2 og 3 ikke i en vis forstand parametre når vi siger at Standardmodellen er en gauge teori med gauge grupperne U(1), SU(2) og SU(3)? Er antallet af dimensioner i rummet ($d = 3$) også en parameter? osv.

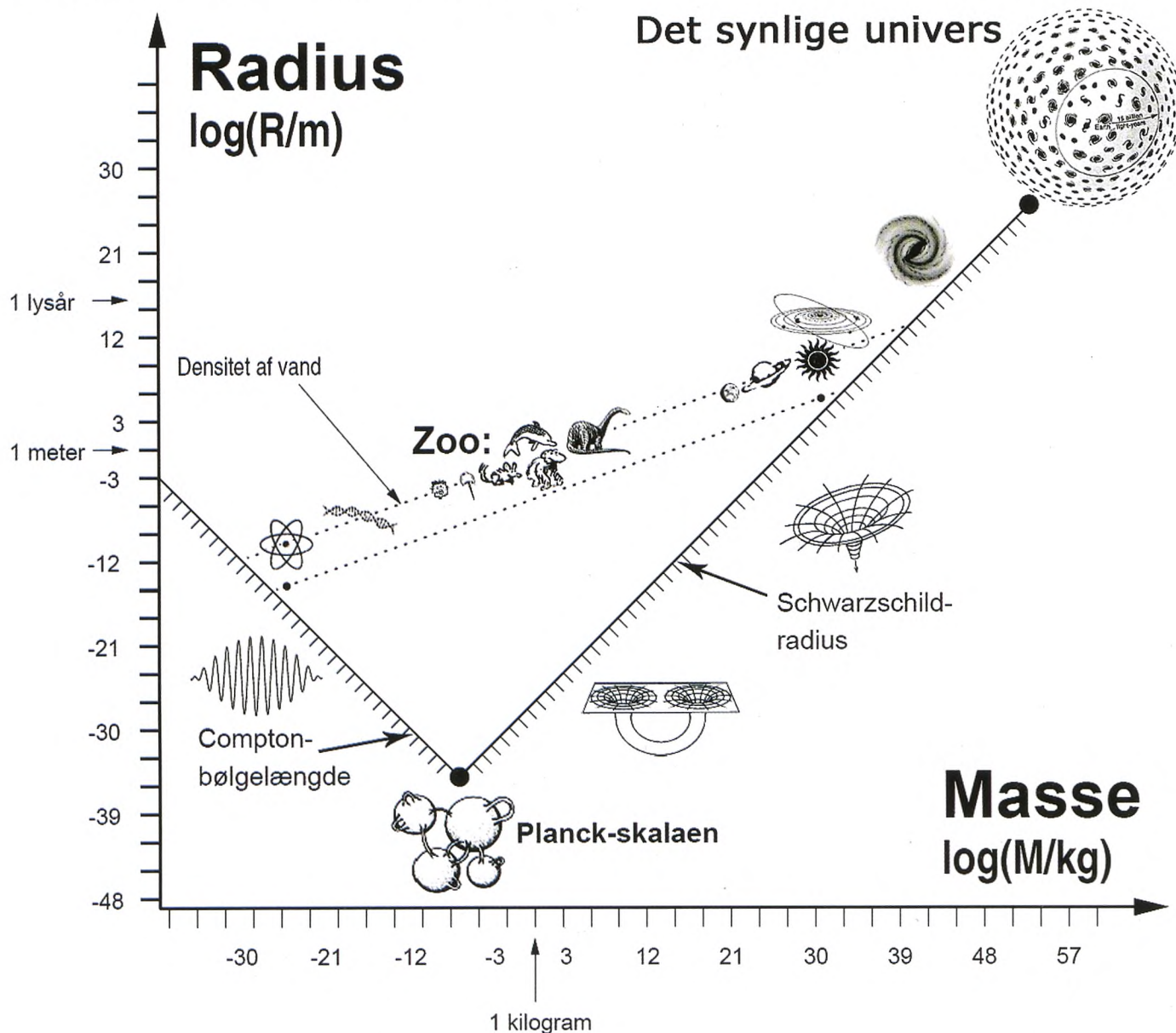
²For en kort omtale af disse parametre, se fx Robert N. Cahn (1996) [3] eller fx Tegmark et al. (2006) [4], hvor der redegøres for 26 parametre i Standardmodellen (som direkte indgår i dens dynamiske ligninger) og yderligere 5-11 kosmologiske parametre (der parametriserer en række væsensforhold i Universets storskalastruktur og som mere kan betragtes som en art "randbetingelser"). I Standardmodellen er de 26 parametre: Seks kvark-masser og tre lepton-masser (angivet via Yukawa-koblinger), et par parametre der specificerer Higgs-sektoren, nogle koblingskonstanter der fortæller om styrken af de fire vekselvirkninger (jfr. tabel 1), og fire parametre der angiver en "mixing" mellem kvarkerne i de forskellige generationer (beskrevet ved en "Cabibbo-Kobayashi-Maskawa"-matrix = CKM-matrix). Tre neutrino-masser og en "mixing" CKM-matrix for neutrinoer giver yderligere 7 parametre. Endelig er der nogle parametre, der er mystisk tæt på nul: En CP-brydende parameter θ (for de stærke kernekrafter), der måske er nul, og en mystisk lille kosmologisk konstant, Λ , i teorien for den gravitationelle vekselvirkning.

³Vores SI-enhedssystem med fx meter, sekund, kg og J, er defineret ud fra jordiske forhold og derfor noget arbitrært. Ved brug af de tre naturkonstanter, c , G og $\hbar$, kan man fastlægge et *Planck-enhedssystem*, der gør det muligt at udtrykke fysiske størrelser som *dimensionsløse* tal (størrelsen i forhold til Planck-enheden, fx $m_{\text{jord}}/m_{\text{planck}}$), således at arbitrært valgte fysiske enheder divideres ud. Derved kan vi i princippet blive forstået af en "7-armet blæksprutte i Andromeda-galaksen" med helt andre "Blæksprutte-SI-enheder". Det er sjovt nok konstanterne c , G og $\hbar$, der ændres i Gamows historier om Mr. Tompkins, men som i virkeligheden regnes for noget af det mest faste.

⁴Det, at tyngdekraften trods sin svaghed overhovedet mærkes – og på astrofysiske skalaer ofte *dominerer* – skyldes, at mange makroskopiske objekter har en total elektrisk ladning meget tæt på nul, hvorved de frastødende og tiltrækkende elektriske kræfter ophæver hinanden.

Mange 'dagligdags objekter', opbygget af atomart stof, ligger på en ret linie med en hældning på 1/3 i figur 2 (der er et log-log plot), idet $R \propto (M/\rho)^{1/3}$. De har (indenfor en faktor 10) den samme densitet angivet af

protonens masse divideret med et volumen sat af Bohr-diameteren (jfr. fx Press og Lightmann (1983), [5], s. 324): $\rho_{\text{atom}} \sim \frac{m_p}{(2a_0)^3} = \frac{1}{8} m_p \left(\frac{\alpha m_e c}{\hbar} \right)^3 \approx 1,4 \text{ g/cm}^3$.



Figur 2. Et dobbeltlogaritmisk diagram, der afbilder masse og radius (karakteristisk størrelse) for en række objekter i Universet. På den øverste stiplede skrå linje (med hældning på 1/3), svarende til densiteten af vand (og andre atomare stoffer), ligger en lang række velkendte objekter: Kulstofatom, DNA-molekyle, celle, goble, mus, delfin, primat, dinosaur, planeter (repræsenteret ved Jorden og Saturn) og stjerner (Solen). Den sorte plet under atomet er en atomkerne (med en radius på $\sim 10^{-15}$ m) og den sorte plet under Solen er en neutronstjerne (de har samme densitet, ca. 10^{15} gange større end densiteten for vand; denne er antydnet med den nederste stiplede skrå linje). Ovenover Solen ses vores solsystem og skråt til højre over dette ses en galakse (Mælkevejen). Øverst til højre markerer den sorte prik hele det synlige univers (også illustreret ved en ballon med galakser på). Begge akser løber over mange størrelsesordener. Hele den zoologiske have af dyr, atomer, planeter og stjerner ligger i passende afstand fra de to sorte linjer. Den skrå linje til venstre, "Compton-bølgelængden" er omvendt proportional med massen: $\lambda_C = h/mc$ (dvs. med hældning på -1 i log-log-plottet). Den angiver en form for ubestemthed for kvantepartikler. For hvis en partikel lokaliseres (fx med kortbølget lys) til sin Compton-bølgelængde, vil der være energi nok til at danne en tilsvarende partikel med samme masse: $hf = hc/\lambda_C = mc^2$ (egentlig kan der som en kvante-effekt dannes et partikel-antipartikelpar ved den halve bølgelængde). Den skrå linje til højre, "Schwarzschild-radius" er proportional med massen: $R_{\text{Sch}} = 2Gm/c^2$ (dvs. med hældning $+1$). Den angiver radius af begivenhedshorisonten af et sort hul med den pågældende masse. En mængde stof der er kollapset til et sort hul kan ikke undslippe denne radius. Bemærk, at radius af det synlige univers omtrentligt svarer til Schwarzschild-radius for den totale masse i det synlige univers (ca. 10^{11} galakser med hver 10^{11} stjerner med massen 10^{30} kg, i alt 10^{52} kg; og hvis man medregner mørk masse (en faktor ca. 6 mere end det synlige stof), så vil Schwarzschild-radius for Universets stofmasse passe fint med en Hubble-radius på 10^{26} m). Man kan således fortolke vort Univers som det indre af et sort hul! Det ses også, at de to skrå linjer står vinkelret på hinanden og skærer hinanden i punktet defineret af Planck-massen og Planck-længden. I dette punkt er Compton-bølgelængden lig med Schwarzschild-radius for et sort hul, dvs. at kvante-effekter og gravitationseffekter er så dominerende, samtidigt, at der vil kunne ske pardannelse af sorte huller. Figur: Michael Cramer Andersen.

Objekt	Karakteristisk størrelse (radius)			Talværdi	Referencer
Planck-længde	l_{Pl}	$= \sqrt{G\hbar/c^3}$	$= \left(\frac{m_e}{m_p}\right) \alpha \cdot \alpha_G^{1/2} \cdot a_0$	$\sim 10^{-35} \text{ m}$	B&T, s. 292
Atomkerne (nukleon)	R_{kerne}	$\sim \frac{\hbar}{m_{\pi} c}$	$= \left(\frac{m_e}{m_{\pi}}\right) \alpha \cdot a_0$	$\sim 10^{-15} \text{ m}$	B&T, s. 319
Atom	R_{atom}	$\sim \frac{\hbar^2}{m_e e^2} = \frac{\hbar}{\alpha m_e c}$	$= a_0$	$\sim 10^{-10} \text{ m}$	B&T, s. 297
Liv	R_{liv}	$\sim K_1 \left(\frac{m_e}{m_p}\right)^{1/4} (\alpha/\alpha_G)^{1/4} (2a_0)$	$\sim 10^2 \left(\frac{m_e}{m_p} \frac{\alpha}{\alpha_G}\right)^{1/4} \cdot a_0$	$\sim 1 \text{ m}$	P&L, s. 333
Beboelig planet	R_{planet}	$\sim \left(\frac{kT}{E_0}\right)^{1/2} (\alpha/\alpha_G)^{1/2} \cdot a_0$	$\sim 0,044 \cdot (\alpha/\alpha_G)^{1/2} \cdot a_0$	$\sim 10^6 \text{ m}$	C&R, s. 608
Typisk stjerne	R_{stjerne}	$\sim \left(\frac{M_{\text{chandra}}}{\rho_{\text{atom}}}\right)^{1/3} = \left(\frac{\hbar c}{G m_p^2}\right)^{1/2} \cdot 2a_0$	$\sim \alpha_G^{-1/2} \cdot a_0$	$\sim 10^9 \text{ m}$	C&R, s. 607
Planetbane (livszone)	“1 AE”	$\sim K_2 \left(\frac{m_p}{m_e}\right) \alpha^{-4} \alpha_G^{-1/4} \cdot a_0$	$\sim \left(\frac{m_p}{m_e}\right) \alpha^{-4} \alpha_G^{-1/4} \cdot a_0$	$\sim 10^{11} \text{ m}$	P&L, s. 331
Galakse	R_{galakse}	$\sim \left(\frac{m_p}{m_e}\right)^{1/2} \alpha^4 \alpha_G^{-1} \cdot a_0$	$\sim \left(\frac{m_p}{m_e}\right)^{1/2} \alpha^4 \alpha_G^{-1} \cdot a_0$	$\sim 10^{21} \text{ m}$	C&R, s. 609
Synlige univers	R_{univers}	$\sim c/H_0 \sim c \cdot t_{\text{stjerne}} = \alpha_G^{-1} \frac{\hbar}{m_e c}$	$\sim \alpha \cdot \alpha_G^{-1} \cdot a_0$	$\sim 10^{26} \text{ m}$	C&R, s. 608

Tabel 2. Karakteristiske størrelser (udtrykt ved fundamentale naturkonstanter) af nogle væsentlige stabile objekter i Universet inklusiv det synlige univers. De fleste objekter er indtegnet på figur 2. Alle størrelserne skal opfattes som bud på en karakteristisk størrelse af objektet, fundet ved fornuftige overslag over den fysik, der bestemmer balancen mellem de tiltrækkende og frastødende kræfter for objektet. Bemærk, at alle størrelser er udtrykt som dimensionsløse tal ganget med Bohr-radius. Flere af de angivne størrelser skal forstås med $\sim$ tegn, som betyder “af samme størrelsesorden som” (dvs. faktorer på 4 og π , og sågar 4π , vil blive sat til ~ 1). Nogle af konstanterne der indgår er de tre partikelmasser: elektronen (m_e), protonen (m_p) og pi-mesonen (m_{π}) samt den elektromagnetiske (α) og den gravitationelle (α_G) finstrukturkonstant. Derudover indgår forholdet mellem den termiske energi (kT , med $T \approx 300 \text{ K}$ og Boltzmanns konstant, $k = k_B = 1,38 \cdot 10^{-23} \text{ J/K}$) og Bohr-energien ($E_0 \approx 2 \cdot 10^{-18} \text{ J}$). Chandrasekhar-massen, der beskriver maksimummassen af en hvid dværgstjerne, er $M_{\text{chandra}} = (\hbar c / G m_p^2)^{3/2} m_p$ og $\rho_{\text{atom}} \approx m_p / (2a_0)^3$. En konstant ($K_1 \approx 0,5\text{--}100$) beskriver detaljerne ved de kemiske bindinger i liv (se Press og Lightman [5]) og en anden konstant ($K_2 \approx 4,4$), beskriver geometriske, kemiske og strålmæssige forhold for en planet der er i en passende afstand fra en gennemsnitlig stjerne til at temperaturen understøtter liv. Hubble-konstanten er $H_0 \approx 22 \text{ km/(s·Mlysår)} \approx 2,3 \cdot 10^{-18} \text{ s}^{-1}$. Referencerne er forkortet: C&R = Carr og Rees (1979) [6]; P&L = Press og Lightman (1983) [5]; B&T = Barrow og Tipler (1986) [7].

Af Standardmodellens godt 25 parametre er der nogle få af dem der – tilsyneladende – er vigtigere for verden, som vi ser omkring os (dvs. ved lave energier), end andre. Faktisk er de fleste strukturer vi ser (for en første overfladisk betragtning⁵) kontrolleret af følgende få parametre: Massen af elektronen (m_e), massen af protonen (m_p) samt styrken af den elektromagnetiske og gravitationelle vekselvirkning α og α_G (se tabel 2). Dette kan ses ved at lave simple overslag over den fysik (som vi i dag mener at forstå i grove træk) der bestemmer masserne og størrelserne af disse objekter.

Elektronens masse og styrken af den elektromagnetiske kraft indgår essentielt i opførslen af atomart stof og dets vekselvirkning med elektromagnetisk stråling, dvs. disse størrelser styrer, overordentligt meget, ’slagets gang’ i kemi og biologi. De indgår fx i

$$a_0 = \frac{4\pi\epsilon_0\hbar^2}{m_e e^2} = \frac{\hbar}{\alpha m_e c} \sim 10^{-10} \text{ m}, \quad \text{og}$$

$$E_0 = \frac{m_e e^4}{2(4\pi\epsilon_0)^2\hbar^2} = \frac{1}{2} m_e (\alpha \cdot c)^2 \sim 10 \text{ eV} \sim 10^{-18} \text{ J},$$

der sætter skalaen for hhv. atomers udstrækning (Bohr-radius) og skalaen for de atomare bindingsenergier⁶. Konstanten $1/4\pi\epsilon_0 = 8,988 \cdot 10^9 \text{ Nm}^2/\text{C}^2$ er Coulomb-konstanten.

Det kan synes overraskende at man i tabel 2 kan give et fysisk overslag (udtrykt ved fundamentale naturkonstanter) over karakteristiske størrelser af liv, en beboelig planet, og sågar 1 AE = 1 astronomisk enhed (= afstanden mellem Solen og Jorden = $1,5 \cdot 10^{11} \text{ m}$). Lad os derfor knytte nogle få bemærkninger til de fysiske vurderinger over størrelserne af disse objekter

⁵Går man dybere ind i stoffets struktur kan den være meget følsom overfor ændringer i styrken af den stærke og svage kernekraft (som ikke direkte indgår i resultaterne for de fysiske overslag over de karakteristiske størrelser af objekter i tabel 2). Endvidere: Selvom det er fristende at påstå at visse af Standardmodellens parametre, som fx masserne af de tunge kvarker og leptoner, ikke spiller nogen rolle for den fysik vi ser – i hverdagen – omkring os (jfr. fx F. Wilczek, s. 52, i Carr (ed) (2007) [9]), så skal man passe på med at føres til en sådan påstand alt for hurtigt. Det kræver nøje og komplicerede undersøgelser. Således kan forskellige tidlig-univers-processer være afgørende for betingelser for livet i en senere fase af Universets udvikling. Hvor kvark- og lepton-masser i den tredje generation, såsom bottom- og top-kvarker, er meget tunge (og derfor tilsyneladende uvæsentlige) i forhold til energier i hverdagens fysik, viser det sig, at det strukturtræk i modellen at have mindst tre generationer kan være afgørende for at have de CP-brud der er nødvendige for at Universet ikke består af ren stråling (fra annihilation af baryoner-antibaryoner) men har nogle få baryoner tilbage (se fx Cahn (1996), [3], s. 956).

⁶Denne bindingsenergi er den elektrostatiske feltenergi imellem to enhedsladninger i en afstand af Bohr-radius: e^2/a_0 . Hvis vi størrelsesordensmæssigt sætter denne energi lig elektronens kinetiske energi $\sim \frac{1}{2} m_e v^2$, ses, at elektronens hastighed er $\sim \alpha \cdot c$ – altså 1/137 af lysets hastighed.

(i lidt ændret rækkefølge): En “beboelig planet” (beboet af liv der indånder luft i planetens atmosfære) er karakteriseret ved at have en passende overfladetemperatur T (så $k_B \cdot T$ svarer til typiske energier der udveksles i reaktioner mellem komplekse molekyler) og planeten skal have en passende størrelse så den har en atmosfære der ikke kun består af brint og helium. Dvs. størrelsen af planeten skal vælges så den termiske hastighed af brint og helium skal være af samme størrelsesorden som undslippeshastigheden fra planeten. Se fx Carr og Rees (1979) [6] s. 608, Press og Lightman (1983) [5], s. 330 eller Barrow og Tipler (1986) [7], s. 309.

Et overslag over afstanden, “1 AE”, fås som afstanden mellem en typisk stjerne (fx geometrisk middelværdi af mindst mulig og størst mulig stjerne) og en beboelig planet, hvor afstanden vælges således at planetens atmosfære får en passende bio-venlig temperatur T (Press og Lightman (1983) [5], s. 331 og Barrow og Tipler (1986) [7], s. 337). Størrelsen af liv – et opretstående dyr, der går rundt på planetoverfladen – estimeres lidt groft ud fra en betragtning om, at dyret ikke må være større end at den kinetiske energi der opnås ved et frit fald af dyret (med et fald af størrelsesorden som dyrets størrelse) i planetens tyngdefelt skal være en del mindre end en karakteristisk brudstyrke af dyrets bestanddele (Press og Lightman (1983) [5], s. 333 og Barrow og Tipler (1986) [7], s. 312).

Størrelsen af de forskellige objekter på figur 2 og i tabel 2 spænder over ca. 40 størrelsesordener fordi gravitationen er så svag en kraft: $\alpha_G^{-1} \sim 10^{40}$. Formuleret lidt anderledes kan vi sige, at den gravitationelle finstrukturkonstant α_G 's overmåde beskedne størrelse er en *nødvendig* betingelse for, at der er plads i Universet til strukturer (og kompleksitet), men er ikke en *tilstrækkelig* betingelse for at der er sådanne strukturer.

Hvad vil det sige at “ændre på naturlovene”?

Ifølge Uzan (2003) [12] er der ikke videre eksperimentelt grundlag for at antage, at parametrene (naturkonstanterne) faktisk varierer – i tid og/eller rum – i vort univers. Der er altså tale om kontrafaktuelle undersøgelser i det følgende. I kontrafaktuel historieskrivning (“Hvad nu hvis...”) har bl.a. historikere og science fiction-forfattere leget med idéer om, at historiens gang kunne have været gået anderledes [10]. Ofte kan de diskussioner, der herved opstår, netop tjene til at belyse sagsforhold i den faktisk skete historie. Det er naturligvis svært at overskue hvad der kunne ske med den menneskelige historie, med dens indviklede kompleks af menneskelige drifter og visioner, hvis man blot ændrer på udfaldet af en enkelt begivenhed. Hvis det skal være undersøgelser af høj kvalitet, kræver det et enormt overblik over historiens mange mekanismer og mange medspillere. Hvad angår fysik og liv er det, rimeligvis, også meget svært at overskue (og det kræver et stort overblik over fysikken) hvad konsekvenserne bliver hvis man varierer naturlovene (på kontrollabel vis). Det er, alt andet lige, dog nok nemmere – og

nemmere at gøre til veldefinerede projekter med veldefinerede spørgsmål – i fysikken end i kontrafaktuel historieskrivning.

Holger Bech Nielsen, som er en dansk højenergifysiker, har i sit projekt “tilfældig dynamik” [11] prøvet at variere visse formmæssige strukturtræk i naturlovene og undersøgt om diverse (emergente) fænomener (og effektive love) er stabile (robuste) eller skrøbelige under sådanne ændringer⁷. Holger er i dette projekt altså vant til at prøve at overskue hvilke konsekvenser det har at ændre på fundamentale træk ved naturlovene.

Er den fysiske egenskab at have ‘lys’ i Universet fx strukturelt stabil under ændringer i fundamentale naturlove? Holger prøver at påstå at dette er tilfældet. Uanset hvad man, i fremtiden, vil opnå enighed om er hoved-resultaterne af Holgers (og andres) “tilfældig dynamik”-projekter, er der tale om meget interessante spørgsmål (udforsket i en række sammenhænge) og projektet er meget beslægtet med (men, i en vis forstand, dybere end) det projekt som vi skitserer her.

Lad os nu som annonceret vende os mod fænomenet liv som vi kender det – eller snarere en indkredsning af ting, der er nødvendige for liv, såsom at Universets naturlove skal muliggøre eksistensen af atomkerner, atomer, herunder fx brint og kulstof, vandmolekylet og større (organiske) molekyler osv. Den publicerede litteratur, der sætter sig som mål at undersøge stabiliteten af liv, under variation af naturlovene, er i dag ret omfattende. Disse studier går ofte under mystiske ord som ‘antropisk princip’, ‘multiverser’, osv. – se fx [6], [7], [8], [9], [13] og [14]. Her varierer man typisk kun få af parametrene (naturkonstanterne) i parametersystemet i naturlovene, mens man fastholder formen af naturlovene. Fælles for studier af denne art er, at man prøver at indkredse såkaldte “antropiske bånd”, hvor parameteren skal have en værdi indenfor intervallet sat af det “antropiske bånd”, for at muliggøre eksistensen af de strukturer (vi kender i Universet) som er vigtige for liv (som vi kender det). Samtidig prøver man – i projektet – at indkredse hvorledes Universet *kunne have været indrettet og konstrueret anderledes*, med andre værdier af parametrene.

Drastiske konsekvenser ved små ændringer af parametrene (naturkonstanterne)

Når man ser de forskellige overslag over størrelser af de udvalgte stabile objekter (udtrykt ved fundamentale naturkonstanter) i tabel 2 skulle man måske umiddelbart tro, at størrelsen af disse objekter *blot ville blive skaleret op eller ned*, hvis de indgående naturkonstanter blev ændret. Fx ses at alle objekter har karakteristiske størrelser angivet som dimensionsløse tal ganget med Bohr-radius. Den elektromagnetiske koblingsstyrke, α , indgår i Bohr-radius og man skulle tro, at objekterne blot skalerede med α . Men det forholder sig slet ikke så enkelt. Med selv små ændringer i værdien af α (og andre konstanter) kan det være, at der slet ikke er nogle atomer!

⁷Når vi ændrer på naturlovene, gør vi det med matematikkens (og logikkens) sprog uforandrede. Men man skal være opmærksom på, og huske at prøve at reflektere over, at disse sprog – fx matematikkens sprog – jo har en forankring i vort faktiske fysiske univers!

Lad os illustrere dette med et enkelt eksempel ved at gå lidt dybere ind i stoffets struktur og se på atomkernen. Atomkernen (en forudsætning for atomet) synes at være meget følsom og strukturelt ustabil overfor selv små ændringer i styrken af de subatomare vekselvirkninger (såsom den elektromagnetiske finstrukturkonstant α og styrken af den stærke kernekraft α_S) men også små ændringer i fx massen af u - og d -kvarkerne kan få atomkernen til at 'smuldre'.

Som bekendt har protonen (uud) og neutronen (udd) næsten samme masser: $m_p = 938,27 \text{ MeV}/c^2$ og $m_n = 939,57 \text{ MeV}/c^2$, med et meget lille masseoverskud til neutronen på godt en promille, ca. $1,3 \text{ MeV}/c^2$. Det er vigtigt at neutronen vejer denne promille mere! Det er meget kompliceret kernefysik at regne på disse forhold i detalje, men, lidt groft, kan man sige at hvis massen af neutronen var ca. en elektron- (= positron) masse mindre end massen af en proton ville protonen være ustabil (og kunne henfalde til en neutron og en positron) og der ville ikke være nogle atomer og derfor ingen kemi. Det er derfor vigtigt at $m_n > m_p$, men heller ikke for meget større, for så bliver neutronen for ustabil og den isotop af brint der har en ekstra neutron, deuterium, ville blive ustabil⁸.

At udregne protonens og neutronens masser med nogen nøjagtighed er meget kompliceret og langt det meste af massen (måske ca. 99 %) kommer faktisk fra kinetisk energi (dynamikken) af u - og d -kvarkerne og de kræfter (gluoner) der holder dem sammen⁹. Det er ikke underligt at styrken af disse kræfter - fx stærke og elektromagnetiske kræfter - spiller en stor rolle her. Man skulle egentlig tro (se Cahn (1996) [3], s. 953), at protonen var tungere end neutronen da der er ekstra elektromagnetisk energi i protonen pga. dens ladning. Men det viser sig altså (som ovenfor nævnt) at være omvendt, fordi d -kvarken er tilstrækkeligt meget tungere end u -kvarken så kvark-masseforskellen ($m_d - m_u$) netop er stor nok til at overvinde den ekstra Coulomb-energi i protonen. Hogan (2000) [15] anfører at stabiliteten af protonen kræver at $(m_d - m_u)/m_p \geq \alpha^{3/2}$ for at overkomme den ekstra elektromagnetiske energi af en proton relativt til en neutron. Man skal ikke justere meget på parametrene for at denne ulighed ikke længere er opfyldt.

Atomkernen er, endvidere, overmåde følsom overfor styrken af den stærke kernekraft (α_S). Et meget berømt eksempel er at He-2 kernen (der består af to protoner og derfor også kaldes "di-protonen") ikke er en stabil atomkerne. Men den mangler kun ca. $\sim 1/10 \text{ MeV}$ i at blive en bunden (stabil) tilstand (se fx Barrow og Tipler (1986) [7], s. 322; Davies (1982) [8], s. 68). Undersøgelser viser at hvis man øger styrken af den stærke kernekraft med under ~ 4 procent ville He-2 (di-protonen) blive bundet. I vor stjerne, Solen, sker

brintomdannelsen yderst langsomt, hovedsagligt fordi omdannelsen i den samlede reaktionskæde er bremset yderst kraftigt ned af en del-proces $p + p \rightarrow {}^2_1\text{D} + e^+ + \nu$ som foregår via de svage vekselvirkninger (en proton skal omdannes til en neutron, for at to protoner kan blive til deuterium, og det sker yderst langsomt). Hvis He-2 (di-protonen) var en stabil atomkerne, ville brint omdannelsen kunne foregå alene via de stærke vekselvirkninger, og brint omdannelsen ville foregå ca. en faktor 10^{18} hurtigere! (Davies (1982) [8], s. 71). Dette ville føre til et univers uden hydrogen. Dvs. uden vand, uden organisk kemi og uden liv (som vi kender det).

Eksemplet antyder at det ikke er muligt at ændre meget ved den stærke kernekraft og stadig have et univers med en sådan indretning at der fx kan opbygges en stjerne, der lyser i milliarder år (som den flotte stjerne der er vist på Kvants forside). Og med mulighed for at skabe en iagttager som Mr. Tompkins til at cykle rundt. I sine drømme om natten. I vort fængslende og dejligt levende univers.

Tak til Holger Bech Nielsen, Thomas Døssing og Igor Novikov for en snak om nogle af emnerne.

Litteratur

- [1] G. Gamow (1968), Tredive år, der rystede fysikken. Kvanteteoriens historie. Gyldendal.
- [2] G. Gamow (1942), Mr. Tompkins i Drømmeland. Eller historien om lille c, store G og lille h (tilegnet Lewis Carrol og Niels Bohr). Gyldendal.
- [3] R.N. Cahn (1996), The eighteen arbitrary parameters of the standard model in your Everyday life, *Rev. Mod. Phys.* **68**, No. 3, July 1996, p. 951-959, <http://phyweb.lbl.gov/~rncahn/www/rmp-18.pdf>.
- [4] M. Tegmark, A. Aguirre, M.J. Rees og F. Wilczek (2006), Dimensionless constants, cosmology and other dark matters, *Phys. Rev. D* **73**:023505, [arXiv:astro-ph/0511774](http://arxiv.org/abs/astro-ph/0511774).
- [5] W.H. Press og A.P. Lightman (1983), Dependence of macrophysical phenomena on the values of the fundamental constants, *Phil. Trans. Roy. Soc. Lond. A* **310**, 323 - 336.
- [6] B.J. Carr og M.J. Rees (1979), The anthropic principle and the structure of the physical world. *Nature* **278**, s. 605-612.
- [7] J.D. Barrow og F.J. Tipler (1986), The Anthropic Cosmological Principle. Oxford University Press 1986. Findes elektronisk på books.google.com.
- [8] P.W. Davies (1982), The accidental universe. Cambridge Univ. Press.
- [9] B. Carr (ed) (2007), Universe or multiverse? Cambridge Univ. Press.
- [10] Rasmus Dahlberg (2008), Hvad nu hvis... 40 alternative verdenshistorier. Forlaget Dingbat (www.dingbat.dk).
- [11] Holger Bech Nielsen: Har vi brug for fundamentale naturlove ? GAMMA (Niels Bohr Inst.) 36 og 37 (i to dele) 1979. Se også fx "Dual strings - Sec. 6 Catastrophe Theory Programme" (1976) optrykt i C.D. Froggatt og H.B. Nielsen "Origin of Symmetries". World Scientific (1991).
- [12] Jean-Philippe Uzan (2003), The fundamental constants and their variation: observational and theoretical status, *Rev. Mod. Phys.* **75**, 403-455.
- [13] Max Tegmark (1998), Is the theory of everything merely the ultimate ensemble theory, *Annals of Physics* **270**, s. 1-51; [arXiv:gr-qc/9704009v2](http://arxiv.org/abs/gr-qc/9704009v2).
- [14] H. Kragh, Higher speculations (2011). Oxford University Press. Fx kap. 9 Anthropic Science.
- [15] C. Hogan (2000), Why is the universe just so, *Rev. Mod. Phys.* **72**, s. 1149-1161; [arXiv:astro-ph/9909295v2](http://arxiv.org/abs/astro-ph/9909295v2).

⁸Deuterium er vigtig for brintfusion i stjerner. Fx producerer pp-reaktionen $p + p \rightarrow D + e^+ + \nu_e$ kun ca. $0,42 \text{ MeV}$ i energi, så hvis deuteriums masseækvivalente energi var $0,42 \text{ MeV}$ større, ville reaktionen ikke engang frigive energi, og ville have lyst til at løbe i den modsatte retning, se fx Hogan (2000) [15], s. 16.

⁹Bemærk, således, at hvile-energien af atomart stof (hvis hvile-masse jo hovedsagligt udgøres af nukleonerne) faktisk skyldes bevægelsen af de konstituentier/bestanddele (u -, d - kvarker og gluoner) som nukleonerne er opbygget af! Hvile-energien er altså slet ikke i hvile!