

Newtonsk gravitation: Fra orden til kaos

René Michelsen, Astronomisk Observatorium, Niels Bohr Institutet for Astronomi, Fysik og Geofysik.

Newtons gravitationslov,

$$F = -G \frac{Mm}{r^2}, \quad (1)$$

er et udtryk for kraften mellem to legemer (med masserne M og m), der befinder sig i afstanden r fra hinanden. Det var epokegørende at Newton kunne præsentere denne forholdsvis simple relation i den første udgave af "Principia" i 1687. Men mindst lige så vigtigt var det at Newton ud fra denne gravitationslov var i stand til at udlede Keplers tre love, som Kepler tidligere var nået frem til ud fra Tycho Brahes observationer. Keplers love beskriver, at planeterne i Solsystemet bevæger sig rundt om Solen i ellipseformede baner, på en regelmæssig måde. Men faktum er, at ligesom Keplers love kun gælder for den relative bevægelse af to legemer, gælder Newtons gravitationslov for kraften mellem to legemer. Vil man derfor behandle dynamikken af et system med mere end to legemer, som f.eks. Solsystemet, bliver den ellers simple og ordnede ligning (1) forvandlet til et yderst kompliceret system, hvor Keplers love kun er en approksimation til den faktiske dynamik.

Newtons gravitationslov har således givet, og giver stadig væk anledning til adskillige store hovedbrud. Vi skal således her se på nogle af de overraskende store udfordringer der ligger gemt i gravitationsloven.

Hvirvler og gravitation

Da Newton formulerede sin gravitationslov, var man ikke umiddelbart overbevist om dens rigtighed. Gravitationsloven var ganske vist en kvantitativ teori for vekselvirkningerne mellem planeterne og Solen og Keplers tre love kunne udledes fra den. Men samtidig var den ikke intuitivt indlysende, i og med at den ikke redegjorde for hvordan en kraft blev overført fra et legeme til et andet.

René Descartes havde tidligere fremsat sin hvirvelteori, en teori som sagde at rummet mellem planeterne var fyldt med noget særligt stof, æteren, som drejede rundt om Solen i nogle store hvirvler, og samtidig fik planeterne til at bevæge sig. Denne hypotese er intuitivt forståelig, da planeternes bevægelser således kunne forklares med påvirkningen fra et stof som selv i tidernes morgen var sat i bevægelse. Newtons gravitationslov er derimod en abstrakt størrelse, som opererer med det vage begreb "kraft", der i sig selv ikke giver nogen større forståelse af fysikken bag bevægelserne. Som sådan stiller gravitation større krav til den intellektuelle fantasi end hvirvler.

Begge disse hypoteser manglede dog overbevisende argumenter. Man havde observeret at kometerne bevægede sig i samme slags baner som planeterne, men på tværs af planetbanerne. Tilstedeværelsen af en æter måtte imidlertid betyde at kometerne pga. gnidningsmodstanden måtte blive bremsset op i deres bevægelse og falde ind mod Solen, hvilket dog ikke passede med det observerede.

Tilsvarende viste det sig at Newtons gravitationslov tilsyneladende ikke stemte overens med observationerne. Den kunne ganske vist redegøre for bevægelsen i store træk, svarende til Keplerbevægelsen, men der var nogle små variationer i planeternes bevægelser, udledt vha. tusind-år gamle observationer af planeterne og sol- og måneformørkelser. Disse variationer synes ikke umiddelbart at kunne hidrøre fra gravitationsloven alene.

Newton selv foreslog at disse variationer i især Månens bevægelse måtte skyldes ændringer i planeterne masser, som følge af gasser fra Solen og kometer der faldt ned på planeterne, eller også at Solen blev lettere med tiden. Et mere raffineret forslag blev fremsat af Clairaut (1713-1765, se også figur 1), som foreslog at gravitationskraften måtte beskrives ved et yderligere afstandsafhængigt $\frac{1}{r^4}$ -led, ud over det enlige $\frac{1}{r^2}$ -led i (1), en idé som også blev taget op af Leonhard Euler.

Men som det skulle vise sig, så var årsagen til forskellen mellem teori og observationer den, at man havde undervurderet problemets karakter. Newtons gravitationslov resulterer ganske vist i den smukke Kepler-bane, som en planet i kredsløb om Solen ville følge hvis de ellers var alene. Men planeten vekselvirker også med de øvrige planeter i Solsystemet, og disse vekselvirkninger er man også nødt til at tage højde for, når man vil opskrive den totale kraft, der virker på en given planet. Vekselvirkningerne mellem planeterne er dog blot små perturbationer, dvs. forstyrrelser, af vekselvirkningen planet-Sol. Det var derfor helt naturligt at man så bort fra disse små perturbationer. Perturbationerne har nemlig ikke kun den effekt, at de forstyrrer planeterne bevægelser og får dem til afvige fra Keplers love og de rene ellipsebaner: Perturbationerne gør også de ligninger man skal løse umådeligt komplicerede, og rent matematisk var tiden ikke moden til at håndtere perturbationsproblemer. Det var dog Clairaut, som i 1749 nåede frem til at man ved at forbedre sine approksimationer, teoretisk kunne redegøre for næsten hele Månens bevægelse, udelukkende ved brug af Newtons gravitationslov. At hans beregninger var yderst avancerede for hans tid afspejler sig i, at da Leonhard Euler i 1751

endelig forstod Clairauts metode, skrev han til ham, at *“Denne opdagelse er den vigtigste og mest dybsindige i matematikkens historie”*. For Clairaut havde ikke blot som den første beskrevet Månens bevægelse analytisk, han havde også vist at Newtons gravitationslov var nok til at redegøre for Månens bevægelse, og at der ikke var brug for hvirvelteorier eller $\frac{1}{r^4}$ -led, uanset hvordan kraftoverførslen mellem planeterne ellers fandt sted. Den analytisk-kritiske holdning sejrede således over hvad man intuitivt havde forventet.



Figur 1. Alexis Clairaut (1713-1765), den første til at redegøre for Månens bevægelse ud fra Newtons gravitationslov.

Solsystemets stabilitet

Perioden omkring Clairaut var i det hele taget præget af en stor udvikling, især drevet frem af den kendte matematiker Leonhard Euler, hans søn Johann Albrecht Euler, Charles Euler, Jean d'Alembert, Pierre-Simon Laplace og Joseph-Louis Lagrange, med udvikling af mere og mere raffinerede matematiske metoder. Laplace og Lagrange kunne hånd i hånd således udarbejde et bevis på Solsystemets stabilitet. De påviste at variationerne i den halve storakse, eccentriciteten og tangenten til inklinationen af planetbanerne, se boks 1, udelukkende var periodiske. Det betyder at planetbanerne ganske vist ændrede sig ifht. en Kepler-bane, men i og med at ændringerne var periodiske med begrænsede amplituder, ville Solsystemet være stabilt, dvs. planetbanerne ville se ud som de altid havde gjort.

Dette var samtidig udtryk for en deterministisk grundtanke; hvis man kendte planeternes tilstand til en given tid (dvs. deres masser, positioner og hastigheder), så ville man kunne beregne tilstanden til et hvilket som helst givet tidspunkt.

Boks 1. Baneelementer

I stedet for at beskrive en planets bevægelse ved dens position og hastighed kan man i stedet for benytte de såkaldte baneelementer. Af disse er

den halve storakse a halvdelen af ellipsebanens længde, og inklinationen i angiver hældningen af banen ifht. en referenceplan. Eccentriciteten e

fortæller noget om hvor meget banen afviger fra en cirkel. Er $e = 0$ er banen cirkelformet, er e tæt på 1 er banen meget elliptisk. For $e = 1$ og $e > 1$ er banerne hhv. paraboliske og hyperbolske.

Delaunays måneteori

Udvikling af de nye matematiske metoder førte også til udviklingen af den kanoniske perturbationsteori, hvor man behandler banevariationerne ved at undersøge perturbationerne af energien af systemet. Højdepunktet af disse metoder var Delaunays matematiske beskrivelse af Månens bevægelse (se boks 2). Delaunay var fra starten blevet frarådet at kaste sig over dette arbejde, da man mente at det ville overstige den menneskelige formåen. Men opmuntret af sine personlige støtter gik han igang med arbejdet, og 20 år senere, i 1860, blev første bind af hans beregninger publiceret, efterfulgt af andet bind i 1867. Hans arbejde er enestående, og et godt eksempel på udviklingen siden diskussionen om hvirvelteori kontra newtonsk gravitation.

Opdagelsen af Neptun

Gravitationsloven skulle prøves endnu engang. Uranus blev opdaget i 1781, men uregelmæssigheder i dens bane gav anledning til undren, og man begyndte at overveje om disse uregelmæssigheder kunne skyldes et $\frac{1}{r^4}$ -led, æteren eller en hidtil uopdaget planet. Man havde altså endnu ikke sluppet den gamle tankegang helt, men fandt det nærliggende at der ganske enkelt måtte være mere mellem himmel og jord end Newtons gravitationslov. Rent faktisk var et problem af denne art et omvendt perturbationsproblem. Hidtil havde man ud fra Newtons gravitationslov bestemt perturbationerne af en planets bane, og regnet sig frem til banen af planeten. Nu havde man observeret banen, og skulle så regne sig frem til perturbationerne.

Adams fra Cambridge og Leverrier i Paris regnede, uafhængigt af hinanden, frem til positionen af en evt. uopdaget planet. Adams var først med sine beregninger, ca. et år før Leverrier, men Leverrier sendte resultatet af sit regnestykke til bl.a. Galle i Berlin, som havde det nyeste og bedste stjerne kort til sin rådighed. Få dage efter, den 26. september 1846, kunne Galle som den første observere og identificere den nye planet, Neptun. Adams forsøgte også at sætte gang i en engelsk

eftersøgning af den uopdagede planet, men formåede ikke at få sine omgivelser til at foretage en helhjetet indsats.

Denne mangel på motivation vækker undren, og var årsag til de mest forbitrede stridigheder, både internt i England og på tværs af Den engelske Kanal. Ifølge Smart (side 28, se referencerne), skal direktøren for Cambridge observatoriet, James Challis, have sagt at *“det var så ny en ting at foretage observationer udelukkende i tiltro til teoretiske udledninger, og at mens det var sikkert at det ville involvere meget arbejde, synes succes at være tvivlsomt”*. Om Challis’ udtalelse blot er en dårlig undskyldning skal jeg lade være usagt.

Men hvis han mente det alvorligt, er det yderst interessant at den episode skulle opstå, netop i en periode, hvor den celeste mekanik gennemgik den største udvikling, rent matematisk, men hvor man endnu ikke havde vænnet sig til den nye tankegang. Newtonsk gravitation var stadig en mental udfordring 200 år efter “Principia”.

Netop opdagelsen af Neptun er der skrevet meget om, ikke mindst pga. de stridigheder, der opstod i kølvandet af opdagelsen. Desuden hævdes det af og til, at opdagelsen i høj grad skyldtes en række heldige omstændigheder. Men hvordan det end forholdt sig, så blev opdagelsen et stort mentalt fremskridt for den newtonske gravitation.

Boks 2. Eksempel på en rækkeudvikling

Dette eksempel er en forkortet udgave af Delaunays perturbationsfunktion for Månen, hvor man udover påvirkningen fra Jorden (de umærkede størrelser) medtager perturbationen fra Solen (de mærkede størrelser). Eksemplet går til anden orden i eccentriciteterne (e og e') og inklinationer (i og i' , $\gamma = \sin \frac{i}{2}$ og tilsvarende for γ'), og består af 25 periodiske led. Delaunays oprindelige system går til 8. orden, dog medtagende enkelte 9. og 10. ordens led, og består af 320 periodiske led. Til sammenligning går Jacques Laskars ligningssystem for planeterne i Solsystemet (undtagen Pluto) til 5. orden mht. eccentriciteterne og inklinationer, og til anden orden mht. planetmasserne, og består af 153.824 led, dvs. lidt mere end 6000 gange så mange led som vist i dette eksempel. Der er ca. 400 år imellem Keplers love om planeternes uperturberede bevægelse, og Laskars perturbationsligninger for planeterne i Solsystemet (undtagen Pluto).

$$\begin{aligned}
 R = n'^2 a^2 & \left[\frac{1}{4} + \frac{3}{8}e^2 + \frac{3}{8}e'^2 - \frac{3}{2}\gamma^2 + \frac{3}{4}e' \cos(\lambda' - \varpi') - \frac{1}{2}e \cos(\lambda - \varpi) - \frac{9}{4}e \cos(\lambda - 2\lambda' + \varpi) \right. \\
 & + \frac{21}{8}e' \cos(2\lambda - 3\lambda' + \varpi') - \frac{3}{8}e' \cos(2\lambda - \lambda' - \varpi') + \frac{3}{4}e \cos(3\lambda - 2\lambda' - \varpi) \\
 & + \frac{15}{8}e^2 \cos(2\lambda' - 2\varpi) + \frac{9}{8}e'^2 \cos(2\lambda' - 2\varpi') - \frac{63}{8}ee' \cos(\lambda - 3\lambda' + \varpi + \varpi') \\
 & - \frac{3}{4}ee' \cos(\lambda - \lambda' - \varpi + \varpi') + \frac{9}{8}ee' \cos(\lambda - \lambda' + \varpi - \varpi') - \frac{3}{4}ee' \cos(\lambda + \lambda' - \varpi - \varpi') \\
 & + \frac{51}{8}e'^2 \cos(2\lambda - 4\lambda' + 2\varpi') + \frac{3}{2}\gamma^2 \cos(2\lambda' - 2\Omega) + \left(\frac{3}{4} - \frac{15}{8}e^2 - \frac{15}{8}e'^2 - \frac{3}{2}\gamma^2 \right) \cos(2\lambda - 2\lambda') \\
 & - \frac{1}{8}e^2 \cos(2\lambda - 2\varpi) + \frac{3}{2}\gamma^2 \cos(2\lambda - 2\Omega) + \frac{21}{8}ee' \cos(3\lambda - 3\lambda' - \varpi + \varpi') \\
 & \left. - \frac{3}{8}ee' \cos(3\lambda - \lambda' - \varpi - \varpi') + \frac{3}{4}e^2 \cos(4\lambda - 2\lambda' - 2\varpi) \right].
 \end{aligned} \tag{2}$$

Den eftertænksomme periode

Selvom fremskridtene var særdeles store, så var der alligevel nogle detaljer, der manglede at komme på plads; newtonsk gravitation skulle også gennemgå en periode præget af eftertanke.

Først var der Leverriers opdagelse af Merkurs bane-drejning i 1855. Opdagelsen skulle vise sig at tilhøre en anden tid med andre udfordringer, i og med den først blev forklaret med Einsteins generelle relativitetsteori fra 1915. Rummets krumning er i sig selv en perturbation af den newtonske gravitation. Så i den forstand fik

skeptikerne, ironisk nok, ret i at der manglede et $\frac{1}{r^3}$ -led.

Anderledes problematisk forholder det sig med Solsystemets stabilitet. Laplace og Lagrange havde i deres arbejder opstillet analytiske udtryk for visse af baneelementernes opførsel. Disse udtryk bestod af rækkeudviklinger, dvs. summer af trigonometriske funktioner, jvfr. boks 2. Beviset var dog kun formelt, for i praksis havde man ikke nogen fornemmelse af om disse rækker var konvergente, dvs. om rækkeudviklingerne egentlig gav mening.

Henri Poincaré var en af de meget store bidragydere til den celeste mekanik; hans “Les Méthodes nouvelles

de la Mécanique céleste" i tre bind fra 1892-1899 lagde grundlaget for den efterfølgende udvikling, både inden for celest mekanik og inden for dele af matematikken. Poincaré tog konvergensproblemet under behandling, og kunne konkludere, at de anvendte rækkeudviklinger kun var semi-konvergente, dvs. de var kun gyldige under visse forudsætninger, og kun i begrænsede tidsintervaller. Med Poincarés resultat er det således ikke muligt at komme med nogen konklusion på Laplaces og Lagranges arbejde. Problemet med Solsystemets stabilitet var altså stadig åbent. Fremskridtet havde resulteret i ny viden, der havde reduceret den gamle.

Efter Poincaré kom der en ny tid, hvor udviklingen inden for den nu noget halte celest mekanik, ikke synede af meget i forhold til den eksplosive udvikling der fandt sted inden for andre dele af videnskaben, på trods af de væsentlige problemer, der endnu stod uløste. Den celest mekanik viste sig efterfølgende at kræve endnu en grad af abstraktion, og nå et endnu højere udfordringsniveau.

KAM-sætningen

Ideerne om kaos, der tog form i midten af det tyvende århundrede havde også deres afsmitning på astronomien. Et vigtigt resultat blev KAM-sætningen, fremsat af Kolmogorov i 1953, og bevist af Moser i 1962 og Arnold i 1963. Resultatet er en videreudvikling af Poincarés arbejde, men bygger på forholdsvis komplicerede matematiske metoder. Newtons gravitationslov var stadig det underliggende grundlag, selvom den kan synes forsvundet i abstraktionerne og de generelle metoder. KAM-sætningen siger, at under visse betingelser vil det for et perturberet system være muligt at finde løsninger til systemet. Dvs. at hvis planeterne i Solsystemet opfylder KAM-sætningens betingelser, vil det være muligt at opnå gyldige beskrivelser af planeterne baner. For stabilitetsproblemet vedkommende er KAM-sætningen dog blot et springbrædt til den videre udvikling. Det er nemlig ikke bevist at Solsystemets planeter opfylder KAM-sætningen, så umiddelbart er man ikke nået løsningen nærmere. Men man er begyndt at få en fornemmelse af den overordnede dynamik, og af at der måske skal nogle meget radikale og nye værktøjer til.

Kaos i Solsystemet

Det var først ved fremkomsten af tilstrækkelig digital regnekraft, at man kunne undersøge gravitationsloven direkte, uden først at være tvunget til at opskrive de store analytiske udtryk fra den traditionelle celest mekanik. De første spæde beregninger af planeterne baner blev foretaget omkring 1980'erne, hvor man beregnede banerne over perioder af nogle millioner år. Selv dette er dog en ikke-triviell opgave, da de ydre planeter bevæger sig meget langsomt, mens Merkur løber igennem sin bane utroligt hurtigt. Når man regner direkte på den newtonske gravitationslov er systemet

derfor forholdsvis inhomogent, hvilket vanskeliggør, ja nærmest umuliggør, beregningerne for de lange tidsperioder man har brug for, for at kunne følge planetbanerne, og afgøre om Solsystemet er stabilt.

Gennembruddet kom i 1989, som følge af et særdeles usædvanligt arbejde udført af Jacques Laskar. Laskar anvendte en kombination af de klassiske rækkeudviklinger og computerkraft. Først udviklede han et computerprogram der kunne hjælpe ham med at håndtere de store udtryk. Han brugte dette program på Solen og planeterne i Solsystemet (undtagen Pluto), og opskrev ligningerne for variationerne i baneelementerne, heriblandt eccentriciteterne og inklinationer, som følge af planeterne indbyrdes vekselvirkninger.

Resultatet af dette var et overordentligt stort ligningssystem, som passende kunne anvendes til at beskrive planeterne bevægelser. Fordelen ved dette system er, at man i stedet for at beregne planeterne positioner i deres baner, ser på variationerne af formerne af banerne. Således har dette vældige ligningssystem, på trods af den uhyre kompleksitet, en homogen struktur, og kan fodres ind i en computer, der kan fortælle noget om, hvordan Solsystemet ændrer sig dynamisk over perioder på millioner, ja endog milliarder, af år.

Den første konklusion på dette arbejde blev præsenteret i en beskeden artikel i Nature i 1989, hvor Laskar kunne berette, at Solsystemet er overordentligt kaotisk, i forhold til dets forventede levetid.

Dette illustreres meget fornemt af hans anden konklusion fra 1994, nemlig at det ved en udvalgt serie af beregninger lykkedes at smide Merkur ud af Solsystemet. Man skal dog være forsigtig med at konkludere noget direkte ud fra disse beregninger, for systemets kaotiske natur tillader ikke nogen direkte konklusion på stabilitetsproblemet.

Hvor man i tiden efter Newton, med højdepunktet i Lagranges og Laplaces arbejde, forventede at Newtons gravitationslov rummede svaret på alt vedrørende ting der bevægede sig, har man siden fremlæggelsen af KAM teorien og ideen om kaos, taget udgangspunkt i netop den kaotiske natur af systemerne. Laskars arbejde er revolutionerende, i og med man med dette arbejde har fået en håndfast demonstration af Solsystemets kaotiske natur. Stabilitetsproblemet er således blot en del af det overordnede aspekt af dynamikken af planeterne i Solsystemet. Om Solsystemet er stabilt eller ej er ikke noget man skal forvente at få et direkte svar på, problemet i dets oprindelige formulering hører groft sagt til Laplaces og Lagranges tid. Til gengæld har den menneskelige forståelse af Newtons gravitationslov taget endnu et stort skridt fremad.

En renaissance inden for den celest mekanik ses netop for tiden, hvor man med stor energi, med den nye forståelse i ryggen, studerer dynamikken af asteroider og kometer. Ikke mindst de såkaldte "Near-Earth Objects", NEO'er, har stor bevågenhed, da de er objekter som udgør en potentiel risiko for at kolliderer med Jor-

den. Disse småplaneter udviser en lang række interessante dynamiske egenskaber, der skyldes deres små masser, og deres baner, som bl.a. går på tværs af Sol-systemets store planeter.

Perspektiv

Den fornyede interesse for dynamiske problemer i Sol-systemet gør det ekstra interessant at forsøge at se udviklingen lidt fra oven. Man kan ofte gribe sig selv i at overse Newtons gravitationslov, hele den udvikling den har medført, og den fundamentale fysik der ligger i den. Men jeg synes at man af og til skylder sig selv, og ikke mindst Newton og hele den celeste mekanik, at tænke lidt tilbage på hvordan det hele startede, på den enorme udvikling der har fundet sted, og på de imponerende resultater og fundamentale erkendelser man har opnået, ikke mindst i vores egen tid.

Hvis man gik og troede at newtonsk gravitation var en simpel sag, og et hurtigt overstået kapitel, håber jeg hermed at have vist det modsatte.

Referencer:

- [1] Jeff A. Suzuki (1996) "A history of the stability problem in celestial mechanics from Newton to Laplace (1642-1787)", PhD afhandling, Boston University.
- [2] W. M. Smart (1947) "John Couch Adams and the discovery of Neptune", Royal Astronomical Society.
- [3] R. Michelsen (1996) "Kaos i Solsystemet", Gamma nr. 103.
- [4] R. Michelsen (1998) "C.-E. Delaunay og hans måneteor", Gamma nr. 109.

- [5] R. Michelsen (1999) "En ny metode til analyse af Jord-Måne-Sol systemet", Gamma nr. 113.
- [6] H. Poincaré (1892, 1893, 1899) "Les Méthodes Nouvelles de la Mécanique Céleste", Gauthier-Villars.
- [7] C. E. Delaunay (1860) "Théorie du mouvement de la Lune, premier volume, Mallet-Bachelier, Paris, se også Mémoires de l'Académie des Sciences, Tôme XXVIII.
- [8] C. E. Delaunay (1867) "Théorie du mouvement de la Lune", deuxième volume, Gauthier-Villars, Paris, se også Mémoires de l'Académie des Sciences, Tôme XXIX.
- [9] J. Laskar (1989) "A numerical experiment on the chaotic behaviour of the solar system", Nature, bind 338, side 237-238.
- [10] J. Laskar (1994) "Large-scale chaos in the solar system", Astron. Astrophys., bind 287, side L9-L12.
- [11] Billedet af Clairaut er fra St. Andrews, www-groups.dcs.st-and.ac.uk/XXXXXXhistory/Mathematicians/Clairaut.html



René Michelsen, er Ph.D. studerende ved Astronomisk Observatorium, Niels Bohr Institutet for Astronomi, Fysik og Geofysik.

Nyt fra Selskabet for Naturlærens Udbredelse

Selskabet for Naturlærens Udbredelse

Hjemmeside: www.snu.nbi.dk

Direktionen for SNU udgøres af:

Professor Dorte Olesen (formand)
UNI-C
Vermundsgade 5
2100 København Ø
E-mail: bente.egaa@uni-c.dk
Tlf. 35 87 88 04

Professor Søren Brunak

Professor Poul Erik Hansen

Lektor Erik Schou Jensen

Direktør, adjungeret professor Ole Mørk Lauridsen

Lektor Malte Olsen

Lektor Finn Berg Rasmussen

Lektor Jørn Johs. Christiansen (sekretær)



Efterårsprogram i SNU

Efterårets mødeprogram har "Modellering" som gennemgående tema – taget i bred forstand:

Mandag, den 30. oktober:

Virksomhedsbesøg med modelleringstema.

Tid og sted annonceres senere.

Mandag, den 20. november kl. 19.30:

Foredrag om grundvandsmodellering.

v/Lektor Ole Larsen, Geologisk Museum.

Foredraget holdes på Geologisk Museum.

Mandag, den 11. december kl. 19.30:

Solsystemets opståen

v/Lektor Jens Martin Knudsen, Ørsted Laboratoriet.

Foredraget holdes på H.C. Ørsted Instituttet.

Alle er velkomne til selskabets foredrag. Forespørgsler angående møderne kan rettes til Bente Egaa, UNI-C, tlf. 35 87 88 04 eller e-mail: bente.egaa@uni-c.dk. Eventuelle ændringer i programmet kan læses på SNUs hjemmeside: www.snu.nbi.dk