

Den Internationale Rumstation og Danmark – Tredje Del: Lynjægeren ASIM

Carol Anne Oxborrow, DTU Space

I de første to dele af min artikel om Danmarks deltagelse i ISS, den Internationale Rumstation, gav jeg en kort beskrivelse af selve ISS'en og fortalte om nogle eksperimenter udført af Andreas Mogensen, som min forskningsgruppe og jeg selv har været med i. I denne tredje og sidste del fortæller jeg om en mangeårig dansk-ledet mission, der hedder ASIM – “Atmosphere/Space Interactions Monitor” – og som blev opsendt i april 2018.



Figur 1. ASIM i sin oprindelige nadir-observationsstilling, 2018.

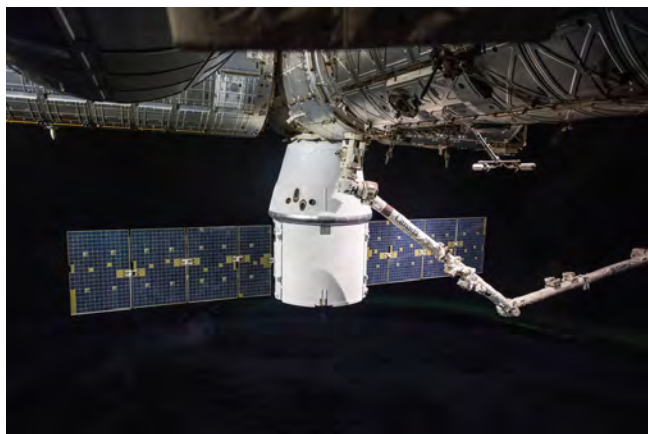
På DTU Space har vi i mange år haft en meget aktiv og verdenskendt forskningsgruppe ledet af Torsten Neubert og Olivier Chanrion, der undersøger elektriske begivenheder, der sker ovenover verdens kraftigste stormskyer. Disse energiske, elektriske udladninger hedder kollektivt “Transient Luminous Events” (TLE'er) – eller på dansk “kortvarige lysudsendende begivenheder”, eller bedre sagt “kæmpelyn”. Der er faktisk mange forskellige slags kæmpelyn: røde feer, der hænger over lynskyerne som et bundt gulerødder; de store blåstråler, der skyder fra skytoppene til ionosfæren; de små, blå flimrende lys, der danser rundt om toppene af de høje, tårnformede stormskyer; de sjældne, ringformede elver, og mest mystiske af dem alle sammen: “Terrestrial Gamma Flashes” (TGF'er), eller jordlige gammastråleglimt. TGF'erne har energi nok til at udsende gammastråling, som er den mest energirige form for lys.

Indtil 2018 havde DTU's Atmosfæriske Elektricitetsgruppe undersøgt disse forskellige fænomener fra Jordens overflade ved at oprette automatiske kamera-

systemer på høje bjerge, hvorfra de kunne overvåge området ovenover stormsystemer, der samlede sig over det lavereliggende landskab omkring bjergene. Olivier Chanrion er gruppens kameraspecialist og har bygget adskillige automatiske kamerasystemer for at forstå de røde feer over Frankrig og Middelhavet. Men denne teknik er problematisk, hvis man vil undersøge det mindst forståede fænomen af dem alle sammen – TGF'en. Gammastråling bliver stærkt absorberet af atmosfæren (heldigvis for menneskeheden), og derfor kan de ikke ses fra bjergtoppen, hvor et kæmpelyn kan være 100 km eller mere fra kameraet.

Omkring 2005 besluttede gruppen derfor at kombinere to af DTU Spaces spidskompetencer: kæmpelynobservationer og røntgen- og gammastrålingsinstrumentering, som er brugt på JEM-X-instrumenterne på ESA's Integralsatellit-observatorium. I stedet for at kigge ud i rummet for at opdage neutronstjerner, sorte huller, og kosmiske gammaglimt, ville det nye observatorium kigge ned på Jorden og opdage mystiske, jordlige

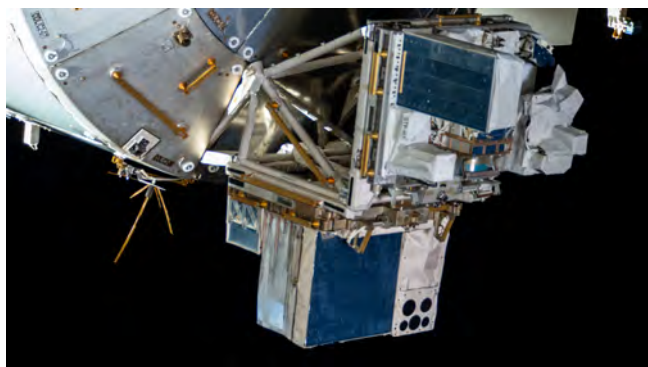
gammaglimt fra stormskyer. ASIM fik sit navn, fordi vi ville studere de øverste lag af Jordens atmosfære, der hvor Jorden møder rummet.



Figur 2. Space-X Drage-kapslen sættes på plads af "Canada-armen". Foto: NASA/ESA/DTU Space.

Projektet ledes af DTU Space i samarbejde med partnere fra Norge og Spanien. Birkeland Centre for Space Science hos Bergens Universitet byggede højenergi-detektorerne og billedbehandlings-laboratoriet på Valencias Universitet bidrog med kodetmaske-teknologi til at lave røntgenstrålingsbilleder. Figur 3 i Del 2 af "Den Internationale Rumstation og Danmark" viser, hvordan ASIMs røntgenkodede maske ser ud. En detaljeret beskrivelse af denne teknik, og hvordan MLH-billeder dannes, findes i [3].

De færdiglavede ASIM-instrumenter blev opsendt i april 2018 i en Drage-kapsel med en Space-X Falcon-9-raket. Den ubemandede kapsel blev ført til sin dockningsplads af den store robotarm "Canada-arm", som vist i figur 2.

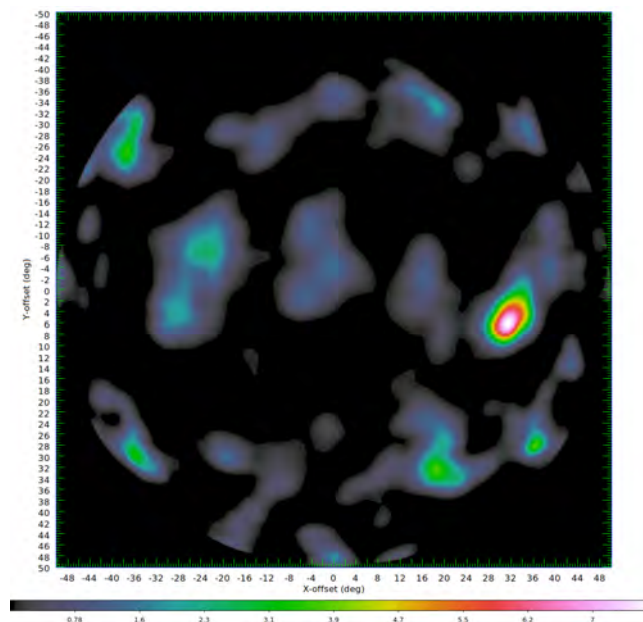


Figur 3. ASIM i horisont-observationsstilling 2022. Foto: NASA/ESA/DTU Space.

På det tidspunkt var ASIM i den nederste del af kapslen, som er åben til rummet, således at luft og damp i instrumenter, der placeres udenfor ISS, kan fordampe inden de startes. Den øverste kegleformede del af kapslen har lufttryk på til alt udstyr, der skal ind i ISS og ikke kan tåle vakuum. Bare at fortælle om alle de indviklede processer og spændende begivenheder omkring opsendelsen og dockningen kunne være en artikel i sig selv, men her holder jeg mig mest til ASIM's forskningsresultater.

Efter 10 dage i kapslen blev ASIM sat fast på et stativ for enden af Columbusmodulet, således at ASIM kunne kigge direkte ned til Jorden, altså i "nadir"-retning som vist i figur 1. Instrumenterne kan se et område, der svarer til omkring 400 km gange 400 km på Jordens overflade direkte under ISS, og vi kan monitorere atmosfæren mellem breddegraderne 51 grader nord til 51 grader syd [1].

ASIM-instrumenterne består af to optiske videokameraer, der filmer ved henholdsvis røde (777 nm) og blå (337 nm) bølgelængder. Den første bølgelængde er typisk for selve lyn-kanalen, der fører strøm fra sky til jord eller fra sky til sky, og kaldes for "leder" (leader), mens det blå lys er typisk for små flimrende lyn-kanaler omkring lederens spids, der hjælper med at forlænge lederen. De kaldes for "strømmere" (streamers). De to bølgelængder kan også skelne mellem røde feer og blåstråler. Ved siden af de to kameraer, der kan danne 12 billeder i sekundet, har vi tre fotometre. Disse instrumenter samler fotoner uden at danne billeder. De registrerer derfor ikke, hvor fotonerne stammer fra i synsfeltet, men til gengæld har de meget fin tidsopløsning, da de udlæses 100.000 gange i sekundet. De tre fotometre måler i blå og rødt lys ligesom kameraerne, og også i UV-lys (240 nm), som kan registrere andre fænomener som fx elvere. Disse optiske kameraer og fotometre hedder tilsammen MMIA (Modular Multispectral Imaging Array) og bruges til at identificere adskillige former for TLE'er. I figur 3 ser man ASIM, efter at den blev flyttet til Horisont-observationsstillingen, og MMIA-instrumenterne kan ses nederst til højre – tre små, sorte cirkler og to lidt større [2].

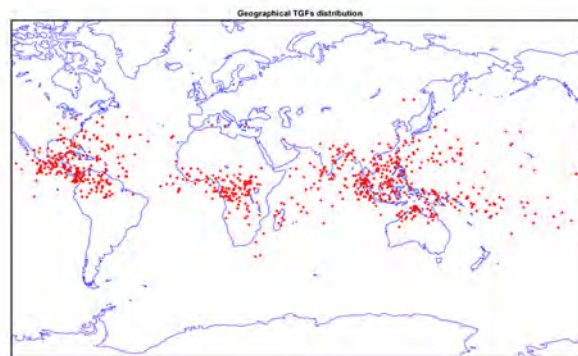


Figur 4. Et røntgen-sandsynlighedsbillede af en TGF observeret med MXGS. Billede: Paul Connell, IPL, University of Valencia.

Ved siden af MMIA ses den store, firkantede solskærm, der dækker MXGS-instrumenterne ("Modular X- and Gamma-Ray Sensors"), der består af to detektorer – en til røntgenstråling (50–400 keV) og en til gammastråling (300 keV – 40 MeV).

Ligesom fotometrene kan gammastrålingsdetektoren tælle fotoner meget hurtigt, men kan ikke danne billeder. Til gengæld kan røntgendektoren lave en slags billede kaldet et Maximum Likelihood Image (maksimalt sandsynlighedsbillede), der har ganske grov vinkelopløsning, men kan lokalisere en TGFs position indenfor synsfeltet [3].

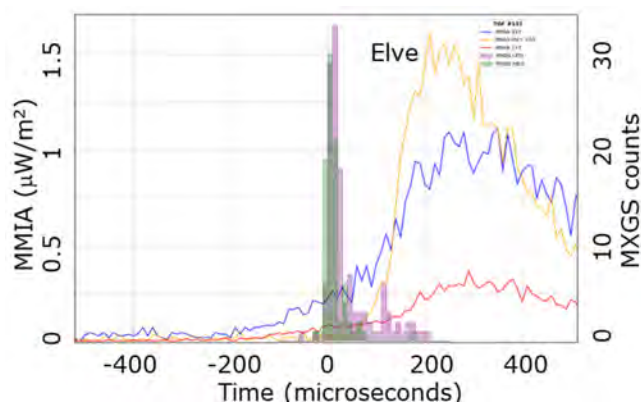
Figur 4 viser et typisk sandsynlighedsbillede af en TGF observeret af MXGS. Det er ikke et portræt af begivenheden – det viser bare, hvor sandsynligt det er, at de 37 målte røntgenfotoner stammer fra hvert område i synsfeltet. Den store hvide plet viser, hvor det er mest sandsynligt, og med denne oplysning kan vi sammenligne vores TGF-aktivitet med samtidig lynaktivitet på samme sted som set med jordbaseret lynnetværk. De 37 fotoner giver et flot resultat med et TGF-signal 5,9 gange stærkere end baggrundssignalet. Valencia-holdet har dog fundet langt mindre sikre resultater med færre fotoner, men teknikken er begrænset til TGF'er, der er stærke nok til at lande et par snese fotoner på MXGS's detektor.



Figur 6. Verdenskort over jordiske gammaglimt målt af MXGS mellem 2018 og 2022. Figur: Nikolai Østgaard, University of Bergen.

De tre områder, hvor TGF'erne samler sig, dækker områder, der kaldes for Jordens "lynkorsten" – de tre steder i verden med de fleste og mest energirige uvejr: midt/centralamerika, centralafrika og det sydøstlige Asien. Der er dog et område, hvor der skulle være en rigdom af TGF-data, som vi desværre ikke kan måle: det østlige Brasilien ligger tæt på et område kaldet "South Atlantic Anomaly" (SAA), hvor partikelstråling fra Jordens strålingsbælte er usædvanligt stærk, især omkring ISS's bane på 400 kilometers højde. Her er vi nødt til at slukke for instrumenterne for at beskytte dem fra, ironisk nok, elektriske overslag forårsaget af de ladede partikler fra Solen. Vi kan dog måle TGF'er over Venezuela, der er kendt for hyppigheden af uvejr omkring Lake Maracaibo, der er geografisk placeret til at maksimere lydennelse. Her har vi set en TGF med kælenavnet "Uhyret".

For at forstå, hvordan målinger i alle 5 bølgelængder er vigtige for en dybere forståelse af processerne, der fører til TGF'er, skal man kigge på figur 7, der viser de 5 lyskurver fra en stærk TGF set tæt på Indien. Lyskurverne viser, hvor meget energi eller hvor mange fotoner, der måles af de 5 typer lys, efterhånden som tiden går – men selv uden billeder kan man forstå en hel del, hvis tidsopløsning er fin nok. I denne figur er alle tider givet i forhold til ankomsttiden for de første røntgenstrålingsfotoner.



Figur 7. Lyskurver i 5 bølgelængder fra lyn, en TGF og efterfølgende elver: Blå (337 nm, blått lys); Rød (777 nm, rødt lys); Gul (240 nm, UV lys); Grøn (gammastråling); Lilla (røntgenstråling). Figur: Matthias Heumesser/DTU Space.



Figur 5. ASIM Science Data Centre's hjemmeside. Billede: ASDC/DTU Space.

Vores samarbejdspartnere i Bergen bidrager også med dataanalyse ved at gennemgå alle vore data for at finde og karakterisere TGF'er, og deres resultater udgives hver måned i et katalog på ASIM Science Data Centres (ASDC) webside: https://asdc.space.dtu.dk/tgf_catalogue/, der kan bruges af ASDCs registrerede brugere.

ASDC er placeret på DTU Space, og det er her, ASIM-data behandles og udgives til verdens kæmpelynforskere. For at downloade selve de videnskabelige data, skal man have et godkendt lynforskningsprojekt. Men der er flere sider på ASDC-websitet, som er tilgængelige for alle, såsom nyhederne [4] og publikationerne [5]. På den sidstnævnte side kan man finde alle referencerne fra denne artikel.

Siden 2018 har ASIM observeret over 1700 TGF'er med sikre positioner og data målt i 5 bølgelængder. Det er en sand skattekasse af data om et fænomen, der først blev opdaget ved en tilfældighed i 1990. ASIM er det første eksperiment, der målrettet er gået på jagt efter TGF'er. Et verdenskort over vores målte TGF'er viser klart, at disse enormt energirige begivenheder forekommer i verdensdelene med de mest voldsomme uvejr, se figur 6.

I figur 7 kan vi se et kompliceret drama, der udfolder sig og forsvinder igen på under to millisekunder. De røde og blå linjer følges ad og viser, hvordan et almindeligt lyn højt oppe i skyen udvikler sig fra omkring 200 mikrosekunder, før TGF'en indtræffer. Der er faktisk to ledere her: en negativ én, der bevæger sig opad imod den positive leder, der søger nedad. På et tidspunkt ($t=0$) nærmer spidserne sig således, at der er et kort øjeblik, hvor et stærkt elektrisk felt mellem de to ledere voldsomt accelererer frie elektroner. De hurtige elektroner bremses af atomerne i den tynde atmosfære, og dermed udsendes gammastråling, der hurtigt absorberes og spredes af andre molekyler og genudsendes som røntgenstråling. Elektronlavinen, der skabes under disse sammenstød, udsender en radiobølgepuls, kaldet en EMP (Elektromagnetisk Puls), der ikke kan ses direkte af ASIMs instrumenter, men som ses som UV-lys fra en elver, når denne puls rammer ionosfæren ($t \sim 200 \mu\text{s}$). Disse processer foregår så hurtigt, at de er overstået, inden det oprindelige lyn, der forårsagede det hele, når sin højeste aktivitet. Et almindeligt lynnedslag varer omkring et halv sekund, mens en TGF som denne varer i mindre end 0.2 millisekunder [7].

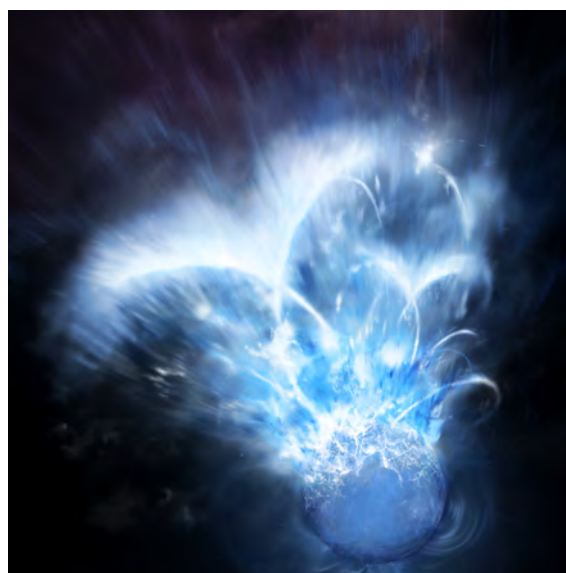
Denne forklaring af de mystiske TGF'er og deres mikroskopiske processor blev publiceret i Science og kom på forsiden takket være vores norske partnere, der fik lavet en animation, der viser disse begivenheder – det voksende lynnedslag, EMP, elven og gammastråling, som er vist med lyserøde partikler. Videoen kan ses på Vimeo <https://vimeo.com/384767040>, og billedet fra filmen på Sciences forside vises i figur 8. Det må understreges, at billedet er en animationkunstners fortolkning af ASIMs data, ikke selve data.



Figur 8. En kunstners fortolkning af TGF-processerne set med ASIM, som vist på forsiden af tidsskriftet Science, januar 2020. Billede: Birkeland Centre for Space Science, Daniel Schmelling/Mount Visual.

Siden 2018 har ASIMs data og forskere oplyst mange andre lynbeslægtede fænomener: blå korona-begivenheder, elektronstråler, overskydende skytopper,

rollen af kyster og bjerge i TGF-dannelse, ELVE-dannelse, leder- og strømmer-dannelse, smalle bipolarer begivenheder osv. Men den mest uventede kilde for ASIMs detektorer var en særlig slags neutronstjerne med et enormt stærkt magnetfelt, en såkaldt magnetar. Gammastrålingssignalet fra stjernen dukkede op, fordi gammastråling kan gå igennem ISS og ASIM og ramme ASIMs BGO-detektor fra rummet, selv når instrumentet kigger ned mod Jorden. Denne 2-sekunders puls af ekstremt højenergi lys stammer fra en magnetar, der havde et voldsomt magnetisk udbrud. Så stor en puls blev set af adskillige astronomiske satellitter, f.eks. Fermi, der er på jagt efter netop denne slags. Men disse røntgen- og gammastrålingsobservatorier havde et problem med at se GRB 200415 (den første kosmiske Gamma Ray Burst den 15. april 2020) – den var for lysstærk, således at dens top blev overeksponeret. MXGS kan dog behandle mere end 100 fotoner i en brøkdel af et millisekund. Så selvom MXGS ikke kunne lokalisere denne GRB som de astronomiske instrumenter, kunne det i hvert fald se detaljerne i pulsen såsom vibrationer ved 2.132 Hz og 4.250 Hz. Den primære puls varede kun 3,2 millisekunder – men det er langt i forhold til ASIMs sædvanlige mål [8].



Figur 9. En kunstners forestilling af GRB200415 set med MXGS. Billede: Birkeland Centre for Space Science, Daniel Schmelling/Mount Visual.

En magnetar som den, der dannede GRB200415, har et magnetfelt, der er op til 2×10^{15} gange stærkere end Jordens. Når feltlinjerne bliver viklet rundt om hinanden, er det som at tage en tyk elastik og trække i enderne, indtil den går i stykker. Enderne flyver hurtigt væk fra hinanden og resten vibrerer i en kort periode derefter. I GRB200415's tilfælde kunne man beregne, at neutronstjernen har en masse omkring 1,4 gange Solens masse og en diameter på omkring 20 km. At studere disse magnetiske udbrud er meget vigtigt, hvis man vil forstå neutronstjerner, fordi det er ikke alle, der har så stærkt et magnetfelt – nogle er "bare" 10^{12} gange stærkere end Jordens magnetfelt. Det afgørende spørgsmål er, om alle neutronstjerner fødes med et hyperstærkt magnetfelt, der falder med tiden ved

at udsende deres energi i udbrud som GRB 200415. Hvis det er tilfældet, kan vi finde en neutronstjernes alder ved at måle dens magnetfelt. Ud fra ASIM's måling, udsendte udbruddet kaldet GRB 200415 samme mængde energi, som Solen udsender på 100.000 år – sikkert nok til at svække en lille neutronstjerne. Heldigvis kan vi opleve noget af denne enestående begivenhed, fordi ASDC-gruppen i Bergen igen har fået lavet en kunstners forestilling, baseret på ASIMs 3,2 ms data, som set i figur 9. Bemærk, at den ekstremt lysstærke neutronstjerne virker mørk i forhold til det magnetiske udbrud.

ASIM har været en meget produktiv mission, og jeg har kun fortalt om et par af de videnskabelige højdepunkter. Der er langt mere at fortælle, men de interesserede kan finde det hele på ASDCs webside [4,5]. Seks og et halvt år efter opsendelsen venter vi på at høre, om missionen kan forlænges efter marts 2025 eller ej. Som altid med rummissioner ved man aldrig, hvad der kan ske i morgen.

Litteratur

- [1] T. Neubert, N. Østgaard, V. Reglero, E. Blanc, O. Chanrion, C. A. Oxborrow m.fl. (2019) “The ASIM Mission on the International Space Station”, *Space Science Review*, bind **215**, 26.
- [2] O. Chanrion, T. Neubert, I. Rasmussen, C. Stoltze, D. Tcherniak, N.C. Jessen, J. Polny, P. Brauer m.fl. (2019) “The Modular Multispectral Imaging Array (MMIA) of the ASIM Payload on the International Space Station”, *Space Science Review*, bind **215**, 28.

- [3] N. Østgaard, J.E. Balling, T. Bjørnsen, P. Brauer, C. Budtz-Jørgensen, W. Bujwan, B. Carlson, F. Christiansen m.fl. (2019) “The Modular X- and Gamma-Ray Sensor (MXGS) of the ASIM Payload on the International Space Station”, *Space Science Review*, bind **215**, 23.
- [4] https://asdc.space.dtu.dk/newsfeed/news_list/
- [5] <https://asdc.space.dtu.dk/publications/>
- [6] A. Castro-Tirado, N. Østgaard, E. Göğüş, C. Sánchez-Gil, J. Pascual-Granado, V. Reglero, A. Mezentssev, M. Gabler m.fl. (2021) “Very-high-frequency oscillations in the main peak of a magnetar giant flare”, *Nature*, bind **600**, side 621–624.
- [7] T. Neubert, N. Østgaard, V. Reglero, O. Chanrion, M. Heumesser, K. Dimitriadou, F. Christiansen, C. Budtz-Jørgensen m.fl. (2020) “A terrestrial gamma-ray flash and ionospheric ultraviolet emissions powered by lightning”, *Science*, bind **367**, side 183–186.



Carol Anne Oxborrow er fysiker, ph.d. Hun har arbejdet på DTU Space i 26 år med adskillige rummissioner: INTEGRAL, Planck, ASIM, MIRI på JWST og nu ATHENA WFI, der skal opsendes i 2038. Carol Anne er leder af ASIM Science Data Centre og forskningsgruppen for Atmosfærisk Elektricitet på DTU Space, samt viceleder af Afdelingen for Astrofysik og Atmosfærens Fysik.

Kommende foredrag

Dato	Tid	Foredragstitel	Foredragsholder	Forening
Februar 2025				
4/2	18.15	Stjerneudvikling frem til kompakte objekter	Anja Andersen	AS (Kbh.)
11/2	18.15	Neutronstjerner (på engelsk)	Irene Tamborra	AS (Kbh.)
18/2	18.15	Novaer og hvide dværge (på engelsk)	Luca Izzo	AS (Kbh.)
25/2	18.15	X-ray binaries	Jérôme Chenevez	AS (Kbh.)
Marts 2025				
4/3	18.15	Neutronstjerner og kilonovaer	Rasmus Damgaard Nielsen	AS (Kbh.)
Maj 2025				
14-15/5		DFS Årsmøde	Afholdes på DTU	DFS

AS (Kbh.): CSS, Gammeltoftsgade 15, 1355 København K. Lokale: 35.-1.05 (astronomisk.dk).

Medlemmer af AS får tilsendt et nyhedsbrev, før foredragsrækken går i gang med information om tilmelding. Andre interesserede kan tilmelde sig foredragsrækken “Neutronstjerner og hvide dværge” via Folkeuniversitetet i København.

SNU: Annoncering af SNU's foredrag kan ses på hjemmesiden www.snu.dk i løbet af foråret 2025. Også i 2025 vil foredragene blive optaget på video og lagt ud på SNU's YouTubekanal.

Wieth-Knudsen Observatoriet, Margot Nyholms Vej 1, 3220 Tisvildeleje, har åbent hus-arrangementer med gratis adgang to lørdage om måneden. De kommende datoer er 11/1, 25/1, 8/2, 22/2, 8/3, 29/3 og 12/4. Se nærmere på astronomisk.dk/wieth-knudsen-observatoriet.