

Pulses from High Harmonic Generation”, *Science*, bind 292, side 1689–1692.

- [4] K. Iwaszczuk, M. Zalkovskij, A. C. Strikwerda og P. U. Jepsen (2015) “Nitrogen plasma formation through terahertz-induced ultrafast electron field emission”, *Optica*, bind 2, side 116–123.
- [5] C. R. Arumainayagam, H.-L. Lee, R. B. Nelson, D. R. Haines og R. P. Gunawardane (2010) “Low-energy electron-induced reactions in condensed matter”, *Surf. Sci. Rep.*, bind 65, side 1–44.



Peter Uhd Jepsen er professor og vicedirektør på Institut for Fotonik, Danmarks Tekniske Universitet. Han forsker i ultrahurtige optiske fænomener, med speciale i ikke-lineær optik, femtosekund-lyskilder og deres anvendelser i terahertz-området, som ligger i grænselandet mellem mikrobølger og infrarødt lys.

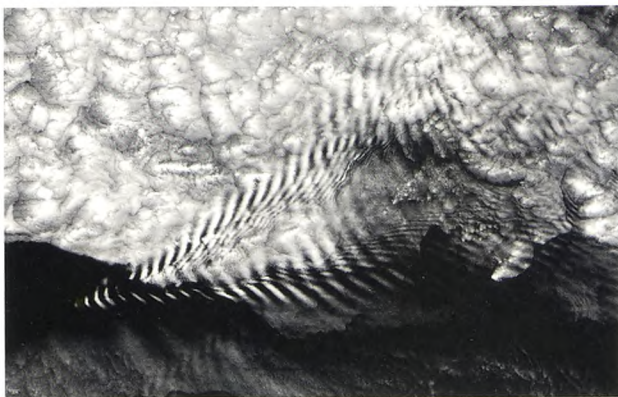
Gravitationsbølger og tyngdebølger

Af Holger Nielsen, Støvring

Gravitationsbølger og tyngdebølger beskriver vidt forskellige fænomener. I artiklen forklares forskellen, og der gives eksempler på tyngdebølger, og hvad man kan bruge observationer af dem til.

Hvad er gravitationsbølger?

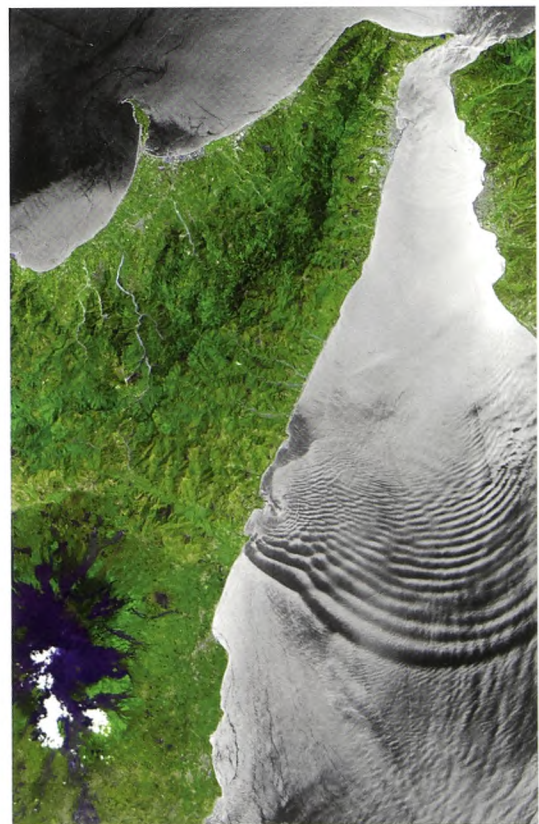
Gravitationsbølger er forstyrrelser i rumtidens struktur, der opstår når en masse udsættes for acceleration. Analogt hermed er elektromagnetiske bølger elektriske og magnetiske felter, der kan dannes, hvis et elektrisk ladet legeme udsættes for acceleration; det kan f.eks. gøres ved at udsætte elektronerne i en metalstang for vekselstrøm, metalstangen kaldes så en antenne. I vakuum udbreder begge bølgetyper sig med lysets fart c .



Figur 1. Tyngdebølger i et skylag dannet ved luftens passage hen over den lille ø L'Île Amsterdam, som i dag er en fransk besiddelse i det sydlige Indiske Ocean. Øen kan skimtes nederst til venstre. Den er opkaldt efter det besøgende nederlandske skib Nieuw Amsterdam, som var opkaldt efter byen Nieuw Amsterdam (i dag New York), som var opkaldt efter ... Foto: Jeff Schmaltz, NASA, GSFC.

Ved passage af en gravitationsbølge øges og formindskes afstanden mellem nærliggende objekter, eller, om man vil, svulmer og krymper selve rummet. Men effekten er på en subatomar skala og derfor yderst vanskelig at påvise. Eksistensen af gravitationsbølger blev postuleret af Albert Einstein i 1916 som en konsekvens af den almene relativitetsteori, han havde udviklet året forinden, og som er den hidtil bedste teori for gravitation [1]. Ganske vist kom Einstein i tvivl og

tilbagekaldte i 1936 denne forudsigelse, for dog senere at tage den op igen.



Figur 2. Tyngdebølger dannet i farvandet syd for Messina-strædet mellem Sicilien og det italienske fastland. I strædet optræder kraftige tidevandsstrømninger. Billedet dækker et areal på 58×90 km. Foto: NASA/GSFC/METI/ERSDAC/JAROS.

I 2015 påviste man definitivt gravitationsbølger fra to kolliderende sorte huller med masser på 35 og 30 solmasser ($M_{\odot}$). Ved sammensmeltningen dannedes et sort hul med en masse på $62 M_{\odot}$, således at en energi svarende til ikke mindre end $3 M_{\odot}$ blev bortstrålet som

gravitationsbølger. Efter en rejsetid på 1,25 milliarder år (fundet ud fra en målt luminositetsafstand på 440 megaparsec) nåede forstyrrelsen frem til Jorden, hvor den blev påvist af instrumentet LIGO [2]. Opdagelsen er tidligere blevet udførligt beskrevet i [3].

Hvad er tyngdebølger?

Tyngdebølger er forstyrrelser, som optræder inden for fluidmekanik (hydrodynamik og aerodynamik), og som udbreder sig styret af det lokale tyngdefelt [4]. Ganske almindelige havbølger er tyngdebølger, og det gælder også for den mere voldsomme variant, tsunamier. Det er derfor inden for videnskabsområder som oceanografi og meteorologi, at man mest arbejder med tyngdebølger. Men de optræder også i astronomisk sammenhæng.

Tyngdebølger kan udbrede sig på grænsefladen mellem to fluider, f.eks. havoverfladen og lufthavet, eller inde i et kontinuert medie, f.eks. atmosfæren. Ikke alle vandbølger er dog tyngdebølger: Hvis bølgelængden er under ca. 1 cm, er det vandets overfladespænding, som præger bevægelsen snarere end tyngdefeltet, og man taler da om *kapilarbølger*.

Eksempler på tyngdebølger

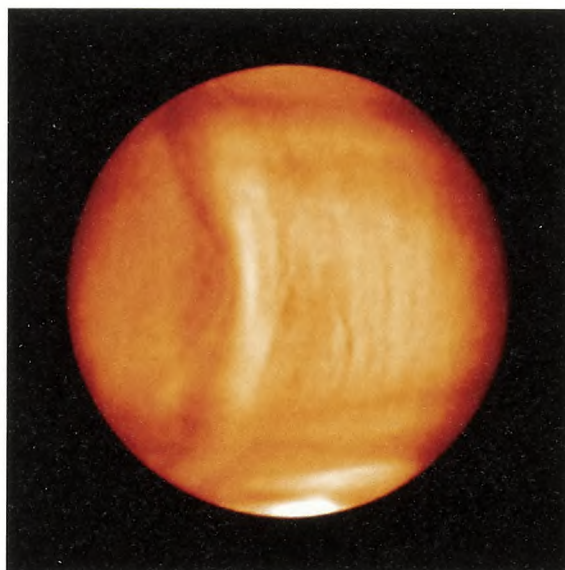
Figur 1 viser tyngdebølger dannet på læsiden af en 881 m høj vulkantop på øen *L'Île Amsterdam*. Luften løftes op over vulkanen, hvorved der med tyngdens hjælp dannes en bølge bag den. Når luften hæves op mod en bølgetop, afkøles den, og det får vanddamp til at kondensere i form af en sky. Når luften herefter synker ned i en bølgedal, opvarmes den, og skyen fordamper. Resultatet er en vekslen mellem striber af skyer og striber af klar himmel, hvor skyerne markerer bølgetoppene. Højere oppe i atmosfæren kan der i forbindelse med en jetstrøm dannes skyformationen *cirrus vertebratus*, hvor tyngdebølger danner et cirrusskymønster, som kan minde om et fiskeskelet. Et eksempel på markante tyngdebølger i havet ses på figur 2.

Gravitationsbølger og tyngdebølger er begge styret af gravitationskraften og er begge bølger, men bortset herfra er der tale om vidt forskellige fænomener. Når en gravitationsbølge passerer, sker der en deformation af rummet, medens en tyngdebølge forårsager en forstyrrelse af stof i rummet. Den første type bevæger sig problemfrit gennem det tomme rum, den anden kræver et stofligt medium. Medens gravitationsbølger har baggrund i en kompliceret teori og påvisning af dem kræver avanceret teknik og omfattende databehandling, så er tyngdebølger en dagligdags oplevelse.

Det er altså vigtigt at skelne mellem de to fænomener, hvilket da også sker på en lang række sprog, se nedenstående tabel.

Sprog		
Engelsk	Gravitational wave	Gravity wave
Tysk	Gravitationswelle	Schwerewelle
Fransk	Onde gravitationelle	Onde de gravité
Norsk	Gravitasjonsbølge	Tyngdebølge

Man kunne tilføje spansk, portugisisk og russisk til listen. Svensk danner dog en undtagelse, her bruges *gravitationsvåg* uheldigvis for begge fænomener, selv om betegnelsen *tyngdvåg* står til rådighed [5].



Figur 3. Den japanske Venus-rumsonde Akatsuki ("Dag-gry"), som har kredset om planeten siden den 7. december 2015, fotograferede 12. december samme år denne bueformede struktur i planetens skylag. Billedet er optaget i infrarødt lys ved en bølgelængde på 10 μm . Nord er opad. Foto: JAXA.

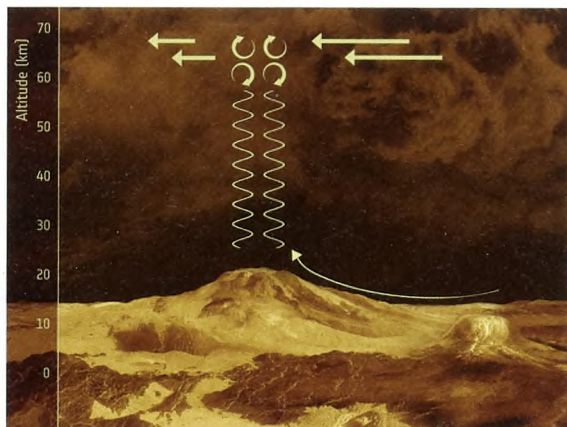
Tyngdebølger på Venus

Som bekendt kan man ikke i synligt lys se planetens overflade, fordi den globalt er dækket af et tykt skylag bestående af dråber af svovlsyre. Skylaget har en tykkelse på op til 20 km, og dets overside befinder sig i en højde af 65 km over overfladen. Mens Venus selv roterer meget langsomt, så bevæger de øverste skyer sig med en fart på omkring 100 m/s ("superrotation"). I 2015 opdagede man på fotografier optaget af den japanske rumsonde *Akatsuki* [6] i kredsløb om Venus nogle skyformationer, som i kontrast hertil i flere døgn holdt sig næsten fast over et underliggende højland på planetens overflade [7]. Figur 3 viser fænomenet, der fortolkes som en tyngdebølge opstået ved passagen af dybereliggende skyer hen over det bjergrige område *Aphrodite Terra*, se figur 4. Fortolkningen støttes af numeriske beregninger. Et problem for udlægningen er dog, at det normalt antages, at der er nærmest vindstille helt nede ved overfladen, men dette er måske alligevel ikke tilfældet.

Tyngdebølger i Solen

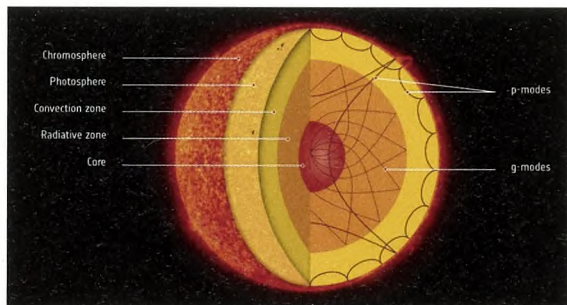
Solens overflade bølger op og ned på en forholdsvis lille skala, og det sker ved mange forskellige frekvenser. Disse svingninger rummer imidlertid en stor righoldighed af information om forholdene i Solens indre. Observationer og teoretisk behandling af svingningerne kaldes *helioseismologi*. Svingninger med høj frekvens skyldes *trykbølger* (p-bølger), som forplanter sig i Solens øvre lag og er lette at observere. Men herudover dannes der lavfrekvente *tyngdebølger* (g-bølger) i Solens kerneområde. Disse sætter dog ikke noget tydeligt

aftryk på forholdene ved Solens overflade og er derfor vanskelige at måle på, se figur 5.



Figur 4. Tegningen viser et snit gennem Venus' atmosfære og antyder, hvordan vinde lavt i atmosfæren ved passage over et bjerg kan frembringe svingninger i det øverste skylag, der udefra ses som en tyngdebølge. Grafik: ESA.

Med solobservatoriet SoHO, som styres af ESA og NASA og som stedse befinder sig nær det solvendte første lagrange punkt (L1), hvor den har samme omløbstid som Jorden, er det imidlertid lykkedes at finde og analysere g-bølger. En gruppe astronomer, ledet af franskmænden Eric Fossat, har benyttet sondens observationer gennem 16,5 år i analysen [8]. Overraskende nok viser det sig, at Solens kerne roterer med en periode på kun 7 døgn i kontrast til overfladen, som ved ækvator bruger 25 og nær polerne 35 døgn om at snurre én gang rundt. Kernen menes at have roteret uændret siden Solens dannelse for 4,6 milliarder år siden, medens koblingen mellem magnetfeltet i de ydre lag og solvinden med tiden har bremset rotationen i disse lag.



Figur 5. I helioseismologien studerer man trykbølger ("p-modes"), som fortrinsvis bevæger sig nær Solens overflade, og tyngdebølger ("g-modes"), som udbreder sig i dens kerne. De observeres ved hjælp af den dopplerverskydning, der opstår, når bølgerne sætter skvulp i Solens fotosfærelag. Grafik: ESA.

Tyngdebølger i neutronstjerner?

Helioseismologi (altså studiet af Solens svingninger) har med stort udbytte kunnet udvides til nogle af de nærmeste sølignende stjerner under navnet *asteroseismologi* (aster = stjerne). Også neutronstjerner forventes at udvise svingninger, men deres meget større densitet

bevirker, at svingningstiderne for tyngdebølger forventes at have værdier på mellem 10 og 400 ms. Neutronstjerner menes på overfladen at indeholde normale atomkerner, der jo består af protoner og neutroner, som igen består af up- og down-kvarker. Disse kerner er fastlåst i et krystalgitter, som også indeholder elektroner, der frit kan bevæge sig gennem gitteret. Bevæger man sig ind i neutronstjernen, støder man på atomkerner med et voksende antal neutroner. Længere inde presses frie neutroner ud af kernerne og til sidst nås en tilstand, hvor der næsten kun er neutroner til stede. Den nøjagtige sammensætning af stoffet i centret af neutronstjerner er ukendt, fordi tilstandsligningen for stof under så ekstreme tryk er ukendt. Måske indeholder centret mere eksotiske former for elementarpartikler, så som pioner og kaoner eller sære kvarker. En påvisning af tyngdebølger i neutronstjerner vil kunne give værdifulde informationer om deres centralområde.

Litteratur

- [1] Temanummer om den almene relativitetsteori (2015) *Kvant*, bind 26, nr. 4.
- [2] www.ligo.org/detections/GW170814.php
- [3] J. O. P. Pedersen og M. C. Andersen (2016) "Tyngdebølger observeret for første gang", *Kvant*, bind 27, nr. 1, side 8–12.
- [4] H. M. Hansen (1967) "Lærebog i fysik", NNF Arnold Busck, side 159.
- [5] [sv.wikipedia.org/wiki/Gravitationsvåg_\(flødesdynamik\)](http://sv.wikipedia.org/wiki/Gravitationsvåg_(flødesdynamik))
- [6] Rumsonden Akatsuki kan tages i særligt øjesyn med dette link:
akatsuki.isas.jaxa.jp/en/gallery/papercraft/images/akatsuki_PaperCraft.pdf
- [7] www.nature.com/articles/ngeo2873
www.theverge.com/2017/1/16/14264886/japanese-spacecraft-akatsuki-gravity-wave-venus-atmosphere
- [8] phys.org/news/2017-08-sun-core-rotates-faster-surface.html



Holger Nielsen er cand. scient. i astronomi og fhv. lektor i fysik, matematik og astronomi ved Støvring Gymnasium. Han medvirkede i 1990'erne i arbejdet med at få indført astronomi som gymnasiefag. Han har i 28 år deltaget i forevisninger ved Urania Observatoriet i Aalborg.