

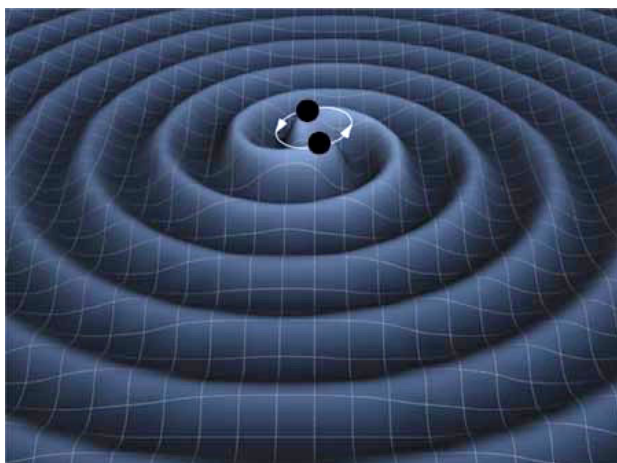
Jagten på gravitationsbølger ved brug af radiopulsarer

Ann-Sofie Bak Nielsen, Max Planck Institutet for Radioastronomi, Bonn, Tyskland

Jagten på direkte observationer af gravitationsbølger har ført til flere forskellige detektorforslag. I 2015 var LIGO den første af disse til direkte at observere gravitationsbølger, men nu er der andre detektorer, der nærmer sig detektion. Det er "Pulsar Timing Arrays", som udnytter naturens egne præcise ure, radiopulsarer, til at observere de svage signaler fra gravitationsbølger.

Gravitationsbølger

I 1916 forudsagde Albert Einstein i sin generelle relativitetsteori eksistensen af gravitationsbølger. Godt 100 år efter, den 14. september 2015, observerede astronomer ved LIGO- (Laser Interferometer Gravitational-Wave Observatory) eksperimentet i USA for første gang direkte gravitationsbølger fra en kollisionen mellem to sorte huller [1, 2]. Gravitationsbølger kan bedst beskrives som krusninger, eller svage bølger, i rumtiden, der kan sammenlignes med ringe i vand (figur 1). Krusningerne dannes af flere forskellige fænomener bl.a. af sammenstød mellem supermassive sorte huller, inspiralling af kompakte objekter i et binært system, eller kataklysmiske begivenheder som supernovaer (figur 2). Med den viden om universet og den teknologi, der var tilgængelig i 1916, antog Einstein, at disse bølger ville være forsvindende svage, og derfor så godt som umulige at observere. De teknologiske fremskridt, der har været i løbet af det sidste århundrede, gjorde det muligt for LIGO at observere gravitationsbølger [1].



Figur 1. En kunstners indtryk af gravitationsbølger udsendt fra to sorte huller, der bevæger sig mod hinanden, og som ender med at kolliderere. Dette er hvad LIGO kunne observere for første gang i 2015. Billede: T. Carnahan (NASA GSFC/LIGO).

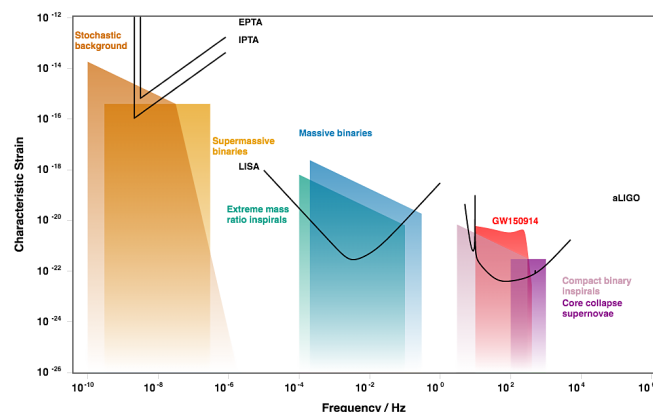
LIGO-detektoren var det første af de forslåede gravitationsbølgeeksperimenter, der direkte observerede gravitationsbølger. Det var dog ved brug af radiopulsarer og pulsartiming, at den første indirekte observation af gravitationsbølger blev foretaget.

R.A. Hulse og J.H. Taylor opdagede i 1974 et binært stjernesystem bestående af to neutronstjerner 21.000 lysår fra Jorden [3]. De to neutronstjerner, hvoraf den

ene er en radiopulsar, bevæger sig tættere og tættere på hinanden. Det betyder, at det binære system mister energi i form af gravitationsbølger. Denne opdagelse førte til at Hulse og Taylor modtog Nobelprisen i fysik i 1993.

Gravitationsbølgeeksperimenter

Gravitationsbølger kommer i forskellige bølgelængder, ligesom elektromagnetisk stråling. Der er derfor foreslået flere forskellige gravitationsbølgedetektorer. LIGO består af to laserinterferometre, hver med to 4 km lange arme i en L-form, én i Livingston og én i Hanford, USA [4]. I hver af de 4 km lange arme er der lasere, som måler små forskydninger i længden af armene. Forskydningerne skyldes gravitationsbølger, som strækker og sammenpresser Jorden. Siden den første detektion af gravitationsbølger, er en tredje detektor, VIRGO i Italien, også begyndt at observere. På nuværende tidspunkt er der observeret mere end 50 gravitationsbølgebegivenheder, bestående af både kollisioner mellem sorte huller, mellem to neutronstjerner og mellem et sorte hul og en neutronstjerne [5].



Figur 2. Gravitationsbølgespektrum hvor de forskellige detektorer er indikeret, viser hvilken frekvens de forskellige detektorer kan observere gravitationsbølger ved. Her ses det bl.a. at PTAs vil være i stand til at detektere gravitationsbølger i nHz-regimet fra den stokastiske baggrund og supermassive sorte huller. På figuren antages det, at omkring 20 pulsarer er inkluderet i EPTA, og 65 i IPTA. Billede: [6].

En anden gravitationsbølgedetektor er LISA (Laser Interferometer Space Antenna), der i modsætning til LIGO er et rumbaseret teleskop. LISA kommer til at bestå af tre satellitter, som kun er forbundet med

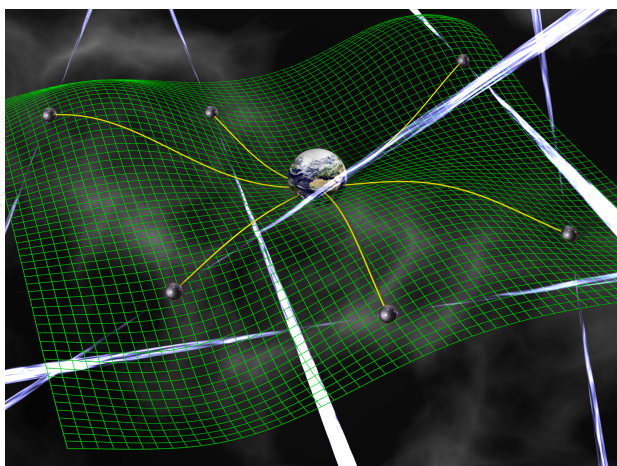
lasere mellem hver satellit. Laserne måler præcist afstanden mellem satellitterne. Ideen bag LISA minder om LIGO, her er det dog frekvensforskellen mellem laserne i satellitterne, man leder efter. Forskellene kan bl.a. skyldes dopplerforskydning, men der kan også være små forskelle fra ændringer i rumtiden, og altså fra gravitationsbølger. I 2015 blev LISA Pathfinder opsendt for at teste teknologien til LISA-missionen. LISA Pathfinder var en succes, og efter planen skal LISA opsendes i 2034 [7].

Pulsar Timing Arrays

Et andet gravitationsbølgeeksperiment er Pulsar Timing Arrays (PTAs), hvor man udnytter radiopulsarers utroligt stabile rotation. Pulsarer – og specielt millisekundpulsarer – er fantastiske værktøjer til at undersøge forskellige aspekter af fundamental fysik.

Radiopulsarer er neutronstjerner, som roterer meget hurtigt om deres egen akse, og som har et meget stærkt magnetfelt. Elektroner accelereres i magnetfeltet, og resulterer i radiostråling udsendt fra de magnetiske poler. Den magnetiske akse er drejet i forhold til rotationsaksen. Hver gang pulsaren roterer, rammer radiostrålingen Jorden, og man kan derved måle en puls fra pulsaren. Det kan sammenlignes med, hvordan et fyrtårn virker.

Millisekundpulsarer gør PTA-eksperimenter mulige med deres bemærkelsesværdige rotations- og derfor timing-stabilitet. PTA er baseret på systematisk at observere et netværk af millisekundpulsarer fordelt på himlen (se figur 3), hvilket effektivt bliver et teleskop på størrelse med Mælkevejen [8].

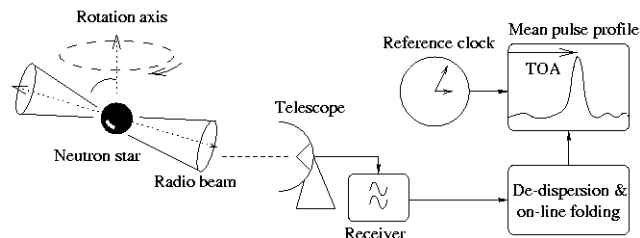


Figur 3. Ved brug af flere pulsarer jævnt fordelt på himlen, et såkaldt Pulsar Timing Array, kan man korrelere og observere forskellen i TOA-residualer (time-of-arrival) af signalet fra forskellige pulsarer, og derved detektere gravitationsbølger. Billede: David J. Champion, MPIFR.

Pulsar timing arrays kan detektere gravitationsbølger i nHz-regimet (se figur 2). Disse bølgers oprindelse er enten inspirallerende super-massive sorte huller (SMBHs), eller fra den stokastiske gravitationsbølgebaggrund.

PTAs er baseret på pulsar timing-teknikken [9]. Her kræves en præcis modellering af pulsarens rotation, binære omløbsbane (når relevant) og signaludbredelse i rummet. For hver observeret pulsar bliver meget præcise målinger af pulsens ankomsttid (time-of-arrival:

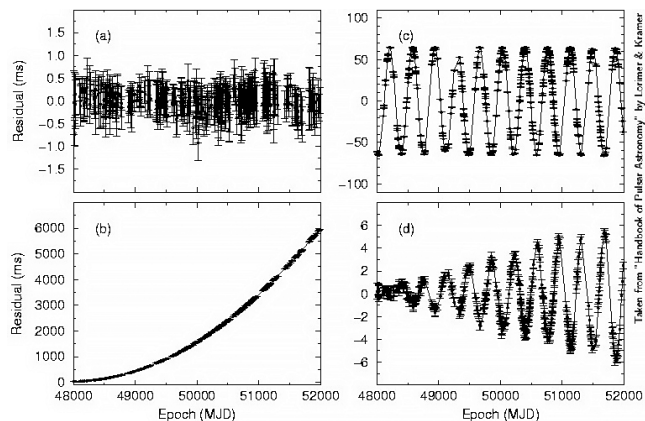
TOA) sammenlignet med en timingmodel. Forskellen på de målte og forudsagte TOAs er residualer, og alle effekter, der ikke indgår i timingmodellen, kan ses i disse residualer (se også figur 5). Modellen kan ændres som følge af de variationer, man kan se i residualerne.



Figur 4. Diagram der viser det fundamentale observationelle set-up af pulsartiming. Billede: [9].

Figur 4 viser en klassisk opsætning af et radioteleskop. Radiostrålingen observeres, hvorefter observationen bl.a. bliver foldet og sammenholdt med et referenceur på teleskopet og med pulsprofilen, for at kunne måle en såkaldt TOA af en puls fra pulsaren. Man folder signalet fra en pulsar for at forstærke det, og for at finde en middelpulsprofil, som er den alle observationer krydsrefereres med.

Undervejs bliver radiofrekvens-interferens (RFI), der stammer fra andre radiokilder, som mobiltelefoner, mikroovne etc, fjernet. De TOAs man finder, kan nu bruges til pulsar timing analyse.



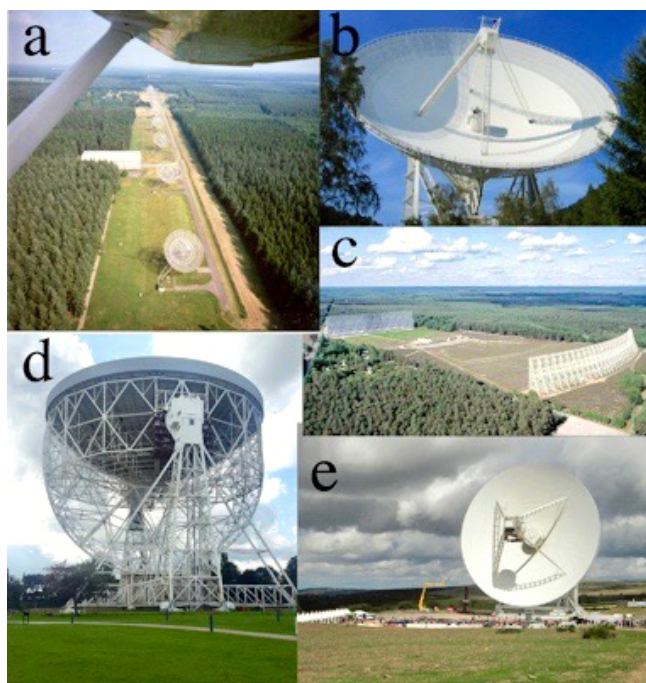
Figur 5. Forskelle mellem TOAs og timingmodellen er vist på figuren [9].

TOAs sammenholdes med en model for, hvordan forskerne tror, at pulsarens system ser ud, nemlig en timing model. Hvis denne model på en eller anden måde er forkert, eller systemet er påvirket af noget uforudset, kan det ses i TOA-residualer, som vist på figur 5. Figur 5a viser en perfekt model, hvor alle parametre, som påvirker pulsaren, er medregnet i modellen – alle TOAs er omkring nul. Figur 5b viser en model, hvor rotationsperiodens afledte er underestimeret. På figur 5c ses et off-set i position, hvilket producerer en sinuskurve i residualer, og på figur 5d ses effekten af ikke at korrigere pulsarens egenbevægelse [9].

Der er nogle begrænsninger for timingmetoden og PTAs; selvom pulsarer er meget stabile rotorer i universet, kan de udvise forstyrrelser (støj), der er uforudsigelige. Det kan bl.a. være støj forårsaget af instrumenterne

på teleskopet, uret som bruges til at måle ankomsttiderne, uforudsete ændringer i signalet udsendt af selve pulsaren (glitches – pludselige ændringer eller accelerationer i pulsarens rotationsperiode) eller ændringer af signalet fra pulsaren som sker på dets vej fra pulsaren til Jorden. Forstyrrelserne forårsaget af individuelle gravitationsbølger er meget små, og kan på nuværende tidspunkt ikke måles direkte i signalet fra en pulsar.

Den store fordel ved PTAs er, at gravitationsbølger har en effekt på alle pulsarer på samme tid: der vil altså være et ekstra støjtryk i ankomsttiderne for pulsen fra hver pulsar, når en gravitationel bølge passerer pulsarene. Hvad forskerne bag PTAs derfor arbejder på, er at optimere observationerne og forståelsen af pulsarens adfærd, så den resterende støj bliver så lille, at støj forårsaget af gravitationsbølger kan skelnes fra den. Fordi gravitationsbølgesignalet er meget svagt, er man nødt til at krydskorrelere ankomsttiderne fra forskellige pulsarer med hinanden. Det betyder i praksis, at man sammenligner TOA-residualer fra en pulsar med andre PTA-pulsarer.



Figur 6. De fem store teleskoper der benyttes af EPTA er a) Westerbork radio synthesis-teleskop i Holland, b) Effelsberg radioteleskopet i Tyskland, c) Nançay radioteleskopet i Frankrig, d) Lovell teleskopet i England og e) Sardinia radioteleskopet i Italien. Billedet fra de respektive teleskopers hjemmesider og privat foto af Lovell teleskopet.

European Pulsar Timing Array

European Pulsar Timing Array (EPTA) blev formelt grundlagt i slutningen af 2006, og består af flere forskningsgrupper i Europa, der alle forsker i pulsarer og gravitationsbølger. EPTA består derudover af fem europæiske radioteleskoper (i 100-meterklassen): Westerbork i Holland (figur 6a), Effelsberg-radioteleskopet nær Bonn i Tyskland (figur 6b), Nançay-radioteleskopet i Frankrig (figur 6c), Lovell-teleskopet i Jodrell Bank tæt på Manchester i England (figur 6d) og det nye radioteleskop på Sardinien i Italien (figur 6e) [10].

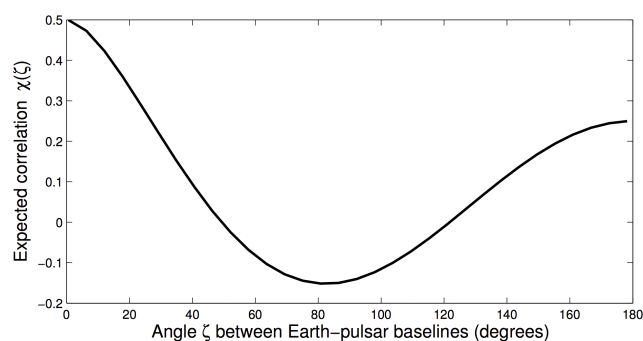
Ligesom de andre PTA-grupper er hovedformålet med EPTA-netværket at observere gravitationsbølger. Udover gravitationsbølger arbejdes der på at forbedre forståelsen af de forskellige påvirkninger, der kan være på radiopulsarer og deres signal. Fordelen ved at have flere teleskoper til rådighed er, at observationstiderne kan planlægges til at foregå på forskellige tidspunkter, og der fås et mere spredt dataset. Samtidige observationer på forskellige teleskoper kan dog også være gavnlige; dette giver uafhængige målinger, som fx kan bruges til at kontrollere stabiliteten af referenceurene ved teleskoperne. Derudover har de fleste teleskoper flere observationsfrekvenser til rådighed. En bredere spredning og bedre dækning af observationsfrekvenser er nyttig til at korrigere for frekvensafhængige påvirkninger på pulsarenes ankomsttider.

Detektion af gravitationsbølger med PTAs

For at få et klart gravitationsbølgesignal benyttes de mest præcise og stabile pulsarer. Det er anslået, at mindst 20 millisekund-pulsarer skal observeres i mindst 5 år, med en nøjagtighed på ca. 100 nanosekunder, for at detektere gravitationsbølger (EPTA observerer mere end 40 pulsarer) [11]. Dette hjælper med at mindske og forstå usikkerheder og variationer som enkelte pulsarer kan udvise.

Udover forståelsen af støjkloder, afhænger detektion af gravitationsbølger også af at pulsarene inkluderet i PTAs er jævnt fordelt på himlen.

For at opnå detektion af gravitationsbølger i den nærmeste fremtid arbejder flere grupper af astronomer hver især på observationer af pulsarer. Det er, udover EPTA, Australiens Parkes Pulsar Timing Array-gruppe (PPTA), den amerikansk-canadiske gruppe med det nordamerikanske Nanohertz-observatorium for gravitationsbølger (NANOGrav), det indiske Pulsar Timing Array (InPTA), samt grupper i Kina. Samarbejdet mellem disse grupper koordineres i det Internationale Pulsar Timing Array (IPTA), der kombinerer observationer fra den nordlige og sydlige halvkugle til et stort datasæt.



Figur 7. Hellings-Downs kurven viser den korrelation der er tilstede mellem pulsarer (y-aksen) og vinklen mellem pulsarer (x-aksen). Hvis denne kurve ses ved analyse af PTA data forventes det at man kan bekræfte at have observeret gravitationsbølger [13].

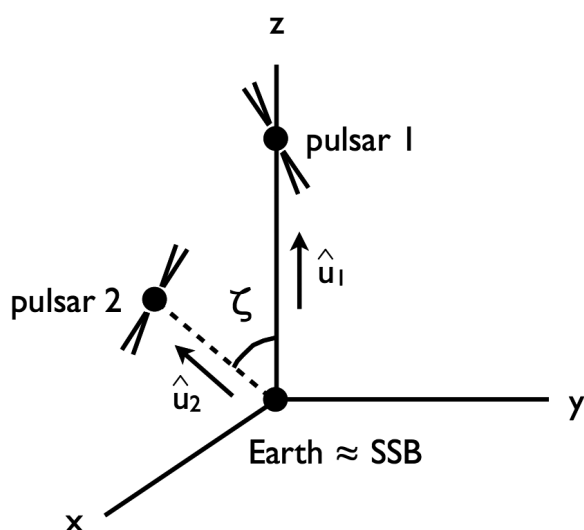
Astronomerne R.W. Hellings og G.S. Downs kiggede i begyndelsen af 1980'erne på ligningerne for korrelation af pulsarens tidsresidualer. De fandt ud af, at ved at antage, at de stokastiske gravitationsbølger kommer fra alle retninger (dvs. er isotrope), og

at kombinationen af baggrundsgravitationsbølger ikke længere bærer nogen polarisationsinformation, så ender krydskorrelationen af timingresidualer med at være en funktion af pulsarernes vinkelafstand [12]:

$$\alpha_{ij} = \frac{1 - \cos(\gamma_{ij})}{2} \times \ln\left(\frac{1 - \cos(\gamma_{ij})}{2}\right) - \frac{1}{6} \frac{1 - \cos(\gamma_{ij})}{2} + \frac{1}{3} \quad (1)$$

hvor α_{ij} er den resterende korrelation mellem to pulsarer (mærket i og j), og γ_{ij} er vinklen mellem de samme to pulsarer. Ved at plote denne funktion over vinkelafstanden, fås Hellings og Downs-kurven (se figur 7) [12, 13].

Denne kurve viser ankomstidskorrelationen for PTA-pulsarer – og fortæller os præcis, hvad vi med statistisk signifikans bør se, når vi krydskorrelerer TOAs fra pulsarer i tilstedeværelse af en stokastisk gravitationsbølgebaggrund.



Figur 8. Et eksempel på geometrien bag udregningen af Hellings-Downskurven. Her ses to pulsarer og Jorden, som er lokaliseret i oprindelsepunktet af akserne. Jord-til-pulsarretningerne er givet ved vektorene \hat{u}_1 og \hat{u}_2 , og vinklen mellem de to pulsarer er ζ . Ofte bruger man solsystemets barycentrum (SSB), som er solsystemets massecenter, for at have et fast referencepunkt i stedet for at bruge Jorden, som bevæger sig, som referencepunkt [13].

Hvor tæt på en detektion er Pulsar timing arrays?

Et nøgleelement i forbindelse med detektion af gravitationsbølger med PTAs er at forstå og reducere den støj, der påvirker det mulige gravitationsbølgesignal og pulsarsignalerne. Alle PTAs arbejder derfor konstant på at forbedre deres metode, forstå pulsarernes støj og eventuelle ændringer i pulsarsignalerne. Dette, og en længere periode med observationer, har gjort, at den øvre grænse for de gravitationsbølgefrequenser, som

PTA'er er følsomme over for, er blevet sænket med mere end fire størrelsesordener siden 1980'erne. Derfor er der mange som mener, at den første direkte detektion af gravitationsbølger med PTAs sker i den nærmeste fremtid.

Litteratur

- [1] B.P. Abbott m.fl. (2016) Observation of Gravitational Waves from a Binary Black Hole Merger, *Physical Review Letters*, bind **116**, side 061102.
- [2] J.O.P. Pedersen og M.C. Andersen (2016) Tyngdebølger observeret for første gang, *Kvant*, bind **27**, nr. 1, side 8–12.
- [3] R.A.Hulse og J.H. Taylor (1975) Discovery of a pulsar in a binary system, *AJ*, bind **195**, side 51–53.
- [4] <https://www.ligo.caltech.edu/>
- [5] R. Abbott m.fl. (2021) Population Properties of Compact Objects from the Second LIGO-Virgo Gravitational-Wave Transient Catalog, *ApJL*, bind **913**, side L7.
- [6] C.J. Moore, R.H. Cole og C.P.L. Berry (2015) Gravitational-wave sensitivity curves, *Class. Quantum Grav.*, bind **32**, side 015014.
- [7] <https://www.elisascience.org/>
- [8] Foster, R. S., Backer, D. C.: Constructing a Pulsar Timing Array, *ApJ*, bind **361**, side 300–308 (1990).
- [9] D.R. Lorimer og M. Kramer (2012) Handbook of Pulsar Astronomy, Cambridge University Press.
- [10] <http://www.epta.eu.org/>
- [11] G. Desvignes m.fl.(2016) High-precision timing of 42 millisecond pulsars with the European Pulsar Timing Array, *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society*, bind **458**, side 3341–3380.
- [12] R.W. Hellings og G.S. Downs (1993) Upper limits on the isotropic gravitational radiation background from pulsar timing analysis, *ApJL*, bind **265**, side 39–42.
- [13] F.A. Jenet og J.D. Romano (2015), Understanding the gravitational-wave Hellings and Downs curve for pulsar timing arrays in terms of sound and electromagnetic waves, *AmJP*, bind **83**, side 635–645.



Ann-Sofie Bak Nielsen er postdoc på Max Planck Institut for radioastronomi i Bonn. Hendes primære forskningsområde er timing af pulsarer, og hun er særligt interesseret i de lidt sjældnere systemer, som Black Widows og Redbacks. Ann-Sofie har også siden 2018 været en del af EPTA.