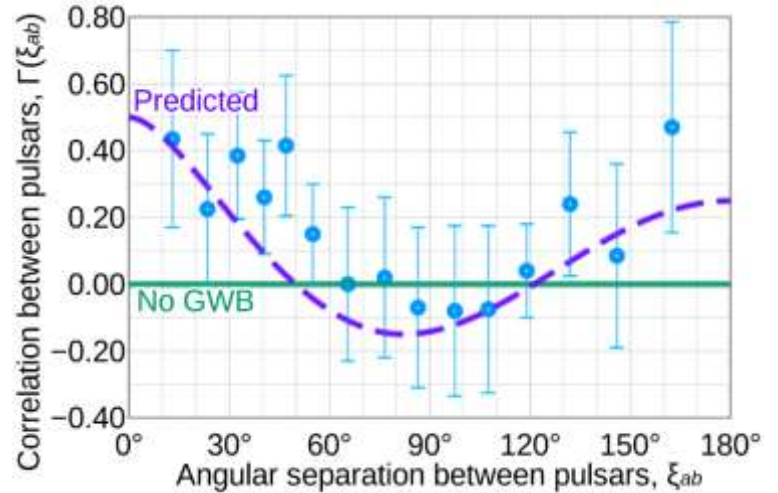


The NANOGrav (**N**orth **A**merican **N**anohertz **O**bservatory for **G**ravitational **W**aves) collaboration, along with the other millisecond pulsar timing collaborations in Europe, China, and India, recently claimed the first observation of a stochastic gravitational wave background in the nano-hertz frequency band. How these experiments work is quite interesting: The pulsar at one end and the barycenter of the solar system at the other end will act as an imaginary baseline. When a gravitational wave passes through the barycenter-pulsar line of sight, it creates a perturbation in the intervening spatial metric, causing a change in the propagation time of the radio pulses emitted by the pulsar. One can then compare the measured and predicted times of arrival (TOAs) of the pulses, using timing models that take into account the various intrinsic and extrinsic properties of the pulsar. Since standard timing models account for only deterministic influences on the arrival times of the pulses, the difference between the measured and predicted TOAs will result in a stream of timing residuals, which encode the influence of both deterministic and stochastic gravitational waves as well as any other random noise processes on the measurement. If one has a set of radio pulsars, i.e., a pulsar timing array (PTA), one can correlate the residuals across pairs of Earth-pulsar baselines, taking advantage of the common influence of a background of gravitational waves against unwanted, uncorrelated noise. The key property of a PTA is that the signal from a stochastic gravitational-wave background will be correlated across the baselines, while that from the other noise processes will not. This is what makes a PTA function as a galactic-scale, gravitational-wave detector. It was Hellings and Downs [1] who showed in 1983 that for an array of pulsars that a stochastic background of gravitational waves would produce a correlated signal for different angular separations on the sky.



At the time, the work was limited in sensitivity by the precision and stability of the pulsar clocks in the array. The emergence of state-of-the-art digital data acquisition systems, new radio telescopes and receiver systems and the discoveries of many new pulsars advanced the sensitivity of the pulsar timing array to gravitational waves. Although in previous data release reports, the collaboration put an upper bound on the amplitude of the gravitational waves, in their 12.5-year data release they suggested that there are signs of a stochastic common-spectrum process [2]. However, it was in June 2023 that NANOGrav published decisive evidence for a stochastic gravitational wave background using the 15-year data release [3]. In particular, it provides measurement of the Hellings-Downs curve, the unique sign of the gravitational wave origin of the observations.

While supermassive black hole binary (SMBHB) mergers can, in principle, generate such a signal, though with a mild tension in the present data, plenty of scopes exist for exotic new physics to contribute. Many follow-up papers have also studied the possible origin or implications of this observation from the point of view of dark matter axions or axion-like particles, first order phase transition, primordial black holes, primordial magnetic field, domain walls, inflation, and cosmic strings. The group at the school of physics of IPM (A. Ashoorioon, K. Rezazadeh and A. Rostami) has envisaged a situation where the signal could be generated from the end of a ~ 10 MeV but still phenomenologically viable double-field inflation when the field configuration settles to its true vacuum [2]. During the double-field inflation at such scales, bubbles of true vacuum that can collapse to primordial black holes form. The mass of such primordial blackholes are in the range of LIGO mass (~ 30 solar mass) and 10^4 solar mass.

[1] R.w. Hellings, G.s. Downs, *Astrophys.J.Lett.* 265 (1983) L39-L42

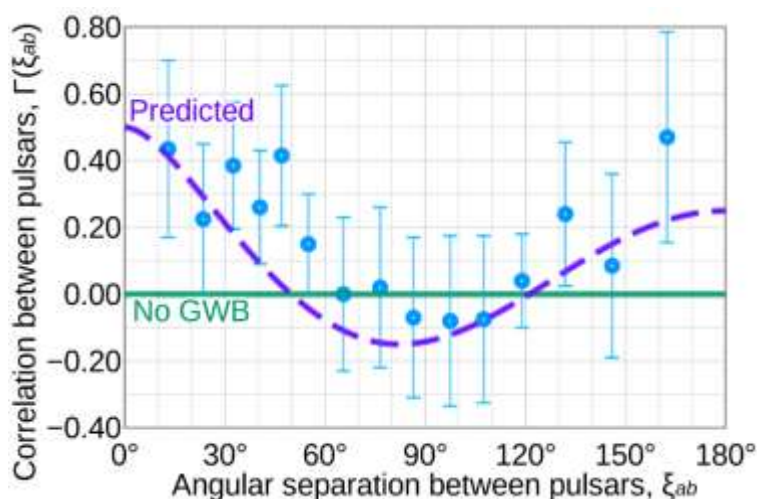
[2] Z. Arzoumanian et al. (NANOGrav), *Astrophys. J. Lett.* 905, (2020) 2 و L34

[3] Adeela Afzal et al. (NANOGrav), *Astrophys.J.Lett.* 951, (2023) 1, L11

[4] Amjad Ashoorioon, Kazem Rezazadeh, Abasalt Rostami, *Phys.Lett.B* 835 (2022) 137542

Written by Amjad Ashoorioon

آزمایش نانو گرو در آمریکای شمالی، به همراه سایر همکاری‌های زمان سنجی تپ اخترها در اروپا، چین و هند، برای اولین بار مدعی مشاهده‌ی پس زمینه‌ی کاتوره‌ای امواج گرانشی در بازه‌ی فرکانسی نانوهرتز شده است. اینکه این آزمایش‌ها چگونه کار می‌کنند در نوع خود جذاب است: تپ اختر به همراه مرکز جرم منظومه‌ی شمسی به عنوان یک پاره‌خط زمینه‌ی فرضی عمل می‌کند. زمانی که موج گرانشی از پاره‌خط زمینه‌ی مرکز جرم-ستاره‌ی تپ اختر می‌گذرد، یک اختلال در متریک ایجاد می‌شود که باعث تغییر در زمان انتشار پالس‌های رادیویی، که توسط تپ‌اختر ایجاد شده‌اند، می‌شود. با استفاده از مدل‌های زمان سنجی که ویژگی‌های تپ‌اخترها را لحاظ می‌کنند، می‌توان زمان پیش‌بینی شده و سنجیده شده‌ی رسیدن پالس‌ها را با هم مقایسه کرد. چون مدل‌های استاندارد زمان سنجی تنها اثرات تعیینی بر زمان‌های رسیدن پالس‌ها را لحاظ می‌کنند، تفاوت بین زمان رسیدن اندازه‌گیری شده و پیش‌بینی شده منجر به دنباله‌ای از "باقیمانده‌های زمانی" می‌شود، که در خود نه تنها اثرات تعیینی و کاتوره‌ای امواج گرانشی، بلکه هر نوفه‌ی رندم در اندازه‌گیری‌ها را رمزنگاری کرده‌اند. اگر ما آرایه‌ای از تپ اخترهای رادیویی داشته باشیم، می‌توان در هم



جفت‌دگی زمان‌های باقیمانده بین زوج‌های تپ‌اختر را محاسبه کرد و از این واقعیت بهره برد که امواج گرانشی، برخلاف نوفه‌ی ناجفتیده، تاثیر یکسانی بر پاره‌خط‌های فرضی تپ اختر-مرکز گرانشی منظومه‌ی شمسی می‌گذارد. بنابراین ویژگی مشخص یک آرایه‌ی زمانی تپ اخترها این خواهد بود که بر خلاف فرآیندهای نوفه‌ای، سیگنال پس زمینه‌ی امواج کاتوره‌ای گرانشی در بین پاره‌خط‌ها، جفتیده خواهد بود. این هلینگز و داونز {۱} بودند که در سال ۱۹۸۳ نشان دادند که برای یک آرایه‌ی تپ‌اختر، یک پس زمینه‌ی کاتوره‌ای از امواج گرانشی، یک سیگنال جفتیده برای فواصل زاویه‌ای متفاوت در آسمان ایجاد می‌کند.

در زمان آن پیشنهاد، چنان آزمایشی، به خاطر محدود بودن دقت و ثبات ساعت‌های منطبق بر تپ اخترها، از حساسیت لازم برخوردار نبود. ظهور سیستم‌های به روز کسب اطلاعات دیجیتالی، تلسکوپ‌های رادیویی جدید، سیستم‌های دریافت کننده، و کشف تعداد زیادی تپ‌اختر، زمان سنجی مبتنی بر حساسیت آرایه‌ی تپ اخترها به امواج گرانشی را توسعه بخشید. اگرچه در گزارش‌های پیشین انتشار داده‌ها، این همکاری‌ها تنها کران بالایی بر امواج گرانشی کاتوره‌ای گزارش کرده بودند، در انتشار داده‌های ۱۲٫۵ ساله، این گروه‌ها مدعی وجود نشانه‌هایی از طیف مشترک کاتوره‌ای شدند {۲}. با این حال در ژوئن سال ۲۰۲۳ بود که همکاری نانو گرو با استفاده از داده‌های پانزده ساله‌ی خود، شواهد متقنی را بر وجود پس زمینه‌ای از امواج گرانشی منتشر کرد {۳}. بالاخص، آنها موفق شدند منحنی هلینگز-داونز را، که نشانه‌ی منحصر به فرد امواج گرانشی است، اندازه بگیرند.

اگرچه فرآیند ادغام سیاهچاله‌های دوتایی فوق سنگین، با اندکی تنش با داده‌های کنونی، می‌تواند سیگنال نانوگرو را توضیح دهد، منابع مختلفی از فیزیک جدید نیز می‌توانند در توضیح این اثر سهمیم باشند. پیرو گزارش نانو گرو، تعداد زیادی مقاله در تلاش برای توصیف منبع این اثر یا پیامدهای آن، برای امواج تاریک اکسیونی یا شبه اکسیونی، گذار فاز مرتبه اول، سیاهچاله‌های نخستین، امواج مغناطیسی نخستین، دیواره‌های کیهانی، و تورم و ریسمان‌های کیهانی، برآمدند. در پژوهشکده‌ی فیزیک نیز، گروهی شامل امجد عشوریون، کاظم رضازاده و عباس‌طی رستمی شرایطی را در نظر گرفتند که سیگنال در انتهای تورم دو میدان‌های سازگار با مشاهده، در سطح انرژی تقریباً ده مگا الکترون ولت، با گذار فاز مرتبه‌ی اولی که در آن آرایش میدان پس از اتمام تورم به خلا صادق می‌رود، ایجاد می‌شود {۴}. در زمان تورم دو میدان، حباب‌های خلا صادق شکل می‌گیرند که پس از پایان تورم به سیاهچاله‌های نخستین می‌رمبند. جرم آن سیاهچاله‌های نخستین در بازه ۳۰ برابر تا چند ده هزار برابر جرم خورشید قرار می‌گیرد که در محدوده‌ی جرمی سیاهچاله‌هایی است که آزمایش لایگو مشاهده کرده است.

[1] R.w. Hellings, G.s. Downs, *Astrophys.J.Lett.* 265 (1983) L39-L42

[2] Z. Arzoumanian et al. (NANOGrav), *Astrophys. J. Lett.* 905, (2020) 2 و L34

[3] Adeela Afzal et al. (NANOGrav), *Astrophys.J.Lett.* 951, (2023) 1, L11

[4] Amjad Ashoorioon, Kazem Rezazadeh, Abasalt Rostami, *Phys.Lett.B* 835 (2022) 137542

نویسنده: جناب آقای دکتر امجد عشوریون