

Jak wakacje, to na parterze

Przesunięcie ku czerwieni może być interpretowane jako konsekwencja zasady równoważności (gravitacja i przyspieszenie są równoważne) lub jako konsekwencja równoważności masy i energii („spadające” w polu grawitacyjnym fotony zyskują energię, a „wspinające się” w dolku potencjału grawitacyjnego tracą energię).

Zasada działania zegara atomowego polega na zliczaniu okresów atomowego wzorca częstotliwości. Wzorem jest na przykład stabilna własność emisyjna atomów uwzględniająca strukturę nadsubtelną atomów (jest to rozszczepienie poziomów energii fotonów emitowanych przez elektrony, których spinowe momenty magnetyczne oddziałują z momentem magnetycznym jądra atomowego).

Zmiana częstotliwości f w potencjale U to, w przybliżeniu,

$$\frac{\Delta f}{f} \approx \frac{\Delta U}{c^2} \approx \frac{g \Delta h}{c^2},$$

gdzie Δh to różnica wysokości w stałym polu grawitacyjnym o przyspieszeniu g .

Siatka optyczna powstaje w wyniku interferencji przeciwbieżnie rozchodzących się wiązek laserowych, tworząc przestrzennie periodyczny wzór polaryzacji. W powstałym w ten sposób potencjale okresowym może uwięzić schłodzone do prawie 0 K atomy dzięki efektowi Starka (zasada działania pułapki polega na tym, że światło niebędące w rezonansie powoduje przesunięcia w wewnętrznej strukturze atomu i powstanie potencjału proporcjonalnego do natężenia, co utrzymuje atomy w oczkach siatki). Atomy pobudzają się następnie do świecenia specjalnym laserem.

Resolving the gravitational redshift within a millimeter atomic sample, T. Bothwell et al., *Nature* **602** 420 (2022)

Niebo w sierpniu

Sierpień jest pierwszym miesiącem roku z szybko ubywającym dniem i wydłużającą się nocą. Przez cały miesiąc Słońce obniży wysokość górowania o 10° i zmniejszy czas przebywania nad widnokregiem o prawie dwie godziny. Dalszemu pogorszeniu ulega także nachylenie ekliptyki do wieczornego widnokregu. Jednocześnie zwiększa się jej nachylenie o świcie. Na naszych szerokościach geograficznych objawi się

Ogólna teoria względności stwierdza, że zegary znajdujące się w różnych potencjałach grawitacyjnych tykają w różnym tempie w porównaniu do siebie (lub do zegara „referencyjnego”). Efekt ten znany jest jako grawitacyjne przesunięcie ku czerwieni (*gravitational redshift*) i został po raz pierwszy opisany przez Alberta Einsteina w 1907 roku, czyli osiem lat przed opublikowaniem przez niego ogólnej teorii względności. W 1971 roku fizyk Joseph C. Hafele i astronom Richard E. Keating wysłali w podróż dookoła świata na pokładach zwykłych rejsowych samolotów kilka zegarów atomowych (cezowych), aby wykryć różnice między wskazaniem zegarów „podróżujących” a wskazaniem analogicznego zegara znajdującego się w laboratorium, zgodne ze szczególną i ogólną teorią względności. Aktualnie zegary atomowe osiągnęły niepewność systematyczną rzędu 10^{-18} , odpowiadającą błędowi mniejszemu niż 1 s w okresie od momentu Wielkiego Wybuchu do teraz (dla porównania, zwykły zegarek kwarcowy, np. mój Casio F-91W, gubi średnio 1 s na dzień).

Równoważnie efekt przesunięcia ku czerwieni rozumiemy jako grawitacyjną dylatację czasu: jeśli dwa takie same źródła promieniowania elektromagnetycznego znajdują się w różnych potencjałach grawitacyjnych, źródło w wyższym potencjale (dalej od ciała przyciągającego) będzie wydawało się świecić bardziej niebiesko (będzie „tykać” szybciej). Z punktu widzenia ustalonego obserwatora źródło będzie miało wyższą mierzoną częstotliwość niż źródło bliżej ciała przyciągającego: czas płynie wolniej na parterze, a szybciej na pierwszym piętrze. Kolor fotonów opisuje więc tempo przepływu czasu, a dostatecznie precyzyjny zegar otrzymany w ten sposób można wykorzystać wprost do badania czasoprzestrzeni.

I tak na przykład w 2020 roku grupa z RIKEN w Japonii, pod kierunkiem Hidetoshiego Katoriego, porównała dwa strontowe zegary wykorzystujące siatki optyczne (*optical lattice clocks*, OLC) odległe od siebie o 450 m, umieszczone w wieży Tokyo Skytree. Badacze uzyskali jeden z najbardziej precyzyjnych ziemskich pomiarów przesunięcia ku czerwieni (w eksperymencie Roberta Pounda i Glena A. Rebki Jr. z 1959 roku – z oczywistych względów mniej dokładnym, w którym po raz pierwszy zmierzono ten efekt, budynek laboratorium Jeffersona w kampusie Harvarda miał zaledwie trzy piętra).

Obecne zegary „siatkowe” stały się tak dokładne, że możliwe są pomiary zmiany przyspieszenia grawitacyjnego w odległościach rzędu milimetra! W pracy Bothwell et al. (2022) (link poniżej), korzystając z technik OLC (100 tys. atomów ^{87}Sr w temperaturze około 100 nK), zademonstrowano pomiar przesunięcia ku czerwieni oraz względną dokładność pomiaru częstotliwości rzędu ułamkowej niepewności częstotliwości $7 \cdot 10^{-21}$ pomiędzy dwoma nieskorelowanymi próbkami w jednowymiarowej siatce ustawionej pionowo względem powierzchni ziemi. W przyjętym układzie współrzędnych przesunięciu grawitacyjnemu odpowiada gradient częstotliwości wynoszący $-1,09 \cdot 10^{-19} \text{ mm}^{-1}$, natomiast finalny wynik pomiaru to $-9,8(2,3) \cdot 10^{-20} \text{ mm}^{-1}$.

Pomiar ten jest dużym krokiem w kierunku badania grawitacji w małych skalach, w dziedzinie najtrudniejszej, czyli na przecięciu ogólnej teorii względności i mechaniki kwantowej – dwóch teorii, których opis w jednym języku jest od dziesięcioleci legendarnie trudnym problemem. Praktyczne zastosowania natomiast to dużo dokładniejsze niż do tej pory satelitarne pomiary okolicznego potencjału grawitacyjnego, czyli geoidy Ziemi.

Michał BEJGER

Istituto Nazionale di Fisica Nucleare (INFN), Sezione di Ferrara, Włochy, Centrum Astronomiczne im. Mikołaja Kopernika PAN

to szczególnie w (nie)widoczności planety **Merkury**, która 27 sierpnia osiągnie bardzo dużą elongację wschodnią, wynoszącą ponad 27° . Jednak pomimo tak dużej odległości kątowej od Słońca planeta zajdzie tego dnia zaledwie pół godziny po nim i zginie w zorzy wieczornej. Wystarczy jednak udać się w obszar szerokości geograficznej wynoszącej 35°N , albo jeszcze bardziej na południe, by dostrzeżenie Merkurego nie stanowiło

kłopotu. W tej części świata Merkury stanie się ozdobą wieczornego nieba na ponad miesiąc.

Również warunki obserwacyjne Księżyca przez pierwszą część miesiąca pozostaną niezadowalające. W pierwszej dekadzie sierpnia Srebrny Glob ledwo przekroczy wysokość 10° nad widnokregiem, dążąc od I kwadry 5 dnia miesiąca do pełni tydzień później. W tym okresie warto odnotować: zbliżenie się Księżyca w fazie 33% na niecałe 5° do Spiki, najjaśniejszej gwiazdy Panny, 3 sierpnia, I kwadrę 5 sierpnia, koniunkcję $0,5^\circ$ z gwiazdą Dschubba tuż przed zachodem obu ciał niebieskich dobę później oraz zbliżenie na 5° do Antaresa, najjaśniejszej gwiazdy Skorpiona, 7 sierpnia. Podczas dwóch kolejnych dni tarcza Księżyca zwiększy fazę do 92% i dotrze na 3° do Nunki, jednej z jaśniejszych gwiazd Strzelca. Tej nocy Księżyc zakryje gwiazdę 3. wielkości τ Sgr. Niestety do zakrycia dojdzie kilkanaście minut po godzinie 20, a zatem tuż po zachodzie Słońca, na jeszcze jasnym niebie. Księżyc odsłoni tę gwiazdę dopiero później, gdy niebo wciąż pozostanie jasne, zwłaszcza w północno-zachodniej części kraju.

W nocy z 11 na 12 sierpnia Księżyc przejdzie przez pełnię i jednocześnie zbliży się do **Saturna** na nieco ponad 6° . Złączenie jakiegoś ciała niebieskiego z Księżycem w pełni oznacza, że owe ciało jest bliskie opozycji do Słońca. I tak właśnie jest z Saturnem. Planeta przejdzie przez tę konfigurację 14 sierpnia. Oznacza to, że Saturn w sierpniu jest najbliżej Ziemi, a w związku z tym ma największą jasność i rozmiary kątowe. W tym roku planeta osiągnie jasność $+0,3^m$ i średnicę kątową $19''$, a podczas górowania wzniesie się na wysokość 23° . W sierpniu Saturn wędruje niewiele ponad $1,5^\circ$ na północ od dwóch jasnych gwiazd Koziorożca: Deneb Algiedi (δ Cap) i Nashira (γ Cap).

Pełnia 12 sierpnia oznacza także bardzo słabe warunki obserwacyjne corocznego słynnego roju meteorów Perseidów. Gdyby nie obecność Księżyca na niebie, tej i kolejnej nocy można by liczyć na ponad 100 jasnych meteorów na godzinę. Niestety tym razem większość z nich zginie w księżycowej łunie, da się dostrzec tylko najjaśniejsze z nich. Przy obserwacjach roju Perseidów najlepiej odwrócić się plecami do Księżyca.

Następnej nocy faza Srebrnego Globu nieznacznie się zmniejszy, do 99%, a jego tarcza przejdzie 3° na północ od planetoidy (4) Westa, najjaśniejszej planetoidy na naszym niebie. W trzecim tygodniu miesiąca, 23 sierpnia, Westa przejdzie przez opozycję względem Słońca, osiągając wtedy jasność nawet $+5,8^m$, czyli porównywalnie do planety Uran. W sierpniu Westa przemierzy około 7° w kierunku południowo-zachodnim na tle gwiazdozbioru Wodnika, jakieś 11° na południowy wschód od wspomnianej już wyżej gwiazdy Deneb Algiedi, a 29 sierpnia planetoida przejdzie zaledwie $11'$ od gwiazdy 5. wielkości 41 Aqr. Oczywiście pełnia Księżyca uniemożliwi jej obserwację. Na szukanie Westy wśród gwiazd należy przeznaczyć początek lub koniec miesiąca.

Po pełni naturalny satelita Ziemi wreszcie zacznie wspinać się wyżej. Księżyc przetnie południk lokalny 15 sierpnia na wysokości 35° , zajmując pozycję między planetami **Jowisz** i **Neptun**. Do pierwszej z wymienionych planet Księżycowi zabraknie 6° , do drugiej 8° . W sierpniu jasność największej planety Układu Słonecznego zwiększy się

do $-2,9^m$, średnica tarczy zaś urośnie do $49''$. Neptun oczywiście świeci znacznie słabiej i nie przebije się przez księżycową lunę. W sierpniu Neptun wędruje jakieś $1,5^\circ$ na zachód od gwiazdy 5. wielkości 20 Psc, przy czym sama planeta świeci blaskiem $+7,8^m$. Obie planety szykują się do wrzesniowych opozycji, a Jowisz stopniowo zbliża się do Neptuna, by pod koniec listopada zmniejszył dystans do tej planety do nieco ponad 6° .

Srebrny Glob przejdzie przez ostatnią kwadrę 19 sierpnia i spotka się z dwiema kolejnymi planetami Układu Słonecznego. Ponownie na lewo od Księżyca znajdzie się łatwo widoczna gołym okiem planeta **Mars**, świecąca w tym momencie z jasnością 0^m , przy średnicy tarczy $9''$. Natomiast na prawo od niego – znacznie słabiej świecąca planeta **Uran**. Jej jasność wynosi $+5,7^m$. Do Marsa zabraknie Księżycowi 5° , do Urana – jedynie o stopień więcej. Mars w sierpniu przemierzy ponad 17° , zaczynając miesiąc nieco ponad 1° na południe od Urana i kończąc 3° od gwiazdy ϵ Tauri, czyli najbardziej na północ wysuniętej jasnej gwiazdy Hiad. W tym czasie jego jasność urośnie od $+0,2^m$ do $-0,1^m$, a tarcza zwiększy średnicę z $8''$ do $10''$.

Po ostatniej kwadrze Księżyc powędruje ku nowiu 27 sierpnia, a ponieważ nachylenie ekliptyki do porannego widnokregu jest bardzo duże, Księżyc pozostanie dobrze widoczny prawie do samego spotkania ze Słońcem. W tym czasie Srebrny Glob ładnie zaprezentuje tzw. światło popielate, czyli swoją nocną stronę oświetloną światłem odbitym od Ziemi.

Srebrny Glob 20 sierpnia w fazie 40% minie Aldebarana, najjaśniejszą gwiazdę Byka, w odległości 7° . Dobę później faza Księżyca spadnie do 32% i dotrze on na odległość 5° do gwiazdy El Nath, stanowiącej północny róg Byka. Następne trzy poranki Księżyc spędzi w gwiazdozbiorze Bliźniąt, zmniejszając stopniowo fazę od 23% do 9%. Tak cienki sierp Księżyca 24 sierpnia wzejdzie 3° pod Polluksem i godzinę przed wschodem Słońca zdąży wznieść się na powyżej 20° ponad widnokrąg.

Podczas dwóch ostatnich poranków przed nowiem również da się dostrzec bardzo cienki sierp Księżyca. I tak 25 sierpnia około godziny 4:40 Srebrny Glob w fazie 5% zdąży się wznieść na wysokość 12° , a 10° pod nim pokaże się bardzo jasna planeta **Wenus**. Następnej doby sierp Księżyca wżęzi się do zaledwie 1° i o tej samej porze zajmie pozycję na wysokości 3° . Wenus, która przez cały sierpień zbliża się do Słońca i świeci coraz niżej, pokaże się 4° na prawo od Srebrnego Globu. Podczas swojej wędrówki, 18 sierpnia, Wenus przejdzie zaledwie $0,5^\circ$ na południe od jasnej gromady otwartej gwiazd M44 w Raku. Wenus zbliża się do październikowej koniunkcji górnej ze Słońcem i jest daleko od nas, stąd wygląd jej tarczy podczas kolejnych dni zmienia się bardzo niewiele. Do końca miesiąca tarcza planety utrzyma średnicę $10''$ i zwiększy fazę do 97%, świecąc z jasnością $-3,9^m$.

W połowie lipca przez maksimum swojej aktywności przeszła długookresowa gwiazda zmienna Mira Ceti. W sierpniu Mira powinna nadal wyraźnie przekraczać granicę widoczności gołym okiem. Około godziny 3 Mira zajmuje pozycję na wysokości mniej więcej 30° nad południowo-wschodnią częścią nieboskłonu.

Ariel MAJCHER