

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