

# Meritev ACES lahko preseže pričakovanja

Franc Rozman

**Povzetek:** Projekt European Space Agency ACES (Atomic Clock Ensemble in Space) je mednarodni znanstveni projekt, katerega namen je zelo natančno primerjanje atomskih ur na Zemlji in v vesolju. Morebiten sinhron tek ure na ISS satelitu z uro na Zemlji pomeni, da gravitacija ne vpliva na frekvenco radijskega vala oziroma svetlobe. V preteklosti izmerjen gravitacijski zamik se lahko nanaša na valovno dolžino, ne pa frekvenco. Avtonomni vpliv okoliščin (gravitacija, hitrost, ..) ločeno na frekvenco in ločeno na valovno dolžino, pa odpira vprašanje hitrosti svetlobe.

Morebiten sinhron tek ure na ISS satelitu z uro na Zemlji pa poveča zanimanje za ločeno merjenje frekvence in valovne dolžine svetlobe v razno raznih okoliščinah.

S tremi v nadaljevanju opisanimi meritvami iz preteklosti lahko ocenimo, kako blizu smo bili pričakovanim rezultatom meritev ACES. Pretekle meritve marsikdaj niso bile izvedene dosledno, zato je to vprašanje ostalo odprto. V nadaljevanju mu skušajmo nameniti več pozornosti.

## Uvod

Razvoj fizike običajno napreduje po korakih, občasno pa se pojavijo okoliščine, ki omogočijo večje premike v razumevanju naravnih zakonitosti. Enega takih korakov lahko ustvari ACES meritev.

Sistem ACES je nameščen na International Space Station (ISS) in vsebuje dve izjemno natančni atomski uri: cezijevo in vodikovo uro. Glavni cilj projekta je merjenje razlik v teku časa med urama na Zemlji in v orbiti. Projekt uporablja mikrovalovno povezavo med ISS in zemeljskimi postajami, ki omogoča zelo natančno primerjavo časa.

Če se potrdijo rezultati ACES meritve, kjer bi meritev pokazala sinhron tek ur na Zemlji in v orbiti, bi to zahtevalo nov model razumevanja gibanja svetlobe. Zamislimo si ga in ga imenujmo: *Klasični model svetlobe ali na kratko Klasični model*.

Na kratko ga lahko opišemo takole: prostor in čas sta absolutna, svetloba zapusti vir s hitrostjo  $c$  (glede na vir). Eter ne obstaja, hitrost svetlobe določa vir svetlobe. Gibanje opazovalca vpliva na zaznano frekvenco, ne pa na njeno valovno dolžino.

Na ponoru se hitrosti svetlobe na izvoru ( $c$ ), prišteje hitrost ponora ( $c+v$ ). *Klasični model svetlobe* je hipoteza, ki jo bomo v nadaljevanju skušali potrditi ali ovreči predvsem z meritvijo ACES pa tudi z drugimi meritvami.

*Klasični model svetlobe* se v meritvah nakazuje že dalj časa. Pogosto takšne meritve niso bile obravnavane dovolj poglobljeno, da bi enoumne potrdile predhodno nakazane lastnosti *Klasičnega modela svetlobe*. Oglejmo si nekaj primerov meritev, ki bi lahko odgovorile na gornje dileme, če bi bile opravljene dosledno in v celoti. Posamezne meritve morda niso bile deležne zadostne pozornosti tudi zato, ker rezultati niso ustrezali uveljavljenim razlagam fizikalnih pojavov. Sledi opis treh meritev, ki že več desetletij sprožajo razprave o razumevanju svetlobe, z namenom raziskovanja svetlobe.

## Pioneer anomaly

Raketi Pioneer 10 in Pioneer 11 sta bili med prvimi vesoljskimi sondami, namenjenimi raziskovanju zunanega dela Osončja in medzvezdnega prostora. Izstreljeni sta bili leta 1972 in 1973. Raziskovalci uporabljajo dve metodi merjenja njunih hitrosti: Dopplerjeve meritve radijskih signalov ter merjenja časa potovanja radijskega signala do rakete in nazaj.

Meritvi v relativističnem modelu kažeta različni hitrosti rakete. Pojav je znan pod imenom »Pioneer anomaly«. Sprožil je številne razprave. Razlika med izmerjenima hitrostma je majhna, vendar merljiva.

Meritve oddaljenosti in hitrosti rakete z merjenjem časa potovanja radijskega signala do rakete in nazaj lahko pojasnimo na dva načina: relativistično ali v *Klasičnem modelu*. V *Klasičnem modelu* svetloba zapusti vir s hitrostjo  $c$ , na ponor pa svetloba prispe s hitrostjo  $c-v$ , če se ponor oddaljuje od izvora s hitrostjo  $v$ .

Gledano z Zemlje oba modela predvidevata, da radijski signal od Zemlje do rakete potuje s hitrostjo  $c$ . Relativistični model predvideva, da signal tudi v povratni smeri potuje s hitrostjo  $c$ , *Klasični model* pa predvideva, da signal na raketi izide s hitrostjo  $c$  glede na raketo, glede na Zemljo pa se giblje s hitrostjo  $c-v$ . Hitrost rakete ( $v$ ) je v tem primeru približno 12 km/s.

Po *Klasičnem modelu* povratni signal potrebuje za pot od rakete do Zemlje več časa kot po relativistični razlagi. Posledično modela pri istih izmerjenih časih potovanja signala (do rakete in nazaj) pomenita različni hitrosti rakete.

V *Klasičnem modelu* hitrost rakete, izmerjena s časom poti signala do rakete in nazaj, sovpada z Dopplerjevimi meritvami. Relativistična interpretacija kaže drugačno hitrost rakete, če jo merimo z Dopplerjem, kot če jo merimo s časom poti signala.

*Klasični model* ima s tem potrditev teorije. Zagovorniki relativnosti pa iščejo pojasnila in po daljšem iskanju so izpostavili »toplotno sevanje«, kot razlog nepričakovane hitrosti rakete. Taka razlaga ne odgovarja na vprašanje. Ne iščemo razloga za nek nepričakovan pospešek rakete, ampak iščemo razlog, zakaj ena in druga meritev v modelu relativnosti ne ponudita enakih izmerjenih hitrosti.

## Sagnac interferometer

Na vrteči plošči imamo več ogledal nameščenih tako, da se žarek po krožni poti odbija od ogledala do ogledala. Eden od žarkov se od ogledal odbija v smeri vrtenja plošče, drugi pa v nasprotni smeri. Žarka za pot porabita različni čas, odvisno od hitrosti vrtenja plošče. Žarka zaključita svojo pot na detektorju, ki zazna njun fazni zamik.

Sagnacov pojav je dolgo veljal za pojav, ki ga ni možno uskladiti s teorijo relativnosti. Po daljšem naporu pa so raziskovalci našli relativistično pojasnilo.

V *Klasičnem modelu* se zaradi vrtenja interferometra v enem primeru zrcala približujejo svetlobnemu žarku, v drugem primeru pa se od njega oddaljujejo. Ob vsakem odboju svetlobe se enemu žarku hitrost poveča, drugemu pa zmanjša.

V *Klasičnem modelu* imata žarka na izhodu proti detektorju različni hitrosti, zato oddaljenost detektorja vpliva na izmerjen rezultat. V primeru relativističnega pogleda imata žarka na poti proti detektorju enaki hitrosti, zato oddaljenost detektorja ni pomembna.

S ponovitvijo meritve pri različnih oddaljenostih detektorja bi lahko spoznali, kateri od modelov objektivno pojasni delovanje interferometra. Ta meritev ni opravljena, čeprav bi bila ključna za dokazovanje relativnosti. ACES meritev bo dala nova izhodišča tudi za odgovor na to vprašanje.

## Hale-Bopp

Meritve kometa Hale–Bopp so bile med najbolj odmevnimi astronomskimi opazovanji devetdesetih let. Zaradi velike svetlosti je bil komet zelo primeren za spektroskopske in fotometrične raziskave.

Astronomi so pri opazovanju analizirali spektralne črte kometa ter iz njih določali hitrost kometa. Opazili so, da v znatnem delu svetlobe kometa ne opažajo zamika spektralne črte, kar bi lahko razlagali, da komet miruje. To je sprožilo razprave o možnih vzrokih za takšne rezultate

Avtorji meritve so menili, da merjena svetloba prihaja iz Zemljine ionosfere in ne s kometa. To predpostavko bi lahko preverili tako, da bi teleskop preusmerili s kometa na temno nebo, kjer obstaja le ionosfera, vendar pa tega niso opravili. Ta njihova domneva ostaja nepojasnjena, kljub temu, da je ključna za razumevanje meritve.

V matematični transformaciji v *Evklidovem prostoru* hitrost ponora vpliva na zaznano frekvenco valovanja na ponoru po Dopplerjevem zakonu. Hitrost opazovalca pa ne vpliva na valovno dolžino. Pri vodnem ali zvočnem valovanju je taka transformacija tudi intuitivno razumljiva.

Če svetlobo obravnavamo v *Klasičnem modelu*, lahko dopustimo to matematično transformacijo tudi za svetlobno valovanje. V tej transformaciji različna hitrost opazovalca vpliva na frekvenco svetlobe, ne pa tudi na njeno valovno dolžino.

Pri meritvah kometa Hale–Bopp se zato pojavi vprašanje, kaj so merilni instrumenti dejansko zaznavali. Morda so avtorji merili predvsem valovno dolžino ne pa frekvence svetlobe. Če se svetloba obnaša skladno z *Klasičnim modelom*, niso mogli izmeriti pričakovanega Dopplerjevega zamika.

Ob tem vprašanju pa naletimo na spoznanje, da v fiziki ne posvečamo pozornosti sistematičnim meritvam, ki bi merile občutljivost posameznih tipov merilnih instrumentov ločeno za frekvenco in ločeno za valovno dolžino svetlobe. To spoznanje ostaja kot izziv za bodoče raziskave.

Primer take raziskave je preprost, vendar še nepoznan. Hitrosti sončevih izbruhov lahko enkrat merimo z optično prizmo, drugič z uklonsko mrežico.

Če meritvi pokažeta različna rezultata, na primer uklonske mrežice pokaže hitrost sončevih izbruhov, optična prizma pa jih ne pokaže, spoznamo dvoje: Optična prizma je na frekvenco in valovno dolžino svetlobe občutljiva drugače kot uklonska mrežica in drugo, hitrost sončevih izbruhov drugače vpliva na frekvenco kot valovno dolžino svetlobe. Tovrstne meritve v preteklosti niso bile deležne pozornosti.

## Zaključek

Te meritve so navedene zato, da pokažejo morebitno neodvisno spreminjanje frekvence in valovne dolžine svetlobe. Vse tri meritve zagovorniki teorije relativnosti uporabljajo za dokazovanje svojih pogledov. Tudi ostale meritve (GPS, Pound–Rebka, Hafele–Keating, ...), ki se nanašajo na relativnost, je možno razlagati, za »dokazovanje« teorije relativnosti ali kot tudi za »dokazovanje« *Klasičnega modela*, odvisno kdo to »dokazuje«. Nimamo torej pedagoških kriterijev za objektivno oceno zaupanja v relativnost oziroma Klasični model.

Meritev ACES, če bo v končni fazi pokazala, da hitrost ure na satelitu teče sinhrono s tekom ure na Zemlji, bi pomenila odgovor na prej zastavljena vprašanja, s tem pa velik korak v znanosti.

Za širše sprejetje morebitnih rezultatov sinhronega teka ur, bodo potrebna nova in nova preverjanja ACES meritve in morda celo njene dopolnitve. Potrebne bodo opisane dopolnitve že opravljenih meritev ter tudi njihovo ponovno preverjanje. Šele tako bodo merilni rezultati prepričali dovolj velik krog znanstvenikov. Govorimo namreč o velikem napredku v načinu razmišljanja.