

УНИВЕРЗИТЕТ У БЕОГРАДУ

МАТЕМАТИЧКИ ФАКУЛТЕТ

Бора Јовановић

**ОДРЕЂИВАЊЕ РАЗЛИКЕ ДИНАМИЧКОГ  
И СВЕТСКОГ ВРЕМЕНА И  
ПРЕДВИЂАЊА ПРОМЕНА У БРЗИНИ  
ЗЕМЉИНЕ РОТАЦИЈЕ**

докторска дисертација

Београд, 2013

UNIVERSITY OF BELGRADE

MATHEMATICAL FACULTY

Bora Jovanović

**DETERMINATION OF THE DIFFERENCE  
BETWEEN DYNAMICAL TIME AND  
UNIVERSAL TIME AND PREDICTIONS OF  
VARIATIONS IN THE EARTH'S ROTATION**

Doctoral Dissertation

Belgrade, 2013

Дисертација одобрена на Математичком факултету  
Универзитета у Београду  
12.12.2008. године.

Ментор: проф. др Стево Шеган  
Математички факултет

---

Комисија за одбрану:

1. проф. др Стево Шеган  
Математички факултет
  2. проф. др Надежда Пејовић  
Математички факултет
  3. академик др Зоран Кнежевић  
Астрономска опсерваторија  
Београд
-

## Одређивање разлике динамичког и светског времена и предвиђања промена у брзини Земљине ротације

### Апстракт

Проблем прецизног предвиђања Земљине просторне оријентације је у директној вези са познавањем будућих вредности параметара Земљине ротације, помоћу којих се врше трансформације између небеског и терестричког референтног система. Ти параметри су зависни од мноштва астрономских и геофизичких узрока, за чије збирно дејство још увек не постоје одговарајући теоријски модели, који би могли довољно прецизно да описују промене Земљине оријентације. Зато се предикције параметара Земљине ротације мање ослањају на геофизичке теорије, а више на математичка моделирања, која су заснована на разним нумеричким методама.

Овај рад је имао за циљ да докаже да је искључиво математичким приступом (без коришћења геофизичких модела и корекција) могуће постићи унапређења у предвиђањима неравномерности скале светског времена  $UT1$ . Познато је да тај параметар има најбржу и највећу промену, јер у потпуности пресликава Земљину ротацију са свим њеним неравномерностима, због чега његове предикције имају најмању тачност.

У раду је коришћена оригинална нумеричка метода за извођење апроксимативних функција у облику суме хармоника и експоненцијала (HE). На основу реалних података рађене су предикције за 10 дана, 30 дана и 500 дана у непрекидном периоду од годину и по дана. Додатно, приказани су и, до сада остварени, резултати једне дуговремене предикције која је истим начином урађена раније.

Сопствени резултати су упоређивани са одговарајућим резултатима других аутора, који су користили разне друге методе предикције, током реализације међународног пројекта "Earth Orientation Parameters Prediction Comparison Campaign" (EOP-RCC). Показало се да HE метод даје сличне резултате као и друге методе када се ради о 10-дневним и 30-дневним предикцијама, али у случају 500 дневних предикција дао је убедљиво најбољи резултат. Да је овај метод заиста погодан за предикције на дужим временским интервалима приказују и до сада (8 година) остварени резултати једне 10-годишње предикције.

Може се закључити да је предикцију величине  $\Delta T$ , која се публикује у астрономским годишњацима, могуће знатно унапредити, коришћењем HE метода.

**Кључне речи:** Време, светско време, терестричко време, референтни системи

**Научна област:** Астрономија

**Ужа научна област:** Земљина ротација

**УДК:** 521.933:519.65(043.3)

## Determination of the difference between dynamical time and universal time and predictions of variations in the Earth's rotation

### **Abstract**

The problem of precise prediction of the Earth's spatial orientation is directly related to the knowledge of the forthcoming values of the Earth's rotation parameters, by the use of which the transformations between celestial and terrestrial reference systems are carried out. These parameters depend upon a multitude of astronomical and geophysical causes; however, for their combined (simultaneous) effects no adequate theoretical models are available to describe precisely enough the changes in the Earth's orientation. Therefore, the predictions of the Earth's rotation parameters to a lower extent rely on geophysical theories, and more on mathematical modeling based on various numerical methods.

The objective of the thesis was to demonstrate that it is possible, applying mathematical approach exclusively (without using geophysical models and corrections) to achieve improvements in predicting the non-uniformities of UT1 universal time scale. It is a common knowledge that this parameter features the fastest and highest change, since it completely reflects the Earth's rotation with all its non-uniformities, and consequently its predictions feature the lowest accuracy.

The original numerical method for deriving approximate functions having the form of the sum of harmonics and exponentials (HE) is applied in the thesis. Based on actual data, 10-day, 30-day and 500-day predictions were done in the continual one and a half year period. In addition, presented were the actual achievements of a long-term prediction that, applying the same method, had been accomplished before.

The obtained results were compared to the respective results of other authors, who applied different prediction methods in the course of the international project "Earth Orientation Parameters Prediction Comparison Campaign" (EOPPCC). The HE method proved to release similar results as other methods of 10-day and 30-day predictions; however, in case of 500-day predictions it produced convincingly superior results. This method is actually suitable for longer interval predictions; this fact is confirmed by so far (after eight years) achieved results of a ten-year prediction.

The implied conclusion is that the prediction of the value  $\Delta T$ , which is released in astronomical almanacs, could be considerably upgraded by using the HE method.

**Keywords:** Time, Universal time, Terrestrial time, reference systems

**Scientific field:** Astronomy

**Field of Academic Expertise:** Earth rotation

**UDC:** 521.933:519.65(043.3)

## САДРЖАЈ

<b>1. УВОД</b> .....	<b>1</b>
<b>2. ВРЕМЕ</b> .....	<b>3</b>
2.1. ОПШТЕ НАПОМЕНЕ .....	3
2.2. КРЕТАЊЕ, ВРЕМЕ И ЊИХОВО МЕРЕЊЕ .....	5
2.3. ОСОБИНЕ ВРЕМЕНСКИХ СКАЛА .....	11
<b>3. САВРЕМЕНЕ СКАЛЕ ВРЕМЕНА</b> .....	<b>22</b>
3.1. РЕЛАТИВИСТИЧКИ КОНЦЕПТ ПРОСТОРА И ВРЕМЕНА .....	23
3.1.1. Гравитационо поље и геодезијске линије .....	26
3.1.2. Координатно и сопствено време .....	32
3.2. АТОМСКО ВРЕМЕ .....	38
3.2.1. Јединица за време .....	39
3.2.2. Међународно атомско време (TAI) .....	44
3.2.3. Светско координирано време (UTC) .....	50
3.2.4. Терестричко време (TT) .....	55
3.3. СВЕТСКО ВРЕМЕ .....	61
3.3.1. Време UT1 пре 2003. године .....	63
3.3.2. Међународни небески референтни систем (ICRS) .....	72
3.3.3. Међународни терестрички референтни систем (ITRS) .....	74
3.3.4. Прелазни референтни системи (CIRS, TIRS) .....	77
3.3.5. Време UT1 .....	86
3.4. ДИНАМИЧКО ВРЕМЕ .....	87
3.4.1. Ефемеридно време (ET) .....	88
3.4.2. Барицентрично и терестричко динамичко време (TDB, TDT) .....	93
3.4.3. Барицентрично и геоцентрично координатно време (TCB, TCG) .....	95
3.4.4. Барицентрично ефемеридно време ( $T_{eph}$ ) .....	98
3.4.5. Релације између динамичких временских скала .....	98

4. ПРОМЕНЉИВА БРЗИНА ЗЕМЉИНЕ РОТАЦИЈЕ И ОДРЕЂИВАЊЕ $\Delta T$ ..	100
4.1. ОСОБЕНОСТИ ЗЕМЉИНОГ РОТАЦИОНОГ КРЕТАЊА .....	100
4.2. РАЗЛИКЕ ДИНАМИЧКОГ И СВЕТСКОГ ВРЕМЕНА ( $\Delta T$ ) .....	103
5. ПРЕДИКЦИЈЕ $\Delta T$ И БРЗИНЕ ЗЕМЉИНЕ РОТАЦИЈЕ .....	108
5.1. ПРОБЛЕМИ ПРЕДВИЂАЊА БРЗИНЕ ЗЕМЉИНЕ РОТАЦИЈЕ .....	108
5.2. ПРЕДИКЦИЈЕ РАЗЛИКЕ UT1-UTC У ОКВИРУ ПРОЈЕКТА ЕОРРСС ...	109
5.2.1. Предикције разлика UT1-UTC методом НЕ .....	110
5.2.2. Резултати десетодневних предикција .....	113
5.2.3. Резултати тридесетодневних предикција .....	114
5.2.4. Резултати петстодневних предикција .....	115
5.2.5. Средња одступања предикција извршених НЕ методом .....	116
5.2.6. Број предикција и тежине метода у ЕОРРСС-у .....	119
5.3. ДУГОВРЕМЕНЕ ПРЕДИКЦИЈЕ .....	120
5.3.1. Резултати дестогодишње предикције .....	120
5.3.2. Процена предикционих грешака према IERS RS/PC и IERS EOP PC	126
6. ЗАКЉУЧАК .....	127
ЛИТЕРАТУРА .....	128
ПРИЛОЗИ .....	138
(Важније IAU одлуке у вези временских скала и референцијних система)	
(П1) Резолуције XXI Генералне скупштине IAU (Buenos Aires, 1991.) .....	139
(П2) Резолуције XXIV Генералне скупштине IAU (Manchester, 2000.) .....	141

## 1. УВОД

Генерално, ова дисертација се бави неравномерностима скале *светској времена* UT1 или, другим речима, неравномерностима брзине Земљине ротације. Прецизније, њен конкретан циљ је да се ближе дефинишу границе предвидљивости тих неравномерности у савременим условима и да се, при томе, прикажу резултати сопственог рада на том плану.

Испитивања неравномерности скале *светској времена* су могућа тек пошто је упоредимо са неком другом, знатно равномернијом, временском скалом. До сада су остварена само два начина формирања таквих временских скала које могу бити референтне за светско време. Један начин је теоријски, јер се заснива на важећим законима динамике, односно на познавању закона кретања тела Сунчевог система, а други је практични, или статистички, начин, у основи кога су упоређивања временских скала великог броја прецизних атомских часовника, због извођења и одржавања јединствене скале међународног атомског времена TAI.

Прву улогу тог референтног, "униформног", времена (за UT1) је имало 50-тих година прошлог века тзв. *ефемеридно време* ET, које било аргумент у једначинама кретања тела Сунчевог система, а такође и у астрономским ефемеридама, одакле му потиче назив. *Ефемеридно време* је почетком 1984. године било замењено *шересџричким динамичким временом* TDT, а од 1991. године, са дефинитивним увођењем опште теорије релативности у астрономску теорију и праксу (а може се слободно рећи и у метрологију, генерално), наследник ET и TDT времена је постало, коректније дефинисано, *шересџричко време* TT, које је у фиксној линеарној вези са *геоцентричним координатним временом* TCG. Зато промене вредности параметра  $\Delta T$ , који представља разлику ET-UT1, TDT-UT1 или TT-UT1, потпуно описују неравномерности времена UT1, а самим тим и варијације у брзини Земљине ротације.

Имајући у виду да скала атомског времена TAI и поменуте теоријске скале (ET, TDT, TT) броје временске јединице исте величине и да између њих и TAI постоји фиксна разлика од 32.184 секунде (са милисекундном тачношћу), као потпуни еквивалент улози параметра  $\Delta T$  у испитивањима варијација UT1 служе и одступања UT1-TAI. Штавише, разлика UT1-TAI је много прецизнији индикатор неравномерности



UT1 времена, јер се она, као један од параметара Земљине ротације (или оријентације), савременим радиоинтерферометријским методама одређује са тачношћу која се мери микросекундама.

Већ из наведеног је јасно да тема овог рада захвата једну веома широку мултидисциплинарну област која се бави временом и Земљином ротацијом. Поред астрономије (време, референтни системи, астрометрија, Земљина ротација, динамика Сунчевог система, ...), ту су укључени још физика и техника (време, теорија релативности, метрологија, атомски сатови, ...), затим геодезија (терестрички референтни системи) и геофизика (Земљина ротација, тектонска померања, структура и динамка слојева у Земљиној унутрашњости и њеном флуидном омотачу), а ту је и математика (диференцијална геометрија, аналитички и нумерички методи, ...).

Поред ширине области која се односи на време и Земљину ротацију, други проблем је њен бурни развој у протеклим деценијама и велики број уведених промена, тако да детаљније бављење историјским аспектима ове теме није могло доћи у обзир. Дисертација се зато бави само савременим временским скалама, укључујући само најнеопходнију историјску фактографију.

Главна тема ове тезе је испитивање тачности предикција неравномерности временске скале UT1. С обзиром да се у таквим испитивањима користе углавном математички модели којима се описују реални подаци и затим се врши њихова екстраполација, и овде се ради о примени једног таквог моделирања које, за разлику од других, као што ће се видети, даје нарочито добре резултате код дуговремених предикција. Оно је засновано на оригиналној алгебарској методи апроксимације (HE) која врло прецизно издваја периодичне компоненте у подацима и истовремено одређује њихов тренд.

Највећи проблем код свих предикција, а нарочито оних дуговремених, је што се њихова анализа може извршити тек пошто се прикупе реални подаци. То значи да се на њих мора сачекати бар онолико времена колика је ширина предикционог интервала. А други, не мањи, проблем је објективна верификација и поређење таквих резултата, када су добијени различитим методама и из различитих улазних података.

У овом раду је други проблем ефикасно решен, јер је била обезбеђена објективна провера и компарација наших резултата и на међународном и на локалном нивоу.

## 2. ВРЕМЕ

Пре детаљнијег бављења актуелним скалама светског и динамичког времена, упознајмо се прво са неким основним појмовима у вези са временом и временским скалама на мало општији начин.

### 2.1. ОПШТЕ НАПОМЕНЕ

У егзактним природним наукама, време је једна од седам основних физичких величина чија се јединица (s) налази у договореном међународном мерном систему (SI), заједно са јединицама за дужину (m), масу (kg), апсолутну температуру (K), јачину струје (A), јачину светлости (cd) и количину супстанце (mol). То значи да се оно *мери* одговарајућим мерним инструментима, а такође и да је емпиријски или теоријски установљеним законима *повезано* са другим физичким величинама, како основним, тако и изведеним. Те *везе* се исказују језиком коначне или инфинитезималне математике, зависно од природе појединих закона, од особина усвојених теорија, а у неким случајевима, и од тачности њиховог приближног представљања.

За разлику од других физичких величина, време има битне посебности које га издвајају и које су га хиљадама година уназад чиниле загонетним објектом интересовања не само појединих научних области, него и, генерално, филозофије, религије, као и свих грана уметности. Тако, у зависности од усвојеног теоријског модела или схватања, постоје различити одговори на фундаментална питања, као што су, на пример: да ли је време материјално или нематеријално, коначно или бесконачно, дискретно или непрекидно, једнодимензионално или вишедимензионално итд.

Време је такође и незаобилазни пратилац у животу сваког човека, те се сви, свесно или подсвесно, баве њиме и имају, више или мање, развијен *осећај* за његову *количину*. На пример, ако је очигледно, и без икаквих мерних уређаја, свако ће установити да је почетак догађаја *A* био *пре* почетка догађаја *B*, а почетак догађаја *C* *после* њих, или да је догађај *C* *најмање шрајао* јер се завршио *пре* завршетка догађаја *B*, који је *мање шрајао* него догађај *A*.

Међутим, иако је логично очекивати да би свеопште размишљање о времену и бављење њиме требало да доведе до значајног напретка у разумевању тог појма, категорије или физичке величине, природа времена још увек представља велику енигму. Ниједна теорија, ни појединачно, ни комплементарно са другим теоријама, не даје задовољавајуће одговоре на сва питања, а многе од њих су суштински супростављене већ у својим основама. Не постоји неко опште, преовлађујуће, објашњење зашто је то тако, али, према личном суду, две ствари су ту најбитније - укорееена *представа о времену као покретном објекту* и неуочавање или занемаривање *посебности мерења времена* у односу на мерење других физичких величина.

За време се уобичајено каже да *прошче, иде, жури, никад не сшаје, цури* и томе слично. Да такви искази нису само производ лаичке илузије, потврђују чак и физичари – релативисти, када, на пример, кажу да је '*шок сопственог времена неког тела све сшорији, уколико се то тело брже креће*'. Међутим, *кретање времена* је објективно тешко прихватити, како са становишта филозофије и логике, тако и саме физике, јер постоји очигледан *circulus vitiosus*. Ако се нешто креће, онда мора да постоји и брзина тог кретања у односу на неки референтни систем. А брзина је, као што је познато, изведена величина која означава неку промену у јединици времена. У нашем случају, не би било могуће одговорити на питање: 'у јединици ког времена је дефинисана брзина кретања времена, и у односу на који референтни систем?'

Са друге стране, и сам термин *мерање времена* је проблематичан, ако време сматрамо мером извесног кретања, јер би он значео да говоримо о мерењу неке, већ дефинисане, мере.

Поред ове две напомене, у вези *прошока* и *мерања* времена, могу се истаћи још неки слични примери који сви заједно указују на чињеницу да није нимало једноставно засновати апсолутно непротивуречну теорију времена и, поготово, разумети његову природу.

Постојало је, а и данас постоје, многа различита схватања о времену, кретању и простору, од којих су нека саставни део појединих филозофских теорија [104, 76], али када је реч о егзактним дисциплинама, какве су астрономија и физика, најпознатије су Њутнова, која говори о апсолутном простору и времену, и Ајнштајнова, која проистиче из његове Теорије релативности, мада у савременој квантној физици такође постоје посебна схватања о истим категоријама, која су потпуно опречна и Њутновим и Ајштајновим. О њима овде неће бити речи, обзиром да је последњих деценија, одлукама надлежних међународних организација, релативистички концепт потпуно прихваћен као тачан и уведен у метрологију времена и све астрономске дисциплине, укључујући астрометрију, небеску механику и ефемеридну астрономију.

Важно је напоменути да атрибут *тачна* у синтагми 'тачна теорија' треба условно схватити, јер свака теорија полази од извесног броја ставова (аксиома или постулата) за које је унапред претпостављено да су тачни. Тако да је, за теорију која је више усаглашена са експерименталним резултатима него нека друга теорија, вероватно примереније користити придев *прихваћљивија*, него *тачнија*.

Обзиром да релативистички модел, којим се тренутно барата и у теорији и у пракси, није баш најпогоднији за објашњавање основних појмова у вези времена и његовог мерења, за ту сврху, послужићемо се једним другачијим теоријским моделом који у себи садржи мањи број полазних претпоставки, једноставнији је и, уз то, усаглашен је са личним погледима и преференцијама.

## 2.2. КРЕТАЊЕ, ВРЕМЕ И ЊИХОВО МЕРЕЊЕ

Није тешко интуитивно прихватити да су *кретање* и *време* тесно повезане категорије, штавише, могло би се рећи и неодвојиве, јер једну без друге није могуће чак ни замислити. Да бисмо описали њихову везу, најпогодније је послужити се математичким језиком, полазећи од дијалектичког гледишта, по коме је кретање основна карактеристика нашег Универзума и свих његових саставних делова.

Дакле, ако смо *кретање* прихватили као најстарији појам, можемо се онда одредити да ли га сматрамо *дискретним* или *непрекидним*.

Ако претпоставимо да је *кретање*<sup>1</sup> дискретне природе, онда оно може бити представљено у форми једног пребројивог скупа који је строго уређен и чији елементи, стога, чине један повезани низ. Елементима тог скупа, које ћемо назвати *стањима* или *елементарним стањима* (кретања), придружени су (нумеричка или ненумеричка) дефиниција *стања* и нека **коначна** количина времена, назовимо је, *трајање стања*<sup>2</sup>.

Нека је са  $\mathcal{A}$  означено неко кретање које се одвија узастопном реализацијом и сменом стања  $a_i = a_i(s_i, \tau_i)$ ,  $i \in \mathbb{Z}$ , где  $s_i$  представља *вредност* или *код* стања  $a_i$ , а  $\tau_i$  његово *трајање*. Скуп

$$\mathcal{A} = \{\dots, a_{i-1}, a_i, a_{i+1}, a_{i+2}, \dots\} \quad (2.1)$$

је потпуно уређен бинарном релацијом '*пре*' (симбол  $\prec$ ), или њеном супротном '*после*' (симбол  $\succ$ ), тако да исказ  $a_j \prec a_k$ , или њему еквивалентан  $a_k \succ a_j$ , значи да се стање  $a_j$  реализовало *пре* стања  $a_k$ , односно да се стање  $a_k$  догодило *после* стања  $a_j$ .

<sup>1</sup> Подразумева се било које кретање.

<sup>2</sup> Није неопходна претпоставка о једнаком трајању стања

Релације  $\prec$  и  $\succ$  имају особине асиметрије, транзитивности и потпуности. То значи да, ако са  $\otimes$  означимо ма коју од њих, важи  $\forall a_x, a_y, a_z \in \mathcal{A}$ :

$$\begin{aligned} a_x \otimes a_y &\Rightarrow \neg(a_y \otimes a_x) && \text{(асиметрија)} \\ a_x \otimes a_y \wedge a_y \otimes a_z &\Rightarrow a_x \otimes a_z && \text{(транзитивност)} \\ a_x \otimes a_y &\bar{\vee} a_y \otimes a_x && \text{(потпуност)}. \end{aligned}$$

Уместо називима 'и $\bar{p}$ ре' и 'и $\bar{o}$ сле', релације  $\prec$  и  $\succ$  могли смо именовати са 'раније' и 'касније', али то је мање битно. Важно је да су оне у складу са индексирањем узастопних стања, тако да ћемо чињеницу

$$\dots \prec a_{i-1} \prec a_i \prec a_{i+1} \prec a_{i+2} \prec \dots, \quad (2.2)$$

искористити да дефинишемо временску метрику кретања  $\mathcal{A}$ , користећи индексе појединих стања.

Имајући у виду да свако стање има коначну временску компоненту, или коначно трајање, можемо дефинисати временску дистанцу између било која два стања кретања, једноставним пребројавањем, односно одређивањем броја међустања. Тако за кретање  $\mathcal{A}$ , временско растојње између стања  $a_j$  и стања  $a_k$  износи

$$D_{j,k}(\tau) = |k - j|\tau, \quad (2.3)$$

при чему је

$$\left. \begin{aligned} \tau &= \frac{1}{k-j} \sum_{i=j+1}^{k-1} \tau_i, && \text{за } k-j > 1, \\ \tau &= \frac{1}{j-k} \sum_{i=k+1}^{j-1} \tau_i, && \text{за } j-k > 1, \\ \tau &= 0, && \text{за } |k-j| = 1. \end{aligned} \right\} \quad (2.4)$$

Обратимо пажњу на могућност двоструког тумачења вредности дискретне функције  $D_{j,k}(\tau)$ , као мере за количину времена. Она, са једне стране, представља збир  $\bar{i}$ рајања свих стања  $\sum_i \tau_i$  између  $a_j$  и  $a_k$ , што је очигледно када одговарајући израз за  $\tau$  из (2.4) заменимо у (2.3) и скратимо бројилац  $|k-j|$  са истим имениоцем, а са друге стране, представља целобројни умножак величине  $\tau$ , која се на основу (2.4) може сматрати  $\bar{i}$ росечним  $\bar{i}$ рајањем једног стања изведеним из свих стања између  $a_j$  и  $a_k$ .

Наравно, директно израчунавање  $\bar{i}$ росечног  $\bar{i}$ рајања  $\tau$  из (2.4) није могуће јер нису познате појединачне вредности  $\tau_i$ , нити је дефинисан било какав мерни систем

којим би евентуално могле бити изражене њихове нумеричке вредности. Једина претпоставка је била да су оне коначне и да су компоненте, или *својство*, одговарајућих елементарних стања у кретању  $\mathcal{A}$ . Зато друго тумачење смисла функције  $D_{j,k}(\tau)$ , по коме се **количина времена мери бројем** фиктивних јединица  $\tau$ , односно бројем најситнијих корака током кретања, има много већу употребну вредност.

На основу горе реченог, можемо извести закључак да је свако кретање *самомерљиво*, јер индексирањем његових узастопних дискретних стања уједно дефинишемо једну временску скалу којом меримо растојање између било које две инстанце тог кретања у јединицама  $\tau$ . Међутим, свако кретање се може упоређивати и са било којим другим кретањем<sup>3</sup>, па је логично изабрати једно референтно кретање помоћу кога ћемо дефинисати заједничку временску скалу.

Нека је већ разматрано кретање  $\mathcal{A}$  референтно, а кретање  $\mathcal{B}$  неко друго кретање

$$\mathcal{B} = \{\dots, b_{j-1}, b_j, b_{j+1}, b_{j+2}, \dots\}. \quad (2.5)$$

Скуп  $\mathcal{B}$  је, исто као и скуп  $\mathcal{A}$ , потпуно уређен релацијом 'и пре' ( $\prec$ ) (или релацијом 'и после' ( $\succ$ )), те је на исти начин временски мерљив, али у његовим *сојственим јединицама* ( $\tau_{\mathcal{B}}$ ). Међутим, у овом случају, и између елемената  $a_i \in \mathcal{A}$  и  $b_j \in \mathcal{B}$ ,  $i, j \in \mathbb{Z}$ , постоји једна специфична релација поретка која нам омогућава да временска растојања између елемената једног скупа меримо временском јединицом другог скупа или, краће речено, да једно кретање меримо другим. То је релација 'није и после' (или 'није касније'), са ознаком  $\preceq$ , или, њој инверзна, релација 'није и пре' (или 'није раније'), са ознаком  $\succeq$ .

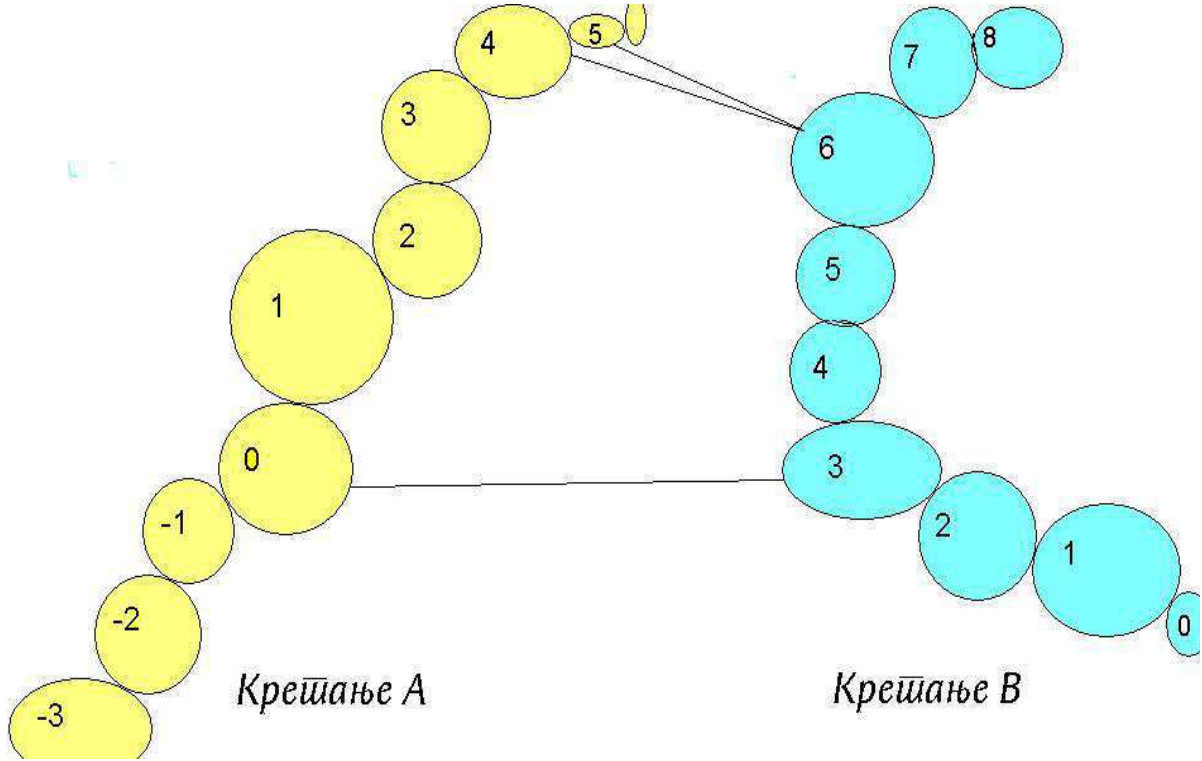
Увођењем релација  $\preceq$  и  $\succeq$  имплицитно смо препоставили постојање релације *истовремености* између појединих стања два различита кретања. Такву релацију еквиваленције ћемо означити симболом  $\doteq$ , да бисмо је разликовали од обичне једнакости  $=$ , чији би смисао био проблематичан када се ради о двокомпонентним објектима, какви су елементарна стања неког кретања.

Релације  $\preceq$  и  $\succeq$  имају особине рефлексивности, антисиметричности и транзитивности. То значи да, ако употребимо исти симбол  $\odot$  уместо било које од њих, за елементе (или стања) три произвољна кретања  $a_x \in \mathcal{A}$ ,  $b_y \in \mathcal{B}$ ,  $c_z \in \mathcal{C}$  важи:

$$\begin{aligned} a_x \odot a_x \wedge b_y \odot b_y \wedge c_z \odot c_z & \quad (\text{рефлексивност}) \\ a_x \odot b_y \wedge b_y \odot a_x & \Rightarrow a_x \doteq b_y \quad (\text{антисиметрија}) \\ a_x \odot b_y \wedge b_y \odot c_z & \Rightarrow a_x \odot c_z \quad (\text{транзитивност}). \end{aligned}$$

<sup>3</sup> Овај став је заснован на (интуитивно) претпостављеној вези између природе кретања и принципа узрочности, одакле следи да редослед свих догађаја, како прошлих тако и будућих, мора бити исти у свим временским скалама.

Пошто смо дефинисали особине релација  $\prec, \preceq, \doteq$ , и имајући у виду изразе (2.3) и (2.4), можемо било који временски интервал током кретања  $\mathcal{B}$  изразити у временским јединицама кретања  $\mathcal{A}$ , и обрнуто, простим пребројавањем међустања између почетних и крајњих *истовремених стања*<sup>4</sup> (Слика 2.1).



**Слика 2.1.** Упоредивање кретања  $\mathcal{A}$  и  $\mathcal{B}$ . Истовремена стања су спојена дужима. Уочавамо да је  $(b_3 \doteq a_0 \wedge b_6 \doteq a_4 \wedge b_6 \doteq a_5) \Rightarrow (\tau_1 + \tau_2 + \tau_3)_{\mathcal{A}} = (\tau_4 + \tau_5)_{\mathcal{B}}$ .

Ако је  $N_{\mathcal{B}}$  број међустања између  $j$ -тог и  $k$ -тог стања у кретању  $\mathcal{B}$ , а  $N_{\mathcal{A}}$  одговарајући број међустања између  $x$ -тог и  $y$ -тог стања<sup>5</sup> у кретању  $\mathcal{A}$ , онда је  $N_{\mathcal{B}} = |k - j|$  и  $N_{\mathcal{A}} = |y - x|$ , па је *шрајање* датог сегмента кретања

$$D_{j,k}(\tau_{\mathcal{B}}) = D_{x,y}(\tau_{\mathcal{A}}) = N_{\mathcal{B}} \cdot \tau_{\mathcal{B}} = N_{\mathcal{A}} \cdot \tau_{\mathcal{A}} \quad . \quad (2.6)$$

Као што смо повезали кретање  $\mathcal{B}$  са кретањем  $\mathcal{A}$ , тако можемо и свако друго кретање. У том случају сваки временски интервал, било ког другог кретања, би био целобројно изражен у јединицама  $\tau_{\mathcal{A}}$ . Међутим, према (2.3), стабилност те јединице, која је *просечно шрајање* једног елементарног стања кретања  $\mathcal{A}$ , зависи од величине

<sup>4</sup> Приметимо да је у овом општем приступу чак допуштено и да неко стање једног кретања може бити истовремено са више узастопних стања другог кретања (в. Слику 2.1).

<sup>5</sup> Важи  $(b_j \doteq a_x \wedge b_k \doteq a_y) \vee (b_j \doteq a_y \wedge b_k \doteq a_x)$ .

мереног временског интервала. Из статистичких разлога, што је већи тај интервал, величина  $\tau_A$  је тачнија, па је за временску јединицу згодно изабрати неки интервал

$$t_0 = N_0 \cdot \tau_A \quad (2.7)$$

са што већим коефицијентом  $N_0$ , али са друге стране изведена јединица  $t_0$  треба да буде и довољно мала, да би била употребљива у реалним условима<sup>6</sup>. Због тога, избор кретања  $A$ , којим формирамо референтну временску скалу, зависи од мноштва фактора које треба узети у обзир, а највише од природе самог кретања.

На пример, нарочито погодна околност за избор временске јединице  $t_0$  је код оног референтног кретања у коме постоји *правилно понављање* (цикличност) у вредностима стања  $s_i$ . Свакако, најприроднији избор за јединицу временске скале, коју дефинише такво кретање, је онда *трајање* одређеног броја циклуса његових узастопних стања.

Када смо дефинисали *временску јединицу* или, прецизније речено, јединицу за *мерање времена*, за коју претпостављамо да је константна, можемо дати значење термину *мерање времена*.

Постоје две различите врсте мерења времена, зависно од објекта који се мери. Прва врста су *коначна мерења*, којим се одређује *количина времена* или *интервал времена* дуж неког сегмента кретања, а друга врста су *нейресџана мерења*, којим се дефинише нека (општа) *временска скала*. У оба случаја се користи (броји) иста стандардизована временска јединица  $t_0$ .

*Количина времена*, представљена изразом (2.6), може се, помоћу дефиниције (2.7), одредити у јединицама  $t_0$  као

$$N_A \cdot \tau_A = \frac{N_A}{N_0} \cdot t_0 = q \cdot t_0 \quad , \quad (2.8)$$

где је рационални коефицијент  $q = \frac{N_A}{N_0} \in \{ \frac{1}{N_0}, \frac{2}{N_0}, \dots, \frac{N_0-1}{N_0}, 1, \frac{N_0+1}{N_0}, \dots \}$ . Одавде видимо да *величина временског интервала*, у суштини, представља целобројни умножак најситније мерљиве *количине времена*  $\frac{t_0}{N_0}$ .

*Временска скала* је сложени објект који се остварује *нейресџаним мерењем* времена, односно *праћењем* неког референтног кретања, тако да она, сама по себи, представља један референтни систем у коме се установљавају редослед и међусобна временска растојања свих догађаја<sup>7</sup>, како оних из прошлости, тако и оних будућих.

<sup>6</sup> На пример, једна SI секунда броји трајање 9 192 631 770 извесних периода зрачења унутар цезијумовог атома Cs133. Иако се концептуално ти периоди не могу потпуно поистоветити са хипотетичким  $\tau_A$  у разматраном теоријском моделу, разумљиво је зашто атомски часовници броје врло стабилне временске јединице.

<sup>7</sup> Подразумевају се тренутни догађаји. Код догађаја коначне временске дужине, разликујемо два тренутна догађаја – тренутак почетка и тренутак завршетка.



У идеализованом случају, какав тренутно разматрамо, временска скала је потпуно *равномерна*, јер се може упоредити са *нейресџаним* сабирањем *једнаких* временских јединица, почевши од неког нултог тренутка, кога називамо *ејоха* скале. Зато можемо временске скале, и регистроване тренутке у њима, симболички представљати у облику уређеног пара (са назнаком референтног кретања):

$$(t_0, t)_A \quad , \quad (2.9)$$

у коме је прва координата временска јединица у скали, а друга – стање сабирача (бројача) временских јединица у неком конкретном, или било ком, тренутку. Ако је тај тренутак стално *садашњи тренутак*, објекат у (2.9) представља један *идеални часовник* који броји јединице  $t_0$  у корацама величине  $\frac{t_0}{N_0}$ .

Поред поменутог начина заснивања временских скала, постоји још један могући концепт, који се базира на познавању закона кретања, али пре него што га објаснимо, размотримо прво претпоставку о непрекидној природи кретања и истакнимо разлике у односу на све што је до сада речено о дискретном кретању и времену.

Ако претпоставимо да је кретање непрекидне природе, онда би оно исто могло да се представи скупом стања уређених релацијом  $\prec$ , са истим особинама, али са том разликом што би тим стањима била придружена инфинитезимална количина времена, па тај скуп не би био пребројив. Не би постојала суседна стања, већ би између било која два стања било непребројиво много међустања. Да бисмо добили временску меру неког коначног кретања, морали бисмо да га разбијемо на низ узастопних коначних делова и тако добијемо пребројив скуп дисјунктних интервала. Трајање тог кретања се онда, по аналогији са дискретним случајем, мери укупним *бројем интервала*, и изједначава са збирним трајањем истог броја просечних интервала.

Код упоређења два непрекидна кретања, слична је ситуација. Релације  $\preceq$  и  $\doteq$  такође важе, само што истовременост два стања нема коначно *трајање*, и што бројимо интервале између одговарајућих стања, да бисмо добили *трајање* кретања.

До дефиниције временске јединице  $t_0$  долазимо на сличан начин као у (2.7), само што би велика константа  $N_0$  множила (бројила) просечно трајање свих интервала на које је одговарајуће кретање издељено.

За мерење коначних временских интервала и непрестано мерење времена, при схватању времена као континуума, може се користити исти формализам као у (2.8) и (2.9), само позитивни рационални коефицијент  $q$  би постао позитивни реални. То би значило да не постоји теоријски најмања количина времена, па би се то исто односило и на произвољну блискост два тренутка у некој временској скали. Међутим, имајући у виду да смо и временску јединицу  $t_0$  непрекидног кретања извели његовом

дискретизацијом, постојао би и у овом случају најмањи мерљиви временски интервал  $\frac{t_0}{N_0}$  чија величина зависи броја дискретних јединица унутар  $t_0$  и константе  $N_0$ .

Дакле, са практичног становишта, за мерење времена, потпуно је свеједно да ли сматрамо да је време дискретно или да је непрекидно. Мерење времена, као и свако друго мерење, увек је оптерећено грешкама. Али о њима, као и о карактеристикама временских скала генерално, биће детаљније речено у даљем тексту.

На крају овог најуопштенијег разматрања о кретању, времену и њиховом мерењу истакнимо још један концепт заснивања временске скале који се користи у пракси.

Претпоставимо да се неко кретање одвија по познатим законима из усвојене (признате) теорије. Рецимо да су стања  $s$  тог кретања у теорији зависна од времена  $t$  према закону

$$s = \mathcal{F}(t) \quad , \quad (2.10)$$

где и  $s$  и  $\mathcal{F}$  треба најопштије схватити<sup>8</sup>.

Ако је могуће, на основу (2.10), реализовати инверзни поступак  $\mathcal{F}^{-1}$ , онда бисмо регистровањем стања  $s$  једнозначно одређивали одговарајуће тренутке  $t$ , према

$$t = \mathcal{F}^{-1}(s) \quad . \quad (2.11)$$

Временска скала, у којој су одређени ти тренуци, конзервирана је у коришћеној теорији кретања, па колико је она тачна, толико ће бити и временска скала .

Према томе, постоје два концепта формирања временских скала:

- (А) *Непрестаним бројањем временских јединица током праћења неког кретања; и*
- (Б) *Регистровањем стања у кретању које се одвија по законима неке теорије.*

Сваки од њих има својих предности и мана, али са практичног становишта концепт А је много значајнији, јер је широко заступљен. Концепт Б је у вези са тзв. динамичким временом, које има специјалну намену и о коме ће бити више речено у трећој глави, када будемо разматрали савремене временске скале.

### 2.3. ОСОБИНЕ ВРЕМЕНСКИХ СКАЛА

Када говоримо о особинама временских скала, онда истовремено говоримо и о особинама носилаца кретања (или процеса) којим се те скале формирају. У њих не

---

<sup>8</sup> Стање  $s$  може бити вектор положаја неке планете у хелиоцентричном правоуглом координатном систему, када је  $\mathcal{F}$  векторска функција времена, а може бити и нумерички, или нунумерички, код неке појаве која се одвија по познатом, временски зависном, алгоритму  $\mathcal{F}$ .

спадају само часовници, разни осцилатори и други слични технички уређаји, већ и природни часовници, какви су наша ротирајућа планета и далеки пулсари, на пример.

Идеална временска скала, коју би формирао неки бројач (или сабирач) потпуно једнаких временских интервала, у реалности не постоји, јер такав савршени осцилатор, чији би периоди осциловања били увек идентични, до сада није ни направљен, нити је пронађен у природи. Због тога, можемо говорити само о мање, или више, квалитетним скалама времена, као и о начинима дефинисања њиховог квалитета.

Са друге стране, питање квалитета (или униформности) реалних временских скала је доста сложено, пошто не постоји јединствени параметар која би га одређивао. Најважије три карактеристике временских скала, које се узимају у обзир када разматрамо њихов квалитет, су *тачност*, *прецизност* и *стабилност*. Ниједна од њих није апсолутна мера, обзиром да се одређују у односу на неку референтну или номиналну временску скалу, за коју се претпоставља да је тачна<sup>9</sup>.

Пре него што објаснимо како се дефинишу *тачност*, *прецизност* и *стабилност* временских скала, треба истаћи да, када се ради о карактеристикама техничких уређаја, чешће се користи физичка величина фреквенција ( $\nu$ ) него време, пошто они при мерењу временских интервала раде на принципу пребројавања неке појаве која се понавља, па стога зависе од њене учестаности у јединици времена. То значи да ако та појава траје  $T$  секунди (s), њена фреквенција је  $\nu = 1/T$  у херцима ( $\text{Hz} = \text{s}^{-1}$ ).

Приликом упоређења различитих уређаја, као мера њиховог квалитета или, боље речено, квалитета фреквенције, а самим тим и временске скале, коју генеришу, користи се *релативна грешка фреквенције (фракциони фреквенциони офсет)*, бездимензионална величина

$$\frac{\Delta\nu}{\nu} = \frac{\nu_{\text{мерено}} - \nu_{\text{номинално}}}{\nu_{\text{номинално}}}, \quad (2.12)$$

која се у пракси често погрешно сматра апсолутном карактеристиком фреквенционе (или временске) скале сваког уређаја појединачно, јер се учестаност другог (референтног или номиналног) уређаја ( $\nu_{\text{номинално}}$ ) неоправдано сматра свевременом константом<sup>10</sup>, па се његова улога у наведеном количнику занемарује.

*Релативна грешка фреквенције* (2.12) је временски зависна и у вези је стабилношћу временских (или фреквенционих) скала на које се односи. Када су часовници у

<sup>9</sup> Тако се претпоставља углавном у техничкој комуникацији, када се говори о карактеристикама разних уређаја. Међутим, за нас, на овом месту, то ће бити само референтна временска скала.

<sup>10</sup> Узрок забуна лежи вероватно у самој дефиницији фреквенције, као физичке величине која се везује за константни временски стандард (константну временску јединицу). Међутим, и временска јединица се мери (или производи, када говоримо о техничким уређајима), па се њено трајање не може установити са неограниченом тачношћу. Уосталом, главни разлог разилажења временских скала је управо постојање варијација у величини временске јединице коју они броје.

питању, најчешће се њена просечна вредност односи на један дан ( 86400 s ).

За описивање особина временских и фреквенционих скала математичким језиком, потребно је још објаснити како се две скале упоређују, као и значење термина *синхронизација* и *синџонизација*.

Претпоставимо да имамо две скале које броје исту временску јединицу  $t_0$ . Скала коју производи кретање (уређај)  $\mathcal{A}$  и скала коју производи кретање (уређај)  $\mathcal{B}$ , означене са  $(t_0, t)_{\mathcal{A}}$  и  $(t_0, t)_{\mathcal{B}}$ , су *синхронизоване* у неком тренутку  $t$ , ако у том тренутку (њихови бројачи) показују исто време<sup>11</sup>, односно ако је  $(t_{\mathcal{A}} = t_{\mathcal{B}})_t$ .

Већ смо нагласили, да ма како схватали природу кретања, а самим тим и времена, да бисмо били у могућности да га меримо, треба га разбити на надовезани низ коначних делова, за које (из неког разлога) претпостављамо да би требало исто, или слично, да *шрају*. Јединицу времена онда бирамо тако да буде једнака збирном *шрајању* што већег броја тих делова, али и да њена величина ипак буде ограничена на меру која је прихватљива у пракси. На моделу кретања првилног синусоидног типа, које генерише неки хармонијски осцилатор<sup>12</sup>, ти елементарни делови би одговарали таласној дужини, а временска јединица, неком (договореном) целобројном умношку таласне дужине.

За два реална хармонијска осцилатора,  $\mathcal{A}$  и  $\mathcal{B}$ , која би требало да генеришу синусоидне сигнале приближно исте фреквенције, кажемо да су *синџонизовани* у неком тренутку, ако су им сигнали тада били изједначени у фази<sup>13</sup>.

Приметимо да *синхронизација* две временске скале (или два уређаја који их генеришу), истовремено подразумева и њихову *синџонизацију*, али да обрнуто не важи, јер се *синџонизација* може извршити са много ситнијим кораком. Зато је понашање фреквенционе грешке неке скале (у широком временском распону) најбољи индикатор њеног квалитета.

Упоређивање временске скале  $\mathcal{B}$  са референтном скалом  $\mathcal{A}$  је истовремено и увек се повезује са количином протеклог времена  $t$  (према скали  $\mathcal{A}$ ) од тренутка њихове *синхронизације*. Ако за временску разлику (грешку) и релативну грешку фреквенције

---

<sup>11</sup> Може се извршити синхронизација и временских скала које по дефиницији имају различите јединице, али то за ову причу о особинама скала не би имало нарочитог смисла.

<sup>12</sup> Већина уређаја, који генеришу фреквенцију и време, заиста јесу хармонијски осцилатори, а и они који нису увек генеришу неки правилни сигнал, у коме се разликују делови константне периодичности.

<sup>13</sup> Синџонизација је углавном једнострана операција, јер се најчешће врши дотеривањем (померањем) мереног сигнала ( $\mathcal{B}$ ) у односу на референтни ( $\mathcal{A}$ ), до њиховог фазног поклапања. Са практичног становишта, најједноставније је синџонизовати максимуме синусоида, обзиром да бројањем (појава) максимума најлакше генеришемо временску скалу.

у тренутку поређења уведемо ознаке  $x(t)$  и  $y(t)$ , формално их третирајући као реалне функције, онда је

$$x(t) = t_{\mathcal{B}}(t) - t_{\mathcal{A}}(t) = t_{\mathcal{B}}(t) - t \quad (2.13)$$

и

$$y(t) = \frac{dx(t)}{dt} \approx \frac{t_{\mathcal{B}}(t) - t}{t} = \frac{N_{\mathcal{B}}(t) - N_{\mathcal{A}}(t)}{N_{\mathcal{A}}(t)} = \frac{\nu_{\mathcal{B}}(t) - \nu_{\mathcal{A}}(t)}{\nu_{\mathcal{A}}(t)} \quad (2.14)$$

где су  $N_{\mathcal{A}}(t)$  и  $N_{\mathcal{B}}(t)$  укупни бројеви најситнијих делова кретања<sup>14</sup>  $\mathcal{A}$  и  $\mathcal{B}$  у интервалу  $(0, t)$ , који дефинишу фреквенције њихових скала  $\nu_{\mathcal{A}}(t)$  и  $\nu_{\mathcal{B}}(t)$ , респективно.

Уочавамо да приближна једнакост у (2.14) постаје строга, ако је тачан линеаран модел везе између  $t_{\mathcal{B}}$  и  $t_{\mathcal{A}}$  у облику  $t_{\mathcal{B}} = Kt_{\mathcal{A}}$ , где је коефицијент  $K \in \mathbb{R}$ . То значи да се могу упоређивати и временске скале које броје различите временске јединице. Наравно, оне ће се по времену све више разилазити, али мера квалитета њихове фреквенционе сагласности је и у том случају константност величине  $y(t)$ .

Упознавши се са потребним појмовима и терминологијом, можемо сада на концизан начин објаснити основне особине временских скала које одређују њихов квалитет – *тачносћ*, *прецизносћ* и *стабилносћ*.

**Тачносћ** временске скале (кретања)  $\mathcal{B}$  дефинише се само у односу на неку поредбену скалу (кретања)  $\mathcal{A}$ , за коју се претпоставља да је тачна. Зато се за референтну скалу по правилу бира најтачнија расположива, или бар она, за коју се унапред зна да је квалитетнија од испитиване временске скале.

Под тим условима, претпоставимо да смо извршили  $N$  упоређења ових временских скала и измерили разлике  $x_i$ , онда нам статистика

$$\sqrt{\frac{1}{N} \sum_{i=1}^N x_i^2} = \sqrt{\bar{x}^2} = |\bar{x}| \quad (2.15)$$

даје меру тачности (сагласности у средњем) испитиване временске скале у односу на референтну скалу. Што је мања њена вредност, тачност је већа, али, ако су скале упоредивог квалитета, не можемо говорити о тачности, већ само кажемо да је њихова сагласност у средњем већа, или да је њихово средње одступање мање.

На тачност временске скале може се гледати и на други начин, ако претпоставимо да у тој скали из серије мерења одређујемо трајање неког познатог временског

<sup>14</sup> Ако временске скале генеришу осцилатори  $\mathcal{A}$  и  $\mathcal{B}$ , онда  $N_{\mathcal{A}}(t)$  и  $N_{\mathcal{B}}(t)$  представљају укупне бројеве њихових осцилација у интервалу  $(0, t)$ .

стандарда. Тачност наше временске скале ће бити утолико већа, уколико је апсолутна средина мерених вредности ближа усвојеном стандарду.

**Прецизност** временске скале, исто као и тачност, може се само релативно дефинисати. У горњим условима, за одређивање прецизности испитиване скале на основу серије од  $N$  мерења најпогоднија је средња квадратна грешка (стандардна девијација). У складу са већ употребљеним ознакама, она се израчунава по формули

$$\sigma = \sqrt{\frac{1}{N-1} \sum_{i=1}^N (x_i - \bar{x})^2} = \sqrt{\frac{N}{N-1} (\overline{x^2} - \bar{x}^2)} \quad , \quad (2.16)$$

у којој је са  $\bar{x}$  означена аритметичка средина свих  $N$  мерених вредности разлика  $x_i$ .

Што је мања вредност реализоване статистике  $\sigma$ , мање је међусобно растурање резултата мерења  $x_i$  и онда кажемо да је испитивана скала прецизнија, иако при томе може да буде ниске тачности (на пример у случају да вредност  $|\bar{x}|$  знатно одступа од нуле). Исто тако, тачност може бити висока, а прецизност врло мала.

На прецизност временске скале може се гледати и на други начин, ако претпоставимо да у тој скали из серије мерења трајања неког временског стандарда одређујемо њихову стандардну девијацију у односу на израчунату средњу вредност. Што су поновљена мерења ближа по резултатима једна другима, њихова дисперзија је мања и прецизност скале је тиме већа. Наравно, претпоставља се да прецизност реализације тог временског стандарда у довољној мери превазилази прецизност испитиване временске скале.

**Стабилност** две временске скале, или два уређаја које их производе, дефинише њихову способност да буду у синхронизацији и синтонизацији током времена. Одступања у фази<sup>15</sup> и фреквенцији, која при томе настају, статистички се обрађују, како због анализирања њихове природе, тако и због одређивања извесне квантитивне мере за *стабилност* ових скала.

Постоји више статистика преко којих се може нумерички изразити стабилност временских и фреквенционих скала, али последњих деценија у пракси је најшире распрострањено коришћење *Аланове варијансе* [2] и разних њених модалитета.

*Аланова варијанса* је дво-узорочка бездимензионална временски зависна статистика која се изворно представља у једном од следећа два равноправна облика:

$$\sigma_y^2(\tau) = \frac{1}{2(M-1)} \sum_{i=1}^{M-1} (\bar{y}_{i+1} - \bar{y}_i)^2 \quad (2.17)$$

<sup>15</sup> Имајући у виду модел хармонијског осциловања, фазна разлика је уствари временска разлика.

или

$$\sigma_y^2(\tau) = \frac{1}{2(N-2)\tau^2} \sum_{i=1}^{N-2} (x_{i+2} - 2x_{i+1} + x_i)^2, \quad (2.18)$$

где је  $\bar{y}_i$  просечна релативна грешка фреквенције на  $i$ -том узастопном временском интервалу ширине  $\tau$ , од  $M$  постојећих, а  $x_i$  је  $i$ -та вредност фазне разлике, од укупно  $N = M + 1$  постојећих, које су равномерно распоређене, тако да временски размак између свака два суседна мерења фазне разлике,  $x_i$  и  $x_{i+1}$ , износи  $\tau$  (према референтној скали).

У формули (2.17), просечна вредност  $\bar{y}_i$  за интервал  $\tau$  рачуна се преко фазних разлика  $x_i = x(t_i)$  и  $x_{i+1} = x(t_i + \tau)$  на основу

$$\bar{y}_i(\tau) = \left( \frac{\Delta\nu}{\nu} \right)_i = \frac{1}{\tau} \int_{t_i}^{t_i+\tau} y(t) dt = \frac{1}{\tau} x(t) \Big|_{t_i}^{t_i+\tau} = \frac{x_{i+1} - x_i}{\tau}, \quad (2.19)$$

а број  $M$  се узима да буде што већи, на пример  $M \geq 100$ .

Извесно побољшање карактеристика Аланове варијансе постиже се ако се она рачуна са тзв. *преклајањем*, односно ако се просечне вредности  $\bar{y}_i$  за интервал  $\tau$  померају са кораком мањим од  $\tau$ . На пример, ако је тај корак  $\tau_0 = \tau/m$ , онда статистика  $\sigma_y^2(\tau)$ , у облику (2.17) или (2.18), постаје:

$$\sigma_y^2(\tau) = \frac{1}{2m^2(M-2m+1)} \sum_{j=1}^{M-2m+1} \left[ \sum_{i=j}^{j+m-1} (\bar{y}_{i+m} - \bar{y}_i) \right]^2 \quad (2.20)$$

или

$$\sigma_y^2(\tau) = \frac{1}{2(N-2m)\tau^2} \sum_{i=1}^{N-2m} (x_{i+2m} - 2x_{i+m} + x_i)^2. \quad (2.21)$$

Најчешће се Аланова варијанса користи у својој модификованој верзији [3] која, за разлику од претходних варијанти, боље успоставља везу са спектралном густином одступања (грешака) у фази и фреквенцији. Када се њене вредности моделују на уобичајен начин, тако да су пропорционалне степенима  $\tau^\alpha$ ,  $\alpha \in \{-3, -2, -1, 0, 1\}$  на одговарајућим временским сегментима, могуће је разликовати два типа фазног шума<sup>16</sup> (пропорционални степенима  $\tau^{-3}$  и  $\tau^{-2}$ ) који се у вредностима обичне Аланове варијансе не распознају.

<sup>16</sup> Према изгледу функција  $x(\tau)$  и  $y(\tau)$ , који су директно зависни од Аланове дисперзије, поједине области у временском домену називамо областима специфичног шума. Разликујемо тако бели (white) и треперави (flicker) фазни шум, као и бели, треперави и лутајући (random walk) фреквенцијски шум. У нестабилном делу спектра постоје још и треперави лутајући (flicker walk) и брзи лутајући (random run) шум, али они за ову причу о стабилности временских скала (уређаја) нису толико битни, нити их Аланова варијанса препознаје.

Модификована Аланова варијанса се оцењује статистиком

$$\text{Mod } \sigma_y^2(\tau) = \frac{1}{2m^4(M - 3m + 2)} \sum_{j=1}^{M-3m+2} \left\{ \sum_{i=j}^{j+m-1} \left[ \sum_{k=i}^{i+m-1} (\bar{y}_{k+m} - \bar{y}_k) \right] \right\}^2 \quad (2.22)$$

или

$$\text{Mod } \sigma_y^2(\tau) = \frac{1}{2m^2\tau^2(N - 3m + 1)} \sum_{j=1}^{N-3m+1} \left[ \sum_{i=j}^{j+m-1} (x_{i+2m} - 2x_{i+m} + x_i) \right]^2, \quad (2.23)$$

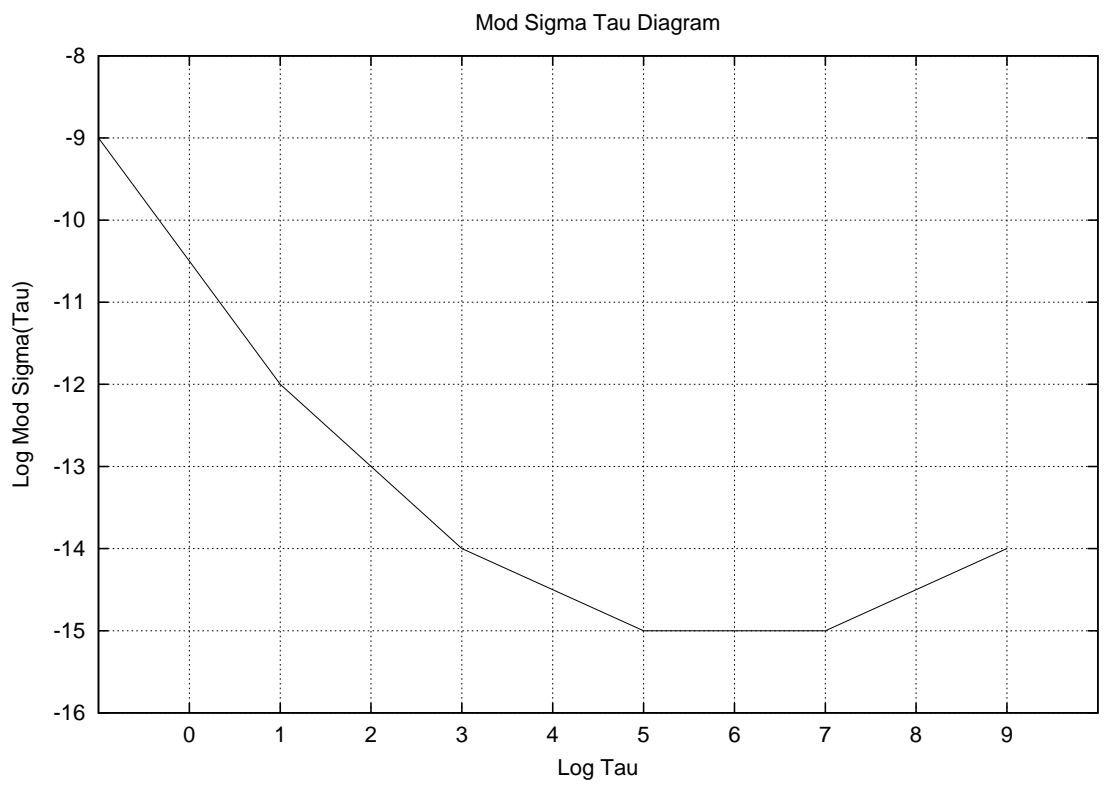
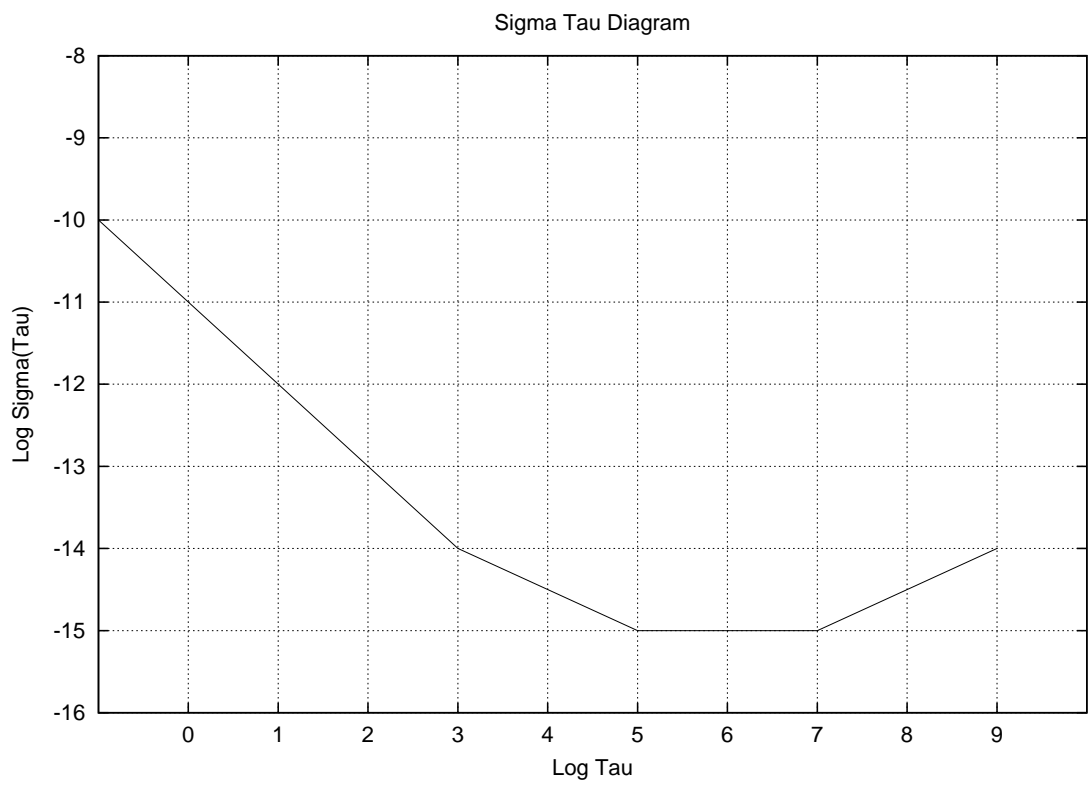
где је значење употребљених ознака већ објашњено<sup>17</sup>.

Уместо статистика  $\sigma_y^2(\tau)$  и  $\text{Mod } \sigma_y^2(\tau)$ , често се користе њихови квадратни корени  $\sigma_y(\tau)$  и  $\text{Mod } \sigma_y(\tau)$ , који су познати под именима *Аланова девијација* и *модификована Аланова девијација*. Њихове нумеричке вредности за што шири дијапазон вредности аргумента  $\tau$ , као и њихова одговарајућа графичка представљања, која се уобичајено називају *сиџма-џау дијаграми*, јесу финални резултат испитивања стабилности временских скала (или стабилности уређаја који их производе).

*Сиџма-џау дијаграми* су такође и они, чије су ординате директне или логаритамске вредности дисперзија  $\sigma_y^2(\tau)$  и  $\text{Mod } \sigma_y^2(\tau)$ , а апцисе логаритми времена  $\tau$ . Такав приказ је згодан јер је онда график у облику изломљене праве линије, на којој је сваки појединачни сегмент линеарно зависан од одговарајућег степена са основом  $\tau$ . Према већ поменутом моделу, сваки такав део припада једном временском опсегу у коме су фазна или фреквенцијска оступања истог типа. На Слици 2.2. су приказани карактеристични  $\sigma$ - $\tau$  дијаграми неког осцилатора на којима се уочава разлика између Аланове варијансе у обичном и модификованом случају.

<sup>17</sup> Можемо приметити да се за  $m = 1$  модификована Аланова варијанса своди на обичну.





Слика 2.2. Обична и модификована Аланова девијација, израчунате на истом узорку.

Овој веома коришћеној статистици, нарочито у испитивању перформанси часовника, могу се приписати и неке лоше стране. На пример, Аланова варијанса претпоставља да временске или фреквенцијске скале немају неке промене које су последица заједничког узрока. Постојање било какве кохерентне (детерминистичке) варијације оба осцилатора би вероватно довело у питање веродостојност  $\sigma$ - $\tau$  дијаграма [111].

Са друге стране, Аланова варијанса није заснована на било каквом физичком моделу осцилатора (извора фреквенције), већ искључиво на емпиријском истраживању, односно тестирању постојећих модела који су направљени у релативно блиској прошлости, тако да десни део  $\sigma$ - $\tau$  дијаграма (дугопериодични део) није тако добро испитан као његов леви (краткопериодични део) или средњи део [35].

Но без обзира на замерке, значај Аланове варијансе је велики јер се, на пример, помоћу  $\sigma$ - $\tau$  дијаграма може поуздано предвидети ход часовника и њихове могуће грешке у временском распону од делова секунде до неколико часова, што је врло значајно за сва мерења која захтевају рад синхронизованих часовника на великој удаљености [35].

Аланова варијанса је настала средином 60-тих, упоредо са наглим развојем технологије производње цецијумских атомских часовника, а непосредно пре званичног усвајања нове јединице за време у међународном систему јединица, SI секунде или атомске секунде, 1967. године. Од тада, па до данашњих дана, статистике за испитивање стабилности фреквенције осцилатора све моћнијих атомских часовника су биле њихов неодвојиви пратилац. Поред најчешће коришћене Аланове варијансе и њених модалитета, током 80-тих, 90-тих и после 2000-те године настајале су и друге сличне статистике исте намене, као што су: *Варијација времена*, или *Временска варијанса* ( $\text{TVAR} = \frac{\tau^2}{3} \text{Mod } \sigma_y^2$ ), *Тошална варијанса* (Totvar) [73,59,74], неколико модификација *Хадамарових* варијанси (Hadamard) [22,77,28,75] и три *Теоријске варијансе* (Théo1, ThéoBR, ThéoH) [88,72].

---

На крају овог одељка о особинама временских скала, да бисмо стекли представу о широком распону њиховог квалитета, као и квалитету извора који их генеришу, прикажимо упоредно границе дневне стабилности фреквенције и тачности за неке од њих (Табеле 2.1. и 2.2.). Упоредне карактеристике најквалитетнијих савремених атомских часовника (према типу осцилатора) приказане су на Слици 2.3.

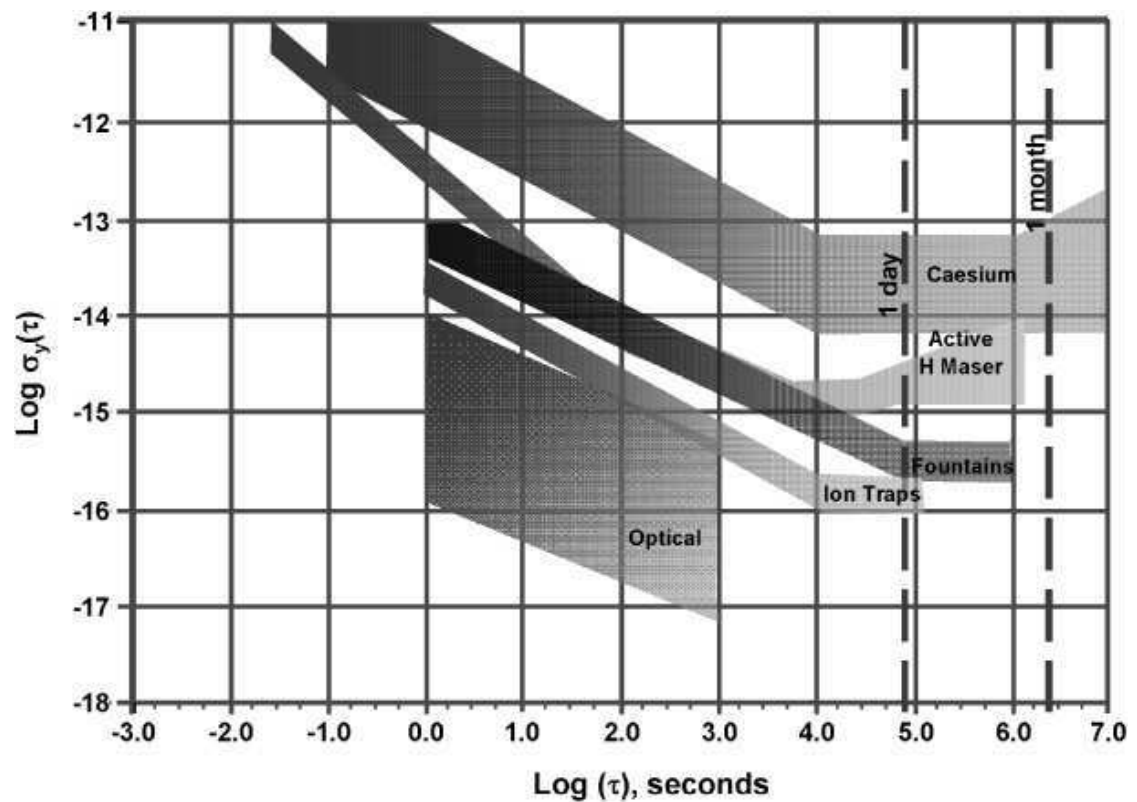
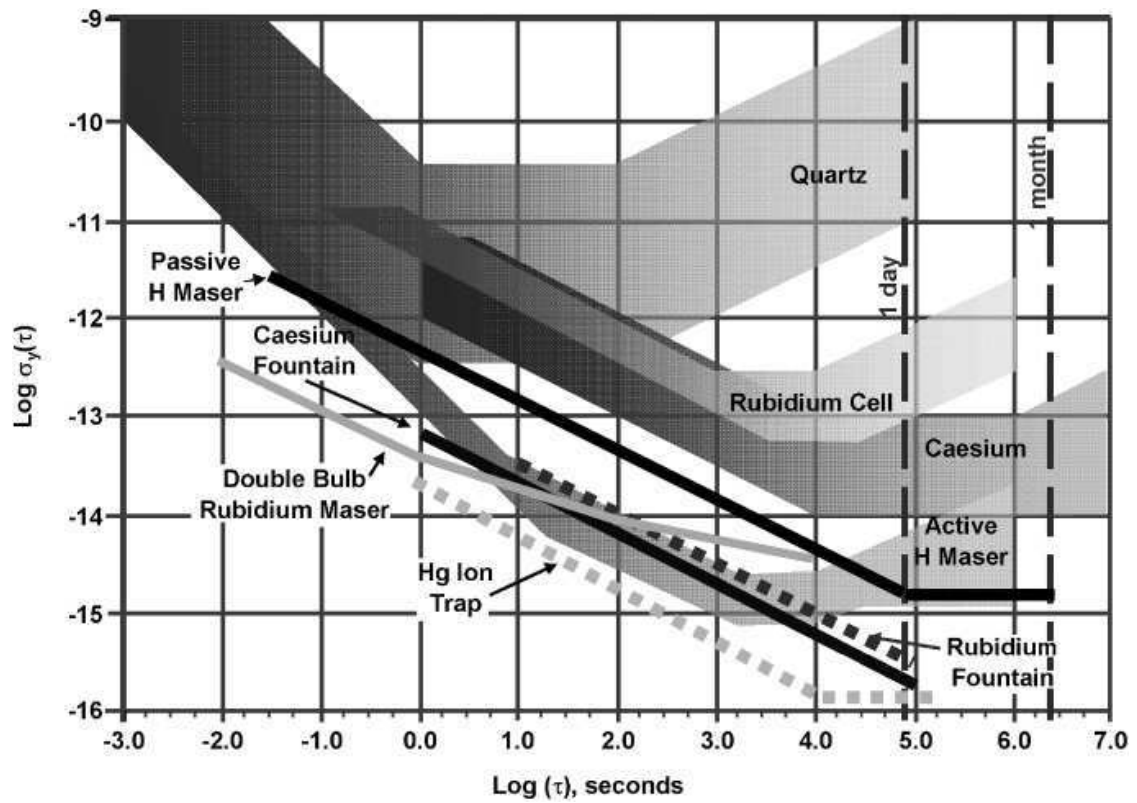
**Табела 2.1.** Нестабилност фреквенције и грешке разних часовника на 24 сата.

<i>Осцилатори</i>	<i>Нестабилности фреквенције</i>	<i>Грешка [s/дан]</i>	<i>Часовници</i>
Клатно	$10^{-7} - 10^{-8}$	$10^{-2} - 10^{-3}$	Најбољи механички
Кристал кварца	$\sim 10^{-6}$	$\sim 10^{-1}$	Ручни и зидни кварцни
Термостаб. кварц	$10^{-9} - 10^{-11}$	$10^{-6} - 10^{-4}$	Најбољи кварцни
Rb ћелија	$10^{-12} - 10^{-13}$	$10^{-8} - 10^{-7}$	Комерц. Rb атомски
Cs цев	$10^{-13} - 10^{-14}$	$10^{-9} - 10^{-8}$	Комерц. Cs атомски
H масери, Cs фонтане	$10^{-15} - 10^{-16}$	$10^{-11} - 10^{-10}$	Лабораторијски

**Табела 2.2.** Раст тачности временских скала које су се користиле за рачунање астрономских ефемерида од Птолемеја (150 г.) до данас (према [111])

<i>Временска скала</i>	<i>Релативна тачност</i>	<i>Тачност [s/дан]</i>
Право Сунчано време	$10^{-4}$	$10^{+1}$
Средње Сунчано време	$10^{-8}$	$10^{-3}$
Ефемеридно време*	$10^{-10}$	$10^{-5}$
Атомско време 195x	$10^{-12}$	$10^{-7}$
Атомско време 200x	$10^{-15}$	$10^{-10}$
Барицентрично коорд. време*	$10^{-30}$	$10^{-25}$

\* По дефиницији.



Слика 2.3. Стабилност најтачнијих савремених часовника [111].

### 3. САВРЕМЕНЕ СКАЛЕ ВРЕМЕНА

За општу оријентацију у времену и сваки вид комуникације потребно је користити *јединствену* временску скалу, која је свима лако доступна и, при томе, довољно квалитетна. Обзиром да небески часовник који прати дневно привидно обртање небеске сфере, заједно са Сунцем и осталим објектима на њој, веома добро задовољава оба критеријума, он је од давнина био најпрактичније средство за рачунање времена. Штавише, сматран је апсолутно тачним, све до појаве кварцних часовника, 30-тих година прошлог века, и, поготово, атомских часовника, половином 50-тих, који су производили равномерније временске скале. Средње сунчано време на гринвичком меридијану, које се од 1935. године назива *светским временом*<sup>1</sup> (UT), је тако постало одраз неравномерности Земљине ротације који се регистровао у тачнијим временским скалама, па је дефинитивно од почетка 1962. године престало да буде време по коме се дотерују часовници.

Међутим, иако је пре више од пола века јединствена скала *светској времена*, заснована на праћењу Земљине ротације, престала да буде еталонска, глобални значај њеног прецизног одређивања није нимало умањен. Њој је и даље остала улога најдоминантнијег параметра, од пет постојећих, којим се дефинише оријентација наше планете у простору, а назив "тачно време" придодео је скали *светској координираној времена*<sup>2</sup> (UTC), која у ходу прати статистичку скалу *међународној атомској времена*<sup>3</sup> (TAI). Међународне организације које су одговорне за реализацију и одржавање ових временских скала су познате под акронимима IERS<sup>4</sup> и BIPM<sup>5</sup>.

Поред поменутих временских скала од општег значаја, постоје и специфичне скале тзв. *динамичкој времена* које се користе у ефемеридној астрономији и небеској механици. Оне су базиране на законима кретања тела Сунчевог система према усвојеној гравитационој теорији и на усаглашеним стандардима *Међународне астрономске уније* (IAU), који се наводе у њеним посебним резолуцијама и препорукама.

---

<sup>1</sup> Universal Time

<sup>2</sup> Universal Time Coordinated

<sup>3</sup> International Atomic Time

<sup>4</sup> International Earth Rotation and Reference System Service

<sup>5</sup> Bureau International des Poids et Mesures

Дакле, према начину формирања, временске скале можемо класификовати у две групе. У једној групи су *физичке* или *лабораторијске скале*, које производе атомски часовници, а у другој су *астрономске скале* које се формирају, или на основу резултата астрономских посматрања референтних небеских објеката, или на основу усвојене теорије кретања тела Сунчевог система, па их зато можемо сврстати у две одвојене подгрупе. У једној су *оне које праће Земљину ротацију*, или, прецизније, оријентацију фиксираних терестричких система у простору, а у другој су, већ поменуте, *динамичке скале*. Свака од њих има посебну намену и одговарајући значај, али оно што је, мање више, свим наведеним скалама заједничко јесте да имају врло компликовану историју, што се нарочито односи на астрономске скале. Због тога, у овом одељку наводимо само информације о савременом стању у области временских скала, које су у функцији праћења главне теме овог рада. Мали изузетак је направљен једино у случају ефемеридног времена, због његове оригиналне концепције и зато што је претходник савремених динамичких временских скала.

### 3.1. РЕЛАТИВИСТИЧКИ КОНЦЕПТ ПРОСТОРА И ВРЕМЕНА

Иако је у физици, у својој матичној области, само једна од теоријских концепција, Ајнштајнова *теорија релативности* је, одлукама Скупштине Међународне астрономске уније<sup>6</sup> (IAU) последњих деценија двадестог века, почела поступно да се уводи у астрономију и метрологију као *тачна физичка теорија*, да би тај процес скоро потпуно био довршен у првој деценији текућег века. Ове одлуке су увеле револуционарне промене у теорију и праксу дефинисања просторних и временских референтних система, од чисто термилошких, до суштинских, каква су, на пример, дилатација простора и времена у координатним системима који се крећу или специфична геометријска тумачења природе гравитационог поља у целом физичком Универзуму. Због тога је неопходно да се упознамо бар са основним појмовима *специјалне* и *опште теорије релативности*, који су битни за разумевање дефиниција савремених временских скала о којима овде говоримо.

*Теорија релативности (ТР)* представља својеврсну геометријацију физике која се бави кретањима у четвородимензионалном континууму, званом простор-време. Дели се на *специјалну ТР*, која описује ефекте релативних кретања инерцијалних система у идеализованим условима, какви не постоје у реалности, и на *општу ТР*, која у поменуте услове уводи силу, масу и енергију, па се још назива и *релативистичком*

---

<sup>6</sup> International Astronomical Union

*теоријом тправишације*. Језик којим се служи је језик математичке анализе и диференцијалне геометрије, те стога нема никаквих ограничења у применама на простор-време било којих димензија, укључујући и инфинитезималне случајеве.

ТР је математички непротивуречна теорија, али је тачна са становишта физике само онолико колико су тачни њени постулати и колико тачно описује реалне физичке феномене који се могу мерити у експериментима или посматрањима. Обе ове тачности су повезане и имплицирају једна другу, али мора се приметити да, бар за сада, смерови тих импликација немају исту тежину, обзиром на величину мерених или теоријски урачунатих релативистичких ефеката, и на објективну чињеницу да за њих још увек не постоје објашњења услед којих физичких узрока се догађају [149].

Међутим, на овом месту није ни важно да ли је ТР тачна теорија, или је само фиктивни теоријски модел којим се поправљају мерења (посматрања) и коначни резултати. Битно је да она представља међународно договорени теоријски оквир који има своју терминологију и да је у основама дефиниција свих временских скала које имају глобални значај.

Поимање времена у класичној Њутновој механици се разликује од релативистичког. У првом случају време је једно, независно и апсолутно у целом Универзуму, док је у ТР оно саставни део четвородимензионалног ентитета простор-време и зависно од кретања сваког референтног система у њему. ТР разликује две врсте времена – **координатно време**, које се рачуна, јер је једна координата у координатном систему простор-време, и **сопствено време**, које је својствено неком конкретном тачкастом објекту у простор-времену, јер се мери часовником<sup>7</sup> који је везан за тај објекат.

И у Њутновој, класичној, и у Ајнштајновој релативистичкој механици време *тече* непрекидно, само што се у првом случају то догађа независно од било чега и идеално равномерно свуда, док у другом случају оно *пролази* брже или спорије, зависно од брзине којом се креће мерни инструмент (већ поменути идеални часовник) и од јачине гравитационог поља у коме се он налази приликом тог кретања. *Већа брзина кретања, као и јаче травишационо поље, успоравају рад часовника, док је у супротним случајевима обрнуто.*

Повећање брзине не изазива само дилатацију времена, већ утиче и на дужину објекта у правцу његовог кретања. Што је брзина већа, то је скраћење његове дужине веће. У екстремном случају, ако би брзина објекта достигла брзину светлости у вакууму, контракција његове дужине би била тотална, односно дужине више не би ни било, јер би била једнака нули. Истовремено, према ТР, би се догодило да маса тог

<sup>7</sup> Функционисање идеалних часовника, као тачних и објективних инструмената за мерење времена, који се често помињу у ТР, није јасно објашњено. Само се претпоставља њихово постојање.

објекта и његова енергија постану бесконачно велики, пошто се они неограничено увећавају, када се брзина објекта приближава брзини светлости.

Са друге стране, када се узме у обзир усвојена чињеница да се под кретањем светлости подразумева кретање њених честица<sup>8</sup>, фотона, који у кретању имају коначну масу и енергију, као и, такође усвојена чињеница, да је њихова маса мировања једнака нули, постављају се многа питања о границама применљивости ТР и исправности релативистичког концепта физичке реалности. Али таква питања се не постављају астрометрији и математици, већ физици. Уосталом, ТР је од свог настанка изазивала контроверзна мишљења, и није једина теорија у савременој физици.

G. Winkler и T. Van Flandern, у свом чланку из 1977. године [149], детаљно образлажу зашто је увођење ТР у астрономију неминовност и експлицито наводе седам експерименталних "добро утврђених чињеница које чине основу релативистичке теорије". То су:

- 1° Независност брзине светлости од кретања извора (мерења аберације и Доплеровог ефекта код двојних звезда [133]);
- 2° Sagnac-ов експеримент (реални утицај убрзања на простирање светлости [127]);
- 3° Michelson-Morley-јев експеримент (једнакост брзине светлости у свим правцима и свим инерцијалним системима [86]);
- 4° Ives-Stilwell-ови експерименти (провера Лоренцове трансформације, дилатација времена и трансверзални Доплеров ефект у инерцијалним системима [87]);
- 5° Eötvös-Dicke-ов експеримент (једнакост инерционе и гравитационе масе [40]);
- 6° Rebka-Pound-ов експеримент (гравитациони црвени помак [128]);
- 7° Hafele-Keating-ов експеримент (транспорт часовника [68]).

---

<sup>8</sup> Ако се под кретањем светлости не би подразумевало путовање фотона од извора електромагнетног зрачења до пријемника, већ само преношење импулса (или енергије) са фотона на фотон у одређеном смеру, онда би схватање природе светлости као таласног кретања било у предности над тумачењем светлости као млаза честица. Јер, онда би било потпуно разумљиво зашто је кретање светлости у свим правцима исто, и зашто оно не зависи ни од брзине кретања извора светлости, нити од брзине кретања пријемника. Напросто, простирање светлости је онда својство средине кроз коју се она простире (какво год дали име тој средини) и није ни у каквој физичкој вези са кретањима извора и пријемника светлости, па је сабирање вектора брзина било ког од та два кретања са вектором брзине простирања светлости лишено сваког смисла. Према томе, резултат Michelson-Morley-јевог експеримента би могао бити протумачен и као убедљив прилог схватањима да је светлост искључиво таласне природе. (прим. Б.Ј.)



### 3.1.1. Гравитационо поље и геодезијске линије

Према ТР, брзина светлости у вакууму  $c$  је иста у свим инерцијалним система и она је највећа могућа брзина уопште. Зато се у једначинама ТР често просторне и временске мере изражавају у зависности од  $c$ , односно претпоставља се да је  $c$  бездимензиона величина и да је  $c = 1$ .

ТР се бави кретањима у кривим четвородимензионалним риманским просторима одређених карактеристика<sup>9</sup> или, прецизније говорећи, у малим њиховим областима које су блиске равним просторима, јер је Ајнштајн *прећихосиавио* да целокупни физички Универзум има управо такве (риманске) геометријске карактеристике [41].

Квадрат инфинитезималног линијског елемента  $ds$  у таквим просторима дефинисан је изразом<sup>10</sup>

$$ds^2 = g_{\mu\nu} dx^\mu dx^\nu, \quad (\mu, \nu \in \{0, 1, 2, 3\}) \quad (3.1)$$

где су  $x^\mu$  криволинијске координате, а  $g_{\mu\nu}$  је симетрични тензор који потпуно одређује метрику и кривину конкретног простора. Интервал  $ds$  је инваријантан у односу на избор генерализаних просторно-временских координата  $x^\mu$  и, у зависности од предзнака суме (3.1), може бити реална или имагинарна величина. Структура предзнака на десној страни израза за квадратну форму  $ds^2$  у (3.1) дефинише тип риманског простора. Тако, поред простора позитивне и негативне дефинитности, постоје и римански простори индефинитне метрике. Такав је управо Ајнштајнов простор-време са метричком сигнатуром  $(-+++)$ , ако претпоставимо да је само координата  $x^0$  временска, а остале три  $(x^1, x^2, x^3)$  да су просторне.

У општој теорији релативности (ОТР) гравитација се сматра геометријским својством четвородимензионалног простор-времена, због чега се ОТР назива још и Ајнштајновом теоријом гравитације. Другим речима, гравитационо привлачење је последица кривљења простор-времена услед присуства материје и енергије, а математички израз ове геометријско-физичке релације представља систем од десет нелинеарних парцијалних диференцијалних једначина

$$G_{\mu\nu} + g_{\mu\nu}\Lambda = \frac{8\pi G}{c^4} T_{\mu\nu} \quad (3.2)$$

<sup>9</sup> У диференцијалној геометрији, такви простори се називају четвородимензионалне глатке повезане многострукости Лоренцовог типа.

<sup>10</sup> Концизности ради, у изразу (3.1), као и целом овом одељку, примењена је Ајнштајнова конвенција о сабирању, како је иначе уобичајено у ТР и тензорском рачуну [41,7]

по непознатим компонентама метричког тензора  $g_{\mu\nu}$ , где је:  $G_{\mu\nu}$  – Ајнштајнов тензор,  $\Lambda$  – космолошка константа<sup>11</sup>,  $G$  – универзална гравитациона константа и  $T_{\mu\nu}$  – тензор енергије и импулса. Симетрични тензор  $G_{\mu\nu}$  на врло сложен начин зависи од  $g_{\mu\nu}$ , тако да је решавање једначина (3.2) технички изводљиво само у поједностављеним специјалним случајевима и уз мноштво апроксимативних корака.

Ајнштајнове једначине (3.2) се могу извести из тзв. Хилбертове акције  $S_{\mathcal{H}}$ ,

$$S_{\mathcal{H}} = \int \mathcal{L} d^4x ,$$

која је дефинисана преко лагранжијана (Лагранжевог тензора густине)  $\mathcal{L}$ , где је

$$\mathcal{L} = \sqrt{-g} [a(R - 2\Lambda) + \mathcal{L}_M] , \quad \text{или} \quad \mathcal{L} = a\sqrt{-g}R \quad (\text{за вакуум и } \Lambda = 0) ,$$

$g = \det(g_{\mu\nu})$ ,  $R$  је Ричијев скалар, константа  $a = c^4/(16\pi G)$  и  $\mathcal{L}_M$  је део лагранжијана  $\mathcal{L}$  који зависи од расподеле материје у пољу, односно од тензора  $T_{\mu\nu}$ . Варирајући метрику  $g_{\mu\nu}$ , тако да  $S_{\mathcal{H}}$  има екстремну вредност, и интегралећи по целом простор-времену, долазимо до једначина (3.2) [33].

Када је метрички тензор (гравитационог) поља, или простор-времена, дефинисаног једначинама (3.2) познат, онда се путања инерционог кретања неке слободне честице<sup>12</sup>, која у потпуности прати геометрију тог поља, може одредити решавањем диференцијалних једначина

$$\frac{d^2 x^\mu}{ds^2} + \left\{ \begin{matrix} \mu \\ \nu \sigma \end{matrix} \right\} \frac{dx^\nu}{ds} \frac{dx^\sigma}{ds} = 0 , \quad (3.3)$$

где је: параметар  $s$  – *сопствено време* или *дужина* интервала  $s$ , зависно од типа трајекторије, а ознака  $\left\{ \begin{matrix} \mu \\ \nu \sigma \end{matrix} \right\}$  – Кристофелов симбол друге врсте или повезаност Леви-Чивите. Једначине (3.3) се називају *геодезијским*, а њихово решење је *геодезијска линија*. Одређивањем геодезијске линије, није само одређена трајекторија у четвородимензионалном простор-времену, већ и параметар  $s$  дуж ње. Другим речима, *геодезијска линија пошћуно ојисује и крећње дуж ње*.

Параметризација у (3.3) није извршена на произвољан начин, већ поштујући захтев да је норма тангентног вектора  $\frac{dx^\mu}{ds}$  константна<sup>13</sup> (тзв. афина параметризација).

<sup>11</sup> Према савременим тумачењима, смисао константе  $\Lambda$  се може повезати са енергијом вакуума, односно са чињеницом да је та енергија различита од нуле [70,33].

<sup>12</sup> То је честица чија се величина и сопствено гравитационо поље занемарују и на коју не делују било које друге силе, осим гравитационих сила самог поља. За њих кажемо да се слободно крећу или "слободно падају" у Ајнштајновом простор-времену.

<sup>13</sup> Под нормом неког вектора  $A$  се овде подразумева скаларни производ  $A \cdot A$ . Вектори са истом нормом су паралелни и имају исти интензитет, односно транслацијом се могу превести једни на друге. То значи и да се сви тангентни вектори дуж неке геодезијске линије паралелно померају, пошто им је норма константна.

Према знаку те норме, геодезијске линије у Ајштајновом простор-времену се разврставају на *временске, просторне и нула линије*. Ако је важећа (најчешће коришћена у ТР) метричка сигнатура типа  $(-+++)$ , онда су *временске геодезијске линије* оне чији тангентни вектори имају негативну норму, *просторне геодезијске линије* су са позитивном нормом својих тангентних вектора, а код *геодезијских нула линија*, као што им и само име говори, таква норма је једнака нули.

Свака честица са коначном (али занемарљивом) масом која се налази у гравитационом пољу, а није под утицајем још и неких других (негравитационих) сила, слободно се креће дуж временске геодезијске линије, док честице које немају масу (мировања), као што је фотон, на пример, крећу се брзином  $c$  дуж *геодезијске нула линије*, тако да сопствено време таквих честица не постоји ( $ds = 0$ ). Дуж просторних геодезијских линија се не крећу физичке честице, иако се такве путање могу разматрати са теоријског становишта.

Једначине (3.3) се могу упоредити са једначином  $\mathbf{F} = m\mathbf{a} = \mathbf{0}$  у класичној механици. Ако би десна страна у (3.3) била различита од нуле, материјална тест-честица се не би кретала по инерцији дуж геодезијске линије већ форсирано по некој другој трајекторији. Такав случај би одговарао кретању које описује главни закон динамике (други Њутнов закон). Иначе, свака путања у релативистичком простор-времену назива се *светска линија*, а геодезијске линије су само неке од њих.

На сличан начин се може извршити поређење и са првим Њутновим законом у класичној механици (законом инерције). Уместо тврђења "*тело (или материјална честица) се креће по инерцији равномерно дуж праве линије, када на њега не делује нека сила*", у ТР стоји "*тело се креће по инерцији дуж геодезијске линије, када на њега не делује нека сила*". При томе, треба имати на уму да се у ТР гравитација не сматра силом, већ се под силом подразумева нека друга (негравитациона) сила која тело "избацује" са геодезијске трајекторије. Зато се често у текстовима о Ајнштајновој теорији релативности наводи једна реченица која сликовито објашњава гравитацију: "*кривина простор-времена говори масама како треба да се крећу, а масе простор-времену како треба да се криви*" [101].

Геодезијска линија у уопштеним риманским просторима је аналогон правим линијама у равним еуклидским просторима<sup>14</sup>. Тако дужима које спајају било које две различите тачке равног еуклидског простора, одговарају лукови геодезијских линија

<sup>14</sup> Еуклидски простори су посебна врста риманских простора са метриком  $ds^2 = c_\alpha (x^\alpha)^2$ , где су  $c_\alpha$  константне позитивне величине (независне од координата  $x^\alpha$ ). У равним еуклидским просторима је  $c_\alpha = 1$ , а  $x^\alpha$  су Декартове правоугле координате. Ако су неке од констаната  $c_\alpha < 0$ , такви простори се онда називају псеудоеуклидским.

у свим осталим риманским просторима. Ти лукови могу бити најкраћа, али и највећа, растојања између тачака, јер се геодезијска једначина (3.3) може поистоветити са условом за екстремум функционала  $\int ds$ .

У Ајнштајновом простор-времену екстремно четвородимензионално растојање  $L$  између тачака (догађаја)  $A$  и  $B$

$$L = \int_{\widehat{AB}} \sqrt{\left| g_{\mu\nu} \frac{dx^\mu}{ds} \frac{dx^\nu}{ds} \right|} ds \quad (3.4)$$

ће бити највеће (по времену) ако су оне налазе на временској геодезијској линији, а најмање (по дужини) када их спаја просторна геодезијска линија. Инерционо кретање неке честице у гравитационом пољу се увек врши дуж геодезијске линије истог типа. Другим речима, геодезијске линије не могу у неким својим тачкама бити временског, а у другим просторног типа. Зато је мера геодезијског лука  $L$  између тачака  $A$  и  $B$  изражена или у временским јединицама или у дужинским јединицама, зависно од смисла параметра  $s$ , односно од зависно типа геодезијске линије.

Треба нагласити да је кретање дуж геодезијских линија (3.3) у гравитационом пољу, дефинисаног једначинама (3.2), својеврсна идеализација, или боље речено, апроксимација реалних ситуација, када се гравитационо поље покретне материјалне честице (тзв. тест-честице) занемарује и када на њу не делују неке друге (негравитационе) силе. И у таквом (идеалном) случају врло је тешко одређивати једначине кретања при ма каквом нивоу уопштења, чак и у случају када је тензор енергије и импулса  $T_{\mu\nu}$  једнак нули, односно када је простор-време празно поље<sup>15</sup> (вакуум).

У вакуумском гравитационом пољу, претпостављајући да је  $\Lambda = 0$ , Ајнштајнове једначине поља (3.2) се своде само на

$$R_{\mu\nu} = 0, \quad (3.5)$$

где  $R_{\mu\nu}$  представља Ричијев тензор<sup>16</sup>, који на посредан начин, преко Кристофелових симбола, зависи од метричког тензора  $g_{\mu\nu}$ . Међутим, и једначине (3.5) су нелинеарне и још увек веома компликоване за решавање, без увођења неких додатних претпоставки и ограничења. Срећом, за примене ТР у области која је нама интересантна, везано

<sup>15</sup> У ОТР празно поље значи одсуство материје и свих других физичких поља, изузев гравитационог. Гравитација не нарушава празнину простора, пошто се она идентификује са самим простором, тј. сматра се производом његових геометријских својстава. "Дејство" гравитације је зато неизбежно и не постоје гравитационо неутрални објекти [33].

<sup>16</sup> Ричијев тензор  $R_{\mu\nu} = \frac{\partial}{\partial x^\nu} \left\{ \begin{matrix} \alpha \\ \mu \alpha \end{matrix} \right\} - \frac{\partial}{\partial x^\alpha} \left\{ \begin{matrix} \alpha \\ \mu \nu \end{matrix} \right\} + \left\{ \begin{matrix} \beta \\ \mu \alpha \end{matrix} \right\} \left\{ \begin{matrix} \alpha \\ \beta \nu \end{matrix} \right\} - \left\{ \begin{matrix} \beta \\ \mu \nu \end{matrix} \right\} \left\{ \begin{matrix} \alpha \\ \beta \alpha \end{matrix} \right\}$  и Ричијев скалар  $R = g^{\mu\nu} R_{\mu\nu}$  дефинишу Ајнштајнов тензор  $G_{\mu\nu} = R_{\mu\nu} - \frac{1}{2} R g_{\mu\nu}$  у (3.2).

за кретање Земље у Сунчевом систему и њену просторно-временску оријентацију, постоје усвојени поступци којим се ови проблеми решавају са потребном тачношћу.

У Сунчевом систему планете по орбитама крећу брзинама које су много мање од брзине светлости, у скоро вакуумском стационарном гравитационом пољу (Сунца) и са масама које су скоро занемарљиве у односу на Сунчеву, тако да се са високим степеном тачности могу сматрати слободним (тест) честицама које се крећу у четвородимензионалном простор-времену по геодезијским линијама<sup>17</sup>. То је слабо (скоро равно) гравитационо поље које се може третирати као мали поремећај равног простор-времена, па се под таквим претпоставкама може показати да се Ајнштајнова једначина (3.2) може поистоветити са Пуасономом једначином

$$\Delta U = 4\pi G\rho, \quad (3.6)$$

у којој фигурише класичан Њутновски гравитациони потенцијал  $U$  и густина материје  $\rho$ , а  $\Delta$  је Лапласов оператор<sup>18</sup>. Међутим, иако су у граничним случајевима ефекти релативистичке гравитације исти као у класичној њутновској механици, постоји суштинска разлика у описивању гравитационог потенцијала.

Нерелативистички гравитациони потенцијал, у некој тачки  $A$ , услед присуства  $N$  тачкастих маса  $m_i$  на локацијама  $\mathbf{r}_i$  је проста сума сваког потенцијала (од сваке масе) понаособ, односно

$$U = \sum_{i=1}^N U_i = G \sum_{i=1}^N \frac{m_i}{|\mathbf{r}_A - \mathbf{r}_i|}, \quad (3.7)$$

па је њутновска гравитациона сила која делује у истој тачки  $\mathbf{F} = \nabla U$ . У ОТР то није случај. Таква адитивност потенцијала не важи. Гравитациони потенцијал је изражен кроз десет компонената метричког тензора  $g_{\mu\nu}$  (практично кроз десет потенцијала), али оне, поред тога што одређују потенцијал гравитационог поља, дефинишу и његову геометрију, односно систем координата  $x^\mu$ , за разлику од класичног приступа, у коме је потенцијал скаларна величина, независна од избора координата. Та повезаност гравитационог потенцијала са координатама и, већ поменуто, нелинеарност најзначајније су особености поједностављене релативистичке једначине (3.5).

Простор-време називамо *равним* ако у њему нема гравитационог потенцијала<sup>19</sup>. Геодезијске линије су онда праве и, метрички тензор  $g_{\mu\nu}$  у (3.1) добија једноставнију

<sup>17</sup> Планетске орбите су заправо пројекције одговарајућих геодезијских линија из четвородимензионалног простор-времена у "наш видљиви" тродимензионални простор.

<sup>18</sup>  $\Delta = \nabla \cdot \nabla$ , где је векторски оператор  $\nabla = \left\{ \frac{\partial}{\partial x^1}, \frac{\partial}{\partial x^2}, \frac{\partial}{\partial x^3} \right\}$  (тзв. Хамилтонов оператор).

<sup>19</sup> Подразумева се и да су координате  $x^\mu$  дефинисане у односу на систем који не ротира и у односу на пол који нема убрзање.

форму  $\eta_{\mu\nu}$ ,

$$\eta_{\mu\nu} = \begin{pmatrix} -c^2 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{pmatrix}, \quad (3.8)$$

када координате  $x^\mu$  дефинишемо тако да буде  $\{x^0 = t, x^1 = x, x^2 = y, x^3 = z\}$ , где је  $t$  - *координатно време*, а  $x, y, z$  - правоугле Декартове (просторне) координате. Метрика (3.1), у том случају, постаје тзв. *метрика Минковској*

$$ds^2 = \eta_{\mu\nu} dx^\mu dx^\nu = -c^2 dt^2 + dx^2 + dy^2 + dz^2, \quad (3.9)$$

која је карактеристична за специјалну теорију релативности (СТР). Још је једноставније ако се узме да је  $c = 1$ , као што се то обично ради, јер се скаларни производ два вектора онда рачуна на препознатљив начин<sup>20</sup>.

$$P \cdot Q = \eta_{\mu\nu} P^\mu Q^\nu = -P^0 Q^0 + P^1 Q^1 + P^2 Q^2 + P^3 Q^3.$$

Метрика Минковског, према ТР, важи дакле у инерцијалним референтним системима, односно у системима који се идентификују са онима који "слободно падају", чији су сопствени гравитациони утицаји занемарљиви и који су изоловани од утицаја било каквих електричних, магнетних или било каквих других спољних поља. Такви референтни системи се увек могу довољно тачно дефинисати у неком *локалном равном простор-времени* везаном за конкретну тачку. Као што довољно мала околина неког топоцентра на Земљиној површини припада хоризонској равни која тангира Земљу на том месту, тако је тај равни простор-време (у коме је дефинисан локални инерцијални референтни систем) тангентан у некој својој тачки на неки криви (неинерцијални) простор-време, при чему координате  $x^\mu$  (у оба простора), и њихови изводи, међусобно одговарају једни другима.

Обзиром да је Сунчев систем слабо гравитационо поље и да метрика у ОТР зависи од расподеле и кретања маса, у астрономији се тензор  $g_{\mu\nu}$  изражава преко редова по малим параметрима који су функција гравитационог потенцијала  $U$  и вектора гравито-магнетног потенцијала  $\mathbf{W}$ , а за координате се узимају, као у СТР,  $(ct, x, y, z)$  или  $(t, x, y, z)$ <sup>21</sup>. То онда значи да се метрика (3.1) дефинише са  $dx^\mu = \{cdt, dx, dy, dz\}$  и  $g_{\mu\nu} = g_{\mu\nu}(t, x, y, z, U, \mathbf{W})$ .

<sup>20</sup> Зато се каже да метрика Минковског има сигнатуру  $(-+++)$ , за разлику од еуклидске метричке сигнатуре  $(++++)$  у четвородимензионалном простору.

<sup>21</sup> То је случај за  $c = 1$ , па су и просторне координате  $x, y, z$  изражене у временским јединицама. Оне тада представљају време простирања светлости на одговарајућим раздаљинама.

Резолуције Међународне астрономске уније које се тичу барицентричног и геоцентричног небеског референтног система, коефицијената пост-њутоновског потенцијала и трансформација релативистичких временских скала, као и реализације координатног времена у Сунчевом систему су (због њихове обимности) дате у Прилогу, на крају овог рада. Тамо су приказани развоји за компоненте тензора  $g_{\mu\nu}$  са тачношћу од  $\sim 10^{-17}$  секунди (по времену), односно  $\sim 10^{-6}$  лучних секунди (по правцу).

### 3.1.2. Координатно и сопствено време

Релативистички концепт координатног и сопственог времена је предложен на IAU конгресу 1976. године, а уведен је у астрономску праксу од 1984. године. Потпуно усвајање Ајнштајнове ТР, као тачне теорије, и комплетно дефинисање свих система референције на релативистичкој основи предложено је тек на IAU конгресу у Буенос Аиресу 1991. године, када су извршене и темељне редефиниције постојећих, и увођење нових, временских скала.

Појмови сопственог и координатног времена, који су већ поменути у претходном одељку, су специфични за ТР. Обзиром да је у СТР временска координата одвојена од просторних и да се инерцијални референтни системи, везани за геометрију са псеудоеуклидском метриком Минковског (3.9), увек могу дефинисати (бар локалном простор-времену), најједноставније је у таквим условима објаснити разлику између сопственог и координатног времена.

Претпоставимо да су  $S(t, x, y, z)$  и  $\bar{S}(\bar{t}, \bar{x}, \bar{y}, \bar{z})$  два инерцијална референтна система, тако да се систем  $\bar{S}$  креће сталном брзином  $\mathbf{v} = \{v_x, v_y, v_z\}$  у односу на систем  $S$ . Ако су  $\mathbf{r} = \{x, y, z\}$  и  $\bar{\mathbf{r}} = \{\bar{x}, \bar{y}, \bar{z}\}$  одговарајући вектори положаја (истих) тачака у овим системима и уведемо карактеристичне ознаке за СТР

$$v = (v_x^2 + v_y^2 + v_z^2)^{\frac{1}{2}}, \quad \beta = \frac{v}{c}, \quad \gamma = (1 - \beta^2)^{-\frac{1}{2}}, \quad (3.10)$$

може се показати да, када су Декартове просторне координате и време повезани релацијама

$$\left. \begin{aligned} \bar{t} &= \gamma \left( t - \frac{\mathbf{v} \cdot \mathbf{r}}{c^2} \right), & \bar{\mathbf{r}} &= \mathbf{r} - \left( \gamma t - (\gamma - 1) \frac{\mathbf{v} \cdot \mathbf{r}}{v^2} \right) \mathbf{v} \\ t &= \gamma \left( \bar{t} + \frac{\mathbf{v} \cdot \bar{\mathbf{r}}}{c^2} \right), & \mathbf{r} &= \bar{\mathbf{r}} + \left( \gamma \bar{t} + (\gamma - 1) \frac{\mathbf{v} \cdot \bar{\mathbf{r}}}{v^2} \right) \mathbf{v} \end{aligned} \right\}, \quad (3.11)$$

растојање  $\Delta s$  између две тачке (два догађаја) у простор-времену, чије су разлике координата  $\Delta t, \Delta x, \Delta y, \Delta z$ , је инваријантно у односу на све промене координата, односно увек је

$$\Delta s^2 = -c^2 \Delta t^2 + \Delta x^2 + \Delta y^2 + \Delta z^2, \quad (3.12)$$

независно од избора координата.

Израз (3.12) остаје инваријантан<sup>22</sup> (утолико пре) и када се коначне разлике замене инфинитезималним, па он, као и еквивалентни израз (3.9), исто одређује *метрику Минковској*, која важи у празном (вакуумском) простор-времену и где нема гравитационог потенцијала.

Једнакости (3.11) су познате у литератури под називом *Лоренцове трансформације*, где се најчешће наводе у једноставнијем облику<sup>23</sup>:

$$\left. \begin{aligned} \bar{t} &= \gamma \left( t - \frac{v_x x}{c^2} \right) \\ \bar{x} &= \gamma (x - v_x t) \\ \bar{y} &= y \\ \bar{z} &= z \end{aligned} \right\}. \quad (3.13)$$

Из Лоренцових трансформација можемо закључити да у два инерцијална система, који се крећу **различитим брзинама**  $\mathbf{v}_1$  и  $\mathbf{v}_2$ , време различито *проишче* и да долази до промене просторних величина (дужина). Те појаве, тзв. *дилатација времена и контракција дужина*, су све израженије што је **релативна брзина**  $v = |\mathbf{v}| = |\mathbf{v}_2 - \mathbf{v}_1|$  ближа брзини простирања светлости у вакууму  $c$ , а не постоје једино када је  $v = 0$ , односно када се посматрани инерцијални системи крећу истим брзинама<sup>24</sup>.

Ова особина "еластичности" времена и простора, која као да им даје материјалне карактеристике, форсирано намеће и сасвим одређену представу о природи тих фундаменталних физичких објеката или категорија, ако се послужимо речником филозофије. Међутим, иако са математичког становишта та представа производи потпуно конзистентну и непротивуречну слику о простору и времену, гледано из угла физике и, поготово, филозофије, то се не би могло сасвим децидирано тврдити.

<sup>22</sup> Овде је реч о праволинијском равномерном кретању.

<sup>23</sup> За посебни случај равномерног кретања само дуж  $x$  осе, када је  $\mathbf{v} = \{v_x, 0, 0\}$ .

<sup>24</sup> Према СТР, питање "У односу на који референтни систем се мери брзина светлости?" се одбацује као бесмислено, јер се претпоставља да се она простира истом брзином  $c$  у свим (или према свим) инерцијалним системима и да је она апсолутна горња граница за интензитет ма које брзине  $\mathbf{v}$  у механици. Зато, према релативистичком закону слагања брзина, увек мора бити  $|\mathbf{v}_2 \pm \mathbf{v}_1| \leq c$ .



Сматра се да је главна предност ТР над другим савременим физичким теоријама њена једноставна форма и задовољавајућа сагласност са експерименталним резултатима.

Обзиром да је у астрономији ТР и званично прихваћена као тачна теорија, за нас је овде битно да на резултат мерења времена у неком референтном систему утиче брзина и начин кретања мерног уређаја<sup>25</sup>, као и гравитациони потенцијал на месту где се тај уређај налази.

Време које се *мери* (неким физичким часовником за кога се претпоставља да "тачно" ради и да се креће заједно са посматрачем) дуж четвородимензионалне трајекторије (светске линије) у простор-времену је *сопствено време* (тог часовника и/или тог посматрача). При томе смо још претпоставили да на то *мерење* (тј. на рад часовника) не утичу било какви спољни услови околине, укључујући гравитацију и убрзање<sup>26</sup>. Дакле, *сопствено време* (посматрача) у суштини је пропорционално дужини (његове) путање током кретања у простор-времену, па је, због инваријанте  $ds^2$  у СТР (3.9) и ОТР (3.1), независно од избора координата.

За разлику од сопственог времена, *координатно време* је само једна од четири координате које се придружују тачкама у простор-времену, те се као такво *не може мерити*, него једино (*из*)*рачуна(ва)ти*. Оно је повезано са *локацијом* тачака и, самим тим, уграђено је у дефиницију референтног система, па се зато користи за описивање кретања у (том) референтном систему.

Веза између сопственог и координатног времена у ОТР је условљена метриком простор-времена, али полазиште је исто као и у СТР, где важи метрика Минковског, јер је линијски елемент  $ds^2$  инваријантан. Тако, ако означимо са  $\tau$  сопствено време и са  $t$  координатно време, у изразу (3.9), када нема промене просторног положаја ( $dx = dy = dz = 0$ ), биће  $t = \tau$  и онда имамо

$$ds^2 = -c^2 d\tau^2, \quad (3.14)$$

одакле

$$d\tau^2 = \frac{ds^2}{-c^2}. \quad (3.15)$$

<sup>25</sup> Ти мерни уређаји у ТР су већ поменути "идеални часовници", за које претпостављамо да "тачно" раде, односно да производе потпуно равномерну временску скалу (у стању мировања), а у пракси су то најпрецизнији атомски часовници.

<sup>26</sup> У званичној дефиницији SI секунде, која се мери трајањем 9192631770 периода зрачења Cs атома и која се сматра јединицом сопственог времена, не помиње се ни нека одређена вредност гравитационог потенцијала, нити стање кретања.

Сада, заменом десне стране једнакости (3.9) у (3.15), директно добијамо везу између сопственог и координатног времена

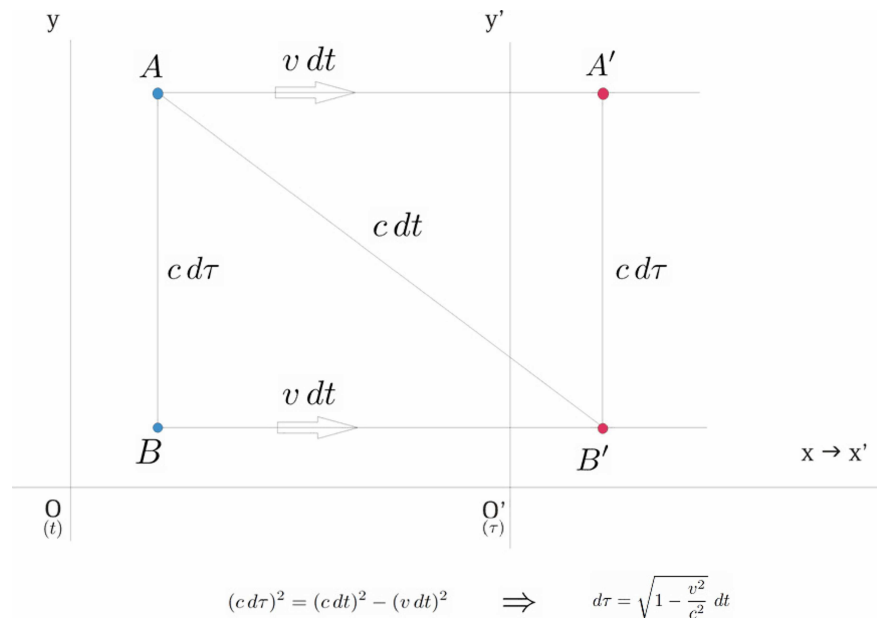
$$d\tau^2 = dt^2 - \frac{1}{c^2} (dx^2 + dy^2 + dz^2) , \quad (3.16)$$

која важи у СТР.

Израз (3.16) се, деобом са  $dt^2$  и кореновањем, трансформише у

$$\frac{d\tau}{dt} = \sqrt{1 - \frac{1}{c^2} \left( \frac{dx^2}{dt^2} + \frac{dy^2}{dt^2} + \frac{dz^2}{dt^2} \right)} = \sqrt{1 - \frac{v^2}{c^2}} = \frac{1}{\gamma} , \quad (3.17)$$

где је  $v = \sqrt{\dot{x}^2 + \dot{y}^2 + \dot{z}^2}$  интензитет брзине  $\mathbf{v}$ , која је у функцији координатног времена<sup>27</sup>  $t$  (Слика 3.1).



**Слика 3.1.** Веза сопственог и координатног времена са Питагорином теоремом у специјалној теорији релативности.

Иако је релација (3.15) изведена у условима СТР, она важи за сваки локални инерцијални систем и када је метрика  $ds^2$  искривљена, јер су и брзина светлости  $c$  и линијски елемент  $ds$  инваријанте за сваки референтни систем. На пример, у случају слабог гравитационог поља (какво је у Сунчевом систему), за сваки координатни

<sup>27</sup> Узгред, можемо приметити да се из једноставних веза (3.16) и (3.17) види да Питагорина теорема повезује инфинитезимална растојања  $c d\tau$ ,  $v dt$  и  $c dt$ , и да, због (3.12), исто важи и за коначна растојања  $c\Delta\tau$ ,  $v\Delta t$ ,  $c\Delta t$  (Слика 3.1)

систем са центром у барицентру било ког система маса<sup>28</sup> одговарајућа метрика се, са великим степеном тачности, може приближно представити у облику

$$ds^2 = - \left( 1 - \frac{2U}{c^2} \right) c^2 dt^2 + \left( 1 + \frac{2U}{c^2} \right) (dx^2 + dy^2 + dz^2) , \quad (3.18)$$

где је  $U$  збир гравитационих потенцијала датог система маса ( $U > 0$ ), па, на основу (3.15), имамо следећу везу између сопственог и координатног времена

$$d\tau^2 = \frac{ds^2}{-c^2} = \left( 1 - \frac{2U}{c^2} \right) dt^2 - \frac{1}{c^2} \left( 1 + \frac{2U}{c^2} \right) (dx^2 + dy^2 + dz^2) , \quad (3.19)$$

која важи и када се Декартове координате  $x, y, z$  замене било којим другим просторним координатама  $x^i$ .

Занемарујући мале чланове, који садрже фактор  $c^{-4}$ , и примењујући исту трансформацију као када смо из (3.16) добили (3.17), из (3.19) имамо

$$\frac{d\tau}{dt} = \sqrt{1 - \frac{2U}{c^2} - \frac{v^2}{c^2}} \approx 1 - \frac{U}{c^2} - \frac{v^2}{2c^2} . \quad (3.20)$$

Једнакости (3.17) и (3.20), на основу којих се може квантитативно одредити дилатација времена, изражавају везу између сопственог и координатног времена у СТР и ОТР, респективно. Наравно, много већи практични значај има израз (3.20), јер се односи на реалне ситуације, када постоји потенцијал ( $U \neq 0$ ).

Истакли смо већ да се координатно време не може директно мерити, али се може израчунати. На основу (3.20), видимо да када меримо сопствено време, неким реалним физичким часовником, током кретања<sup>29</sup> можемо одредити одговарајући временски интервал координатног времена интеграљењем леве и десне стране следеће диференцијалне једнакости

$$dt = \left( 1 - \frac{2U}{c^2} - \frac{v^2}{c^2} \right)^{-\frac{1}{2}} d\tau \approx \left( 1 + \frac{U}{c^2} + \frac{v^2}{2c^2} \right) d\tau . \quad (3.21)$$

На пример, ако меримо време неким часовником који *мирује* на Земљиној површини, до одговарајуће количине координатног времена, која се односи на геоцентрични координатни систем, једноставно долазимо, обзиром да се коефицијент уз  $d\tau$  у изразу (3.21) може сматрати *константним* за дату локацију мерења<sup>30</sup>.

<sup>28</sup> Барицентар се може сматрати тачком која "слободно пада" у простор-времену, јер се у њему гравитационе силе поништавају. У његовој блиској околини је зато увек слабо гравитационо поље.

<sup>29</sup> Претпоставља се да су, за сваку тачку путање, познати потенцијал  $U$  и брзина  $v$  у датом референтном систему (на који се односи, или у коме је дефинисано, координатно време  $t$ ).

<sup>30</sup> Занемарујући неправилно померање центра масе Земље, које износи највише пар центиметара, геоцентрична одстојања тачака на површини геоида смо претпоставили да су стационарна.

Тако, полазећи рецимо од усвојених параметара за геодезијски референтни елипсоид по моделу WGS-84, који се користи у GPS навигацији [17], гравитациони потенцијал  $U$  и брзину  $v$  на паралелу  $(r, \theta)$ , са високом степеном тачности, израчунавамо помоћу образаца

$$U = \frac{GM}{r} \left( 1 - \frac{J_2 a_1^2}{2r^2} (3 \cos^2 \theta - 1) \right), \quad v = |\vec{\omega} \times \vec{r}| = \omega r \sin \theta \quad (3.22)$$

у којима су координате  $r = |\vec{r}|$  и  $\theta$ , геоцентрично одстојање и колатитуда<sup>31</sup> фиксног часовника, изражене у метрима и радијанима, респективно, а остале величине су константе: производ  $GM = 3.986004418 \cdot 10^{14} \text{ m}^3/\text{s}^2$ , екваторски полупречник Земље  $a_1 = 6.378137 \cdot 10^6 \text{ m}$ , коефицијент квадруполног момента  $J_2 = 1.08268 \cdot 10^{-3}$  и угаона брзина Земљине ротације  $\omega = |\vec{\omega}| = 7.292115 \cdot 10^{-5} \text{ rad/s}$ . За часовник на екватору ( $r = a_1, \theta = \pi/2$ ), на пример, добили бисмо следећу вредност дилатационе константе из (3.21)

$$\begin{aligned} 1 + \frac{U}{c^2} + \frac{v^2}{2c^2} &= 1 + \frac{1}{c^2} \left[ \frac{GM}{a_1} \left( 1 + \frac{J_2}{2} \right) + \frac{\omega^2 r^2}{2} \right] = 1 + \frac{1}{299792458^2} \times \\ &\times \left[ \frac{3.986004418 \cdot 10^{14}}{6.378137 \cdot 10^6} \left( 1 + \frac{1.08268 \cdot 10^{-3}}{2} \right) + \frac{(7.292115 \cdot 10^{-5})^2 \cdot (6.378137 \cdot 10^6)^2}{2} \right] = \\ &= 1 + 6.96928 \cdot 10^{-10}, \end{aligned}$$

која је скоро идентична (у границама тачности обрачунаог потенцијала) са њеном усвојеном вредношћу за површину геоида

$$1 + L_G = 1 + 6.969290134 \cdot 10^{-10}.$$

Са константом  $L_G$ , која је пропорционална гравитационом потенцијалу геоида  $U_G$ ,

$$L_G = \frac{U_G}{c^2} = 6.969290134 \cdot 10^{-10}, \quad (3.23)$$

још ћемо се сусретати у даљем тексту, када будемо повезивали тререстричке временске скале са геоцентричним координатним временом.

Са тим у вези, а и са претходно реченим, важно је напоменути да ће дилатациона константа, која дефинише однос неког интервала геоцентричног координатног времена према одговарајућем интервалу сопственог времена на некој фиксној тачки

<sup>31</sup> То је угаоно поларно одстојање, рачунато од северног пола, или комплемент географске ширине. Представља угао који геоцентрични вектор положаја  $\vec{r}$  заклапа са вектором угаоне брзине Земљине ротације  $\vec{\omega}$ .

$(x, y, z)$  Земљине површине (и обрнуто), бити *исти* у геоцентричном координатном систему, независно од тога да ли он ротира заједно са Земљом, или је непокретан (према небеском референтном систему). Координатна брзина  $v$  која се појављује у изразима (3.20)-(3.22), иако на први поглед не би требало да буде у ротирајућем геоцентричном систему, јер часовник мирује у њему ( $v=0$ ), због дејства центрифугалне силе услед Земљине ротације, члан  $\frac{1}{2}v^2$  ипак, као центрипетални потенцијал [18,111]

$$U_R = \frac{v^2}{2} = \frac{1}{2} |\vec{\omega} \times \vec{r}|^2 = \frac{1}{2} \omega^2 (x^2 + y^2), \quad (3.24)$$

улази у укупни потенцијал  $U$ .

На крају овог одељка о релативистичким временима истакнимо још једну важну практичну улогу координатног времена.

Као што је познато, питање *синхронизације* часовника, или установљавања *исто-времености* (симултаности) различитих догађаја, је врло компликовано, обзиром да је различита сопствена времена тешко упоређивати. Тај проблем је решен установљавањем тзв. *конвенције о синхронизацији*, по којој су два (просторно удаљена) догађаја истовремена (симултана) само ако им се (у истом систему референције) координатна времена подударају. Тек ако се позовемо на ту конвенцију, можемо онда упоређивати показивања часовника и вршити њихову синхронизацију. Међутим, треба имати на уму да тако установљена истовременост није апсолутна, јер истовремени догађаји у једном референтном систему не морају то бити и у неком другом, пошто је координатно време зависно од дефиниције референтног система.

### 3.2. АТОМСКО ВРЕМЕ

Тренутно постоје три временске скале од глобалног значаја које се формирају атомским часовницима. То су скале: *међународној атомској времена* (TAI), *светској координираној времена* (UTC) и *шесториичкој времена*<sup>32</sup> (TT). Организација, непосредно одговорна за извођење ових скала, која, у том циљу, обједињује и обрађује међусобна упоређења око 350 атомских часовника, распоређених у 70-так лабораторија времена широм света [15], је *Међународни биро за мере и тежине* (BIPM) са седиштем у Паризу.

Најважнија заједничка особина временских скала TAI, UTC и TT је да оне по дефиницији све имају исту јединицу – секунду у *међународном систему јединица*<sup>33</sup>, или краће, SI секунду.

<sup>32</sup> Terrestrial Time

<sup>33</sup> Système International

### 3.2.1. Јединица за време

У тексту ВРМ-ове брошуре о међународном систему јединица [25] у одељку 2.1.1.3, који се исто налази и на званичном WEB сајту ВРМ-а, стоји дословно:

*'Јединица за време, секунда, је својевремено смањена 86400-тим делом средњеј сунчевој дана. Тачна дефиниција "средњеј сунчевој дана" је била остављена астрономима. Међушим мерења су показала да су неправилности Земљине ротације учинили такву дефиницију незадовољавајућом. Да би прецизније дефинисала јединицу за време, 11-та Генерална конференција за мере<sup>34</sup> (CGPM) (1960, Резолуција 9) је усвојила једну дефиницију Међународне астрономске уније (IAU), засновану на (трајању) тroyске године 1900. Међушим, експериментни су већ показали (од 1955.-те, па надаље) да атомски временски стандард, заснован на прелазу између два енергетска нивоа неког атома или молекула, може да се оствари и репродукује много тачније. Узимајући у обзир да је врло прецизна дефиниција јединице за време неопходна за науку и технологију, 13-та CGPM (1967/68, Резолуција 1) је заменила (постојећу) дефиницију секунде следећом:*

**Секунда је трајање 9 192 631 770 периода зрачења које одговараја прелазу између два хиперфина (енергетска) нивоа основног стања атома цезијума 133.**

*То повлачи да учешаност хиперфиног стања (енергетског нивоа) у основном стању атома цезијума 133 износи тачно 9 192 631 770 Hz.*

*На свом скупу из 1997. године, Међународни комитет за мере<sup>35</sup> (CIPM) потврђује (уз значајну корекцију) да се:*

**Горња дефиниција односи на цезијумов атом у мировању на термператури 0 К.**

*Ова примедба је разјаснила да је дефиниција секунде заснована на цезијумовом атому на која не утиче зрачење црног тела, односно да се он (тај атом) налази у околини која је термодинамичка термпература 0 К. Због тога, фреквенције свих примарних фреквенцијских стандарда треба коришћати за одређену поправку која је последица зрачења њихове околине, како је установљено на скупу Саветодавног комитета за време и фреквенцију<sup>36</sup> (CCTF) 1999. године.'*

Иако се наведена званична дефиниција SI секунде најчешће користи, у литератури се могу срести и нешто детаљније дефиниције. На пример, у [1] јединица за време је одређена као

<sup>34</sup> Conférence Générale des Poids et Mesures

<sup>35</sup> Comité Internationale des Poids et Mesures

<sup>36</sup> Consultative Committee for Time and Frequency

*'интервал времена у шоку кога се извршава 9 192 631 770 осцилација, које одговарају фреквенцији зрачења, које апсорбује атом цезијума Cs<sup>133</sup> при резонансном прелазу између енергетских нивоа султанке (сулфине) структуре основног стања <sup>2</sup>S<sub>1/2</sub>, који се карактеришу мајоритарним квантним бројевима F = 4, m<sub>F</sub> = 0 и F = 3, m<sub>F</sub> = 0, у отсуству утицаја спољних мајоритарних поља.'*

Калибрација цезијумове фреквенције, односно одлука о избору величине атомске секунде (SI секунде, од 1967.), је крајем 50-тих година прошлог века била усаглашена са претежном жељом светске астрономске заједнице, да јединица за време одговара јединици ондашњег ефемеридног времена, и са резултатима експеримената [105] који су извршени на Поморској опсерваторији САД<sup>37</sup> (USNO, Вашингтон) и у енглеској Националној физичкој лабораторији<sup>38</sup> (NPL, Тедингтон).

Треба истаћи да у релативистичком контексту **SI секунда може бити само јединица сопственог времена**, обзиром да је, према Guinot-у [64], *сопствено време теоријски концепт у коме се представља да је оно локално мерљиво у класичном метролошком смислу од стране било којег посматрача који носи са собом "идеални часовник"*<sup>39</sup>. Уосталом, ево како у [95] најистакнутији светски експерти разјашњавају нејасноће у вези дефиниције SI секунде:

*'... важно је схватити да ова дефиниција не садржи никакве напомене о томе како посматрач, који реализује ту секунду, треба да се креће, или где (у каквом трајекторијском пољу) тај посматрач треба да се налази. Са релативистичке тачке гледишта то је једини правилни приступ у дефинисању физичке јединице за време. Физичка јединица за време може бити реализована само путем физичких посматрања. Један од основних принципа опште теорије релативности, Ајнштајнов принцип еквиваленције, у комбинацији са изв. локалном хипотезом, посебно истиче да посматрач, користећи само своје сопствено време (тј. показивање неког идеалног часовника који се креће са њим), не може судити о томе како се креће и колико је јак трајекторијски поље дуж његове путање. Због тога, конкретна секунда, коју ћемо надаље звати SI секунда, може бити реализована од стране било којег посматрача, свеједно да ли се он са својим часовником налази на површини Земље, површини Марса или у некој свемирској летелици, далека од било које планете. У том смислу, SI секунда је истица за било којег посматрача и представља (само) један поступак који треба извршавати да би се у локалу реализовали*

<sup>37</sup> US Naval Observatory

<sup>38</sup> National Physical Laboratory

<sup>39</sup> По (никада оспораваној) претпоставци, атомске часовнике сматрамо "идеалним часовницима", а самим тим, и показатељима сопственог времена [64].

јединични временски интервали. Према томе, SI секунда је јединица сопствене времена и јединица за сопствено време, која може и треба да се реализује само у локалу (али од стране било којег посматрача, на произвољној локацији и у произвољном инерцијалном пољу). Одатле је јасно да формулација "SI секунде на *теоиду*", која се појављује у оригиналној дефиницији TAI скале, не значи да су SI секунде дефинисане на *теоиду* или да могу бити реализоване само на *теоиду*. Та формулација се заправо односи на сопствено време неког посматрача на *теоиду* које је изражено у SI секундама.'

Непосредна последица овакве локализације (величине) SI секунде се природно преноси и на све друге јединице које су дефинисане преко јединице за време. Тако је, на пример, и основна јединица за дужину (SI метар) одређена само у локалу, обзиром да се она сматра *дужином пута који светлост прелази у вакууму за време  $1/299792458$  дела*<sup>40</sup> SI секунде. Поставља се онда питање: како упоређивати резултате физичких или астрономских мерења (посматрања) која су изведена на различитим локацијама, када присуство (локалних) релативистичких ефеката има различити утицај? Општа теорија релативности има врло једноставан одговор: *сопствене (физичке) величине се не могу непосредно упоређивати*, већ само посредним путем, у оквиру неког договореног (дефинисаног) референтног система, пошто се оне претходно пребаце у одговарајуће *координатне величине* (својствене датом референтном систему). Наравно, таква упоређења могу имати само релативан карактер, јер су зависна од дефиниције конкретног референтног система. Међутим, тиме се сви проблеми овде не завршавају, јер остаје (још увек) отворено питање јединица одговарајућих координатних величина и њихове номенклатуре.

У одељку 3.1.2. смо већ разјаснили појмове сопственог и координатног времена, као и њихов однос у одређеним конкретним ограниченим случајевима. Усредсредимо нашу пажњу сада на однос те две врсте времена, везано за неки произвољни референтни систем и јединицу његове временске координате, користећи се дискусијом и ознакама као у [95,79].

Претпоставимо да је познат метрички тензор  $g_{\mu\nu}$  неког четвородимензионалног референтног система са координатама  $x^\alpha$  у коме је једна координата временска, на пример  $x^0 = t$ , а остале три  $x^i$  су просторне. Теорија опште релативности, у том случају, даје следећу диференцијалну везу између сопственог времена ( $\tau$ ) и

---

<sup>40</sup> Дефинициони разломак је реципрочна вредност усвојене константе за интензитет брзине светлости у вакууму  $c = 299792458$  m/s.



координатног времена ( $t$ )

$$d\tau = \sqrt{-g_{00}(t, \mathbf{x}_{obs}(t)) - \frac{2}{c} g_{0i}(t, \mathbf{x}_{obs}(t)) \dot{x}_{obs}^i(t) - \frac{1}{c^2} g_{ij}(t, \mathbf{x}_{obs}(t)) \dot{x}_{obs}^i(t) \dot{x}_{obs}^j(t)} dt, \quad (3.25)$$

у којој су:  $\mathbf{x}_{obs}(t) = \{x_{obs}^1(t), x_{obs}^2(t), x_{obs}^3(t)\}$  и  $\dot{\mathbf{x}}_{obs}(t) = \{\dot{x}_{obs}^1(t), \dot{x}_{obs}^2(t), \dot{x}_{obs}^3(t)\}$  вектори положаја и брзине посматрача (чије је сопствено време  $\tau$ ) у овом референтном систему (чије је координатно време  $t$ ).

Интеграцијом везе (3.25) од неког почетног тренутка

$$\tau(t_0) = \tau_0, \quad (3.26)$$

до  $\tau$  (на левој страни), односно  $t$  (на десној страни), може се израчунати количина сопственог времена  $\tau - \tau_0$  у зависности од одговарајуће (претпостављене) количине координатног времена  $t - t_0$ , а исто тако и обрнуто, аналитичким или нумеричким инвертовањем релације (3.25), може се добити интервал сопственог времена  $t - t_0$  у зависности од интервала  $\tau - \tau_0$ . У оба случаја, претпоставља се да су *синхронизацијом часовника* претходно одређени (установљени) одговарајући ("истовремени") тренуци  $\tau_0$  и  $t_0$  у (3.26). Логично, најједноставније је узети да буде  $\tau_0 = t_0 = 0$ , па се, по правилу, тако увек и поступа када год је то могуће, као што је то случај када постоји само један посматрач.

Не би требало да буде дилеме око јединице координатног времена  $t$ , јер, са једне стране, у другој препоруци IAU резолуције 4 (1991) полази се од претпоставке *да би исте физичке јединице требало да се користе у свим координатним системима* и предлаже: – *да координатно време треба да се изводи из временске скале коју реализују атомски часовници на Земљи* и – *да су основне физичке јединице простор-времена у свим координатним системима SI секунда за сопствено време и SI метар за сопствену дужину, који су повезани са вредношћу константе  $c = 299792458$  m/s*, а, са друге стране, и правила квантитативног рачуна, усаглашена са метролошким правилима, налажу да времена  $\tau$  и  $t$  у (3.25) и (3.26) морају бити изражена у истим јединицама. То значи да би онда и координатно време  $t$  требало да буде у SI секундама. Међутим, ту се појављује суштински проблем.

Јединица за време, SI секунда, може се реализовати само као интервал физички мерљивог сопственог времена, а **координатно време  $t$  је немерљива координата која је са мерљивом величином  $\tau$  у математичкој вези** (овде, преко (3.25) и (3.26)), зависној од метрике локалног простор-времена. Очигледно је да постоји извесна (и квалитативна и квантитативна) разлика између израчунатих "SI секунди"

координатног времена и (метролошких) SI секунди сопственог времена, па се поставља питање адекватног назива јединице координатног времена, као уосталом и назива јединица других координатних физичких величина, у оквиру датог референтног система, које се посредно изражавају преко јединица за време и дужину.

За сада још не постоји међународно усаглашен званични став по питању номенклатуре координатних јединица, али се претежно издвојио став, који је (формално) веома елегантан и има већинску подршку истакнутих ауторитета у овој области [95,64], по коме не би требало користити никакве атрибуте испред ознака јединица за време и дужину. Тако би, на пример, време увек требало изражавати у секундама и дужину у метрима, независно од тога да ли се ради о мери сопствене или координатне величине<sup>41</sup>, а за изведене физичке величине (које зависе од времена и дужине) и њихове јединице обавезно користити придев *компајтибилан/на* између акронима, који указује на координатни систем, и назива величине или њене одговарајуће вредности, изражене у метрима и секундама<sup>42</sup>.

Међутим, поред овог преовлађујућег става, постоје и нека опонентска мишљења која се не могу олако занемарити или поништити формалним конвенцијама, јер указују на објективне проблеме суштинске природе. На пример, једна од главних замерки је да многе физичке константе престају да буду константе, већ променљиве величине чије су нумеричке вредности зависне од координатног система, као што је рецимо то случај са параметрима планетских маса  $GM_x$  (в. други део фусноте 42).

Исто тако, не може се порећи да постоји проблем и код скалираних величина, тј. код оних величина које се неком (обично линеарном) математичком везом директно пребацују из једног координатног система у други, када за овај други координатни систем не постоји, или није дефинисана, метрика која непосредно успоставља везу са сопственим величинама (а тиме и са SI јединицама тих величина). Ако се у другом систему користи (позната) метрика првог координатног система (као што се то оби-

<sup>41</sup> У [64] се истиче да је такво одређење у сагласности са метролошким правилима: да "јединица не дефинише физичку величину" и да "квантитативни рачун обезбеђује да су важеће везе међу физичким величинама у једначинама усаглашене са њиховим нумеричким вредностима".

<sup>42</sup> Следећи примери су наведени у [95]:

(1) "Неправилно је рећи 'интервал је  $xx$  секунди TDB времена' или 'временски интервал износи  $xx$  TDB-секунди'. Одговарајућа правилна формулација је 'TDB интервал износи  $xx$  секунди';

(2) За нумеричку вредност изведене величине, каква је рецимо константа – параметар масе Земље  $GM_E$  ( $G$  је универзална гравитациона константа, а  $M_E$  је маса Земље), чија је физичка димензија  $[GM_E] = L^3T^{-2}$ , исправне су следеће тврдње:

TСВ/TСG-компатибилна вредност за  $GM_E$  је  $3.986004418 \cdot 10^{-14} m^3 s^{-2}$ ,

IT-компатибилна вредност за  $GM_E$  је  $3.986004415 \cdot 10^{-14} m^3 s^{-2}$ ,

TDB-компатибилна вредност за  $GM_E$  је  $3.986004356 \cdot 10^{-14} m^3 s^{-2}$ .

чно примењује у пракси), онда је јасно да је (у другом координатном систему) дошло до промене јединица физичких величина, односно да се изгубила веза SI јединицама. Такав је случај, као што ћемо даљем тексту видети, са координатним временским скалама TDB<sup>43</sup> и TT које су линеарно повезане са барицентричним координатним временом<sup>44</sup> TCB и геоцентричним координатним временом<sup>45</sup> TCG, пошто "IAU још увек није дала никакве одреднице о мeтpици која би се односила на координатна времена TDB и TT " [64].

У сваком случају, у овој области постоје отворена питања за која се траже најбољи одговори у непосредној будућности, али оно што је непобитна чињеница је да се јединица (сопственог) времена, атомска секунда или SI секунда, реализује помоћу најтачнијих савремених атомских часовника (који раде на принципу цезијумских фонтана) са грешком од свега неколико јединица на шеснаестој децимали [10].

### 3.2.2. Међународно атомско време (TAI)

Скала међународног атомског времена TAI се посебним статистичким методама изводи из показивања неколико стотина атомских часовника<sup>46</sup> који су распоређени у око 70 националних метролошких лабораторија и научних института широм света. Списак свих таквих институција и њихове опреме, према званичним BIPM-овим изворима [26], табеларно је приказан у Прилозима, на крају овог рада.

TAI скала се води под својим садашњим званичним именом од 1972. године, мада у Међународном часовном бироу<sup>47</sup> (BIPM), у организацији која се до краја 1987. године старала о извођењу најтачнијег референтног времена, исти назив је незванично коришћен још од раних 60-тих година, када је у свету постојало само неколико лабораторија времена са атомским часовницима.

Временом, како је напредовао технолошки развој, тако су и атомски часовници, генератори SI секунди, који учествују у формирању TAI, постајали све напреднији, а самим тим и TAI скала, најпоузданији бројач тих јединичних временских интервала, постајала је све тачнија и прецизнија. Већ током 70-тих година било је установљено да јединица TAI скале није једнака трајању SI секунде на нивоу мора (тј. на површи

---

<sup>43</sup> Baricentric Dynamical Time

<sup>44</sup> Baricentric Coordinate Time

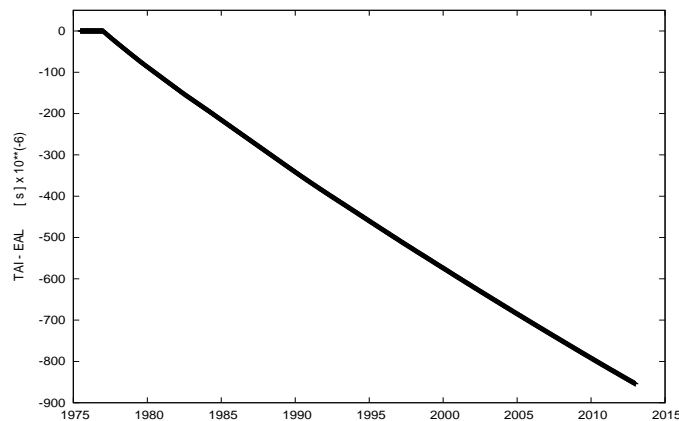
<sup>45</sup> Geocentric Coordinate Time

<sup>46</sup> Према стању из 2011. године [15], број регистрованих часовника у BIPM-у је износио око 350.

<sup>47</sup> Bureau Internationale de l'Heure

геоида). Показало се да постоји корелација између јачине гравитационог поља Земље и хода часовника, који је мерен на различитим висинама. Часовници на већим висинама су имали вишу фреквенцију (бржи ход) него они на мањим, услед чега су производили SI секунде различитог трајања. Ефекат је протумачен као последица гравитационе дилатације времена и као убедљива експериментална потврда исправности опште теорије релативности, што је уједно означило и улазак ОТР у метрологију на велика врата.

Обзиром да је просечна висина локација часовника, чија су показивања (средном 70-тих) коришћена за извођење TAI, била изнад геоида, ради свођења на ниво мора, од почетка 1977. године фреквенција TAI скале почела је да бива редовно коригована (смањивањем) у релативној мери за приближно  $10^{-12}$ . Тиме је ход TAI времена незнатно успорен у односу на његову претходну реализацију, која је и даље одржавана, побољшавана и публикована, али под именом *слободна атомска скала*<sup>48</sup> и акронимом EAL (Слика 3.2).



Слика 3.2. Разилажење вемениских скала TAI и EAL од почетка 1977. године.

Имајући у виду да је у релативистичком контексту SI секунда по дефиницији интервал сопственог времена и да би она требало да буде јединица TAI скале, поставља се питање да ли је TAI сопствено или координатно време. У [61] стоји да *'TAI, као референшно време за Земљу и њену околину, мора бити реализовано као координатно време'*, а и Саветодавни комитет за дефиницију секунде<sup>49</sup> CCDS (касније CCTF) још 1980. године је по том питању имао јасан став: *'TAI је координатно време које је дефинисано у геоцентричном референшном систему и чија јединица скале је SI секунда каква се реализује на роширајућем геоиду'*. Међутим, IAU је, после много дискусија и супростављања различитих мишљења, озваничила ову дефиницију тек са доношењем резолуција на Генералној скупштини 1991. године,

<sup>48</sup> Echelle Atomique Libre

<sup>49</sup> Consultative Committee for the Definition of the Second

када је, за регион Сунчевог система и блиску околину Земље, препоручила употребу нових просторно-временских референтних система (BCRS, GCRS)<sup>50</sup> у контексту ОТР и одредила њихове метрике, које су касније, IAU резолуцијама из 2000. године, побољшане са додатним члановима вишег реда (в. Прилоге).

У склопу ових новина, које је IAU усвојила и почела да примењује од 1991. године, дефинисано је још неколико координатних временских скала (TCB, TCG, TT), а скала TDB је редефинисана (на Генералној скупштини IAU, 2006. у Прагу). Свака од њих се реализује практично преко TAI скале, пошто се примене одговарајуће релативистичке трансформације. Због тога је TAI најважнија, па се њеном одржавању и квалитету посвећује највећа могућа пажња.

TAI скала има изузетне метролошке квалитете, засноване на *високој поузданости, стабилности фреквенције, тачности фреквенције и широкој доспућности* [15,16].

*Поузданост* је повезана са поузданошћу самих часовника који се користе за формирање TAI и са њиховом великом бројношћу. Највећи део њих (~ 83%) су комерцијални цезијумски часовници високих перформанси (Symmetricom/HP/Agilent тип 5071A) или активни саморегулишући водонични масери. Независност њиховог рада и мала дисперзија разлика у резултатима међусобних поређења њихових симултаних показивања такође иду у прилог високе поузданости TAI скале.

*Стабилност фреквенције* временске скале је мера константности односа реализованих јединичних интервала те скале према (њима) одговарајућој теоријској величини. Уобичајено да се као квантитативна мера ове карактеристике користи Аланова варијанса, о којој је већ било речи.

*Тачност фреквенције* временске скале показује у коликој мери реализовани јединични интервали те скале одступају од (своје) одговарајуће теоријске величине. У случају TAI скале, то је карактеристика која говори о томе колико њени јединични интервали одступају од SI секунде, мереној на површини ротирајућег геоида. Наравно, уколико су та одступања мања, утолико је већа тачност фреквенције, јер су реализоване (репродуковане) јединице скале ближе својој (идеалној) теоријској вредности.

*Широка доспућност* временске скале се огледа у могућности да се она лако може користити, односно да свако има начина да региструје тренутке разних догађаја у њој, што свакако зависи и од нивоа захтеване прецизности тог регистровања.

Приликом извођења TAI скале максимално су искоришћене техничке могућности свих расположивих инструмената и примењене најефикасније методе обраде

---

<sup>50</sup> Baricentric Celestial Reference System, Geocentric Celestial Reference System

прикупљених података, да би се у резултату добила временска скала код које су горе наведене карактеристике сведене на оптималну меру. Због тога се TAI изводи у BIPM-у на основу резултата претходних 30-дневних упоређивања часовника, која се усредњавају по сукцесивним 5-дневним интервалима (да би се смањио случајни шум у подацима). После финалне обраде (по посебном алгоритму) и дотеривања (кориговања) јединице скале (путем упоређења са најтачнијим лабораторијским часовницима, тзв. примарним стандардима фреквенције<sup>51</sup> PFS), TAI се објављује<sup>52</sup> у званичној (месечној) публикацији *Circular T* са кашњењем од 10-так дана у односу на време последњих урачунатих података.

Тренутна стабилност фреквенције TAI скале је око  $4 \times 10^{-16}$  на просечном интервалу од 30 до 40 дана, а на дугачким интервалима (деценија и више) она се изједначава са тачношћу PFS-а, која износи приближно  $2 \times 10^{-15}$ , према чињеничном стању из претходне деценије ([15,16,111]). Колико је то добар резултат, који говори о високом квалитету TAI скале, постаје јасније када се има у виду да су перформансе огромне већине часовника у саставу BIPM-ове мреже много слабије. Релативна грешка фреквенције комерцијалних цезијумских часовника високих перформанси је око  $1 \times 10^{-13}$  на вишемесечном временском интервалу и водоничних масера  $\sim 10^{-15}$ , али на интервалу од највише неколико дана. То практично значи да TAI има стабилност и тачност PFS-а<sup>53</sup>, само, за разлику од њих, у знатно већем временском распону и са много већим нивоом поузданости.

На особине изведене TAI скале, поред обимности BIPM-ове мреже референтних часовника и њихових појединачних квалитета, веома утиче и *тачност упоређења* њихових истовремених показивања, пошто се она неминовно смањује услед објективних техничких ограничења приликом преношења таквих информација на великим раздаљинама, а разлике тих показивања су улазни подаци у поступку формирања TAI.

Тренутно су у употреби две технике преношења времена. Једна је тзв. *двосмерни сателитски пренос времена и фреквенције*<sup>54</sup> (TWSFT), а друга (једносмерна техника) се своди на *примање временских сигнала са GPS сателита*<sup>55</sup>, при чему GPS време има посредну улогу. Тачност упоређења удаљених часовника помоћу ових техника зависи од *тачности мерења фреквенције*, чија случајна грешка се креће унутар

<sup>51</sup> Primary Frequency Standards производе SI секунду са највећом могућом тачношћу ( $\sim 10^{-16}$ ).

<sup>52</sup> Заправо објављују се одступања свих локалних временских скала (тј. показивања свих часовника, или групе часовника, који чине BIPM-ову мрежу) од изведене TAI скале.

<sup>53</sup> Према [16] у 2011. години било укупно 15 PFS-а, од чега је две трећине радило на принципу цезијумских фонтана.

<sup>54</sup> Two-Way Satellite Time and Frequency Transfer

<sup>55</sup> Global Positioning System

1 ns, и тачности установљене разлике показивања часовника, у којима доминирају систематске грешке услед, мање или више, несагласне калибрације часовника. Те грешке се обично крећу од распону од  $\pm 1$  ns, за добро калибрисане часовнике, до  $\pm 20$  ns, за некалибрисане часовнике. Њихова величина се минимализује применом одговарајућих метода калибрације у поновљеним мерењима (упоређењима) [16,111].

Пошто смо установили шта је TAI скала, какав је њен квалитет и чиме се она формира, прикажимо сада, бар у најгрубљим цртама, и како се то чини у ВІРМ-у, претпостављајући да је сваки регистровани часовник у мрежи једнозначно индексан.

Основни (улазни) подаци су разлике  $x_{ij}$ ,

$$x_{ij}(t) = h_j(t) - h_i(t), \quad (3.27)$$

где су  $h_i(t)$  и  $h_j(t)$  показивања часовника  $H_i$  и  $H_j$  у неком тренутку  $t$ .

Ти подаци се даље обрађују по посебном алгоритму ALGOS, који је почетком 70-тих развијен у ВІН-у [23,24] и намењен извођењу скале EAL, која је у то време још увек била TAI. ALGOS је касније неколико пута надограђиван, упоредо са побољшањем карактеристика коришћене опреме и метода упоређења, али су основни принципи и циљ остали исти. А циљ је да изведена (статистичка) временска скала (TAI) на дужем интервалу буде поузданија, тачнија и фреквенцијски стабилнија од скала било којих часовника, употребљених са генерисање података (3.27), појединачно.

ALGOS се састоји из три дела: 1) алгоритма за придодељивање тежина часовницима, чијом применом се обезбеђује дуговремена стабилност изведене скале [67,145];

2) алгоритма за предикцију, који има за циљ да спречи скокове у времену и фреквенцији, обзиром да се мрежа часовника стално мења и проширује, а и због могућности да улазни подаци понекад буду са грубим грешкама [146,67,145,144,62]; и

3) алгоритма за коришћење фреквенције (од 1977. године) којим се побољшава тачност скале, односно њена јединица се приближава својој идеалној еталонској вредности (SI секунди) [19,15].

Прва два дела ALGOS-а се односе на извођење скале EAL, односно на добијање одступања сваког часовника од те скале

$$x_j(t) = \text{EAL}(t) - h_j(t) = \frac{\sum_{i=1}^N p_i [h'_i(t) - x_{ij}(t)]}{\sum_{i=1}^N p_i}, \quad (3.28)$$

извршавањем једне итеративне процедуре [144] у којој се користе: – показивања  $h_i(t)$  свих  $N$  часовника  $H_i$  у току једног месеца, – предикције тих показивања  $h'_i(t)$  за исти тренутак  $t$  (према установљеном линеарном моделу) и – тежине  $p_i$  сваког часовника. Током итерација поправљају се вредности  $x_i(t)$ ,  $p_i$  и параметара линеарног модела којим се рачунају предикције  $h'(t)$ , тако да је предвиђено да се, у случају неког њиховог неочекованог скока, тежина  $p_i$  тренутно спусти на нулу и утицај лошег, или неисправног, часовника на EAL аутоматски елиминише. За почетне вредности тежина  $p_i$  и параметара линеарне функције<sup>56</sup>  $h'_i(t)$  узимају се њихове претходне најбоље статистичке вредности.

Пошто је изведена скала EAL највеће могуће стабилности, примењује се завршни део извођења TAI, у току кога се јединица скале EAL коригује, да би њено трајање било што приближније дефиницији SI секунде, и тако добије TAI скала максималне тачности. Тај циљ се постиже кориговањем фреквенције скале EAL одређеним поправкама, које се добијају из упоређења са фреквенцијама PFS-а, тако да тачност (јединице) TAI скале зависи искључиво од тачности PFS-а, њихових мерења и међусобних упоређења која се редовно достављају BIPM-у. Ти подаци се тамо комбинују да би се добила најтачнија дужина јединице TAI скале, чија се непоузданост тренутно мери малим цифрама шеснаесте децимале.

Корекција фреквенције EAL скале се врши према алгоритму [19] који се користио у BIPM-у још 70-тих година. Од почетка 1977. примењује се систематска корекција од  $1 \times 10^{-12}$ , којом се јединица скале (продужава и) усаглашава са трајањем SI секунде на нивоу мора. У периоду од 1995. до 1998. дужина TAI јединице је постепено била смањивана за око  $2 \times 10^{-14}$ , да би ефекат зрачења црног тела био неутрализован, у складу са тадашњом редефиницијом SI секунде, а у периоду од 1998. до 2004. примењиване су по потреби корекције од  $\pm 1 \times 10^{-15}$ , бар на два месеца. Коначно, од јула 2004. уводе се месечне поправке фреквенције за износе до  $\pm 7 \times 10^{-16}$ , када је разлика између јединице TAI скале и SI секунде PFS-а 2.5 пута већа од грешке којом су установљене (те јединице) [111,65].

Све битне информације у вези TAI скале (њене текуће реализације, упоређења са часовницима помоћу којих се формира и сл.) објављују се у BIPM-овом месечном билтену *Circular T*, који је доступан у штампаном и електронском издању<sup>57</sup>. TAI се не дистрибуира директно, већ се до њега у реалном времену може доћи само посредним

---

<sup>56</sup> Стабилност параметара предикционе функције  $h'_i(t)$  директно утиче на вредност тежине  $p_i$ , јер је  $p_i$  доминантно одређена реципрочном вредности дисперзије коефицијента правца линеарне функције  $h'_i(t)$ .

<sup>57</sup> <http://www.bipm.org/jsp/en/TimeFtp.jsp?TypePub=publication#nohref>



путем, преко локалне официјелне UTC скале која се користи у ВРМ-у, па ју је зато могуће упоредити са ВРМ-овом реализацијом UTC-а.

### 3.2.3. Светско координирано време (UTC)

UTC скала је основа за грађанско рачунање времена у готово свим државама света, јер је то прецизно атомско време које са прихватљивом толеранцијом прати традиционално астрономско (средње сунчево) време, засновано на Земљиној ротацији. Има исту јединицу и ход као ТАИ скала, са којом је стално синтонизована, али између њих постоји константан временски помак, који се по потреби у стандардизованим тренуцима мења за једну секунду (од почетка 1972. године), увођењем (додавањем или одузимањем) тзв. *ипресџуине секунде*. Према томе, добра и лоша страна UTC-а су јасно поларизоване: позитивно је што се та скала, која има готово све квалитете ТАИ, глобално дистрибуира, па је у сваком тренутку доступна (већини корисника) довољно тачна информација о оријентацији Земље у простору, а негативно је што нема континуалност (као ТАИ), тако да, због повремених скокова, за израчунавање разлике времена између два тренутка (забележених у тој скали), морамо знати историју свих промена које су у међувремену уведене.

Прелиминарни развој UTC-а, односно временске скале која је касније означена акронимом UTC, има сложен ток. На њега су, својим одлукама и оперативним деловањем, својевремено утицале међународне организације CCIR<sup>58</sup>, ВИН, URSI<sup>59</sup> и IAU (в. [4],[111],[89]). Суштински о UTC-у, као референтној атомској скали коју је ВИН реализовао путем организоване међународне сарадње, може се (данас) говорити тек од раних 60-тих година па надаље, мада је, хронолошки гледано, сам назив '*светско координирано време*' (UTC) употребљен први пут у ВИН-овој публикацији *Bulletin Horaire* од 1964. године. У почетку, то време је било првенствено повезано са преношењем тачног (гринвичког) времена GMT<sup>60</sup> путем радио сигнала и синхронизацијом прецизних часовника на великим удаљеностима. Амерички национални биро за стандарде<sup>61</sup> NBS је тек 1974. године престао да употребљава назив GMT и званично почео да користи име UTC за ту исту временску скалу, а то је било чак две године после коначног редефинисања UTC скале и трансформације у њен садашњи облик.

---

<sup>58</sup> International Radio Consultative Committee

<sup>59</sup> International Union of Radio Science

<sup>60</sup> Greenwich Mean Time

<sup>61</sup> National Bureau of Standards, касније National Institute of Standards and Technology (NIST).

Такође и релевантне резолуције<sup>62</sup> IAU из 1973. године, којима се препоручује да UTC буде основа за грађанско рачунање времена, као и одређени начин кориговања те скале, су (из објективних разлога) биле ретроактивне, па су само овериле и формално озваничиле већ постојећу праксу, која је почела да се спроводи (под руководством ВИН-а) још од почетка 1972. године.

У свом пионирским раздобљу, од 1961. до краја 1971. године, UTC скала је била другачије реализована него што је то почело да се практикује после тога. Допуштено одступање од светског времена UT2 држано је унутар граница  $\pm 100$  ms,

$$|\text{UTC} - \text{UT2}| < 0.1\text{s} , \quad (3.29)$$

на тај начин што је јединица UTC скале постајала "еластична" и једном годишње прилагођавана (променом фреквенције скале) тако да буде што ближа астрономској секунди (секунди UT2 времена), уз увођење скокова од 100 ms и/или (ређе) од 50 ms (в. Табелу 3.1). Зато би, према [4], практично значење тадашњег назива *светско координирано време* најбоље могло да се опише реченицом: *'То је врста светској времена која можемо да дистрибуирамо путем емисија радио сигнала који су међународном координацијом синхронизовани са тачношћу од 1 ms или боље од ње'*.

Оваква реализација UTC-а, колико год да је добро претила Земљину ротацију, није била повољно решење за многе кориснике из разних специјализованих области (навигација, радиодифузна техника, системи за избегавање судара ваздухоплова итд.) у којима је квалитет функционисања техничких уређаја зависан од стабилности и прецизности дистрибуиране фреквенције. Због тога је почетком 70-тих година UTC скала била редефинисана, добивши форму која је још увек актуелна. Одговорност за њену дефиницију, реализацију и дистрибуцију су имале исте међународне институције као и пре, с тим што треба имати у виду да су неке од њих у међувремену реорганизацијом или трансформацијом промениле и назив. Тако су гашењем ВИН-а његове надлежности од почетка 1988. пренете на IERS (Земљина ротација и референтни системи) и ВІРМ (скале TAI, UTC), а ITU-R<sup>63</sup> је од 1992. године наставио рад CCIR-а.

Према томе, званична дефиниција UTC-а, кавим га сматрамо од почетка 1972. године, садржана је у званичној препоруци са садашњом ознаком ITU-R TF.460-5:

***'UTC је временска скала одржавана од стране ВІРМ-а, уз асистенцију IERS-а, која чини основу за распрострањавање стандардне фреквенције и временских сигнала. Она је према ходу истаовешћена скали TAI, али се од ње разликује за цели број секунди.***

<sup>62</sup> Заједничке резолуције 1 и 4 Комисија 4 и 31.

<sup>63</sup> International Telecommunications Union-Radio

*UTC се коришћује додавањем или одузимањем једне секунде (шзв. позитивне или негативне престајне секунде) да би се обезбедила приближна сагласност са светским временом UT1.'*

Овом опису недостају још неки важни детаљи, као што је, на пример, квантитативно одређење поменуте "приближне сагласности" између UTC и UT1, коју изражава неједнакост<sup>64</sup>

$$|\text{UTC} - \text{UT1}| < 0.9 \text{ s} . \quad (3.30)$$

Исто тако, важно је додати да се по усвојеној конвенцији механизам *престајне секунде* примењује првенствено на крају јуна или на крају децембра, а допуштени су, у изузетним случајевима, још и алтернативни термини крајем марта и септембра, али до сада још није било потребе да они буду коришћени (в. Табелу 3.1).

UTC скала се одувек дистрибуирала путем радио сигнала, а у новије доба до неке од реализација тог времена се може доћи и преко навигационих сателита и/или интернета. Емисије радио сигнала UTC-а у првих 16 секунди сваког минута садрже и посебно кодирану информацију о разлици DUT1, где је

$$\text{DUT1} = \text{UT1} - \text{UTC} , \quad (3.31)$$

са тачношћу од 0.1 s, тако да се, заједно са UTC-ом, путем радио таласа практично дистрибуира и светско време UT1 са довољном тачношћу за потребе класичне астрономске навигације у морепловству<sup>65</sup>.

UTC је, дакле, практична и лако доступна, временска скала широке намене која је на једноставан начин повезана са TAI скалом и при томе има њене главне квалитете. Знајући њихову везу, можемо сваки тренутак регистрован по UTC времену, са готово истом прецизношћу лако пребацити у TAI време, и обрнуто. На Слици 3.3 је приказана графички, а у Табели 3.1 наведена текстуално, целокупна историја везе те две временске скале.

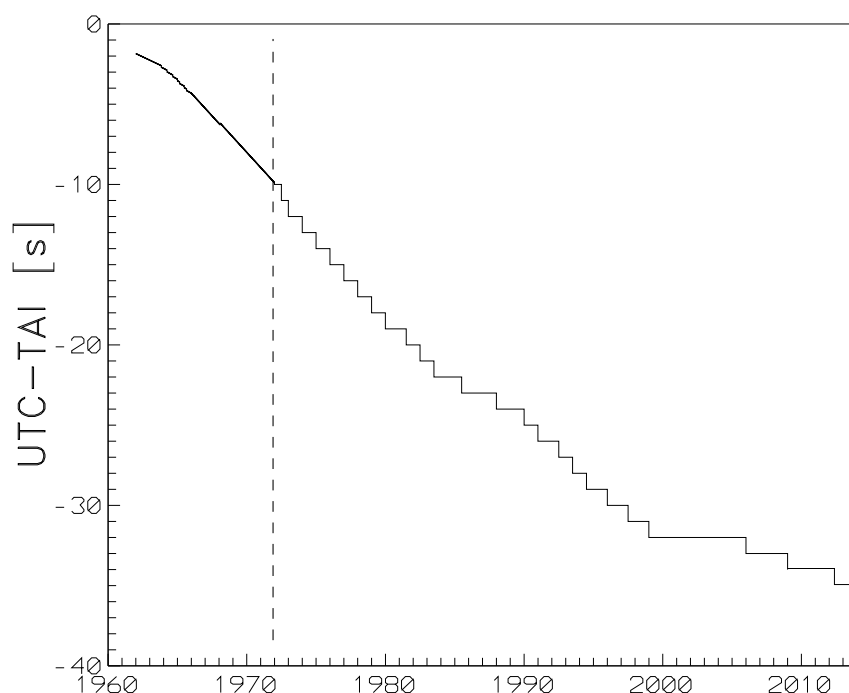
Можемо уочити да се разлика |UTC-TAI| само прогресивно увећавала, како у првом раздобљу (доба "еластичних секунди"), тако и у другом (од 1.1.1972.), када је у UTC скали увек одузимана преступна секунда<sup>66</sup>, да би био испуњен услов (3.30).

<sup>64</sup> Почетком 1974. CCIR је померио границу са 0.7 s на 0.9 s уважавајући препоруку IAU из 1973.

<sup>65</sup> У савременим условима, са широком доступношћу техничке опреме за коришћење прецизних сателитских навигационих система, какав је GPS на пример, класична навигација, изузев алтернативне улоге, нема више неког нарочитог практичног значаја.

<sup>66</sup> Одузимање преступне секунде на граници два временска интервала се постиже истим обележавањем две суседне секунде – последње секунде првог интервала и прве секунде другог интервала.

На овом месту посебно истичемо да **узрок тој појави не лежи у секуларном успорењу Земљине ротације**, како се често може прочитати у литератури, па чак и код најреспектабилнијих аутора (в. страну 229 у [111] и страну 234 у [98]), **већ у разлици трајања SI секунде и јединице скале светског времена UT1** (астрономске секунде). Штавише, у протеклих пола века, као што ћемо касније видети, угловна брзина Земљине ротације се у средњем повећала.



**Слика 3.3.** Одступања UTC-TAI пре и после 1.1.1972. Период "еластичних секунди" (лево) је испрекиданом линијом одвојен од периода "преступних SI секунди" (десно).

**Табела 3.1.** Историја свих дефиниција разлика UTC – TAI

од	до	UTC – TAI [s]
1961.01.1	1961.08.1	$-1.422818 - (\text{MJD}-37300) \times 0.001296$
1961.08.1	1962.01.1	$-1.372818 - (\text{MJD}-37300) \times 0.001296$
1962.01.1	1963.11.1	$-1.845858 - (\text{MJD}-37665) \times 0.0011232$
1963.11.1	1964.01.1	$-1.945858 - (\text{MJD}-37665) \times 0.0011232$
1964.01.1	1964.04.1	$-3.240130 - (\text{MJD}-38761) \times 0.001296$
1964.04.1	1964.09.1	$-3.340130 - (\text{MJD}-38761) \times 0.001296$
1964.09.1	1965.01.1	$-3.440130 - (\text{MJD}-38761) \times 0.001296$
1965.01.1	1965.03.1	$-3.540130 - (\text{MJD}-38761) \times 0.001296$
1965.03.1	1965.07.1	$-3.640130 - (\text{MJD}-38761) \times 0.001296$
1965.07.1	1965.09.1	$-3.740130 - (\text{MJD}-38761) \times 0.001296$
1965.09.1	1966.01.1	$-3.840130 - (\text{MJD}-38761) \times 0.001296$
1966.01.1	1968.02.1	$-4.313170 - (\text{MJD}-39126) \times 0.002592$
1968.02.1	1972.01.1	$-4.213170 - (\text{MJD}-39126) \times 0.002592$
1972.01.1	1972.07.1	-10
1972.07.1	1973.01.1	-11
1973.01.1	1974.01.1	-12
1974.01.1	1975.01.1	-13
1975.01.1	1976.01.1	-14
1976.01.1	1977.01.1	-15
1977.01.1	1978.01.1	-16
1978.01.1	1979.01.1	-17
1979.01.1	1980.01.1	-18
1980.01.1	1981.07.1	-19
1981.07.1	1982.07.1	-20
1982.07.1	1983.07.1	-21
1983.07.1	1985.07.1	-22
1985.07.1	1988.01.1	-23
1988.01.1	1990.01.1	-24
1990.01.1	1991.01.1	-25
1991.01.1	1992.07.1	-26
1992.07.1	1993.07.1	-27
1993.07.1	1994.07.1	-28
1994.07.1	1996.01.1	-29
1996.01.1	1997.07.1	-30
1997.07.1	1999.01.1	-31
1999.01.1	2006.01.1	-32
2006.01.1	2009.01.1	-33
2009.01.1	2012.07.1	-34
2012.07.1	?	-35

Иако је у току протеклих деценија UTC скала глобално прихваћена и успешно испуњавала сврху свога постојања, почев од 1999. године појавила су се веома снажна настојања, углавном под руководством и у организацији Сектора за радиокомуникације Међународне телекомуникационе уније (ITU-R), да се прекине са праксом увођења преступне секунде [120,109,13,14]. Међутим, како су последице таквог чина веома крупне, постоје велика размимоилажења у мишљењима светских експерата [50,51,130,5]. Упркос свим покушајима, формална сагласност још увек није постигнута, а предлагачи (или, исправније је рећи, заговарачи и извршиоци) акције (*de facto* укидања UTC скале), очекују да ће се то догодити на *Светској конференцији о радиокомуникацијама*<sup>67</sup> WRC 2015. године у Женеви.

За сада, као што је то практиковано у претходних 40 година, IERS је у обавези да неколико месеци унапред прогласи термин увођења преступне секунде у својој публикацији *Bulletin C*, а исто тако, али у *Bulletin D* и бар месец дана унапред, предикцију разлике DUT1 са тачношћу од 0.1 s. Сваки *Bulletin D* садржи и информацију о месецу његовог наредног излажења.

#### 3.2.4. Терестричко време (ТТ)

Терестричко време ТТ је дефинисано Препоруком 4 IAU одлуке А4 из 1991. године и редефинисано Одлуком В1.9 из 2000. године (в. Прилог х). Првенствена му је намена да буде аргумент астрономских ефемерида и у том смислу формални је наследник динамичког терестричког времена<sup>68</sup> TDT и (његовог претходника) ефемеридног времена<sup>69</sup> ET. Међутим, постоје суштинске разлике у дефиницији, реализацији и карактеристикама у односу на оба своја претходника, а најбитнија је да ТТ уопште није динамичко време.

ТТ је скала координатног времена у геоцентричном референтном систему, али се она не односи на геоцентар, већ на једну конкретну еквипотенцијалну површину блиску геиду. Због тога је фреквенција ТТ скале нешто нижа (ход ТТ времена је спорији) од фреквенције скале геоцентричног координатног времена TCG, и јединица ТТ скале је истоветна јединици TAI скале (SI секунда, каква се реализује на нивоу мора, при температури 0 K). Конкретно, фреквенција TCG-а је у релативном износу

---

<sup>67</sup> World Radiocommunication Conference

<sup>68</sup> Terrestrial Dynamical Time

<sup>69</sup> Ephemeris Time

виша за око  $7 \times 10^{-10}$  у односу на фреквенцију ТТ-а, што значи да се на годишњем нивоу те скале разилазе за константан износ акумулиране разлике  $TCG - TT \approx 22 \text{ ms}$ .

За почетну епоху скала ТТ и TCG је изабран тренутак 1.1.1977. у  $0^h 0^m 0^s$  (TAI), када је дефинисано

$$TT = TCG = 0^h 0^m 32^s 184, \quad (3.32)$$

или JD 2443144.5003725, према јулијанском датуму. Од тог тренутка, који се, узгред речено, поклапа са почетком обрачунавања гравитационе дилатације времена приликом извођења TAI скале (тренутак одвајања TAI од EAL-а), времена ТТ и TCG су у линеарној вези

$$TT = TCG - L_G \times (JD_{TCG} - 2443144.5003725) \times 86400 \text{ s}, \quad (3.33)$$

где је  $JD_{TCG}$  време TCG по јулијанској скали, а  $L_G$  је (од 2000. године, према IAU резолуцији B1.9) дефинициона константа<sup>70</sup>, која износи тачно

$$L_G = 6.969290134 \times 10^{-10}, \quad (3.34)$$

и која се више неће мењати у будућности (приликом евентуалних побољшавања модела Земљине површине).

Ако тренутке ТТ и TCG у једнакости (3.33) преведемо на одговарајуће јулијанске датуме  $JD_{TT}$  и  $JD_{TCG}$ , онда се она може изразити и у облику

$$JD_{TT} = (1 - L_G) \times (JD_{TCG} - 2443144.5003725) + 2443144.5003725, \quad (3.35)$$

одакле се (после диференцирања) лако уочава да је

$$TT'_{TCG} = 1 - L_G. \quad (3.36)$$

**ТТ је теоријски идеална скала која се може практично реализовати само са већим или мањим степеном апроксимације.**

За сада постоје две актуелне реализације ТТ скале, различите тачности. Једна је сама TAI скала (померена за 32.184 s), у ознаци TT(TAI), која је доступна у реалном времену (преко ВРМ-ове мреже атомских часовника), а друга је TT(BIPMху), која се

<sup>70</sup> Према поменутој IAU резолуцији из 1991. године, константа  $L_G$  је била дефинисана као количник  $U_G/c^2$ , где је  $U_G$  гравитациони потенцијал на површини геоида. Према експерименталним резултатима, најбоља добијена вредност за  $L_G$  је била  $6.969291 \times 10^{-10}$ . Са замрзавањем вредности за  $L_G$ , од 2000. године, замрзнут је и однос фреквенција скала ТТ и TCG, пошто је он једнак вредности израза  $1 - L_G$ .

изводи на сличан начин и из истих података као и TAI, али у поступку њихове поновне анализе, када се додају сви подаци из претходне календарске године (19ху или 20ху), да би се добио оптималан резултат и уочиле евентуалне грешке у TAI скали<sup>71</sup>.

Према томе, оперативна верзија TT скале је TT(TAI)<sup>72</sup>, са једноставном дефиницијом

$$TT(TAI) = TAI + 32.184 \text{ s}, \quad (3.37)$$

али и са свим квалитетима и ограничењима TAI скале.

Друга реализација TT скале, са стандардном ознаком TT(BIPMху), квалитетнија је од TT(TAI). Њено извођење се заснива на примени процедура сличним онима које се користе за формирање TAI скале, али се у овом случају обрађује узорак значајно већег обима и много шире временске покривености. У резултату се зато добија **референтна временска скала TT(BIPMху)<sup>73</sup> која има знатно бољу дуговремену стабилност него TAI**, па се у њој могу регистровати дефекти скала EAL и TAI. Детаљи извођења овакве реализације терестричког времена описани су у [63,125].

TT(BIPMху) се формира једном годишње (у јануару), када су доступни сви потребни подаци из претходне 20ху. године, тако да свака нова верзија TT(BIPMху), поред тога што додаје прошлогодишње резултате, ревидира и старе резултате (свих протеклих година, почев од 1993. године). На тај начин се постиже да свака следећа реализација TT(BIPMху) буде боља од свих претходних.

Једина мана ове (најквалитетније) временске скале, која се може реализовати помоћу атомских часовника, јесте њена **одложена доступност**. Међутим, ни то није тако велики проблем јер се, упоредо са текућим извођењем TAI скале, рачунају и **месечне предикције** за TT, које се уписују у фајл *TTBIPM.ху.ехт* електронске верзије BIPM-овог билтена *Circular T*. Имајући у виду да свака нова верзија TT(BIPMху) ближе конвергира оптималном резултату, логично је да и текуће (месечне) предикције (које се ослањају на последње реализације скала TT и TAI) буду све боље. На пример, одступања између реализације TT(BIPM10) и предикција током 2010. године, изве-

<sup>71</sup> Једном изведено (и објављено) TAI не сме се више исправљати, чак ни у случају када се накнадно пронађе грешка или добије бољи резултат.

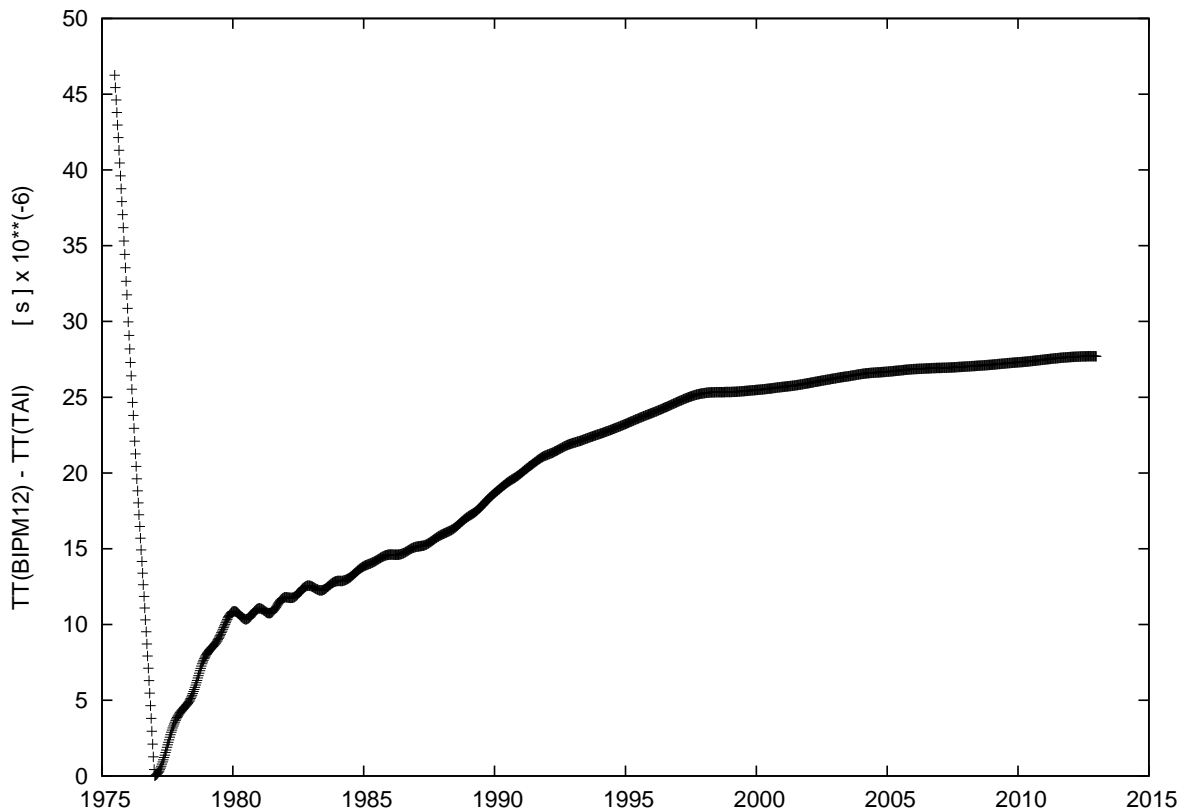
<sup>72</sup> Обзиром да скале TT и TAI имају исту јединцу, SI секунду, чија је величина одређена тако да буде што ближа ефемеридној секунди (јединици скале ET), износ сталне разлике од 32.184 s између TT и TAI је првенствено последица својевремене одлуке да се почетак скале TAI поклапа тренутком 0<sup>h</sup>0<sup>m</sup>0<sup>s</sup> светског времена UT2 (а не ефемеридног времена ET) дана 01.01.1958. Најбоља процена вредности разлике ET-TAI за почетак 1977. године износила је 32.184 s.

<sup>73</sup> У објављеном резултату се са десетодневним кораком (од 26.06.1975. до краја 20ху.) приказују одступања TT(BIPMху)-TT(EAL) и TT(BIPMху)-TT(TAI) (у  $\mu\text{s}$ , са резолуцијом 1 ns или 0.1 ns, од 31.03.2003.), при чему је TT(EAL) на аналоган начин дефинисано као TT(TAI) у (3.37).



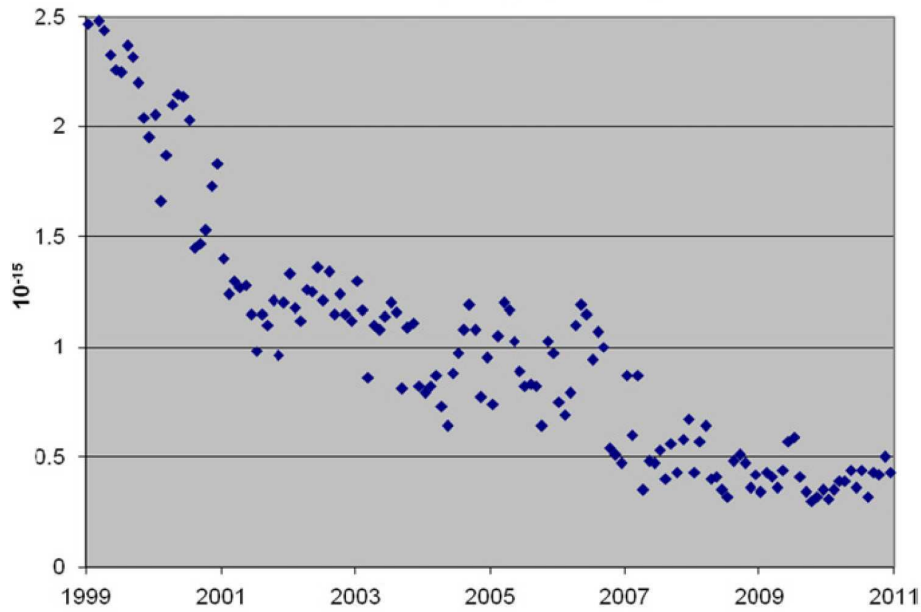
дених помоћу реализације TT(BIPM09) (фајл *TTBIPM.09.ext*), крећу се у распону од -3 ns до +2 ns, док за 2012. годину аналогно поређење TT(BIPM12) и *TTBIPM.11.ext* показује да су одговарајућа одступања у опсегу од -0.8 ns до +1.6 ns.

Слике 3.4 – 3.7, на којима су графички приказане најбитније карактеристике скале TT(BIPM $x$ ) у односу на TAI и EAL, јасно показују да је она током протеклих година постајала све квалитетнија.

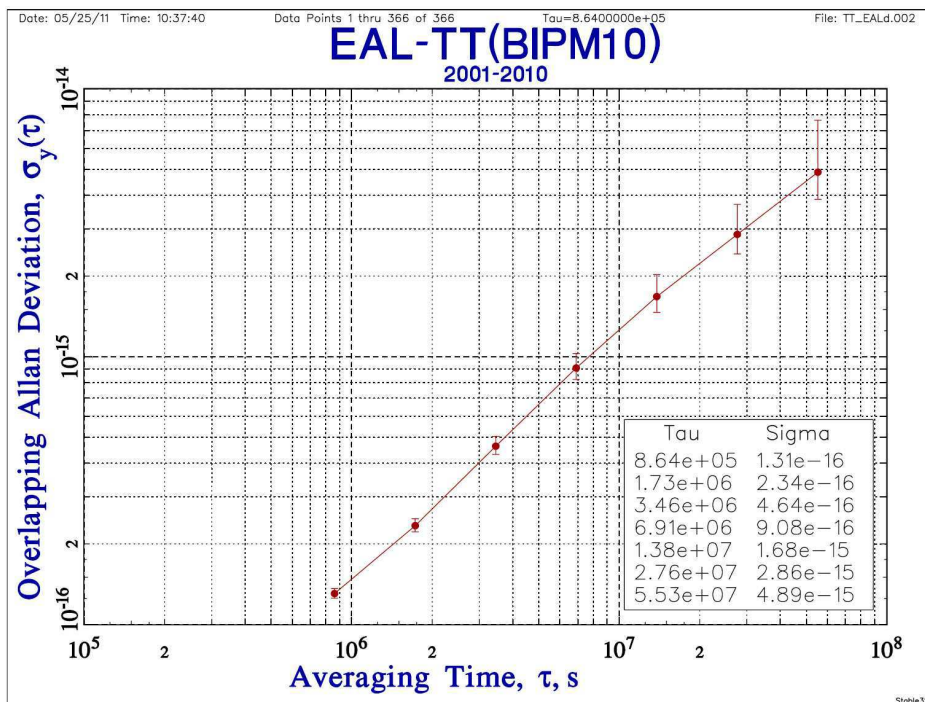


**Слика 3.4.** Одступање последње реализације терестричког времена TT(BIPM12) од TT(TAI) у наносекундама на интервалу од 26.06.1975. до краја 2012. године. Према промени нагиба криве, уочљиво је да временом прираштај ових разлика постаје све мањи. Током 2012. године скале TT(BIPM12) и TT(TAI) су се разишле за свега 50 ns, док је, на пример, у претходној деценији просечни раст те разлике на годину дана износио преко 100 ns, а у раздобљу 1977–1980 чак 2.8  $\mu$ s.

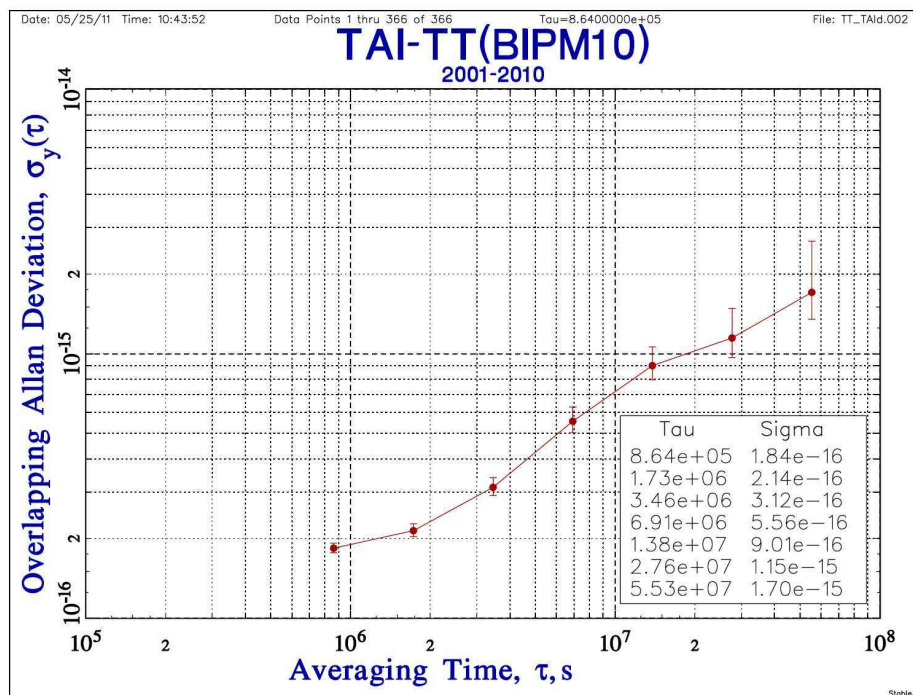
(Према подацима из фајла [ftp://tai.bipm.org/TFG/TT\(BIPM\)/TTBIPM.12](ftp://tai.bipm.org/TFG/TT(BIPM)/TTBIPM.12))



Слика 3.5. Процењена тачност (у релативној мери) реализације терестричког времена ТТ(ВІРМ10) од почетка 1999. до краја 2010. године. Видимо да је почев од 2007. грешка у просеку испод  $5 \times 10^{-16}$ . (Слика је преузета из [15])



Слика 3.6. Стабилност фреквенције скале EAL у односу ТТ(ВІРМ10) за временски интервал [2001–2010]. (Слика је преузета из [15])



Слика 3.7. Стабилност фреквенције скале TAI у односу TT(BIPM10) за временски интервал [2001–2010]. (Слика је преузета из [15])

Поред постојећих реализација скала терестричког времена, TT(TAI) и TT(BIPM), чији је квалитет (стабилност и тачност) заснован на стабилности скале EAL и тачности примарних фреквенцијских стандарда (PFS), у блиској будућности се очекује формирање још једне потпуно независне TT реализације која би пратила брзе и правилне пулсације у електромагнетном зрачењу једне посебне класе неутронских звезда, тзв. *милисекундних њулсара*<sup>74</sup>. Сматра се да би таква временска скала (вероватно са неком од ознака: TT(pulsars), TT(PSR), TT(PS), или неком сличном) могла имати изузетно високу стабилност милијардама година, с обзиром на претпостављену природу и понашање пулсара, па би њено упоређивање са TT(BIPM) на дугачким временским интервалима било драгоценост. То је управо био главни подстицај за развој досадашњих идеја и планова о остварењу временске скале засноване на посматрањима пулсара (в. нпр. [63,66,126,107,125,71,34,20]).

За сада, док још не постоји "спољна" контрола атомског времена, једини ослонац и гаранција квалитета садашњих најпрецизнијих лабораторијских временских скала су

<sup>74</sup> Општа је претпоставка да њихово привидно пулсирање представља збирни ефекат две појаве. Једна је у вези са специфичним обликом електричног и магнетног поља око тавих објеката, а друга се односи на начин њиховог механичког кретања или, прецизније, на њихову брзу и врло равномерну ротацију.

**независност** рада атомских часовника и међусобна **поређења** њихових показивања. Ефекат евентуално постојећег заједничког узрока незнатно бржег или споријег рада свих часовника (у ВІРМ-овој мрежи) не би могао бити примећен. Исто тако, и акумулација финих систематских грешака у скали ТТ(ВІРМ) се не може констатовати<sup>75</sup>, без обзира на годишње кориговање те скале, јер она временом ипак све више вуче за собом последице својих ранијих (лошијих) ревизија.

### 3.3. СВЕТСКО ВРЕМЕ

Ротирајући око своје поларне осе, Земља непрекидно мења оријентацију у простору на врло сложен начин, јер при томе брзина Земљине ротације није константна, а, истовремено, њеној поларној оси се мења положај, како у односу на околни простор (непокретни небески референтни систем), тако и у односу на Земљину површину (тј. стални терестрички референтни систем који је круто везан за фиксне тачке на Земљиној површини).

Само се један део тог сложеног обртног кретања Земље, и то углавном онај који је последица луни-соларног гравитационог утицаја због несферичног облика Земље (*прецесија и нутација*), може (до извесне границе) добро теоријски моделовати. Преостали део је збирна последица мноштва тешко предвидљивих геофизичких и метеоролошких појава променљивог интензитета у унутрашњости Земље и њеном флуидном омотачу (*поларно кретање и неравномерности у брзини Земљине ротације*). Због такве непредвидљивости, а и узимајући у обзир да је што тачније познавање промена просторне оријентације Земље потребно у разноврсним научним истраживањима (астрометрије, геодезије, геофизике, . . . ), као и у решавању многих важних практичних задатака<sup>76</sup>, **неопходно је стално пратити Земљину ротацију**, применом најнапреднијих астрономских посматрачких техника и метода обраде података.

Финални производ праћења Земљине ротације чини један скуп временски променљивих нумеричких величина, које се уобичајено називају **параметрима Земљине ротације**. Одређивање појединачних вредности тих параметара (за различите епохе посматрања) служи установљавању тачне *историје* Земљиног ротационог кретања, а такође и извођењу што тачнијих *предвиђања* будућих промена оријентације Земље у односу на конвенционалне **референтне системе**.

---

<sup>75</sup> Последња ревизија ТТ(ВІРМху) је за сада најбоља расположива реализована временска скала. Она је зато референтна за све остале скале, па је логично што тренутно не постоји нека друга временска скала у којој би могли бити регистровани њени недостаци.

<sup>76</sup> На пример, у класичној и сателитској навигацији, у мисијама космичких летелица и сл.

Решавање свих теоријских и практичних, техничко-методолошких, питања у вези са дефинисањем, реализацијом, одржавањем и побољшавањима поменутих референтних система, као и са одређивањима параметара Земљине ротације, спада у надлежности *Међународног сервиса за Земљину ротацију и референтне системе* (IERS). Та институција координира активности, и користи резултате мерења (посматрања), свих регистрованих светских центара у области Земљине ротације који користе неку од актуелних посматрачких техника (VLBI<sup>77</sup>, GPS, SLR<sup>78</sup> или DORIS<sup>79</sup>) за одређивање параметара Земљине ротације, или краће EOP<sup>80</sup>-а.

Референтни системи, важни за IERS-ову делатност, примарно се могу раздвојити на *непокретне* и *покретне*, а према референтним објектима, на *небеске* и *штерестричке*. Непокретни су *Међународни небески референтни систем ICRS*<sup>81</sup> (дефинисан положајима једног броја удаљених вангалактичких објеката) и *Међународни штерестрички референтни систем ITRS*<sup>82</sup> (дефинисан положајима одређеног броја фиксних тачака на површини Земље), а покретни су *Небески прелазни референтни систем CIRS*<sup>83</sup> и *Штерестрички прелазни референтни систем TIRS*<sup>84</sup>, који се заснивају на заједничком *прелазном (или штерестричком) небеском полу CIP*<sup>85</sup> и почетним тачкама, CIO<sup>86</sup> (за CIRS) и TIO<sup>87</sup> (за TIRS), на одговарајућем (тренутном) екватору, у складу са прихваћеним концептом тзв. *неротирајуће почетке*<sup>88</sup> (*non-rotating origin*) према идеји Бернара Гиноа из 1979. године [60]. Покретни референтни системи (CIRS, TIRS) су директно повезани преко параметара Земљине ротације са фиксним (ICRS, ITRS), а самим тим је онда и између ових других (на индиректан начин) успостављена међусобна веза.

---

<sup>77</sup> Very Long Baseline Interferometry

<sup>78</sup> Satellite Laser Ranging

<sup>79</sup> Doppler Orbit Determination and Radio-positioning Integrated on Satellite (Doppler Orbitography and Radio-positioning Integrated by Satellite)

<sup>80</sup> Earth Orientation Parameters

<sup>81</sup> International Celestial Reference System

<sup>82</sup> International Terrestrial Reference System

<sup>83</sup> Celestial Intermediate Reference system

<sup>84</sup> Terrestrial Intermediate Reference system

<sup>85</sup> Celestial Intermediate Pole

<sup>86</sup> Celestial Intermediate Origin

<sup>87</sup> Terrestrial Intermediate Origin

<sup>88</sup> Са револуционарним новинама у фундаменталној астрометрији, које се примењују од 2003. године, уведен је један број нових појмова који још нису добили одговарајуће називе на српском језику, тако да превод појма *non-rotating origin*, као и речи *intermediate* у називима са акронимима CIRS, TIRS, CIP, CIO и TIO, треба овде само условно прихватити. Узгред, једна радна група IAU (под руководством N. Capitaine), задужена за нову номенклатуру у фундаменталној астрометрији, активна је већ читаву деценију и још увек разматра нека отворена питања.

У параметре Земљине ротације се убраја пет величина – два пара геоцентричних угловних координата,  $(x, y)$  и  $(X, Y)$ , и (једна) временска разлика, UT1-UTC. Оне респективно представљају положај тренутног пола CIP у сваком од фиксних референтних системима (ITRS, ICRS) и одступање светског времена UT1<sup>89</sup> од скале атомског времена UTC. Нама је овде најважнији последњи наведени параметар, јер су његове варијације у непосредној вези са променама интензитета вектора угловне брзине Земљине ротације. Зато, пре него што објаснимо савремено дефинисање светског времена UT1, које се примењује од 2003. године, подсетимо се укратко како је то претходно чињено.

### 3.3.1. Време UT1 пре 2003. године

Светско време је мера обртног кретања Земље око своје поларне осе. Иако је, у историјском и квантитативном смислу, оно увек било блиска апроксимација средњег сунчаног времена на гринвичком меридијану, његова стриктна дефиниција се у пар

<sup>89</sup> Од почетка 1956. године IAU разликује три врсте светског времена: UT0, UT1 и UT2.

– UT0 је светско време одређено из посматрања на неком топоцентру са географским координатама  $(\lambda, \varphi)$  у конвенционалном непокретном референтном систему. Због поларног кретања, мењају се и тренутне координате топоцентра, тако да се мерене вредности UT0 на разним локацијама у истом тренутку међусобно разликују.

– UT1 је кориговано UT0 време, додавањем поправке  $\Delta\lambda = \lambda_1 - \lambda$  у којој је  $\lambda$  фиксна, а  $\lambda_1$  тренутна лонгитуда топоцентра. Обзиром да тренутне координате  $(\lambda_1, \varphi_1)$  одговарају тренутном (северном) полу чији је положај према фиксном конвенционалном полу одређен правоуглим координатама  $(x, y)$ , може се показати (в. [118,21,44,47]) да је

$$UT1 - UT0 = \Delta\lambda = \frac{1}{15}(x \sin \lambda - y \cos \lambda) \tan \varphi \quad (\lambda_{\text{источно од Гринвича}} < 0),$$

где су величине  $x, y, \lambda$  и  $\varphi$  изражене у лучним, а UT1, UT0 и  $\Delta\lambda$  у временским јединицама. Овако дефинисано време UT1 би требало да буде исто, независно од локације на којој је мерено. Евентуалне разлике су последица само случајних посматрачких грешака.

– UT2 је кориговано UT1 време због сезонских (годишњих и полугодишњих) варијација брзине Земљине ротације по (најдуже коришћеном) конвенционалном моделу

$$UT2 - UT1 = 0.022 \sin 2\pi t - 0.012 \cos 2\pi t - 0.006 \sin 4\pi t + 0.007 \cos 4\pi t,$$

у коме је поправка UT2 – UT1 изражена у секундама и аргумент  $t$  је део текуће (Беселове) године. Највећа апсолутна вредност разлике UT2 – UT1 достиже око 0.03 s.

UT2 је најравномернија временска скала која је могла бити изведена из оптичких астрономских посматрања. Са милисекундном тачношћу и стабилношћу од око  $10^{-8}$ , она је све до почетка 60-тих година прошлог века била званична еталонска скала према којој су се управљале емисије радио сигнала тачног времена.

У савременим околностима времена UT0 и UT2 немају више било какву функцију и не користе се. Новим посматрачким техникама и методама време UT1 се директно се одређује, јер је сада на једноставнији и прецизнији начин повезано променама Земљине оријентације.

наврата суштински мењала. Уз то, обзиром да се одређује из астрономских посматрања, и његова тачност је расла, заједно са порастом квалитета посматрачких техника и побољшањима референтних система у којима је дефинисан вектор угловне брзине Земљине ротације.

У дугачком раздобљу, од 1896. па све до краја 1983. године, према међународној сагласности, средње сунчано време на гринвичком меридијану је одређивано помоћу ректасцензије фиктивног средњег екваторског Сунца  $R_U$ , која је у *Њукомбовим таблицама Сунца* [121,123] дефинисана са

$$R_U = 18^{\text{h}} 38^{\text{m}} 45^{\text{s}}.836 + 8640184^{\text{s}}.542 T_U + 0^{\text{s}}.0929 T_U^2, \quad (3.38)$$

где аргумент  $T_U$  представља број јулијанских векова од 36525 дана светског времена који су протекли од гринвичког средњег поднева ( $12^{\text{h}}$  UT) 0. јануара 1900.

Имајући у виду да је локално звездано време једнако часовном углу тачке пролећног еквинокцијума (или  $\gamma$  тачке), а такође и ректасцензији небеског објекта које пролази кроз локални меридијан, из (3.38) следи формула за израчунавање гринвичког средњег звезданог времена (Greenwich Mean Sidereal Time) у  $0^{\text{h}}$  UT

$$\text{GMST} (0^{\text{h}} \text{UT}) = 6^{\text{h}} 38^{\text{m}} 45^{\text{s}}.836 + 8640184^{\text{s}}.542 T_U + 0^{\text{s}}.0929 T_U^2, \quad (3.39)$$

у којој је  $T_U$  изражено у јулијанским вековима од епохе 1900.0 преко низа узастопних еквидистантних вредности са размаком  $1/36525$ .

Формула (3.39) је имала већи практични значај него (3.38), јер су мерења положаја тачкастих ликова звезда далеко прецизнија него што су директна мерења положаја Сунчевог диска са додатним обрачунавање временског изједначења, а са друге стране, строго говорећи,  $R_U$  у (3.38) и не представља ректасцензију фиктивног средњег екваторског Сунца које би требало равномерно да се помера на небеској сфери, јер аргумент  $T_U$  садржи у себи неравномерности због промељиве брзине Земљине ротације<sup>90</sup>. Зато, израз (3.39) треба третирати као конвенционалну формулу која је служила за извођење светског времена од 1900. до краја 1983. године.

За одређивање количине UT времена протеклог од гринвичке поноћи потребно је још знати и однос дужина трајања средњег звезданог и средњег сунчаног времена, а он је у наведеном раздобљу био одређен изразом (према [45])

$$r = \frac{\text{средњи звездани дан}}{\text{средњи сунчани дан}} = 0.997269566414 - 0.586 T_U \times 10^{-10}, \quad (3.40)$$

<sup>90</sup> У Њукомбово време се сматрало да је Земљина ротација равномерна. Израз (3.38) би заправо дефинисао ректасцензију фиктивног средњег екваторског Сунца када би аргумент  $T_U$  представљао равномерно динамичко време [45], а оно је у астрономске ефемериде уведено тек од 1960.

из кога, занемарујући незнатне секуларне промене, следе везе:

$$\left. \begin{aligned} \text{средњи звездани дан} &= 23^{\text{h}} 56^{\text{m}} 04^{\text{s}}.09054 \text{ средњег сунчаног времена} \\ \text{средњи сунчани дан} &= 24^{\text{h}} 03^{\text{m}} 56^{\text{s}}.55536 \text{ средњег звезданог времена} \end{aligned} \right\} \quad (3.41)$$

и

$$UT = [GMST - GMST(0^{\text{h}} UT)] r. \quad (3.42)$$

Треба истаћи да променљивост брзине Земљине ротације не утиче на величину  $r$ , дефинисану изразом (3.40), и да је, због прецесије  $\gamma$  тачке, период ротације Земље већи од дужине звезданог дана за  $0^{\text{s}}.008364$  и износи тачно  $23^{\text{h}} 56^{\text{m}} 04^{\text{s}}.098904$  средњег сунчаног (или UT) времена, што одговара угловној брзини од  $15''.041067$  (или  $7.292115060085 \times 10^{-5}$  радијана) по једној секунди средњег сунчаног времена.

Све време, док је био у употреби израз (3.39) за GMST, биле су актуелне Њукомбова и Хилова теорија кретања планета. Такође, кориштене астрономске константе (нпр. за аберацију, прецесију, нутацију, планетне масе, . . .), као и остале важне дефиниције елемената небеског референтног система, садржале су изворне нумеричке вредности из Њукомбових радова [122,121] са краја 19. века. Међу тим дефиницијама свакако су најзначајније оне које се односе на средње сунчано време, Беселову и тропску годину, као и на положај еклиптике (према екватору) и место  $\gamma$  тачке.

Обзиром да и звезде и Земљина оса ротације непрекидно мењају свој положај у простору, дефиниција непокретног небеског референтног система се увек морала односити на један одређени тренутак, за који је дефинисана екваторска раван (као основна) и основни правац у њој (еквinoxијски правац), усмерен ка  $\gamma$  тачки. Реализацију таквог система је представљао неки фундаментални звездани каталог, у коме су садржани изведени положаји и сопствена кретања одабраног броја сјајних звезда за одређену стандардну епоху (обично за Беселову, B1900.0 или B1950.0).

Било је неколико фундаменталних каталога у употреби пре 1984. године. То су амерички: Њукомбов *Catalogue of Fundamental Stars*, из 1899. године са 1257 звезда, и Морганов *N30*, из 1952. године са 5268 звезда [113], и неколико немачких: Оверсов (Auwers) *Fundamental Catalog for the Zone Observations*, из 19. века са 539+83 звезде, затим *NFK (Neuer Fundamental Katalog)*, из 1907. са 925 звезда [124], *FK3*, из 1937. са 873+662 звезде [96] и последњи, *FK4*, из 1963. године са 1535 звезда [54], чијем основном делу је касније додато проширење са још 1987 звезда (*FK4 Supplement*). Због високог квалитета каталога из FK серије (в. [42]), IAU их је сматрала<sup>91</sup> основним референтним системом у астрометрији.

<sup>91</sup> IAU је званично препоручила употребу FK3 каталога 1938. године.



Сви наведени фундаментални каталози су у суштини били динамички референтни системи, јер им је заједнички начин одређивања основних равни (екваторске и еклиптичке) и њиховог пресека, који је био заснован на посматрањима положаја Сунца, Месеца и планета, а такође и на актуелним теоријама кретања тела Сунчевог система. Према томе, каталожка  $\gamma$  тачка, или нулта тачка од које се рачунају ректасцензије небеских објеката, и еклиптика су били динамички дефинисани.

Терестрички геоцентрични референтни систем је пре 1984. године био дефинисан фиксном мрежом географских координата локација са којих је вршено праћење Земљине ротације различитим оптичким астрономским инструментима<sup>92</sup>, а, од 70-тих година 20. века, делимично и другим техникама<sup>93</sup> и методама. Тај систем, у коме је био дефинисан конвенционални пол и одговарајући екватор (са нултом тачком на њему), sukcesивно је побољшаван и прошириван у складу са повећањем броја инструмената и растом њихових техничких могућности.

Како су сва организација, координација и оперативне активности, у вези са дефинисањем терестичког референтног система и проблематиком одређивања времена на глобалном нивоу, били најдуже у надлежности *Међународној бира за време*<sup>94</sup> (Bureau Internationale de l'Heure), разне реализације терестичког референтног система и прецизног дефинисања времена UT1 су у свом називу садржале годину објављивања и акроним *BIH*, као, на пример, *1968 BIH System* или *1979 BIH System*.

Крајем 70-тих и почетком 80-тих година 20-тог века, упоредо са напредовањем астрономске теорије и праксе, догодиле су се многе промене, па се, као логична последица, јавила и потреба за ревидирањем формуле (3.39), која је била основа за извођење светског времена. Најбитнија достигнућа су се тичала: новог система астрономских констаната *IAU 1976*, нових израза за општу прецесију, заснованих на тим константама (Lieske et al., 1977, [102]), нове нутационе теорије *1980 IAU* (1982, [131]) и препоруке да се *FK4* положаји и сопствена кретања звезда преводе у нови референтни систем са ознаком *FK5* (Fricke, 1982, [53]). Са свим тим уведеним новинама, неминовно је морало доћи и до извесних промена у дефиницијама положаја  $\gamma$  тачке, односно до тачнијег и прецизнијег описивања њеног кретања, а самим тим и до одговарајућег кориговања коефицијената у конвенционалној формули за GMST ( $0^h$  UT), да не би дошло до дисконтинуитета у скали светског времена.

<sup>92</sup> Пасажни инструменти, астролаби, фотографске зенитне тубе, зенит-телескопи, циркумзенитали.

<sup>93</sup> DOPPLER-овско праћење TRANSIT сателита, ласерска даљинометрија вештачких сателита и Месеца (SLR, LLR), дугобазична интерферометрија (VLBI).

<sup>94</sup> BIH је био активан од 1919. до 1988. године. Од почетка 1988. његове надлежности су поделили IERS и BIPM.

Због свега тога, по међународним конвенцијама, у астрономским годишњацима се од 1984. године светско време више није одређивало помоћу израза (3.39) за гринвичко средње звездано време у гринвичку поноћ ( $0^h UT1$ ), већ помоћу измењеног обрасца, објављеног 1982. године у [8] од стране групе аутора (Aoki *et al.*),

$$GMST1(0^h UT1) = 24110^s 54841 + 8640184^s 812866 T_U + 0^s 093104 T_U^2 - 0^s 0000062 T_U^3, \quad (3.43)$$

у коме аргумент  $T_U$  има слично значење као и у (3.39) само за другу епоху. Према уобичајеној формулацији, као на пример у [44,111,98],  $T_U = d_U/36525$ , где је  $d_U$  број протеклих дана (светског времена) од тренутка JD 2451545.0 ( $12^h UT1$ , 1. јануара 2000.) и може узимати само неку од вредности из скупа  $\{\pm 0.5, \pm 1.5, \pm 2.5, \pm 3.5, \dots\}$ .

У формули (3.43) експлицитно је наведено да се ради о врсти светског времена са ознаком UT1, мада и када стоји само UT, без икакве друге ознаке, увек се подразумева да је реч о светском времену UT1, односно о времену које је мера ротационог кретања Земље око своје тренутне поларне осе.

Захваљујући свим горе наведеним побољшањима, изрази (3.40), (3.41) и (3.42), су могли бити респективно замењени одговарајућим, али прецизнијим, изразима (3.44), (3.45) и (3.46), који се односе на епоху J2000.0 :

$$r = \frac{\text{средњи звездани дан}}{\text{дан UT1 времена}} = 0.997269566329084 - 5.8684 T_U \times 10^{-11} + 5.9 T_U \times 10^{-15} T_U^2, \quad (3.44)$$

$$\left. \begin{aligned} \text{средњи звездани дан} &= 23^h 56^m 04^s 090524 \text{ UT1 времена} \\ \text{дан UT1 времена} &= 24^h 03^m 56^s 5553678 \text{ средњег звезданог времена} \end{aligned} \right\} \quad (3.45)$$

$$UT1 = [GMST1 - GMST1(0^h UT)] r. \quad (3.46)$$

Исто тако, наведене промене су се одразиле и на дужину ротационог периода Земље. Њена нова, нешто прецизнија, вредност у скали UT1 времена је сада износила  $23^h 56^m 04^s 09890369732$ , што је за  $0^s 00837969732$  више од дужине звезданог дана. То одговара односу дужине UT1 дана према периоду Земљине ротације у износу од 1.002737811906, или угловној брзини од  $15''.04106717866910$  (или  $7.29211514670638929 \times 10^{-5}$  радијана) по једној секунди UT1 времена.

Како се одређује време UT1 из астрономских посматрања на некој локацији, чија је географска дужина<sup>95</sup>  $\lambda$ , помоћу једначине (3.46) (или помоћу (3.42)), принципијелно се види када се она напише у следећем облику

$$UT1 = [H + \alpha - N_\alpha + \lambda - GMST1(0^h UT)] r, \quad (3.47)$$

<sup>95</sup> Претпостављено је да су географске дужине западно од Гринвича позитивне.

где  $H$ ,  $\alpha$  и  $N_\alpha$  респективно представљају: (мерени) часовни угао посматране звезде, њену (обрачунату) ректасцензију и једначину еквинокцијума (или укупну нутацију по ректасцензији) у тренутку посматрања.

Ако је, на пример, реч о посматрањима меридијанских пролаза звезда ( $H = 0$ ), онда се региструју такви тренуци (пролаза) по времену локалног часовника, који се упоређује са неком официјелном скалом UTC времена, тако да се посредним путем одређује тражена разлика UT1–UTC за средњи тренутак посматране серије звезда.

Наравно, у реалним случајевима, израз (3.47) поприма много сложенији облик када се урачунају посебни параметри коришћеног астрономског инструмента, као и саме методе посматрања (мерења), али ти практични детаљи нису нарочито битни на овом месту.

Формула (3.43) за GMST1, на бази које се одређивало UT1, за разлику од Њукомбове формуле (3.39), није више била у директној вези са положајем Сунца. Она је изведена у складу са следећим захтевима (према [44]):

- (1) да је UT1 сразмерно обртном углу Земље у простору, рачунајући у односу на њену тренутну осу ротације, или, другим речима, да је сразмерно интегралу интензитета вектора њене угловне брзине;
- (2) да је ход UT1 времена такав, да је дужина дана (по UT1) блиска средњем трајању сунчаног дана; и
- (3) да је фаза UT1 времена тако изабрана, да 12<sup>h</sup> UT1 у просеку приближно одговара тренутку проласка Сунца кроз меридијан Гринвича.

Захтеви (2) и (3) нису у потпуној сагласности са првим захтевом, јер (1) повлачи секуларно разилажење UT1 и средњег сунчаног времена. Међутим, њихова разлика, иако временом расте, толико је мала да остаје унутар једне секунде хиљадама година.

Важно је напоменути да, иако то није била једина могућа опција (почетком 80-тих година 20. века), за  $\gamma$  тачку, (коју претпоставља израз (3.43)), је изабрано да одговара њеној FK5 дефиницији, обзиром да је то био најтачнији референтни систем у оптичком таласном подручју. Међутим, FK5 каталог је, за разлику од својих претходника из FK серије, реализација једног комбинованог референтног система, заснованог на коригованом (динамичком) FK4 еквинокцијуму (1982,[53]), IAU формулама за општу прецесију (1977,[102]) и обрачунавањима утицаја галактичке ротације на сопствена кретања звезда. С тим у вези, у [98] се наводи: *"Последица ове нарочитије новине је шаква да, иако се смајтра динамичким сисџемом, FK5 није заснован само на крешањима Сунца и планетџа, џа је, збоџа шџџа, реализација једноџ звездано-динамичкоџ референџноџ сисџема, шџџо је у џуноџ мери оџправдано џрокламованим циџљем*

да се што је више могуће да значај посматрањима, међу којима су посматрања Сунца и планета заснујена са најмањом шежином."

Формула (3.43) је била само једна од уведених новина у астрономску праксу почетком 1984. године. Тада су, у складу са већ поменутиим достигнућима, почели да се примењују нови поступци и стандарди у припреми астрономских годишњака, а такође и *Међународни биро за време* (ВИН) је извршио револуционарне промене у свом раду, подстакнут својим (много јачим) разлозима.

Наиме, од 1972. до 1984. године у ВИН-у су се за одређивање параметара Земљине ротације, поред података добијених класичним оптичким инструментима, упоредо почели постепено користити и одговарајући резултати мерења новим радиоастрометријским и ласерским техникама. Стечена искуства, у том раздобљу, јасно су указивала на супериорност нових инструмената и метода, па је крајем 70-тих година замишљен један велики међународни пројект интензивног праћења параметара Земљине ротације свим расположивим техникама са јасним (мада у то време експлицитно неисказаним) циљем стварања оптималних услова за потпуни прелазак на нове, много прецизније, посматрачке методе [148]. Тај заједнички пројект међународних организација IAU и IUGG<sup>96</sup>, познат по акрониму MERIT<sup>97</sup>, реализован је у две интензивне посматрачке кампање: у припремној, од августа до октобра 1980., и главној, од септембра 1983. до октобра 1984. године.

MERIT је био изузетно важан и деликатан пројекат јер је потенцијално утицао, не само на будућу измену терестричког и небеског референтног система, већ и на њихову суштинску редефиницију, која није смела да доведе до дисконтинуитета са старим резултатима. Због тога су сви учесници тог пројекта (претежно чланови ВИН-а) били дужни да се придржавају усвојених MERIT стандарда [112], који су обухватили сва (горе) поменута достигнућа са краја 70-тих и почетка 80-тих година, укључујући и (тада) нови динамички референтни систем, материјализован са *JPL DE200/LE200* ефемеридима, чији су основни правци максимално усаглашени са будућим системом фундаменталног каталога *FK5* према резултатима у [53].

Извршење MERIT пројекта је било веома ефикасно, а последице добијених резултата веома значајне. Од почетка 1984. године, оптичка астрометрија се више не користи за одређивање параметара Земљине ротације. Претходни ВИН-ов терестрички систем *1979 VLN System* је потпуно замењен новим геоцентричним терестричким системом *BTS 84*, у чијим референтним тачкама, дефинисаним чак са центиметар-

---

<sup>96</sup> International Union of Geodesy and Geophysics

<sup>97</sup> Monitor Earth Rotation and Intercompare the Techniques of observation and analysis

ском прецизношћу, су се нашли само инструменти нових посматрачких техника (VLBI, SLR, LLR). Небески референтни систем је такође коренито измењен. Са система, заснованог на положајима звезда из фундаменталног каталога, потпуно се прешло на систем који су сачињавали положаји далеких вангалактичких радио извора, чија сопствена кретања су толико мала, да их практично није могуће регистровати. Истина, тај нови небески референтни систем је био максимално везан за основне правце система FK5 (у границама њихове FK5 тачности), да се не би појавио скок у резултатима одређивања параметара Земљине ротације, али нова мерења су надаље обезбеђивала већу тачност (за више од реда величине) и много већу прецизност.

ВН је радио до краја 1987. године. Од почетка 1988. године, његову активност у области атомског времена наставио је ВРМ, а одређивање светског времена UT1 је припало IERS-у. Осим тога, IERS је истовремено преузео и послове IPMS<sup>98</sup>-а, који је престао да постоји када и ВН, тако да је тиме IERS објединио све аспекте праћења Земљине ротације, укључујући формирање, одржавање и побољшавање референтних система и њихових реализација<sup>99</sup>.

ВН-ов терестрички систем ВТS84, са својим сукцесивним реализацијама од 1984. до 1987. године, наставио је наредних година да постоји и да се развија као IERS-ов терестрички систем ITRS. Његове реализације, у ознаци ITRF<sup>100</sup>, су напредовале, почев од прве верзије, ITRF88, па све до последње (дванаесте<sup>101</sup>), ITRF2008. За то време неколико усвојених дефиниција (геодетских) датума су наследиле једна другу [84]. Како су расле могућности увођених посматрачких техника и метода, као и коришћених геолошких, или геофизичких модела, тако је напредовао и квалитет

---

<sup>98</sup> International Polar Motion Service

<sup>99</sup> У иностраној литератури разликују се два термина *reference system* и *reference frame* који имају следеће значење:

– *reference system* је, према [98], "теоријски концепт неког система координата, укључујући време и стандарде, који су потребни да се дефинишу основе представљања положаја и кретања тела у простору", или, према [48], "скуп правила, конвенција и модела који су потребни да би у сваком тренутку био дефинисан неки координатни триедар."

– *reference frame* је, према [98], "практична реализација неког *reference system*-а, обично у облику каталога положаја и сопствених кретања извесног броја упоришних тачака на небу (звезда или радио извора), или, према [48], "практична реализација са датим упоришним правцима који су усаглашени са уведеним концептима у одговарајућем *reference system*-у."

С обзиром да у одговарајућој терминологији на српском језику не постоји појмовно разграничење између теоријског концепта неког референтног система и његове физичке реализације, овде, ако се из контекста не може закључити о чему се ради, *reference frame* описно називамо *реализацијом референтног система*.

<sup>100</sup> International Terrestrial Reference Frame

<sup>101</sup> ITRF88, ITRF89, . . . , ITRF94, ITRF96, ITRF97, ITRF2000, ITRF2005, ITRF2008.

терестричке координатне мреже, у погледу њене тачности, прецизности оријентације и броја референтних тачака.

IERS-ов небески референтни систем, наслеђен од ВИН-а 1988. године, био је заснован на положајима 23 вангалктичка радио извора [12]. До 1995. број референтних објеката у том систему нарастао је на 212, а, истовремено, систематска разлика у оријентацијама између две њихове узастопне годишње реализације се смањивала, почев од 0.1 mas, све док се није стабилизовала на испод 0.02 mas. Због тога је IERS предложио [11] да ова верзија њиховог система из 1995. буде прихваћена као *Међународни небески референтни систем* (ICRS), као и његова реализација ICRF<sup>102</sup>, што је IAU, својом одлуком из 1997. године, званично и урадила (в. у Прилогу). На истој Генералној скупштини 1997. године, IAU је одлучила да и дотадашњу званичну реализацију небеског референтног система у оптичком домену, коју су сачињавали положаји сјајних звезда у FK5 каталогу [55,56,57], замени са тачнијим и вишеструко бројнијим положајима звезда у *Hipparcos* каталогу [43], чиме је тај каталог, као реализација HCRS<sup>103</sup>-а, практично постао верзија ICRF-а у оптичком таласном подручју.

Током 90-тих година, астрометрија је наставила свој даљи развој у лучном микросекундном подручју ( $\mu\text{as}$ ). Међутим, са тако великом прецизношћу настали су извесни (концептуални и практични) проблеми који се тичу дефиниције референтних система, зависних од тачности локације  $\gamma$  тачке. Једноставно, та тачност није била усаглашена са могућностима нове посматрачке технике каква је VLBI, па је настала ситуација, сликовито речено, као када бисмо желели врло прецизним инструментом да извршавамо тачна мерења у некој скали, чији почетак није довољно тачно одређен. Уз то, велику прецизност детекције појединих брзих и сложених феномена, директно повезаних са еквинокцијским правцем<sup>104</sup>, прати и постојање одређеног случајног шума у мерним подацима, што омета тачну идентификацију положаја  $\gamma$  тачке. А, са друге стране, крајем 90-тих, постојало је три начина њеног одређивања<sup>105</sup> различите тачности, који су давали блиске, али ипак довољно различите (око 0''1), вредности, да би се проблем локације  $\gamma$  тачке могао игнорисати.

Због свега тога, прво је у 1997. години додатно коригована једначина еквинок-

---

<sup>102</sup> International Celestial Reference Frame

<sup>103</sup> Hipparcos Catalog Reference System

<sup>104</sup> Као што су, на пример, брзе варијације поларног кретања Земљине осе ротације и равни Земљине орбите у вези са променама тренутних положаја екваторске и еклиптичке равни

<sup>105</sup> Једна каталожка и две динамичке дефиниције еквинокцијског правца ка  $\gamma$  тачки. У каталожкој, он је представљен  $x$ -осом ITRF-а, док је у једној динамичкој био заснован на еклиптичкој равни која се равномерно помера (дефиниција из IAU резолуција 1991.), а у другој је подразумеван тренутни пресек еклиптичке и екваторске равни.

цијума, у складу са Препоруком 3 IAU резолуције С7 из 1994. године (в. Прилог), а затим се 2000. године на XXIV Генералној скупштини IAU, у пакету резолуција, којима је препоручено увођење многих револуционарних промена у астрономску теорију и праксу од почетка 2003. године, нашла и одлука о престанку употребе  $\gamma$  тачке у својству почетне (или нулте) тачке на екватору, од које се рачунају координате. Уместо ње, уведена је специјална "непокретна" тачка на екватору ITRF-а, са ознаком CIO (*Celestial Intermediate Origin*), чији је положај заснован на новом прецесионо-нутационом моделу IAU2000A [106], на, већ поменутом, Гиноовом концепту *неро-тирајућеї поочеїка* NRO (*non-rotating origin*) и на опредељењу да прелазак са старог система на нови буде невидљив за резултате континуираних мерења, какви су параметри Земљине ротације, на пример.

Нова астрометрија, у којој  $\gamma$  тачка, звездано време и еклиптика немају више некадашњу улогу, уводећи нове појмове и нове концепције покретних (прелазних) референтних система, увела је и нову дефиницију светког времена UT1, која се суштински разликује од претходних.

### 3.3.2. Међународни небески референтни систем (ICRS)

ICRS је идеализовани барицентрични фиксни небески координатни систем, чије су осе дефинисане у односу на положаје толико удаљених објеката у васиони, да се њихово сопствено кретање не може регистровати, па се правци ка њима могу сматрати константним. Такав систем се назива још и квази-инерцијалним, јер се претпоставља да он не врши било какво ротационо кретање, односно да је он попутно кинематичке природе. Због континуитета, изабрано је да ICRS има исту оријентацију као и претходни референтни систем FK5, што значи да му се основна раван поклапа са средњим екватором за епоху J2000.0 и да му је основни правац у тој равни усмерен ка динамички дефинисаној тачки пролећног еквинокијума у истом тренутку. Оријентација ICRS-а остаје за све епохе стално иста, јер није више зависна од померања еклиптике и екватора.

Практична реализација ICRS-а се материјализује системом ICRF (*International Celestial Reference Frame*), који се састоји од конкретних координата одређеног броја удаљених вангалактичких радио извора<sup>106</sup> чија су сопствена кретања занемарљива. До сада је било две реализације ICRS-а, при чему је прва имала два проширења, па се

<sup>106</sup> То су у највећем броју квазари, затим извори *шиїа* BL Lacertae и неколико активних галактичких језгара (AGN).

може рећи да је заправо било укупно четири верзије ICRF-а. Свака следећа верзија је била изванредан напредак у односу на претходну и садржала је више референтних објеката, као што се може видети у Табели 3.2.

**Табела 3.2.** Све реализације *Међународној небеској референтној систему* ICRS.

ознака	година	број објеката	референца
ICRF1	1997.	608	[80,103]
ICRF1-Ext.1	1999.	667	[81]
ICRF1-Ext.2	2004.	717	[49]
ICRF2	2009.	3414	[83]

Прва реализација ICRS-а, ICRF1, је била заснована на положајима 212 *дефиниционих објеката*<sup>107</sup>, а друга, ICRF2, на 295 таквих објеката, али са много равномернијом расподелом на небеској сфери и већом стабилношћу њихових положаја. Нестабилност координатних оса у ICRF2 се креће унутар  $10 \mu\text{as}$ , што је дупло мање него код ICRF1, а при томе је и ниво шума 5 до 6 пута мањи (око  $40 \mu\text{as}$ ). Зато је резолуцијом В3 XXVII IAU Генералне скупштине одлучено да основна реализација ICRS-а, од почетка 2010. године, званично буде ICRF2, каквим су га сачинили и предложили IERS/IVS<sup>108</sup> ова радна група за ICRF у спреси са специјалном IAU-овом радном групом за ICRF2.

Осим ICRF-а, чијим објектима (из радио таласног подручја) се приступа путем најпрецизније VLBI посматрачке технике, постоје још две посебне реализације ICRS-а у оптичком домену. Једна од њих је *Hipparcos каталога* звезда [43,78], који представља реализацију галактичког референтног система, а друга је конвенционална динамичка реализација, која се заснива на представљању кретања тела Сунчевог система путем *JPL*<sup>109</sup> *ефемерига*.

Веза *Hipparcos каталога* са ICRF-ом је за епоху 1991.25 остварена унутар грешке од  $0.6 \text{ mas}$  у положајима и  $0.25 \text{ mas}$  по години у сопственим кретањима звезда [97]. Последња верзија *JPL ефемерига*, *DE421* ([52]), највише захваљујући VLBI позиционирању последњих сонди упућених ка Марсу (*Mars Global Surveyor*, *Mars Odyssey*, *Mars Reconnaissance*), остварује везу са ICRF-ом унутар грешке  $0.25 \text{ mas}$ , што је око 4 пута боље него у претходној верзији *DE405* ([138]), у којој су за исту сврху коришћена ласерска и VLBI мерења положаја летелице *Magellan* у орбити Венере [84].

<sup>107</sup> То су били компактни вангалактички радио извори који су сачињавали комплетан IERS-ов VLBI каталог из 1995. године [103]. Иначе, *дефинициони објекти* имају најтачније одређене положаје и због тога се користе за дефинисање оријентације координатних оса, као и за прецизније позиционирање других објеката у истом референтном систему.

<sup>108</sup> International VLBI Service for Geodesy and Astrometry

<sup>109</sup> Jet Propulsion Laboratory



За разлику од ICRF-а, временом и *Hipparcos каталога* и *JPL ефемериде* имају све веће грешке. У првом случају то се догађа због сопствених кретања звезда, а у другом, због неминовних нумеричких грешака у интеграцијама, које прогресивно расту са бројем рачунских корака и дужином временског интервала, без обзира, колико год да је добра примењена теоријска метода и колико год да су прецизни коришћени почетни услови.

### 3.3.3. Међународни терестрички референтни систем (ITRS)

Генерално говорећи, фиксни терестрички референтни систем је компликованији него ICRS, јер се референтним тачкама на Земљиној површини не могу приписати фиксне координате као што је то случај са удаљеним вангалактичким радио изворима. Земља није чврсто тело, па плимско дејство тела Сунчевог система и мноштво других узрока геофизичког порекла деформишу њен облик и утичу да међусобна растојања ма ког изабраног скупа референтних тачака на њеној површини подлежу малим, али ипак незанемарљивим, променама. Оне се морају прецизно моделовати, јер савремене посматрачке технике захтевају познавање координата топоцентра са милиметарском тачношћу.

За *Међународни терестрички референтни систем*, у ознаци ITRS, надлежан је IERS, тако да ITRS, под тим именом, постоји од 1988. године, од када је IERS активан. Због континуитета са ранијим дефиницијама, узето је да оријентација ITRS-а буде иста као и код његових претходника, тј. да буде одређена средњим екватором и одговарајућим гринвичким меридијаном за 1900. годину.

Међународне организације IAG<sup>110</sup>, IUGG и IAU су својим резолуцијама из 1991. званично прогласиле ITRS официјелним терестричким референтним системом са следећим карактеристикама (према [84]):

- (1) Он је *геоцентричан*. Координатни почетак је у *центру масе* целе Земље, укључујући океане и *атмосферу*;
- (2) Јединица дужине је *метар (SI)*. Скалирање (*проспирних координата*) је *конзистентно* са временском координатом TCG у локалном *геоцентричном систему*, како је наведено у IAU и IUGG резолуцијама из 1991, *што следи из одговарајуће релативистичког моделовања*;
- (3) *Његова оријентација се иницијално покљача са оријентацијом BIH-овог терестричког система BTS84*;

---

<sup>110</sup> International Association for Geodesy

(4) Он рошира заједно са Земљом, иако да координатна мрежа нема (резидуалну) роширацију у односу на хоризонталну Земљину површину, или, прецизније, у односу на хоризонтална тектонска кретања дуж целе Земље.

Важно је напоменути да је ITRS заснован на положајима тачака на Земљиној кори и да се његова ротација још увек разматра на нерелативистички начин. ITRS се сматра просторним тродимензионалним системом у коме се координатно време TCG не мења (током ротације ITRS-а) [64]. Разлог томе је што су сложени актуелни геофизички модели развијани у оквиру њутновске физике и што све актуелне примене, као што су, на пример, мапирање и навигација, третирају ITRS у тродимензионалној геометрији [84].

Реализацију Међународног терестричког система ITRS, у ознаци ITRF, чини материјализовани геоцентрични координатни систем, у коме су координатни почетак, оријентација оса и њихове промене током времена одређени прецизним координатама једног скупа физичких тачака на којима се налазе инструменти астро-геодетских опсерваторија и/или један број фиксних маркера у њиховој околини.

До сада је било дванаест верзија ITRF-а (од прве ITRF88 до последње ITRF2008 [6]), које су једна за другом биле све боља реализација ITRS-а. Последња реализација, ITRF2008, коју сачињавају 934 станица, смештених на 580 локација<sup>111</sup>, направљена је на основу обраде свих резултата VLBI, SLR, GPS и DORIS мерења у протеклом периоду, рачунајући од када је свака од наведених посматрачких техника уведена (29, 26, 12.5, и 16 година, респективно).

Прецизност ITRF-а је толико висока, да је грешка положаја већине референтних тачака  $\leq 1$  cm, а њихових брзина  $\leq 1$  mm на годину дана. Нарочито брзине морају имати што тачније вредности, да систем не би временом деградирао, пошто хоризонтална померања тектонских плоча понегде чак могу досећи брзину и до 10 cm на годину дана.

Имајући то у виду, а такође и жељу да, горе наведена, 4-та карактеристика ITRS-а буде очувана (на конвенционалном нивоу), у IERS-у су се (током 90-тих година) промене оријентације ITRF-а током времена управљале према посебним геолошким моделима (прво NNR-NUVEL-1, а затим NNR-NUVEL-1A) који су описани и коришћени у радовима [38,9,39]. У таквим оквирима су се одређивале брзине појединих референтних тачака у ITRF-у пре 2000. године. Међутим, после је такав концепт напуштен, истовремено са увођењем темељних промена у астрометрији. У последњим реализацијама ITRS-а (ITRF2005 и ITRF2008), позиције и брзине тачака ITRF-а

<sup>111</sup> 463 на северној и 117 на јужној хемисфери.

не зависе више ни од каквог модела кретања тектонских плоча, већ се изводе на основу свакодневних одређивања параметара Земљине ротације из резултата VLBI, SLR, GPS и DORIS мерења. Тектонски кинематички модел се користи само још за одређивање брзина оних терестричких тачака које нису у ITRF мрежи, а које треба прецизно позиционирати у њој. Типични случај је рецимо, када због неког разлога, није могуће извршити поновљена посматрања (на пример, симултаним GPS мерењима), па је, самим тим, немогуће одредити брзину <sup>112</sup>[98].

У актуелном ITRF-ов моделу свака тачка је представљена својим вектором положаја  $\vec{X}_0$  у референтној епохи  $t_0$  и вектором брзине  $\dot{\vec{X}}$ . Скуп свих уређених парова облика  $(\vec{X}_0, \dot{\vec{X}})$  заправо јесте садашњи ITRF, у коме се положаји референтних тачака у било ком тренутку  $t$  одређују по линеарном моделу

$$\vec{X}(t) = \vec{X}_0 + \dot{\vec{X}} \cdot (t - t_0) . \quad (3.48)$$

У специфичним применама, ITRF положај (3.48) треба још додатно кориговати, било због плимских утицаја, усаглашавања са скалом TCG времена<sup>113</sup> или свођења на тренутни геоцентар<sup>114</sup> (в. [84]).

ITRS и геоцентрични ICRS су сталној вези преко параметара Земљине ротације  $\{(x, y), (X, Y), \text{UT1-UTC}\}$ <sup>115</sup>. Ти параметри у сваком тренутку дефинишу оријентације прелазних (покретних, тренутних) референтних система TIRS и CIRС у односу на ITRS и ICRS, респективно. Наравно, конкретне (изведене) IERS-ове вредности параметара Земљине ротације се односе на реализације поменутих референтних система, ITRF, ICRF, TIRF<sup>116</sup> и CIRF<sup>117</sup>.

<sup>112</sup> Иначе, веома висока тачност локација у ITRF мрежи ( $\leq 1$  cm) је неопходна кад се врше посматрања блиских објеката (сателита, Месеца, разних планетарних сонди итд.), док је за посматрања тела ван Сунчевог система довољна и уобичајена тачност геодетских координата сваке тачке на Земљиним референтном елипсоиду.

<sup>113</sup> ITRS је по конвенцији конзистентан са TCG временом, али његове последње реализације користе скалу TT времена. По потреби, ради усаглашавања са TCG, положаје (3.48) треба помножити фактором  $(1 + L_G)$ , где је  $L_G$  дефинициона константа, наведена у (3.34).

<sup>114</sup> Координатни почетак у ITRF-у је дефинисан као средњи положај центра масе Земље. Он се изводи усредњавањем SLR посматрања из одређеног временског интервала и њиховим моделовањем у облику линеарне функције времена. У резултату се добија временски зависан вектор  $\vec{O}_G$  чији је почетак у координатном почетку ITRF-а, а крај у тренутном геоцентру. Ради свођења на тренутни геоцентар, потребно је од вектора  $\vec{X}$  из (3.48) одузети вектор  $\vec{O}_G$ .

<sup>115</sup> Уместо координата CIP-а у ICRF-у,  $(X, Y)$ , IERS објављује њихове, посматрањем одређене, дневне поправке  $(\delta X, \delta Y)$ , које треба додати на теоријске координате  $(X_{\text{model}}, Y_{\text{model}})$  из прецесионо-нутационог модела да би се добиле тачне координате  $(X, Y)$ .

<sup>116</sup> Terrestrial Intermediate Reference Frame

<sup>117</sup> Celestial Intermediate Reference Frame

### 3.3.4. Прелазни референтни системи (CIRS, TIRS)

Небески прелазни референтни систем (CIRS) и тиреситрички прелазни референтни систем (TIRS) су уведени у астрономску праксу од 2003. године, према препорукама XXIV Генералне скупштине IAU (Манчестер, 2000.). Оба су геоцентрична и заснована на потпуно новим теоријским концептима, са примарном сврхом да буду олакшане међусобне трансформације координата фиксних референтних система ITRS и ICRS<sup>118</sup>, односно да веза ITRS-а и ICRS-а, преко параметара Земљине ротације, буде што једноставнија и тачнија.

Пре него што ближе објаснимо елементе CIRS-а и TIRS-а, наведимо прво које су одлуке Међународне астрономске уније биле у непосредној вези са дефиницијом ових референтних система.

- Резолуцијом IAU 2000 B1.3, релативистички системи просторно-временских координата за Сунчев систем и за ближу околину Земље, који су дефинисани раније Резолуцијом IAU 1991 A4, добили су називе *Барицентрични небески референтни систем BCRS* (Barycentric Celestial Reference System) и *Геоцентрични небески референтни GCRS* (Geocentric Celestial Reference System). Уз то, прецизније су дефинисани њихови метрички тензори и трансформације координата. О релативистичким (просторно-временским) референтним системима ће бити више речено у одељку о динамичком времену. За сада је битно да се GCRS може одредити као *геоцентрични ICRS*.

Просторна компонента четвородимензионалних референтних система BCRS и GCRS није имала стриктно дефинисану оријентацију до 2006. године. Тек резолуцијом IAU 2006 B2 је речено да, ако се другачије не каже, њихова подразумевана просторна оријентација је дефинисана усмерењем ICRS координатних оса.

- Резолуцијом IAU 2000 B1.6 је препоручено да се од почетка 2003. године, уместо IAU 1976 прецесионог модела [102] и IAU 1980 теорије нутације [147,131], почне користити нови *IAU 2000 A* (или MHB2000) *прецесионо-нутациони модел* [106],

<sup>118</sup> Овде се подразумева да се ради о *геоцентричном ICRS-у*, референтном систему који има на исти начин усмерене осе као и барицентрични ICRS, каквим се ICRS иначе дефинише. Заправо реч је *Геоцентричном небеском референтном систему GCRS* (Geocentric Celestial Reference System) чије су осе оријентисане као код (барицентричног) ICRS-а. GCRS је млађи од ICRS-а, јер је GCRS дефинисан 2000. године на XXIV Генералној скупштини IAU, када је ICRS већ увелико био у употреби. У литератури се много чешће користи назив GCRS, него *геоцентрични ICRS*, међутим, због природног редоследа излагања ове материје, овде је коришћен други термин, као што је то практиковано у [98].

чија прецизност износи 0.2 mas, или његова краћа верзија, IAU 2000 B, са прецизношћу од 1 mas [110].

Прецесиони део модела IAU 2000 A је касније, Резолуцијом IAU 2006 B1, замењен са P03 теоријом прецесије [32], која је боље усаглашена са динамичким теоријама и нутационим делом у моделу IAU 2000 A. Примена таквог модела, који се још назива и IAU 2006 прецесија, је препоручена од почетка 2009. године.

- Резолуцијом IAU 2000 B1.7 је препоручено да од почетка 2003. године, уместо дотадашњег *небеској ефемеридној пола* CEP (Celestial Ephemeris Pole), буде у употреби *небески прелазни пол* CIP (Celestial Intermediate Pole). У истом документу је прецизирано и како се дефинише локација CIP-а у GCRS-у и ITRS-у током времена, почев од епохе J2000.0.
- Резолуцијом IAU 2000 B1.8 је препоручено да у небеским и терестричким референтним системима од 2003. године почетна тачка на екватору CIP-а (од које се рачунају ректасценције и лонгитуде) буде дефинисана као Гиноов *неротирајући почетак* NRO (non-rotating origin) [60]. Те тачке су назване *небески ефемеридни почетак* CEO (Celestial Ephemeris Origin) и *терестрички ефемеридни почетак* TEO (Terrestrial Ephemeris Origin), али су им касније (резолуцијом IAU 2006 B2), ради усаглашавања са називом пола CIP, промењена имена у *небески прелазни почетак* CIO (Celestial Intermediate Origin) и *терестрички прелазни почетак* TIO (Terrestrial Intermediate Origin).

Истом Резолуцијом IAU 2000 B1.8, у складу са новоуведеним NRO тачкама, дефинисан је угао Земљине ротације ERA (Earth Rotation Angle), као дужина лука екватора CIP-а између тачака CIO и TIO, а такође и нови начин за одређивање светског времена UT1 преко овог угла. Између UT1 и ERA је успостављена једна проста линеарна веза.

На крају, у истој резолуцији, се препоручује да трансформације између GCRS-а и ITRS-а буду одређене праметрима Земљине ротације, односно углом ERA и положајима CIP-а у GCRS-у и ITRS-у.

Дакле, као што видимо, у интервалу од 1991. до 2003. године, првенствено захваљујући прецизности нових посматрачких техника и метода, издешавале су се револуционарне промене у астрометрији, које су практично одвојиле кинематику Земљиног кретања од динамике Сунчевог система. Вангалактички ICRS је наследио звездани FK5, мало покретни CIO је заменио покретну  $\gamma$  тачку, на сличан начин је TIO преузео улогу гринвичког меридијана, а (кинематички) угао ERA (независан од  $\gamma$  тачке) је заменио гринвичко звездано време (зависно од дефиниције положаја  $\gamma$  тачке).

Обзиром да је реч о врло значајним и фундаменталним новинама, у даљем тексту дајемо кратак опис кључних тачака (CIP, CIO, TIO) нових прелазних референтних система (CIRS, TIRS).

CIP је геоцентрични пол тренутног Земљиног екватора. То значи да се CIP увек налази на тренутној оси Земљине ротације, свеједно да ли је посматрали у односу на небеску сферу (GCRS) или у односу на Земљину површину (ITRS). Кретање CIP-а, у GCRS-у и ITRS-у, дефинише прецесионо-нутациона теорија IAU 2006/2000 A на коју су додају мале, посматрањем одређене, IERS-ове поправке. Прецизније говорећи, CIP раздваја кретање ITRS пола у GCRS-у на небески део и терестрички део и улога му је само да буде прелазни (intermediate) пол у трансформацији између GCRS-а (геоцентричног ICRS-а) и ITRS-а. По садашњој конвенцији:

- H – Небеско кретање CIP-а је *прецесионо-нутациона кретање* у GCRS-у. Оно обухвата: а) све чланове са периодима већим од 2 дана (у IAU моделу); б) део ретроградног дневног поларног кретања ван IAU модела, које укључује тзв. *нутацију слободног (Земљиног) језира* FCN (Free Core Nutation); в) један систематски члан који усаглашава GCRS положај CIP-а са IAU 2006/2000 A моделом у тренутку J2000.0 (јесте део модела) и г) IERS-ове поправке ( $\delta X, \delta Y$ ) за позицију CIP-а у GCRS-у које се одређују из редовних посматрања.
- T – Терестричко кретање CIP-а је *поларно кретање* у ITRS-у. Оно се одређује из посматрања, у процесу непрекидног праћења Земљине ротације и теоријских модела којим су обухваћени: а) део поларног кретања које је ван ретроградног дневног опсега и б) нутације са периодима мањим од 2 дана, без обзира на њихово физичко порекло.

CIO је тачка на екватору CIRS-а од које се рачунају ректасцензије. Она је теоријски дефинисана према концепту NRO, што значи (скоро) да нема компоненту брзине дуж екватора непокретног референтног система (GCRS, ICRS) све време током померања правога (или тренутног) екватора CIRS-а. Њена почетна локација је одређена тако да она буде што ближе нултом меридијану GCRS-а и да се ту налази са грешком од највише  $0''1$  на двестогодишњем интервалу (1900.–2100.). Почетни положај CIO тачке на CIP-овом екватору у тренутку J2000.0 био је удаљен 2.012 mas од ICRS-овог нултог меридијана, на ректасцензији  $0^h 0^m 0^s 00013416$  у ICRS-у.

Са кретањем правога (CIRS-овог) екватора, CIO би требало само да се помера у нормалном правцу према ICRS-овом екватору, тако да не мења своју ректасцензију. Међутим то се ипак догађа у веома малом износу, од око 20 mas на 100 година, што је последица намере да  $x$  - оса ICRF-а буде што ближе усмерена ка  $\gamma$  тачки за

епоху J2000.0. Узевши у обзир да се  $\gamma$  тачка креће брзином од око  $50''$  по години дуж (непокретног) екватора, да се њен положај одређује са много мањом тачношћу и да је он зависан од динамичких теорија, онда се безрезервно може закључити да је, за савремене референтне системе и високе захтеве њихових корисника, СИО далеко бољи избор од  $\gamma$  тачке.

Да бисмо показали како се одређује положај СИО тачке према NRO концепту, послужио се ознакама са Слике 3.8, где је представљена небеска сфера са Декартовим правоуглим координатним системима који материјализују ICRF и CIRF (реализације ICRS-a и CIRS-a) у неким произвољним тренуцима  $t_0$  и  $t$ .

Непокретни координатни систем  $OXYZ$ , дефинисан ICRF-ом, има основну раван  $OXY$  која садржи небески екватор. Основни правац у тој равни  $OX$  продире небеску сферу у почетној тачки екватора  $\Sigma_0$ , оса  $OZ$  продире небеску сферу у полу тог екватора (пол ICRF-a) и оса  $OY$  је тако усмерена да са осталим осама гради десни триедар.

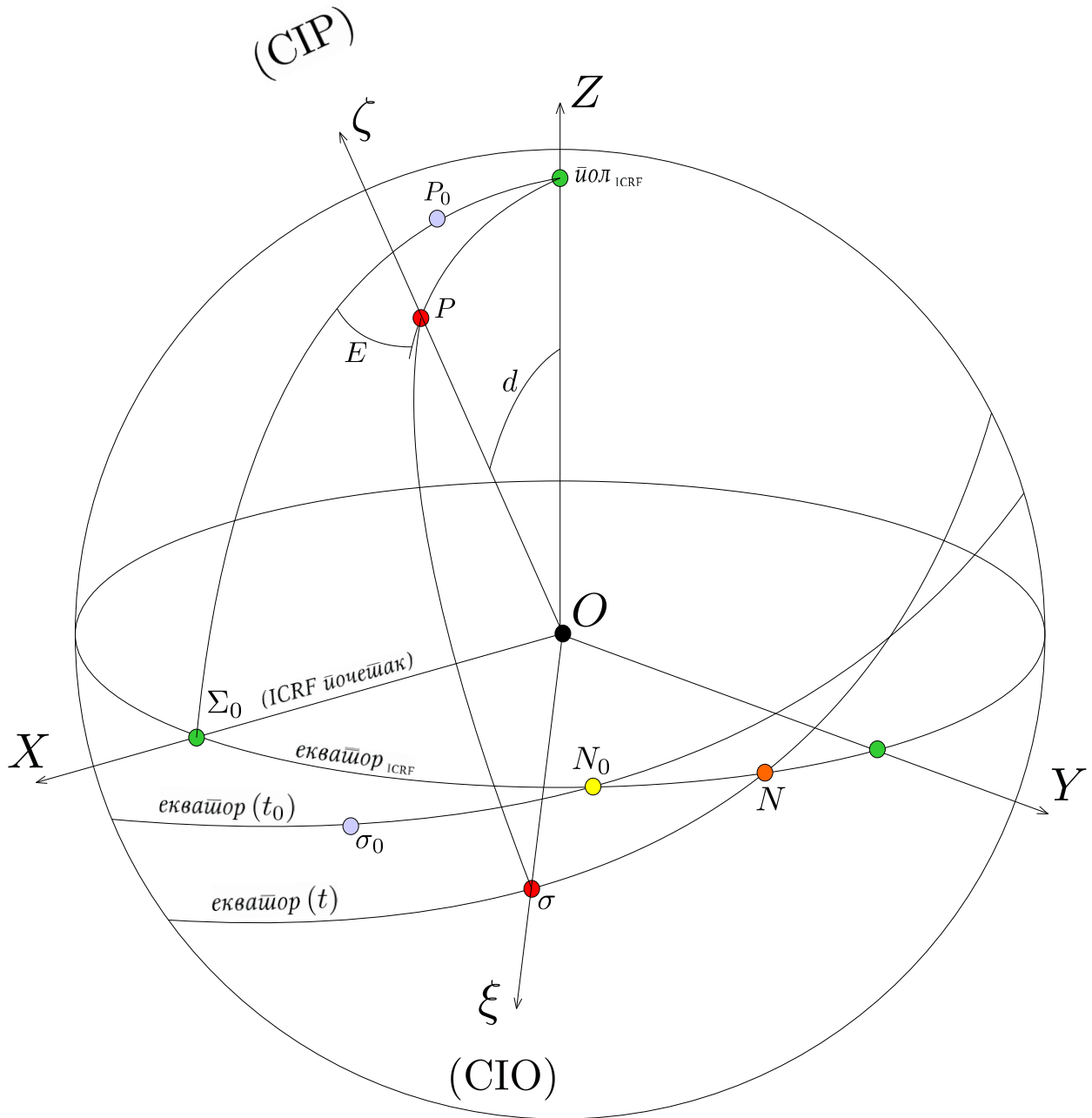
У покретном координатном систему  $O\xi\eta\zeta$ , који је дефинисан CIRF-ом, основна раван је  $O\xi\eta$ . Њен пресек са небеском сфером је тренутни екватор, а почетна тачка на том екватору, означена са  $\sigma$ , је продор осе  $O\xi$  кроз небеску сферу. Оса  $O\zeta$  је управна на раван  $O\xi\eta$ , тако да са осама  $O\xi$  и  $O\eta$  гради десни триедар. Продор осе  $O\zeta$  кроз небеску сферу, означен са  $P$ , је пол покретног екватора у тренутку  $t$ . У почетном тренутку  $t_0$  систем  $O\xi\eta\zeta$  је имао такву оријентацију да је пол тренутног екватора био у тачки  $P_0$ , а почетак на том екватору је био у тачки  $\sigma_0$ .

Да би тачка  $\sigma$  била *нероширајући поцепшак*, или СИО тачка, у покретном координатном систему  $O\xi\eta\zeta$ , потребно је да било који инфинитезимални помак пола  $P$  не повлачи за собом ротацију тог система око  $O\zeta$  осе. На коначном временском интервалу  $[t_0, t]$ , приликом кретања пола из тачке  $P_0$  у тачку  $P$ , место СИО тачке на покретном (или прелазном) екватору одређује се помоћу величине  $s$ , такозваног "СИО локатора", који се може геометријски дефинисати као разлика ректасцензија узлазних чворова  $N_0$  и  $N$  одговарајућих екватора у тренуцима  $t_0$  и  $t$ , односно

$$s = (\sigma N) - (\Sigma_0 N) - [(\sigma_0 N_0) - (\Sigma_0 N_0)], \quad (3.49)$$

где округле заграде представљају, у угловној мери изражене, дужине лукова великих кругова небеске сфере између назначених тачака (в. Слика 3.8).

У складу са дефиницијом (3.49), у радовима [30,29,31] је дата временски зависна функција  $s(t)$  која описује кретање СИО локатора преко CIP-ових правоуглих координата  $\{X, Y, Z\}$ , узимајући у обзир целокупну историју њихових промена, услед прецесионо-нутационог кретања CIP-a у GCRF-у, од тренутка  $t_0$ , који одговара почетној епохи J2000.0, до неког произвољног тренутка  $t$ . Њен облик је



Слика 3.8. Одређивање положаја СИО тачке у ICRF-у према NRO концепту на неком временском интервалу  $[t_0, t]$ . Непокретни координатни систем је означен са  $OXYZ$ , а покретни са  $O\xi\eta\zeta$ . (Према [98])

$$s(t) = -\int_{t_0}^t \frac{X(t)\dot{Y}(t) - Y(t)\dot{X}(t)}{1 + Z(t)} dt - [(\sigma_0 N_0) - (\Sigma_0 N_0)]. \quad (3.50)$$

Пошто су углови  $E = \angle(OZP, OZ\Sigma_0)$  и  $d = \angle(OP, OZ)$ , на Слици 3.8, повезани са



правоуглим координатама  $\{X, Y, Z\}$  путем израза

$$X = \sin d \cos E, \quad Y = \sin d \sin E, \quad Z = \cos d \quad (3.51)$$

и

$$E = \arctan \frac{Y}{X}, \quad d = \arctan \sqrt{\frac{X^2 + Y^2}{1 - X^2 - Y^2}}, \quad (3.52)$$

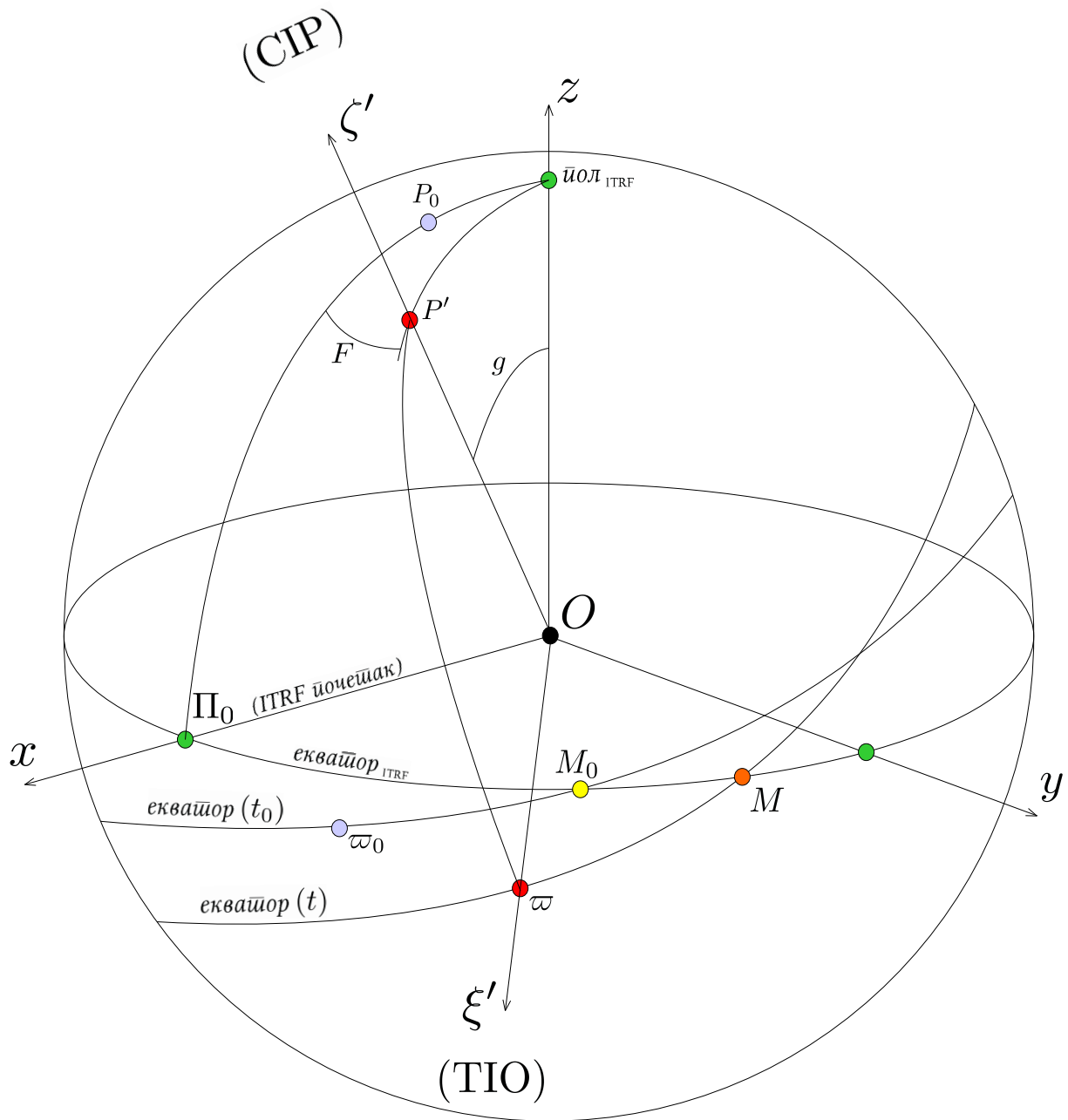
формула (3.50) има и свој еквивалентан облик

$$s = \int_{t_0}^t (\cos d - 1) \dot{E} dt - [(\sigma_0 N_0) - (\Sigma_0 N_0)]. \quad (3.53)$$

Изрази (3.50) и (3.53) се могу написати на различите начине у облику кратких апроксимативних полиномских или тригонометријских развоја са тачношћу од  $1 \mu\text{s}$  на интервалима ширине чак и преко 100 година, што потпуно задовољава практичне потребе (в. нпр. [84,30,29,98,111]), али то на овом месту није од неког посебног значаја. Важно је рећи да је, у принципу, произвољна константа  $[(\sigma_0 N_0) - (\Sigma_0 N_0)]$ , која је у почетку по конвенцији изједначавана са нулом (в. [30,98]), касније одређена у складу са захтевом да не постоји било какав дисконтинуитет резултата на почетку 2003. године, када су се нове методе редукције података и нови, NRO засновани, референтни системи званично почели користити.

Однос (реализација) референтних система CIRS и GCRS (ICRS) је веома сличан односу (реализација) небеских референтних система TIRS и ITRS. У оба случаја, постоји једна (упоришна) NRO тачка (у првом случају CIO, а у другом TIO) и заједнички покретни пол CIP, који у првом случају врши прецесионо-нутационо кретање у GCRS-у (ICRS-у), а другом случају поларно кретање у ITRS-у. Покретни (тренутни, прелазни) екватор CIP-а је такође заједнички (у оба случаја) и зато садржи обе NRO тачке, и CIO и TIO. Кретање TIO тачке у односу на CIO тачку (по овом екватору) на директан и врло прецизан начин пресликава Земљину ротацију. Због тога је угао између тачака CIO и TIO са теменом у геоцентру, који је добио име *звездани угао*, или ERA (Earth Rotation Angle), према IAU препорукама, од 2003. године заменио звездано време и преузео његову претходну улогу у дефиницији светског времена UT1. Дакле, читав TIRS се ротацијом око поларне осе за угао ERA преводи у CIRS.

TIO је NRO тачка на екватору TIRS-а која је у ITRS-у још стабилнија, него CIO тачка у GCRS-у (ICRS-у), јер се CIP (гледано из геоцентра) помера на врло малој угловној раздаљини од ITRS-овог пола. Положај TIO тачке, у неком тренутку  $t$ , дефинише мала величина  $s'$ , тзв. "TIO локатор", која зависи од историје свих претходних промена координата CIP-а у ITRF-у, од неке почетне епохе  $t_0$ .



**Слика 3.9.** Одређивање положаја ТИО тачке у ITRF-у према NRO концепту на неком временском интервалу  $[t_0, t]$ . Непокретни координатни систем је означен са  $Oxyz$ , а покретни са  $O\xi'\eta'\zeta'$ . (Према [98])

Служећи се ознакама са Сlike 3.9, где су представљени правоугаони координатни системи  $Oxyz$  и  $O\xi'\eta'\zeta'$ , који материјализују ITRF и TIRF (реализације ITRS-a и TIRS-a), величину  $s'$  за позиционирање ТИО тачке (аналогно величини  $s$  за СИО тачку) можемо представити као разлику лонгитуда узлазних чворова  $M_0$  и  $M$  одговарајућих екватора

у тренуцима  $t_0$  и  $t$ ,

$$s' = (\varpi M) - (P_0 M) - [(\varpi_0 M_0) - (P_0 M_0)] , \quad (3.54)$$

Упоредљем слика 3.9 и 3.8, лако увиђамо да тачке  $\varpi$ ,  $\varpi_0$ ,  $P_0$ ,  $M_0$ ,  $M_0$  и  $P'$  у ITRF-у и ITRF-у имају исти смисао као и тачке  $\sigma$ ,  $\sigma_0$ ,  $\Sigma_0$ ,  $N_0$ ,  $N_0$  и  $P$  у CIRF-у и ICRF-у, наведеним редоследом, стога није потребно посебно објашњавати њихово значење. Исто запажање се односи и на одговарајуће углове  $F$ ,  $g$  и  $E$ ,  $d$ , па се "ТЮ локатор" у неком тренутку  $t$  одређује решавањем интеграла

$$s'(t) = -\frac{1}{2} \int_{t_0}^t (x(t)y(t) - y(t)x(t)) dt , \quad (3.55)$$

или његовим еквивалентом

$$s' = \int_{t_0}^t (\cos g - 1) \dot{F} dt . \quad (3.56)$$

У изразима (3.55) и (3.56) је претпостављено да се ТЮ тачка  $\varpi$  у тренутку  $t_0$  поклапала са почетном тачком на екватору ITRF-а, односно да је  $\varpi_0 \equiv P_0$ , због чега је константа  $[(\varpi_0 M_0) - (P_0 M_0)] = 0$ . Такође, искоришћена је и чињеница да је  $z$  координата CIP-а практично једнака јединици (са грешком испод  $1 \mu\text{as}$ ), због малих угловних вредности преосталих координата<sup>119</sup>.

Величина  $s'$  је изузетно мала и зато је потребно узимати у обзир само у најпрецизнијим редуцијама. Тако, највећа удаљења ТЮ тачке од њене почетне позиције у тренутку J2000.0, када је била поствљена у почетну тачку ITRF-овог екватора, износе мање од  $0.1 \text{ mas}$  на интервалу [1900–2100]. У [100] је изведена једноставна апроксимативна формула за израчунавање вредности функције  $s'(t)$  у 21. веку,

$$s'(t) = -47t , \quad (3.57)$$

у којој је аргумент  $t$  изражен у јулијанским вековима протеклих од тренутка J2000.0 (1.5 јануар 2000., JD2451545.0, TT), а функција  $s'(t)$  у лучним микросекундама ( $\mu\text{as}$ ).

На крају овог одељка о прелазним референтним системима (CIRS, TIRS), погледајмо како се посредством њихових елемената врши трансформација координата ITRS-а у координате GCRS-а (или геоцентричног ICRS-а).

<sup>119</sup> Вектор положаја CIP-а је јединични у ITRF-у и GCRF-у. Према [84], приближне "угловне вредности" правоуглих координата CIP-а се добијају када се оне помноже са  $180 \cdot 60 \cdot 60 / \pi$ .

Ако сада уведемо следеће ознаке:  $\{x, y, z\}$  – неки вектор у ITRS-у,  $\{X, Y, Z\}$  – одговарајући вектор у GCRS-у,  $Q$  – прецесионо нутациона матрица,  $R$  – ротациона матрица за угао  $ERA$  која TIRS преводи у CIRS и  $W$  – матрица поларног кретања; онда се трансформација координата ITRS-а у координате GCRS-а за неки тренутак  $t$  представља у облику матричног производа

$$\begin{pmatrix} X \\ Y \\ Z \end{pmatrix} = Q(t) \cdot R(t) \cdot W(t) \cdot \begin{pmatrix} x \\ y \\ z \end{pmatrix}. \quad (3.58)$$

Трансформационе матрице  $W(t)$ ,  $R(t)$  и  $Q(t)$  се добијају елементарним ротацијама<sup>120</sup> око координатних оса на следећи начин:

$$\left. \begin{aligned} W(t) &= R_3(-s') \cdot R_2(x) \cdot R_1(y) && \{\text{ITRS} \rightarrow \text{TIRS}\} \\ R(t) &= R_3(-ERA) && \{\text{TIRS} \rightarrow \text{CIRS}\} \\ Q(t) &= R_3(-E) \cdot R_2(-d) \cdot R_3(E) \cdot R_3(s) && \{\text{CIRS} \rightarrow \text{GCRS}\} \end{aligned} \right\}. \quad (3.59)$$

Прецесионо-нутациона матрица  $Q(t)$  се може изразити и као функција "угловних координата" CIP-а,  $(X_p, Y_p)$ , у GCRS-у:

$$Q(t) = \begin{pmatrix} 1 - aX_p^2 & -aX_pY_p & X_p \\ -aX_pY_p & 1 - aY_p^2 & Y_p \\ -X_p & -Y_p & 1 - a(X_p^2 + Y_p^2) \end{pmatrix} \cdot R_3(s), \quad (3.60)$$

где је

$$a = \frac{1}{1 + \cos d} \approx \frac{1}{2} + \frac{1}{8}(X_p^2 + Y_p^2), \quad (3.61)$$

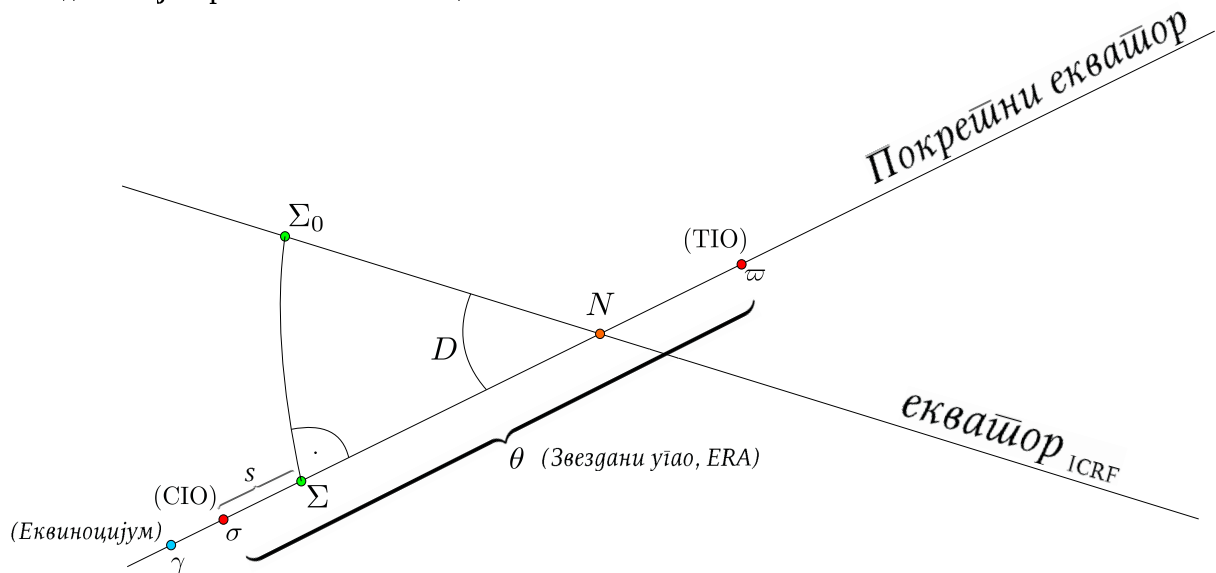
са грешком апроксимације у (3.61) не већом од  $1 \mu\text{as}$ .

<sup>120</sup> Ротационе матрице  $R_i(\varrho)$  за неки (позитивни) угао  $\varrho$  око апцисне ( $i=1$ ), ординатне ( $i=2$ ) и апликативне осе ( $i=3$ ) у Декартовом правоуглом координатном систему су редом:

$$\begin{pmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & \cos \varrho & \sin \varrho \\ 0 & -\sin \varrho & \cos \varrho \end{pmatrix}, \quad \begin{pmatrix} \cos \varrho & 0 & -\sin \varrho \\ 0 & 1 & 0 \\ \sin \varrho & 0 & \cos \varrho \end{pmatrix}, \quad \begin{pmatrix} \cos \varrho & \sin \varrho & 0 \\ -\sin \varrho & \cos \varrho & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{pmatrix}$$

### 3.3.5. Време UT1

Према препоруци Међународне астрономске уније, као што је већ речено, уместо звезданог времена, зависног од тачности положаја  $\gamma$  тачке, од 2003. године користи се звездани угао ERA, који је дефинисан прецизним положајима две NRO тачке, CIO и TIO, на (заједничком) покретном екватору оба прелазна референтна система (CIRS, TIRS), како је приказано на Слици 3.10.



Слика 3.10. Дефиниција звезданог угла ERA. (Према [98])

Обзиром да је време UT1 било дефинисано преко звезданог времена, са увођењем угла ERA, уследила је и нова дефиниција за UT1, која га је непосредније и тачније повезала са Земљином ротацијом [30].

Светско време UT1 се сада дефинише преко звезданог угла ERA путем једноставне линеарне везе (са тачноћу од  $1 \mu\text{s}$ )

$$ERA(T_u) = 2\pi(0.7790572732640 + 1.00273781191135448 T_u) \quad (3.62)$$

или, њој еквивалентне,

$$ERA(T_u) = 2\pi( F_{UT1}(JD) + 0.7790572732640 + 0.00273781191135448 T_u ), \quad (3.63)$$

где је

$$T_u = (\text{Јулијански UT1 тренутак}) - 2451545.0 ,$$

а  $F_{UT1}(JD)$  је део, или фракција, јулијанског дана по UT1 времену<sup>121</sup>.

<sup>121</sup> На пример:  $0^{\text{h}} \text{ UT1} \Rightarrow F_0(JD) = 0.5$ ,  $21^{\text{h}} \text{ UT1} \Rightarrow F_{21}(JD) = 0.375$ , итд.

У пракси Јулијански UT1 тренутак се одређује преко UTC времена на следећи начин

$$\text{Јулијански UT1 тренутак} = \text{JD}_{0^{\text{h}}_{\text{UTC}}} + \text{UTC} + (\text{UT1} - \text{UTC})_{\text{IERS}} ,$$

при чему је  $\text{JD}_{0^{\text{h}}_{\text{UTC}}}$  редни број јулијанског дана који је почео у 12<sup>h</sup> UTC претходног дана увећан за 0.5, UTC је временски интервал који је протекао од поноћи (0<sup>h</sup> UTC) у данима и  $(\text{UT1} - \text{UTC})_{\text{IERS}}$  је параметар Земљине ротације који изводи IERS, исто изражен у данима.

Угао ERA је у једнакостима (3.62) и (3.63) изражен у радијанима. Када је изражен у временским јединицама, онда се (3.62) и (3.63) свODE на

$$\text{ERA}(T_u) = 67310^{\text{s}}:548 + 86636^{\text{s}}:546949141027086 T_u , \quad (3.64)$$

што је аналогон вези између GMST1 и UT1 у (3.43).

Нова и претходна дефиниција времена UT1 су практично идентичне у границама тачности претходне дефиниције. Њихово разилажење је унутар 2  $\mu\text{s}$  током наредних неколико деценија, а у наредних 200 година ће достићи највише 50  $\mu\text{s}$ . Као пре, тако и сада UT1 јесте средње сунчано време на Гринвичком меридијану (у квантитативном смислу), иако више ни у каквој вези није са динамиком Земљиног кретања у Сунчевом систему. Све досадашње промене, укључујући и последњу, обезбеђивале су континуитет скале светског времена.

Последња дефиниција UT1 није више зависна од будућих промена прецесионог и нутационог модела, јер се угао ERA одређује из екстремно прецизних VLBI посматрања непокретних вангалактичких објеката који сачињавају фиксни ICRF.

### 3.4. ДИНАМИЧКО ВРЕМЕ

Концепт динамичког времена је произишао из настојања да се превазиђу недостаци скале светског времена, чију униформност нарушава променљива брзина Земљине ротације. Основа тог концепта је већ поменута на крају одељка 2.2.

Под динамичким временом се подразумева аргумент у једначинама орбиталног кретања тела Сунчевог система. Претпоставља се, при томе, да те једначине описују кретање у оквиру неке усвојене динамичке теорије, да се односе на неки (прецизно дефинисан) референтни систем и да њихов аргумент, неко теоријско време дефинисано у том референтном систему, има идеално равномерни ход. Скалу таквог времена дефинишу сами положаји тела током кретања, јер су (теоријски) повезани са сваким тренутком у њој.

Прва реализација динамичког времена је било *ефемеридно време* ET (Ephemeris Time). Њега су наследила два недовољно коректно дефинисана релативистичка динамичка времена, *барицентрично динамичко време* TDB (Barycentric Dynamical Time) и *терестричко динамичко време* TDT (Terrestrial Dynamical Time), која су касније претрпела неколико ревизија, а време TDT је применовано у *терестричко време* TT (Terrestrial Time), с обзиром да је одредница "динамичко" у његовом називу била проблематична. На крају су уведена и два доследније дефинисана релативистичка времена, *барицентрично координатно време* TCB (Barycentric Coordinate Time) и *геоцентрично координатно време* TCG (Geocentric Coordinate Time).

Као аргумент у астрономским годишњацима, од 1960. до краја 1983. године, коришћено је време ET. Од 1984., астрономске ефемериде се реализују у скали TDB времена, иако је у протеклом раздобљу неколико пута ревидирана његова дефиниција. Времена TCB и TCG до сада још нису коришћена као аргумент у астрономским ефемеридама, иако су дефинисана 1991. године. Време TCG, које се препоручје за сва мерења на Земљи и њеној блиској околини, се углавном користи на индиректан начин, преко терестричког времена TT, са којим је у линеарној вези.

### 3.4.1. Ефемеридно време (ET)

Идеја о концепцији ефемеридног времена се развијала упоредо са сумњама и сазнањима о неравномерности Земљине ротације. Она је имала своју логичну предисторију која је трајала више од 150 година, пре него што је Међународна астрономска унија половином XX века усвојила дефиницију ET времена и препоручила га за употребу уместо светског времена.

Астрономска посматрања Халеја (у XVIII веку) и Ханзена (у XIX веку) су била довољно прецизна да се примети разлика теоријских и посматраних положаја Месеца. Делоне-ова аналитичка теорија је средином XIX века могла само половину тих (из посматрања уочених) разлика да објасни. Евидентно Месечево секуларно убрзање по лонгитуди није се уклапало ни у Њукомбову теорију Месечевог кретања са краја XIX века, па је она употпуњена додавањем тзв. "великог емпиријског члана"

$$10''.71 \sin(240^\circ.7 + 140^\circ.0 T) , \quad (3.65)$$

( $T$  је број јулијанских векова од 0. јануара 1900.), који је ушао и у, својевремено најтачнију, Браунову теорију из 1919. године.

Тај емпиријски члан се могао приписати несавршеностима гравитационе теорије, али, такође, и неравномерној Земљиној ротацији. Ако се ради о другој могућности, Њукомб је исправно претпоставио да слична одступања од (теоријски предвиђених) положаја морају постојати и код осталих тела Сунчевог система. То су прво наговестила истраживања Коуела<sup>121</sup> из 1905., а затим потврдили радови [134,143,136], де Ситера (1927.), Стојка (1937) и Спенсера Џонса (1939.), из којих се могао извући закључак да се кретање било ког тела у Сунчевом систему може искористити за дефинисање јединствене равномерне временске скале и, са друге стране, да се у тој скали може констатовати постојање секуларног успорења и сезонских варијација у брзини Земљине ротације.

Резултати истраживања Фодерингема, де Ситера и, нарочито, Спенсера Џонса из 20-тих и 30-тих година прошлог века су веома значајни јер су они, уз Њукомбове таблице Сунца [121] и Браунову теорију кретања Месеца, били основа на којој је касније реализована и одржавана временска скала ЕТ.

У раду Спенсера Џонса [136] је, уместо Њукомбовог великог емпиријског члана за лонгитуду Месеца, наведен адекватнији параболички члан

$$4''.65 + 12''.96 T + 5''.22 T^2, \quad (3.66)$$

у коме аргумент  $T$  има исто значење као у (3.65). Узимајући у обзир (3.66) и Браунову теорију, лонгитуда Месеца се онда могла израчунати из

$$L_M = L_{\text{BROWN}} - 10''.71 \sin(240^\circ.7 + 140^\circ.0 T) + 4''.65 + 12''.96 T + 5''.22 T^2. \quad (3.67)$$

Међутим, пошто се ни формулом (3.67) нису могли добити вредности које су у потпуности идентичне измереним лонгитудама Месеца, мале разлике

$$B = L_{\text{ПОСМАТРАЊЕ}} - L_M, \quad (3.68)$$

тзв. *флукуације Месечеве лонгитуде*, морале су бити одређиване из посматрања. Када је  $B$  познато, поправке које је требало додавати на вредност Месечеве лонгитуде из Браунових таблица,  $\Delta L_M$ , су се онда одређивале помоћу израза

$$\Delta L_M = L_{\text{ПОСМАТРАЊЕ}} - L_{\text{BROWN}} = 4''.65 + 12''.96 T + 5''.22 T^2 - 10''.71 \sin(240^\circ.7 + 140^\circ.0 T) + B. \quad (3.69)$$

<sup>121</sup> Коуел (Cowell) је 1905. године открио секуларно убрзање у кретању Сунца, а касније је исти ефекат откривен и у кретањима Меркура и Венере.



Спенсер Џонс је у [136], користећи бројна астрономска посматрања у широком временском распону, извео поправке лонгитуда Сунца, Меркура и Венере Сунца према једном фиксном моделу, који је укључивао секуларно убрзање у лонгитуди и величину  $B$ , одређену из посматрања Месеца. Тако је за поправку лонгитуде Сунца (из Њукомбових таблица) добио израз

$$\Delta L_s = 1''0 + 2''97 T + 1''23 T^2 + 0.0748 B, \quad (3.70)$$

који је касније искоришћен за одређивање разлике ефемеридног и светског времена.

Дефинисање ефемеридног времена и његове јединице, ефемеридне секунде, био је један дуг и компликован процес, који потрајао читаву деценију, од 1948. до 1958. године (в. [111]).

Клеменс се у једном делу свог рада о астрономским константама [36] из 1948. године бавио и проблемом разлика између равномерног "њутновског времена" у ефемеридама и светског времена зависног од променљиве Земљине ротације, наглашавајући да би требало корекције светског времена за свођење на "њутновско време" објављивати у националним ефемеридама. Када је објавио свој рад, а и много деценија касније, Клеменс није знао да је Данжон још 1929. године у [37] објавио готово идентичну идеју о погоднијој временској скали, заснованој на орбиталном кретању Земље око Сунца, коју је исто називао "њутновским временом", а користио је и назив "динамичко време".

Две године касније, 1950. године одржан је у Паризу *Међународни колоквијум о фундаменталним константама у астрономији*, коме је председавао Данжон, тада актуелни директор париске астрономске опсерваторије, а један од учесника је био и Клеменс, који је изнео своја гледишта о неминовности дефинисања временске јединице независне од Земљине ротације. Слично су учинили још и неки други учесници, са незнатним разликама у мишљењима, због чега је на крају Колоквијума донета Препорука следеће садржине (према [111]):

*"Конференција препоручује да, у свим случајевима где секунда средњеј сунчаној времена незадовољава као јединица времена збој своје променљивости, усвојена јединица треба да буде сидерална година 1900.0; да време које се рачуна у тим јединицама носи назив Ефемеридно време; да се претварање средњеј сунчаној времена у ефемеридно време врши довањем следеће појравке*

$$\Delta T = 24^s 349 + 72^s 3165 T + 29^s 949 T^2 + 1.821 B,$$

*где се  $T$  рачуна у јулијанским вековима од средњеј тринвичкој поднева 0. јануара 1900. и величина  $B$  има значење које јој је дао Сјенсер Цонс у часопису *Monthly Notices R.A.S.* (Vol. 99, 1939, p. 541) и да њорња формула такође треба да дефинише и секунду (Сјенсер Цонс, 1939.) ... "*

Горња препорука је, са незнатним изменама (у коефицијентима), усвојена на VIII Генералној скупштини IAU у Риму 1952. године, тако да израз за поправку  $\Delta T$  од тада има облик<sup>122</sup>

$$\Delta T = ET - UT = 24^{\circ}349 + 72^{\circ}318 T + 29^{\circ}950 T^2 + 1.82144 B. \quad (3.71)$$

Данжон је касније приметио да је, уместо сидералне године, боље ставити тропску годину у основу дефиниције ефемеридног времена, пошто на њу не утиче вредност усвојене прецесионе константе. Зато је већ 1954. године, по препоруци СГРМ-а, на 10.-том СГРМ-у предложена дефиниција секунде:

*"Секунда је  $1/31\,556\,925.975$  део шројске године за 1900.0",*

која је директно произишла<sup>123</sup> из Њукомбове средње лонгитуде Сунца [121]

$$L = 279^{\circ}41'48''.04 + 129\,602\,768''.13 T + 1''.089 T^2. \quad (3.72)$$

за тренутак  $T=0$ , коме одговара  $12^{\text{h}}$  UT 0. јануара 1900. године.

Ову дефиницију секунде је IAU усвојила 1955. година на Генералној скупштини, али је Данжон накнадно приговорио како би та дефиниција ипак морала да буде прецизнија, због тачнијег израчунавања лонгитуде Сунца при већим вредностима аргумента  $T$  у изразу (3.72). Зато је у октобру 1956. године СГРМ мало прецизније дефинисао секунду:

*"Секунда је  $1/31\,556\,925.9747$  део шројске године за 1900., 0. јануара у  $12^{\text{h}}$  ефемеридној времена.",*

која је формално одобрена на 11-том СГРМ-у 1960. године. То је била прва званична дефиниција секунде као јединице за мерење времена.

<sup>122</sup> Поправка  $\Delta T$  се може добити из (3.70), узимајући у обзир да интервал времена у коме се средња лонгитуда Сунца промени за  $1''$  износи  $365.2422 \cdot 86400 / (360 \cdot 60 \cdot 60) = 24^{\circ}3495$ . Одатле следи да се поправка  $\Delta T$  у временским секундама преставља као  $\Delta T = 24^{\circ}3495 \cdot \Delta L_s$ , што је еквивалентно формули (3.71).

<sup>123</sup> За  $T=0 \Rightarrow L'_T = 129602768''.13$  на 100 година  $\Rightarrow L'_T = 1296027''.6813$  на 1 годину  $\Rightarrow 365.25 \cdot 86400 \cdot (360 \cdot 60 \cdot 60)'' / 1296027''.6813 = 31556925.97474 \dots$

У међувремену, на X Генералној скупштини IAU у Москви 1958. године званично је дефинисана и епоха скале ефемеридног времена (ЕТ) следећом реченицом:

"Ефемеридно време (ЕТ) се рачуна од тренутка, блиској почетку календарске године 1900., када је геометријска средња лонгитуда Сунца била  $279^{\circ}41'48''.04$ , у ком тренутку је мера ефемеридног времена била тачно 1900. јануара  $0^d 12^h$ ." ;

тако да је крајем 50-тих година прошлог века ефемеридно време било потпуно дефинисано и покривено одлукама свих релевантних међународних организација.

Сумирајући претходне чињенице, за ЕТ можемо укратко рећи:

- да је то идеално равномерно време каквим га је подразумевала (нерелативистичка) гравитациона теорија кретања тела Сунчевог система;
- да је практично реализовано коришћењем (Њукомбове) формуле (3.72) за средњу лонгитуду Сунца, у којој се аргумент  $T$  рачуна у јулијанским вековима (= 36525 ефемеридних дана) од почетног тренутка  $0^d.5$  јануара 1900. (ефемеридног времена), када је средња геометријска лонгитуда Сунца (рачуната од средње  $\gamma$  тачке у том тренутку) износила  $279^{\circ}41'48''.04$ ; и
- да је јединица за време, ефемеридна секунда, дефинисана као  $1/31\,556\,925.9747$  део тропске године за епоху 1900.0, која траје  $365.24219878177$  ефемеридних дана од  $86400$  ефемеридних секунди .

На тај начин, Њукомбове таблице Сунца [121] из 1895. године су биле практична реализација скале ефемеридног времена које се користило у водећим астрономским годишњацима<sup>124</sup> од почетка 1960. до краја 1983.<sup>125</sup> или 1985. године<sup>126</sup>.

Релативно кратак употребни век ефемеридног времена био је последица више разлога:

- Време ЕТ није било доступно у реалном времену, већ након обраде астрономских посматрања тела Сунчевог система;
- Иако је ЕТ дефинисано према Њукомбовој формули (3.72) за лонгитуду Сунца, у пракси се оно одређивало из посматрања положаја Месеца у односу на звезде које су материјализовале небески референтни систем, јер директно посматрање

<sup>124</sup> Изузев француског годишњака *Connaissance des Temps*, у коме је за израду ефемерида, уместо Њукомбове, коришћена Леверјеова теорија. Између француских и осталих ефемерида није постојала битна разлика.

<sup>125</sup> На пример, *The Astronomical Ephemeris and The American Ephemeris and Nautical Almanac*, од издања за 1981. годину и надаље, са новим именом: *The Astronomical Almanac*.

<sup>126</sup> *Астрономический Ежегодник СССР*

Сунца је врло тешко и непрецизно, а планете немају довољно велико средње дневно кретање да би се одступање  $\Delta T$  могло добро одредити. Из посматрања су добијане мерене лонгитуде Месеца и коришћењем Браунових таблица и једначине (3.69) одређиване су флукуације Месечеве лонгитуде  $B$ , а затим помоћу формуле (3.71) израчунавале разлике  $\Delta T = ET - UT1$  ;

- У Брауновој теорији кретања Месеца је откривено неколико грешака током 60-тих година, а и усвојен је нови систем астрономских констаната (1964.), тако да је она морала бити коригована. Почетком 70-тих извршена је још једна корекција, због урачунавања соларних поремећаја, тако да је свака исправка повлачила и нову верзију ET времена (верзије: ET0, ET1, ET2) базирану на побољшаним ефемеридима Месеца ILE (Improved Lunar Ephemeris) ;
- Убрзани развој дигиталних рачунара током 60-тих је избацио у први план предности нумеричких метода над аналитичким, тако да је и кретање тела у Сунчевом систему почело све више да се одређује нумеричким интеграцијама ;
- Са релативистичког становишта није било могуће одредити да ли је ET координатно или сопствено време, а са друге стране, у нумеричким интеграцијама је било лако обрачунавати релативистичке ефекте ;
- У време увођења ефемеридног времена, већ је атомско време било у употреби, тако да је званичну јединицу за време, ефемеридну секунду, после само седам година заменила атомска секунда, која је дефинисана трајањем одређених квантно-механичких процеса у атому цезијума. Скала атомског времена је у наредне две деценије показала своје многобројне практичне предности ;

ET скала од почетка 1984. године није више користила. Њу су наследиле две релативистички дефинисане динамичке скале: Барицентрично динамичко време (TDB) и Терестричко динамичко време (TDT).

#### 3.4.2. Барицентрично и терестричко динамичко време (TDB, TDT)

Под динамичким временом се подразумева аргумент у једначинама кретања тела Сунчевог система. ET време, које је имало улогу идеално равномерног динамичког времена, показало се да је проблематично у многим аспектима, тако је IAU на Генералној скупштини 1976. године у Греноблу усвојила *Прејоруку 5* о временској скали за динамичке теорије и ефемериде:

"Препоручује се да:

- (a) у тренутку  $0^h 0^m 0^s$  TAI  $1^d$  јануара 1977., вредности временске скале за привидне геоцентричне ефемериде буде тачно  $1^d 0003725$  јануара 1977. ( $1^d 0^h 0^m 32^s.184$ );
- (b) јединица ове временске скале буде дан од 86400 SI секунди на средњем нивоу мора;
- (c) временске скале за једначине кретања које се односе на барицентар буду такве да постоје само периодичне варијације између ових скала и оне за привидне геоцентричне ефемериде;
- (d) не буде скока у скали Међународној атомској времена (TAI)".

Уз ове препоруке приложена су детаљна објашњења која су дискутована на следећој Генералној скупштини IAU у Монреалу 1979. године. Тамо су дефинитивно усвојена имена и дефиниције двеју временских скала (према горњим препорукама): Терестричко динамичко време, са ознаком TDT, и Барицентрично динамичко време, са ознаком TDB.

TDT је дефинисано као наставак ET времена. То је теоријска временска скала за привидне геоцентричне ефемериде тела Сунчевог система и из практичних разлога је одређено да његов однос према TAI времену буде исти као што га је имао ET, односно да је

$$\text{TDT} = \text{TAI} + 32^s.184 \quad (3.73)$$

TDB се дефинише као аргумент у једначинама кретања за тела Сунчевог система у односу на барицентар свих тела у том систему. За разлику од TDT-а, који није теоријски зависан, TDB зависи од коришћене гравитационе теорије, од астрономских констаната и од положаја и кретања осталих тела у Сунчевом систему. Може се апроксимативно изразити у функцији од TDT на следећи начин [111]:

$$\begin{aligned} \text{TDB} \approx & \text{TDT} + 0^s.001658 \sin(g + 0.0167 \sin g) \\ & + \text{лунарни и планетарни чланови } 10^{-5} \text{ реда,} \\ & + \text{дневни чланови } 10^{-6} \text{ реда} \end{aligned} \quad (3.74)$$

где је  $g$  средња аномалија Земље током кретања на њеној орбити,

$$g = (357^\circ.528 + 35999^\circ.05 T) \cdot \frac{2\pi}{360^\circ} \quad (3.75),$$

и

$$T = \frac{t_{\text{TDB}} - 2451545.0}{36525}.$$

TDB се може приближно представити и у облику

$$\text{TDB} \approx \text{TDT} + 0^{\text{s}}.001658 \sin g + 0^{\text{s}}.000014 \sin 2g, \quad (3.74)$$

где је

$$g = 357^{\circ}.53 + 0.9856003 \cdot (\text{JD} - 2451545.0)$$

и JD је јулијански тренутак, дат на две децимале [44].

Врећемске скале TDB и TDT су биле уведене у званичну употребу од почетка 1984. године. Међутим, у вези њихове динамичке и релативистичке природе било је доста примедби и дискусија у наредним годинама.

IAU је 1991. године редефинисала TDT и преименовала га у терестричко време TT, а време TDB, које је било замишљено као релативистичка верзија ET-а за израчунавања планетских ефемерида, требало је да буде замењено барицентричним координатним временом TCG. Међутим, иако је TDB било проблематично у самој дефиницији<sup>127</sup>, оно се, уз извесна званична појашњавања, одржало до данас, као време које се директно везује за конкретне планетске ефемериде. Резолуцијом В3 (IAU Праг, 2006.) установљена је једна линеарна веза између TDB и TCG.

### 3.4.3. Барицентрично и геоцентрично координатно време (TCB, TCG)

IAU резолуцијом А4 из 1991. године дефинисани су четвородимензионални системи, BRS (барицентрични референтни систем) и GRS (геоцентрични референтни систем), преко метричког тензора за просторно-временски систем координата  $(t, \mathbf{x})$  у облику

$$\left. \begin{aligned} g_{00} &= -1 + \frac{2}{c^2} U(t, \mathbf{x}) + \mathcal{O}(c^{-4}) \\ g_{0i} &= \mathcal{O}(c^{-4}) \\ g_{ij} &= \delta_{ij} \left( 1 + \frac{2}{c^2} U(t, \mathbf{x}) \right) + \mathcal{O}(c^{-4}) \end{aligned} \right\}, \quad (3.75)$$

где је  $U$  – сума (Њутновских) гравитационих потенцијала од свих маса у систему, а  $c$  – брзина светлости у вакууму. Облик тензора (3.75) је исти у оба референтна система, само се разликују вредности потенцијала. Временске координате у BRS-у и GRS-у су назване: *барицентрично координатно време* (TCB) и *геоцентрично*

<sup>127</sup> На пример, недостајали су му прецизна дефиниција епохе од које се рачуна и дефиниција метрике за пребацивања на времена различитих посматрача, постојао је проблем фиксне временске јединице у динамичком систему итд.

координатно време (TCG), респективно. Уз то, у GRS-у је дефинисано још једно координатно време, терестричко време (TT) које је у линеарној вези са геоцентричним координатним временом TCG, како је наведено у (3.33), само што је константа  $L_c$  прво била дефинисана као  $L_c = U_c/c^2$ , а касније, IAU одлукама (2000.) је промењена у дефинициону константу.

IAU резолуцијама B1.3 и B1.4 из 2000. године метрички тензор (3.75) референчних система BRS и GRS је редефинисан тачнијим развојима у којима се уместо чисто гравитационог потенцијала користе гравито-електрични скаларни потенцијал и гравито-магнетни векторски поенцијал [135]. BRS и GRS су добили нова имена: BCRS (*Барицентрични небески референчни систем*) и GCRS (*Геоцентрични небески референчни систем*), а њихове временске координате TCB и TCG су остале исте. У свим парктичним применама подразумевана оријентација BCRS је према координатним осама ICRS-а, а оријентација GCRS-а се изводи из BCRS-ове, који је оријентисан према ICRS-у (према IAU резолуцији B2, 2006.).

Почетак временских скала TCB и TCG је произвољан, али је због везе са осталим скалама узето да буде исти као и почетак TT скале,  $0^h 0^m 0^s$  TAI 1. јануара 1977. Реализације TCB и TCG се, по аналогији са TT, означавају са TCB(xyz) или TCG(xyz) (на пример, TCB(TAI)).

Веза између TCB и TCG је дефинисана интегралом

$$TCB - TCB = \frac{1}{c^2} \left( \int_{t_0}^t \left( \frac{1}{2} \mathbf{v}_e^2 + U_{\text{ext}}(\mathbf{x}_e) \right) dt + \mathbf{v}_e \cdot (\mathbf{x} - \mathbf{x}_e) \right) + \mathcal{O}(c^{-4}), \quad (3.76)$$

у коме вектори  $\mathbf{x}_e$  и  $\mathbf{v}_e$  представљају барицентрични положај и брзину центра масе Земље, а  $\mathbf{x}$  је барицентрични вектор положаја посматрача. У интегралу (3.76) време  $t$  је TCB, тако да се  $t_0$  поклапа са епохом TT скале.  $U_{\text{ext}}$  је њутновски потенцијал који потиче од свих тела Сунчевог система који гравитационо дејствују на Земљу и односи се на геоцентар.

Уместо (3.76) може се користити приближан израз (дат у [82]):

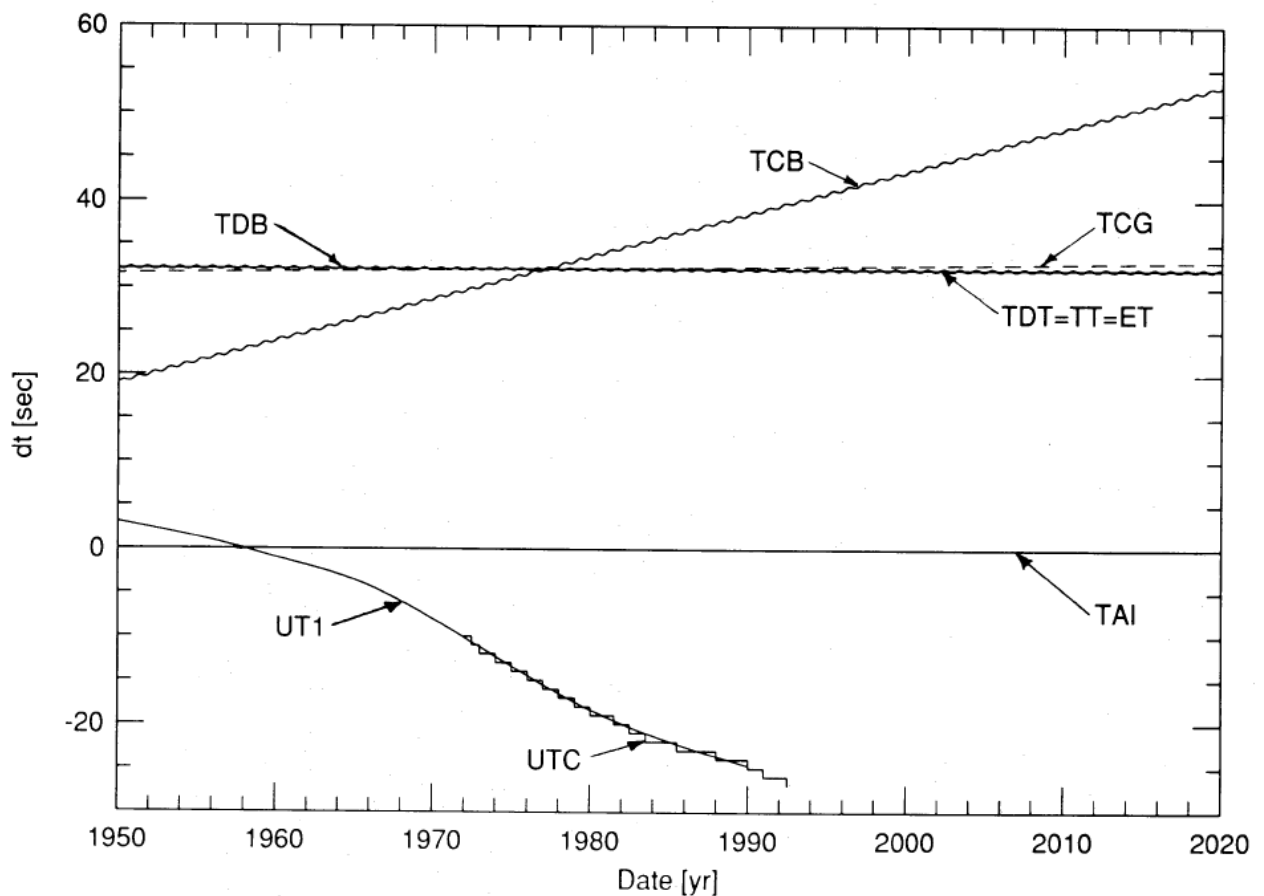
$$TCB - TCB = \frac{L_c \times (TT - TT_0) + P(TT) - P(TT_0)}{1 - L_B} + \frac{1}{c^2} \mathbf{v}_e \cdot (\mathbf{x} - \mathbf{x}_e), \quad (3.77)$$

где  $L_B = 1.550519768 \times 10^{-8}$ ,  $L_c = 1.48082686741 \times 10^{-8} (\pm 2 \times 10^{-17})$  [82],  $TT_0$  одговара тренутку JD2443144.5 ( $0^h 0^m 0^s$  TAI 1. јануар 1977.), а  $P(TT)$  периодични чланови са амплитудама од око 1.6 ms који се могу одредити користећи аналитички модел из [46], или нумеричке временске ефемериде TE405 [85] за одређивање разлике  $P(TT) - P(TT_0)$ .

Према IAU препоруци из 2006. године, када је TDB прецизније дефинисано, веза између TDB и TCB у секундама је дата са

$$TDB = TCB - L_B \times (JD_{TCB} - 2443144.5003725) \times 86400 - 6.55 \times 10^{-5}. \quad (3.78)$$

Обзиром да због дилатације времена SI секунда, рализована у различитим референтним системима, није иста, ни ход времена TCB, TCG, TT и TDB није исти. На пример, часовник који ради по TCG-у накупи за годину дана 20 милисекунди више него исти такав часовник који показује TT време. Разлика између TCB-а и TT-а у истом периоду достиже скоро пола секунде. На Слици 3.11 су приказане ове разлике.



Слика 3.11. Одступања разних временских скала од атомског времена TAI. (Према [132])



#### 3.4.4. Барицентрично ефемеридно време ( $T_{eph}$ )

Барицентрично ефемеридно време ( $T_{eph}$ ) је временска скала у којој су реализоване све досадашње верзије JPL DE ефемерида, деценијама уназад. У почетку она је била називана TDB скалом. Међутим, касније због разних додефиниција TDB скале, време у којем је стално вршена интеграција за JPL ефемериде је означено са  $T_{eph}$ . Стендиш је 1998. у раду [137] доказао да је  $T_{eph}$  координатно време које је са TCB повезано једном фиксном линеарном везом и да има исти ход као и TT. *Радна група за номенклауру у фундаменталној астрометрији* је 2005. године одлучила да је  $T_{eph}$  заправо оно време које је TDB по почетној замисли и требало да буде.

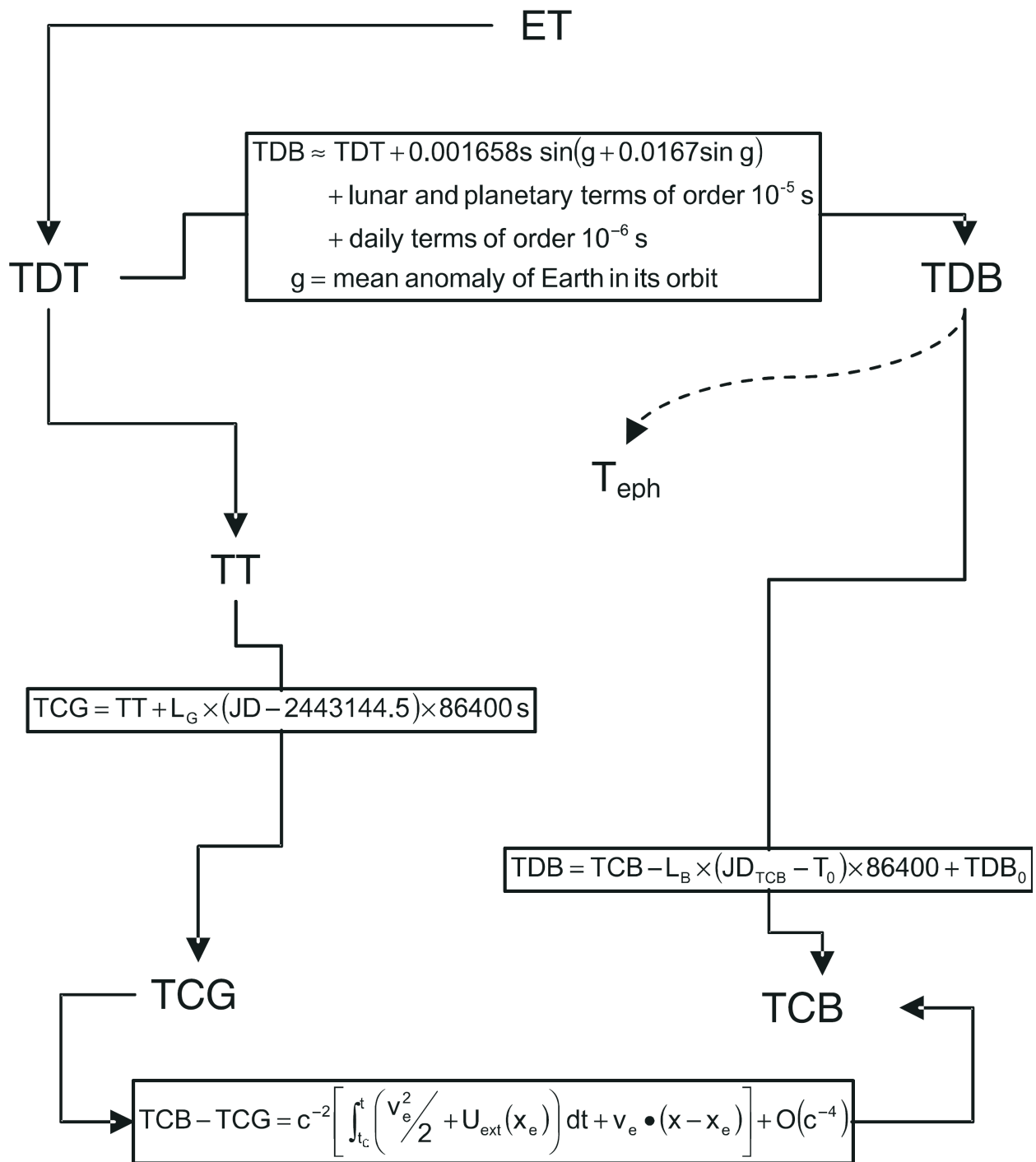
У складу са последњом дефиницијом TDB-а из 2006. године,  $T_{eph}$  се може сматрати једном реализацијом TDB-а. Значи, једина разлика између  $T_{eph}$ -а и TDB-а је што  $T_{eph}$  зависи од конкретне реализације ефемерида, а TDB је (теоријски) дефинисан у односу на (теоријску) скалу TCB.

#### 3.4.5. Релације између динамичких временских скала

Предност скала динамичког времена у односу на време које производе атомски часовници је њихова отпорност на прекиде. Скала атомског времена је уништена оног тренутка када престану да раде технички уређаји који је одржавају, док динамичко време може да се реконструише на милисекунду чак иако су астрономска мерења положаја тела Сунчевог система стотинама година раздвојена. Може и скала светског времена да се реконструише астрономским посматрањима али са много мањом тачношћу, због непредвидљивих промена у брзини Земљине ротације.

Идеја о формирању скале ефемеридног времена ET, иако са многим слабостима, имала је значаја јер су, као њена надградња, настале нове, релативистички конципиране, скале TDB, TDT, TT, TBC и TGC. Све оне су математички повезане са терестричким временом TT, које има и врло прецизну везу са атомским временом. Штавише, реализована атомска TT скала, која се формира исправљањем грешака у TAI скали, је најквалитетније време које се може добити атомским сатовима. Истина, не у реалном времену, али се екстраполацијом може добити врло прецизно у сваком текућем тренутку UTC времена.

На Слици 3.12 шематски су представљене везе између свих временских скала, о којима смо говорили у одељку 3.4.



Слика 3.12. Повезаност динамичких скала времена. (Према [111])

#### 4. ПРОМЕНЉИВА БРЗИНА ЗЕМЉИНЕ РОТАЦИЈЕ И ОДРЕЂИВАЊЕ $\Delta T$

Значај концепта равномерног динамичког времена, конзервираног у (аналитичким или нумеричким) теоријама кретања тела Сунчевог система, огледа се и у томе што се на основу његових упоређивања са светским временом добија потпуна информација о променама брзине Земљине ротације. Та упоређења се могу вршити на онолико широким временским интервалима, колико то тачност коришћене теорије и прецизност расположивих астрономских посматрања допуштају. У сваком случају, тај временски распон се мери стотинама година, па и миленијумима кад је реч о савременим динамичким теоријама. Међутим, тачност и поузданост резултата астрономских мерења драстично опада када се иде у прошлост, а самим тим се то преноси и на тачност упоређења две поменуте временске скале.

Параметар  $\Delta T$ , којим се означава разлика између динамичког и светског времена, је мењао форму, у складу са променама назива актуелне динамичке временске скале ( $ET \rightarrow TDT \rightarrow TT$ ), али суштину није. У савременим условима, он се врло прецизно одређује, међутим, због непредвидљивих промена у брзини Земљине ротације, квалитет предикција његових будућих вредности опада са величином временског интервала. Исто тако, и процена његових вредности у прошлости је утолико мање поуздана, уколико се иде у даљу прошлост.

У сваком случају,  $\Delta T$  је кумулативни индикатор варијација светског времена у односу на неко униформно време, како год то време дефинисали или назвали. Обзиром да су те варијације директно повезане са неравномерностима брзине Земљине ротације, пре него што нешто више кажемо о величини  $\Delta T$ , наведимо најбитније информације о карактеристикама Земљиног ротационог кретања.

##### 4.1. ОСОБЕНОСТИ ЗЕМЉИНОГ РОТАЦИОНОГ КРЕТАЊА

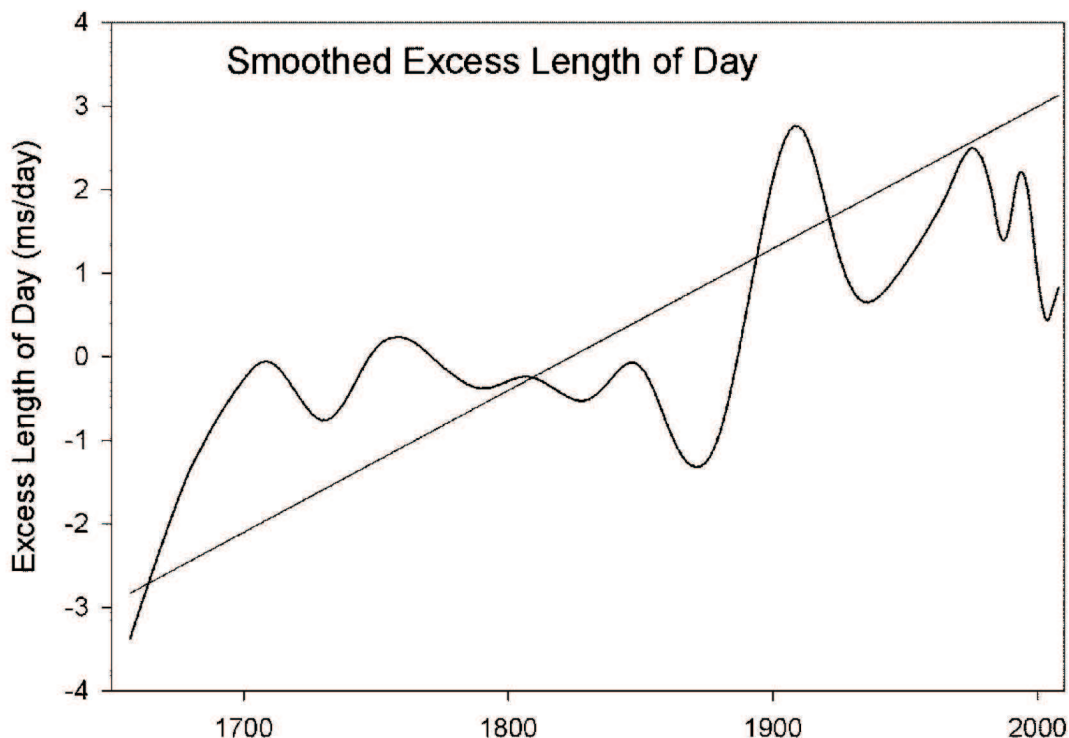
Промене брзине Земљине ротације се према типу разврставају на *секуларне*, *нејравилне* и *периодичне*.

*Секуларне* промене прогресивно смањују брзину Земљине ротације, што утиче на скоро линеарно повећање дужине дана (ротационог периода Земље). Сматра да је

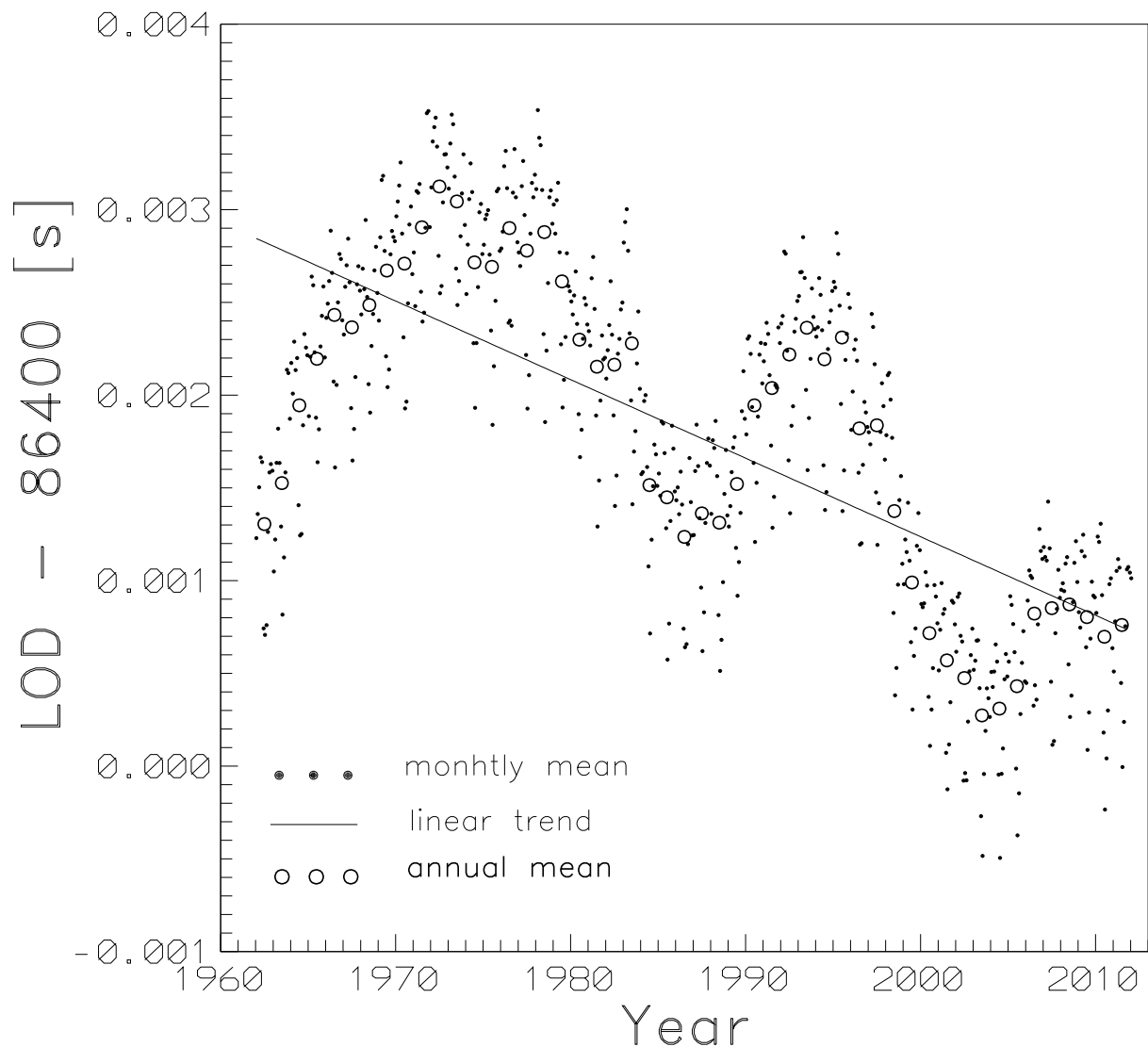
овај ефекат производ два утицаја: Месечевог плимског дејства (тзв. плимско трење), које повећава дужину дана у просеку за 2.3 ms на век, и постглатиалних померања делова Земљине површине, који скраћују дужину дана за 0.6 ms по веку. Збир ових утицаја, према радовима Морисона и Стивенсона [140,115,116,141], производи ефекат продужавања дана у просеку за 1.7 ms на век (Слика 4.1).

*Неправилне* промене се појављују непредвидљиво. Оне се могу повезати са варијацијама дужине дана за око 0.01 s у протеклих 200 година. Последица су међусобног дејства Земљиног омотача и течног језгра, што резултује тзв. ефектом декадних варијација (или флукуација) са неправилним периодима од неколико година до неколико деценија. Постоје и брзе неправилне варијације Земљине ротације, које се углавном повезују са променама у Земљиним флуидним омотачу и унутрашњости Земље.

*Периодичне* промене су последица физичких процеса који се понављају, као што је плимско дејство Месеца и Сунца на чврсту компоненту Земље. Ефекат ових дејстава су варијације у дужини дана са амплитудом до 0.0005 s и са препознатљивим периодима дужине: 1 година, 1/2 године, 27.55 дана, 13.66 дана итд. Периодичне промене истог интензитета изазивају и (глобални) сезонски метеоролошки феномени, а постоје краткoпериодичне, дневне и субдневне, варијације због међусобног утицаја атмосфере и топографије Земљине површине.



**Слика 4.1.** Екцес дужине дана у телескопској ери показује да се брзина Земљине ротације у средњем смањује. (Према [111])



**Слика 4.2.** Екцес дужине дана у ери атомских сатова показује да се брзина Земљине ротације у средњем повећава.

Поред променљиве брзине, друга важна карактеристика Земљине ротације је *поларно кретање*, под којим се подразумева померање осе ротације у односу на површину Земље. Оно је последица непоклапања осе ротације Земље са њеном главном инерцијом осом. Да је Земља чврсто тело, онда би то померање било периодичног карактера са периодом од 305 дана, како је Ојлер својевремено израчунао. Међутим, пошто Земља није чврсто тело, тај период се продужио на око 433 дана. Компонента у поларном кретању са тим периодом је најизразитија и она се идентификује као Чендлеров члан. Поред, Чендлеровог, у опису поларног кретања истичу се још годишњи и полугодишњи члан, који су присутни због утицаја прерасподеле атмосферских и ледених маса током године. Уз њих, постоји још много краткопери-

одичних чланова са малим амплитудама, који су последица метеоролошких фактора (нпр. јаке млазне ваздушне струје у вишим деловима атмосфере).

Сви динамички фактори који утичу на променљивост брзине Земљине ротације и на поларно кретање се могу поделити на оне који имају астрономске узроке и оне који имају геофизичке узроке. У прве спадају гравитациона привлачења Земље и осталих тела у Сунчевом систему, а у друге се убрајају померање маса унутар Земљиних слојева и разни други механички и електро-магнетни међусобни утицаји Земљиних слојева<sup>1</sup>. Због свега тога, изучавање проблематике Земљиног ротационог кретања захвата једну врло комплексну мултидисциплинарну научну област, која је од врло велике теоријске и практичне важности.

Иако се са квалитативног становишта многи феномени у вези са неравномерностима брзине Земљине ротације и поларног кретања могу објаснити, то није ипак довољно за прецизно квантитативно описивање Земљине оријентације у времену, какво захтевају савремене астрогеодетске потребе. Зато је непрекидно праћење Земљине ротације, којим координира IERS на глобалном нивоу, једино решење. Истина, IERS користи и геофизичке моделе за описивања локација тачака у својој терестричкој мрежи, али су ипак за најтачнија одређивања параметара Земљине ротације посматрања неопходна.

#### 4.2. РАЗЛИКЕ ДИНАМИЧКОГ И СВЕТСКОГ ВРЕМЕНА ( $\Delta T$ )

Разлике динамичког и светског времена,  $\Delta T$ , првенствено служе проучавањима варијација брзине Земљине ротације.  $\Delta T$  се током времена одређивало онолико прецизно, колико су то допуштала астрономска посматрања и тачност коришћене, аналитичке или нумеричке, теорије кретања тела Сунчевог система. Данас, када се посматрањима остварује тачност у лучном микросекундном домену и са изузетно тачним нумеричким JPL DE421 ефемеридама (или њима сличним, француским и руским), и  $\Delta T$  се одређује са истом таквом тачношћу. Међутим, за све временске интервале који су удаљавају од савременог доба, било на прошлу страну, или још израженије, ка будућности, грешка одређивања  $\Delta T$  се увећава.

Сада се под разликом  $\Delta T$  подразумева

$$\Delta T = TT - UT1 \quad (4.1)$$

---

<sup>1</sup> О геофизичким аспектима Земљине ротације најдетаљније се може сазнати у познатим монографијама [119,99]. Од радова мањег обима, корисно може послужити нпр. чланак [69].

Имајући у виду да је прва апроксимација за TT,  $TT = TAI + 32^s.184$

$$\Delta T = TAI + 32^s.184 - UT1, \quad (4.2)$$

одакле, одузимајући и додајући UTC на десној страни, добијамо

$$\Delta T = (TAI - UTC) - (UT1 - UTC) + 32^s.184. \quad (4.3)$$

У првој загради израза (4.3) је збир преступних секунди који се акумулира од почетка 1972. године (тренутно износи 35 секунди), а у другој загради је вредност једног од пет параметара Земљине ротације, коју IERS одређује са врло високом тачношћу на основу прикупљених VLBI посматрања.

Од 1984. до 1991. године,  $\Delta T$  је било дефинисано као разлика  $\Delta T = TDT - UT1$ , а пре 1984., као  $\Delta T = ET - UT1$  или,  $\Delta T = ET - UT$ , ако се ради ранијем времену, када се нису разликовала светска времена UT и UT1.

Старија извођења разлике  $\Delta T$  су се заснивала углавном на посматрањима положаја Месеца, помоћу којих су се одређивале флукуације његове лонгитуде, и на коришћењу формуле која је већ наведена у одељку о ефемеридном времену. Поред Месечевих окултација, коришћена су још посматрања Сунчевих и Месечевих помрачења, као и прелази унутрашњих планета преко Сунчевог диска.

Одређивањима разлике  $\Delta T$  и последицама, које проистичу из њених вредности, бавили су се многи истраживачи, али најреспектабилиније резултате су постигли Морисон и Стивенсон. Они су своје резултате објавили у серији радова [114,115,116,117,139,140,141,142] који покривају временски распон од скоро две и по деценије.

Најважнији њихови резултати се односе на одређивање Месечевог секуларног убрзања и вредности  $\Delta T$  на широком временском интервалу, од античких времена па све до савременог доба. При томе су изводили и аналитичке апроксимације за представљање величине  $\Delta T$  у зависности од времена. Те апроксимације су углавном параболичког типа и њихова тачност је зависна од позиције и ширине временског интервала на који се оне односе. На пример, у [116] је изведена приближна формула за израчунавање  $\Delta T$  у секундама,

$$\Delta T = -20 + 32 \cdot [(\text{година} - 1820)/100]^2, \quad (4.4)$$

која покрива временски опсег од 3000 година (-1000. пне, 2000.). У том раду је, такође, процењена вредност Месечевог секуларног убрзања  $\dot{n}$  у износу од  $-26''/\text{век}^2$  и дате су табеларно вредности разлике  $\Delta T$  са стандардним девијацијама (Табела 4.1).

**Табела 4.1.** Вредности разлике  $\Delta T$  у временском распону од 3000 година. (Преузето из рада [116] Морисона и Стивенсона.)

Year	$\Delta T(s)$	$\sigma(s)$	Year	$\Delta T(s)$	$\sigma(s)$	Year	$\Delta T(s)$	$\sigma(s)$
-1000	+25400*	640	+1000	+1570	55	+1800	+14	1
-900	+23700*	590	1100	1090	40	1810	13	1
-800	+22000*	550	1200	740	30	1820	12	1
-700	+21000	500	1300	490	20	1830	8	<1
-600	+19040	460	1400	320	20	1840	6	
-500	17190	430	1500	200	20	1850	7	
-400	15530	390	1600	120	20	1860	8	
-300	14080	360	1700	9	5	1870	+2	
-200	12790	330				1880	-5	
-100	11640	290	1710	10	3	1890	-6	
0	10580	260	1720	11	3	1900	-3	
+100	9600	240	1730	11	3	1910	+10	
+200	8640	210	1740	12	2	1920	21	
+300	7680	180	1750	13	2	1930	24	
+400	6700	160	1760	15	2	1940	24	
+500	5710	140	1770	16	2	1950	29	
+600	4740	120	1780	17	1	1960	33	
+700	3810	100	1790	17	1	1970	40	
+800	2960	80	+1800	+14	1	1980	51	
+900	2200	70				1990	57	
+1000	+1570	55				+2000	+65	

\*By parabolic extrapolation using  $+32[(\text{year} - 1820)/100]^2$ .

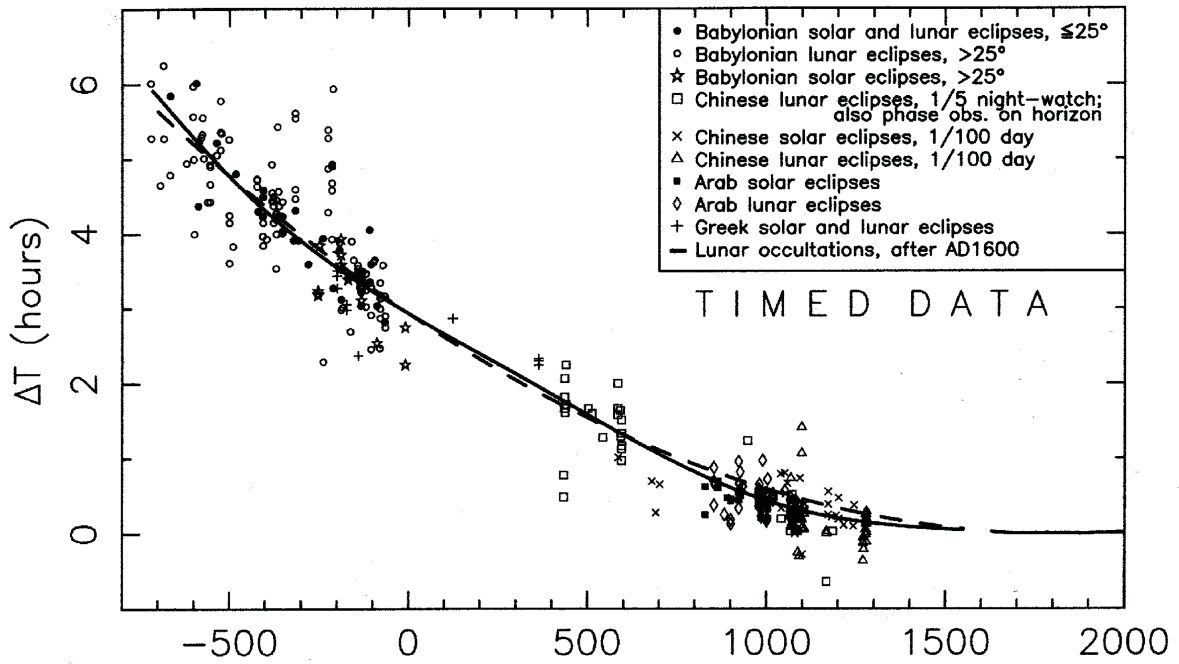
Иначе, заокружено на милисекунду, 1. октобра 2013. године разлика  $\Delta T$  је износила тачно 67<sup>s</sup>.172.

Вредности секуларног Месечевог убрзања које су добијали други аутори су дати на следећој слици:

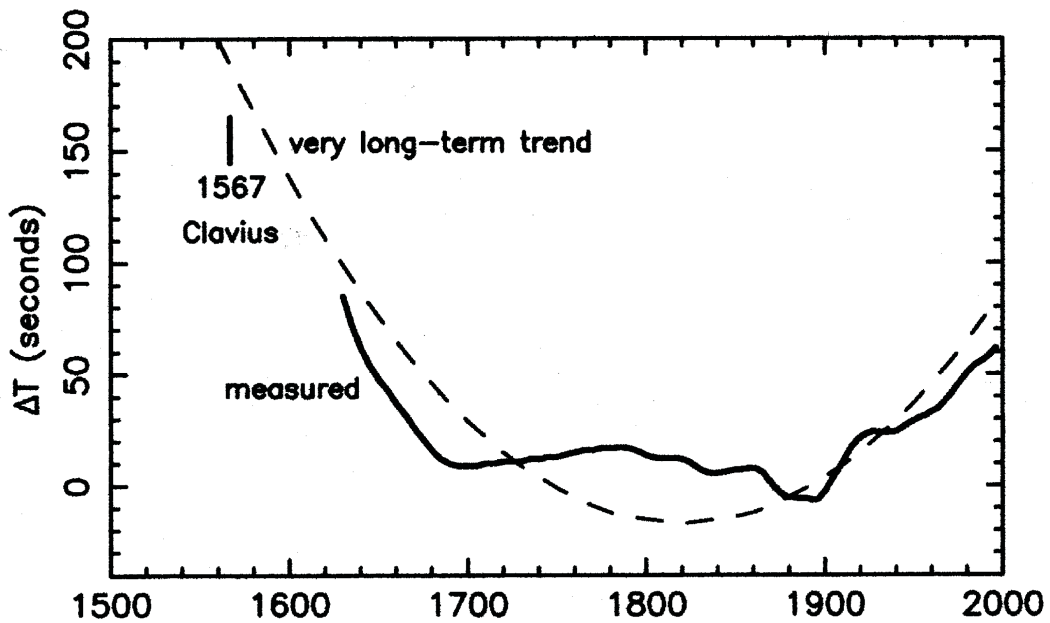
Reference	Value	Observations
Spencer Jones (1939)	-22	Lunar occultations
Oesterwinter and Cohen (1975)	-38	Lunar occultations
Morrison and Ward (1975)	-26	Lunar occultations
Muller (1976)	-30	Eclipses
Calame and Mulholland (1978)	-24.6	Lunar laser ranging
Ferrari <i>et al.</i> (1980)	-23.8	Lunar laser ranging
Newhall <i>et al.</i> (1988)	-24.90	Lunar laser ranging
Chapront <i>et al.</i> (2002)	-25.826	Lunar laser ranging

**Слика 4.3.** Вредности убрзања  $\dot{n}$  (лонгитуде Месеца) у  $''/\text{век}^2$ . У ефемеридама JPL DE405  $\dot{n}$  је  $-25'' .84/\text{век}^2$ , а у најновијим, JPL DE421, износи  $-25'' .85/\text{век}^2$ . ([111])





Слика 4.4. Вредности разлике  $\Delta T$  на интервалу од 3000. година са назнаком врсте астрономских посматрања. У претелескопској ери су углавном коришћена Сунчева и Месечева помрачења, а после тога највише окултације звезда Месецом. (Преузето из рада [116] Морисона и Стивенсона.)



Слика 4.5. Вредности разлике  $\Delta T$  у доба телескопских посматрања. (Преузето из рада [116] Морисона и Стивенсона.)

Величине  $\Delta T$  и  $\dot{n}$  се могу разним приближинм формулама повезати са успорењем брзине Земљине ротације ( $\dot{\Omega}$ ) и варијацијама у дужини дана. На пример, у [111] је наведена емпиријска формула<sup>2</sup> за  $\dot{\Omega}$  у облику

$$\dot{\Omega} = 49 \times 0.004869 \dot{n} \times 10^{-22} \frac{\text{rad}}{\text{s}^2}, \quad (4.5)$$

а ако се, као у [108], пође од приближног представљања  $\Delta T$  (у секундама) само за период после 1650. године,

$$\Delta T = 5.156 + 13.3066(t - 0.19)^2, \quad (4.6)$$

где је  $t$  у вековима од 1800. године, продужење дужине дана се онда рачуна помоћу формуле

$$\text{LOD} = 7.286 \times 10^{-6}(\text{година} - 1819.25). \quad (4.7)$$

Формуле (4.5), (4.6) и (4.7) су изведене под претпоставком да је Месечево плимско убрзање  $\dot{n} = -26''/\text{век}^2$ . Ако се пође од неке друге вредности за  $\dot{n}$ , онда на вредност  $\Delta T$ , израчунату помоћу (4.6), треба, према [44,108], додати поправку (у секундама)

$$(\Delta T)_{\text{ПОПРАВКА}} = -1.821 \frac{\Delta \dot{n}}{2} (T - 19.55), \quad (4.8)$$

где је  $T$  изражено у јулијанским вековима, рачунајући од 1900.0, а  $\Delta \dot{n}$  је одступање новог  $\dot{n}$  од  $-26''/\text{век}^2$ .

Треба имати у виду да су горње формуле изведене врло грубом (параболичком) апроксимацијом астрономских посматрања из прошлости, тако да је њихова употребна вредност за предикције врло мала. На пример, ако се формулом (4.6), која је објављена 1986., одређује  $\Delta T$  за крај 2013. године, грешка је око 11.5 секунди.

---

<sup>2</sup> Christodoulidis et al. (1988) *J Geophys Res*, 93, pp 6216-6236.

## 5. ПРЕДИКЦИЈЕ $\Delta T$ И БРЗИНЕ ЗЕМЉИНЕ РОТАЦИЈЕ

У једнакостима (4.2) и (4.3) видели смо да је разлика  $\Delta T$  директно повезана са разликама UT1-TAI и UT1-UTC, тако да када говоримо о предикцијама UT1-TAI или UT1-UTC, истовремено говоримо и о предикцијама  $\Delta T$ . Извод сваке од три поменуте разлике даје нам информацију о брзини Земљине ротације и о степену униформности скале светског времена UT1.

У овом одељку излажемо резултате примене сопствене предикционе технике у одређивањима одступања светског времена од атомског времена, а с обзиром на стабилну и за, практичне примене, готово фиксну везу времена TAI са теоријском скалом динамичког времена TT, ти резултати се онда истовремено односе и на одступања UT1 од TT у идентичној мери.

### 5.1. ПРОБЛЕМИ ПРЕДВИЂАЊА БРЗИНЕ ЗЕМЉИНЕ РОТАЦИЈЕ

Питање квалитета предикција свих параметара Земљине ротације, а посебно светског времена, је од изузетне важности у свим ситуацијама када је потребно што тачније знати оријентацију Земље, не само у ближој или даљој будућности, него и у реалном времену, јер је за трансформације између ICRS-а и ITRS-а потребно користити предикционе вредности параметара Земљине ротације, који се добијају после прикупљања и обраде прошлих посматрања.

Свакако да проблем оваквих предикција постаје све тежи са увећавањем предикционог интервала. Зато се посвећује велика пажња проналажењу најефикаснијих процедура и оптималних модела за решавање оваквих проблема.

Геофизичке теорије, иако врло значајне за квалитативно проучавање разних механизма који утичу на настанак неравномерности у Земљиној ротацији, нису од велике користи када се од њих тражи квантитативни резултат. Због тога је у предикционим техникама највише заступљен чисти математички приступ и моделирање које евентуално у неким случајевима урачунава атмосферски угловни момент.

Постоји велики број нумеричких метода које се користе, или се могу користити, за израчунавања предикција. Тешко је оценити која је од њих најефикаснија, пошто

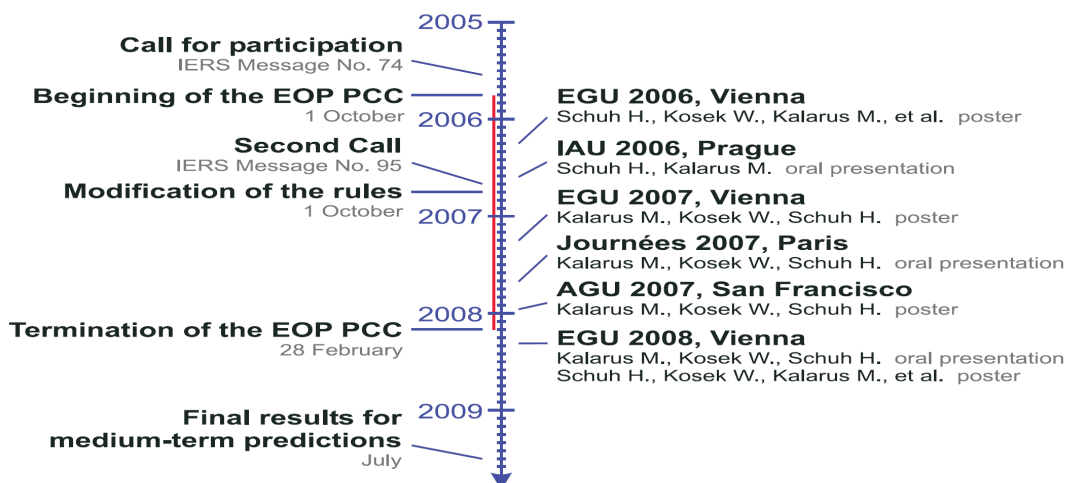
готово свака има неке своје компаративне предности у одређеним ситуацијама. Због тога је, у периоду од октобра 2005. до краја фебруара 2008. године, организована једна међународна кампања упоређења ефикасности разних предикционих метода. Тај међународни пројекат, познат по акрониму ЕОРПСС је имао званични пуни назив "Кампања за упоређење предикција параметара Земљине оријентације" (Earth Orientation Parameters Prediction Comparison Campaign).

На ЕОРПСС-у сам имао прилике да учествујем са сопственим оригиналним методом, тако да су у даљем тексту приказани постигнути лични резултати током те кампање. Поред тога, на крају су приказани и до сада пристигли резултати једне дуговремене предикције која је урађена у октобру 2005. године, применом исте методе. На основу анализе свих тих резултата, бићемо у могућности да извучемо јасне закључке о поузданости коришћене предикционе технике, а такође и, генерално, о границама тачности предикција параметра  $\Delta T$  на временским интервалима различите ширине.

## 5.2. ПРЕДИКЦИЈЕ РАЗЛИКЕ UT1-UTC У ОКВИРУ ПРОЈЕКТА ЕОРПСС

ЕОРПСС је инициран и организован од стране Института за геодезију и геофизику Технолошког универзитета из Беча у сарадњи са Свемирским истраживачким центром Пољске академије наука, после консултовања са руководством IERS-а.

Кампања је одржана у два дела. У другом делу, када су биле мало измењене пропозиције, прикључио се један број нових учесника, међу којима сам био и ја. Календар и шема дешавања током ЕОРПСС-а су приказани на Слици 5.1, а сви учесници, заједно са предикционим техникама које су користили, у Табели 5.1.



Слика 5.1. Календар дешавања и публиковани радови током кампање. (Из [94])

**Табела 5.1.** Списак учесника ЕОРПСС-а, коришћених метода и броја предикција. ([94])

ID	Participant	Prediction technique	Contribution
011	S. Kumakshev	Spectral analysis and least squares extrapolation (Akulenko et al. 2002a,b,c)	301
012		Spectral analysis and least squares extrapolation	301
021	O. Akyilmaz H. Kutterer	Wavelets and fuzzy inference systems	240
031	R. Gross	Kalman filter (AAM forecast: NCEP) (Freedman et al. 1994; Gross et al. 1998)	885
051	W. Kosek	Combination of the least-squares extrapolation and autoregressive prediction	174
052		Wavelet decomposition and autocovariance prediction in polar coordinate system	174
053		Wavelet decomposition and autocovariance prediction	370
061	M. Kalarus	Least squares extrapolation of the harmonic model and autoregressive prediction	449
071	EOP Product Centre	Least squares and autoregressive filtering	611
072	D. Gambis	Adaptive transformation from AAM to LODR (AAM forecast: JMA)	78
073		Adaptive transformation from AAM to LODR (AAM forecast: NCEP)	76
074		Adaptive transformation from AAM to LODR (AAM forecast: UKMO)	76
075		Adaptive transformation from AAM to LODR (AAM forecast: JMA+NCEP+UKMO)	74
091	L. Zotov	Autoregressive prediction	495
092		Least squares collocation	495
093		Neural networks	495
101	S. Pasyнок	Autoregressive prediction with consecutive shift	282
111	P. J. Mendes Cerveira	Heuristic analysis and least squares fitting/extrapolation	204
112		Least squares fitting/extrapolation for amplitudes of Legendre polynomials	274
121	B. Jovanović	HE (harmonic and exponential) method of approximation (Jovanović 1987, 1989)	122

Током ЕОРПСС-а објављено је више радова и саопштења о прелиминарним резултатима 10-дневних и 30-дневних предикција, као што се на Слици 5.1 може видети. На крају, завршна анализа коначних резултата свих предикција је приказана у раду [94], а мој допринос овом пројекту је записан у радовима [129,94].

Сваки учесник кампање је могао да ради предикције параметара Земљине ротације по свом избору. Ја сам радио само предикције разлике UT1-UTC, примењујући сопствену HE методу, коју сам описивао раније у радовима [90,91,92,93].

### 5.2.1. Предикције разлика UT1-UTC методом HE

Предикције су слате електронском поштом једном недељно, до петка у 12 сати по UTC-у, а поступак њихове израде је имао следећи ток:

Улазни подаци, претходне вредности UT1-UTC, преузимани су из изворне IERS-ове датотеке 'eorc04\_IAU2000.62-now' која садржи изведене вредности свих параметара Земљине ротације за 0<sup>h</sup> UTC са једнодневним размаком, почев од 1.1.1962. Та датотека се двапут недељно допуњава (уторком и четвртком), тако да су за израду

предикција редовно узимане последње њене верзије (од четвртка), један дан пре израде и слања предикција за наредних 10, 30 или 500 дана.

Еквидистантно распоређени улазни подаци  $\{y(x_1), \dots, y(x_N)\}$ , издвојени из поменутог фајла, су апроксимирани специфичном функцијом  $F(x)$ , која се представља у облику једне могуће суме експоненцијаних и тригонометријских елементарних функција. Та функција је после тога коришћена за екстраполацију улазних података, односно за предвиђање њихових будућих вредности.

Математичким језиком записано, одређивана је функција  $F(x)$ , тако да је

$$\{y(x_1), \dots, y(x_N)\} \approx \{F(x_1), \dots, F(x_N)\}, \quad x_{i+1} - x_i = \text{const.} \quad ,$$

где је

$$F(x) = \sum_i H_i(x) + \sum_j E_j(x)$$

и

$$H(x) = C_1 \sin \omega x + C_2 \cos \omega x, \quad E(x) = C_1 \lambda^x + C_2 \lambda^{-x}, \quad C_i \in \mathbb{R}.$$

Аргумент  $x$  је био изражен у модификованим јулијанским данима (MJD).

Структура функције  $F(x)$  се не зна унапред (пре него се изврше одређене рачунске процедуре и добију међурезултати). То значи да композиција функције  $F(x)$  зависи од структуре улазних података и претпостављеног броја њених компонентних функција  $n$ , који може донекле да утиче на врсту и на број издвојених компоненти  $m$ .

Извођење  $F(x)$  је подељено у два узастопна дела: 1) одређивања спектра  $\{\omega_i, \lambda_j\}$  и 2) израчунавања констаната  $\{C_1, C_2\}$ .

Оба дела се заснивају на фитовању података методом најмањих квадрата, само што први део укључује и нумеричко решавање једне алгебарске једначине, чији степен зависи од броја (али не и од врсте) претпостављених компоненти функције  $F(x)$ .

Рачунска процедура тече на следећи начин:

- 1) За претпостављено  $n$  и за дати скуп података, формира се матрица  $A$ ,

$$A_{ij} = \sum_{l=0}^{j-1} \binom{j-1}{l} y(x_{n+i+j-1-2l}) \quad , \quad \begin{cases} i = 1, 2, \dots, N - 2n \\ j = 1, 2, \dots, n + 1 \end{cases} .$$

и затим се решава систем линеарних једначина

$$-\sum_{j=1}^n A_{i,n-j+1} P_j = A_{i,n+1} \quad , \quad i = 1, 2, \dots, N - 2n \quad ;$$

После одређивања вредности  $P_i$ , решава се алгебарска једначина

$$\sum_{i=1}^{n+1} B_i k^{n-i+1} = 0 \quad , \quad \begin{cases} B_1 = 1 \\ B_i = P_{i-1} \quad , \quad i = 2, 3, \dots, n+1 \end{cases} \quad ,$$

и помоћу  $m$  реалних корена, формира спектар параметара  $\omega$  и  $\lambda$ . На тај начин су структура у дужина развоја

$$F(x) = \sum_{j=1}^m f_j(x)$$

одређени. Сваки члан  $f(x)$  је типа  $H$  или  $E$  са две неодређене константе  $C_1$  и  $C_2$ .

2) Поновним коришћењем улазних података, формира се нови систем линеарних једначина

$$F(x_i) = \sum_{j=1}^m f_j(x_i) \quad i = 1, 2, \dots, N \quad ,$$

чијим решавањем се добијају вредности  $2m$  констаната  $\{C_1, C_2\}_j$  ( $j = 1, 2, \dots, m$ ). Тиме је апроксимирајућа функција  $F(x)$  потпуно одређена.

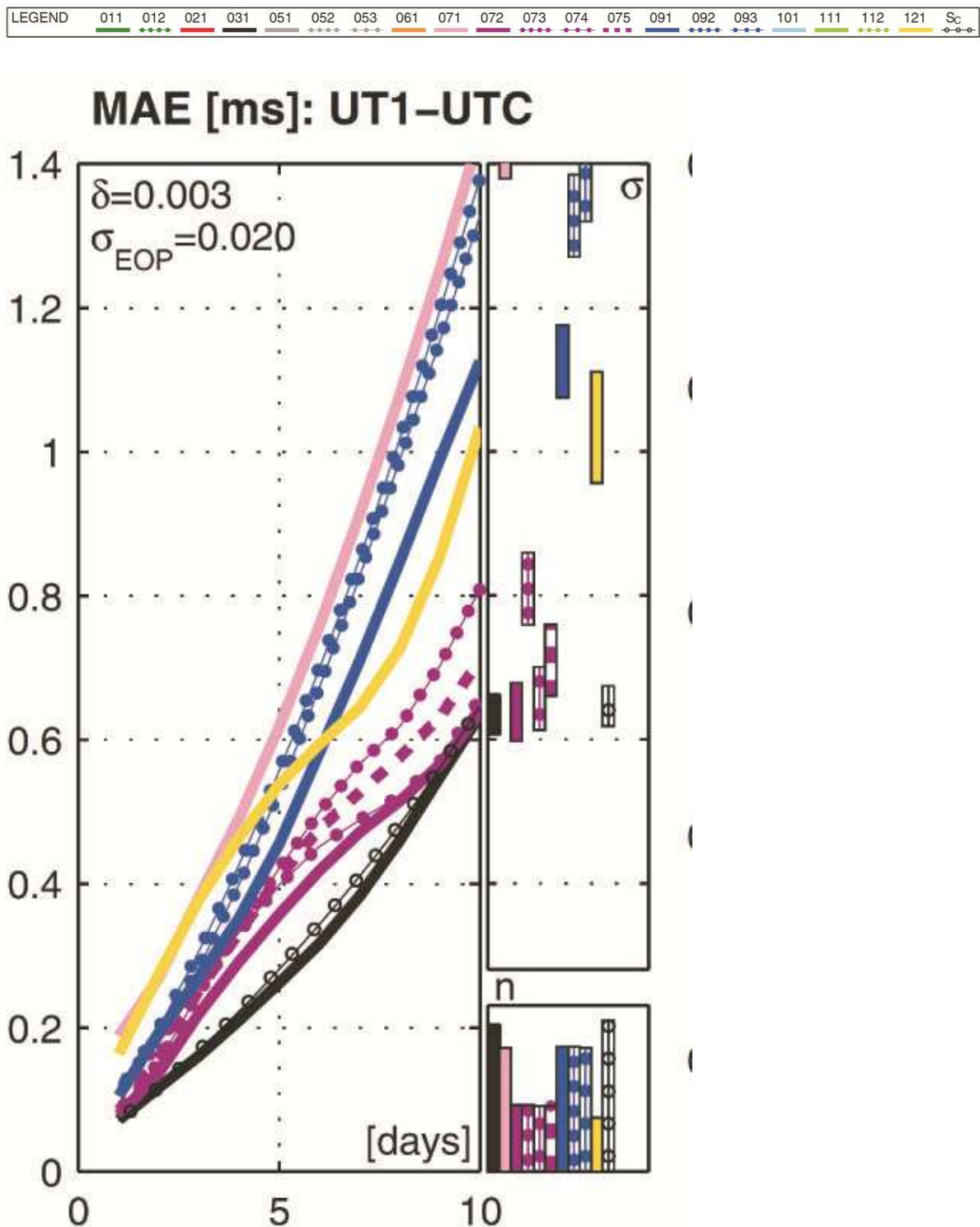
Калибрација описаног алгоритма је извршена емпиријским начином у расположивом времену пре учешћа на пројекту. Свако мењање начина обраде података током кампање би негативно утицало на добијене резултате и покварило би смисао поређења различитих метода предикције.

Различите врсте предикција (на 10, 30 или 500 дана) су третиране на исти начин, само су улазни фајлови били распоређени на различитим временским интервалима. За већи предикциони интервал, узимани су улазни подаци који су покривали већи временски опсег. Обзиром да број улазних података није мењан,  $N = 107$  за алгебарску спектралну анализу и  $N = 56$  за одређивање коефицијената  $\{C_1, C_2\}_j$ , то значи да су подаци узимани са прескоком (ако је временски корак био  $> 1$  дан). Прескочени подаци су коришћени касније, само за проверу квалитета апроксимације.

Спектар је одређиван у првој средњеквадратној апроксимацији из узорка од 107 података, а затим, за претпостављени број компонентних функција ( $H$  или  $E$ ), у другој (средњеквадратној) апроксимацији, на мањем узорку, израчунавани су њихови коефицијенти. Варирајући број компонентних функција потенцијалне екстраполационе функције  $F(x)$ , из скупа допустивих, изабрана би била она која има најмању стандардну девијацију у односу на прошле вредности разлике UT1-UTC.

У наредним поглављима приказани су графички резултати 10-дневних, 30-дневних 500-дневних предикција свих учесника, који су радили предикције временске разлике UT1-UTC. Осим личног кода који се види у Табели 5.1, сваком учеснику кореспондира и график одређене боје. У мом случају, то су код 121 и жута боја.

## 5.2.2 Резултати десетодневних предикција

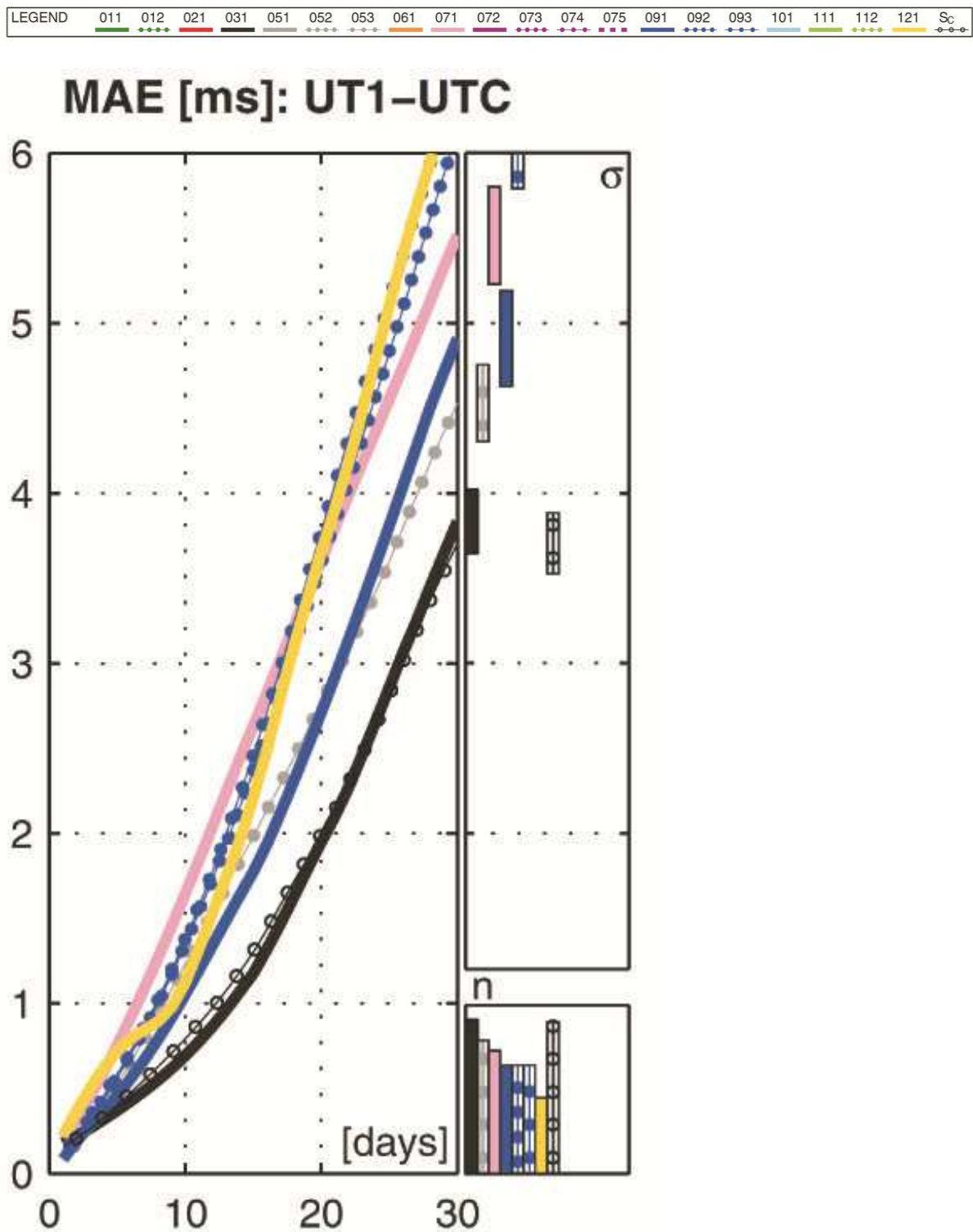


Слика 5.2 Средња апсолутна грешка десетодневних предикција

NE метода (жута линија) је постигла у просеку сличан резултат као и друге методе (око 1 ms). IERS Product Centre је имао грешку од 1.4 ms на десетом дану (розе линија), а најбољи резултат је постигла метода Р. Гроса (црна линија) у којој је коришћен Калманов филтер (испод 0.7 ms). ([94])



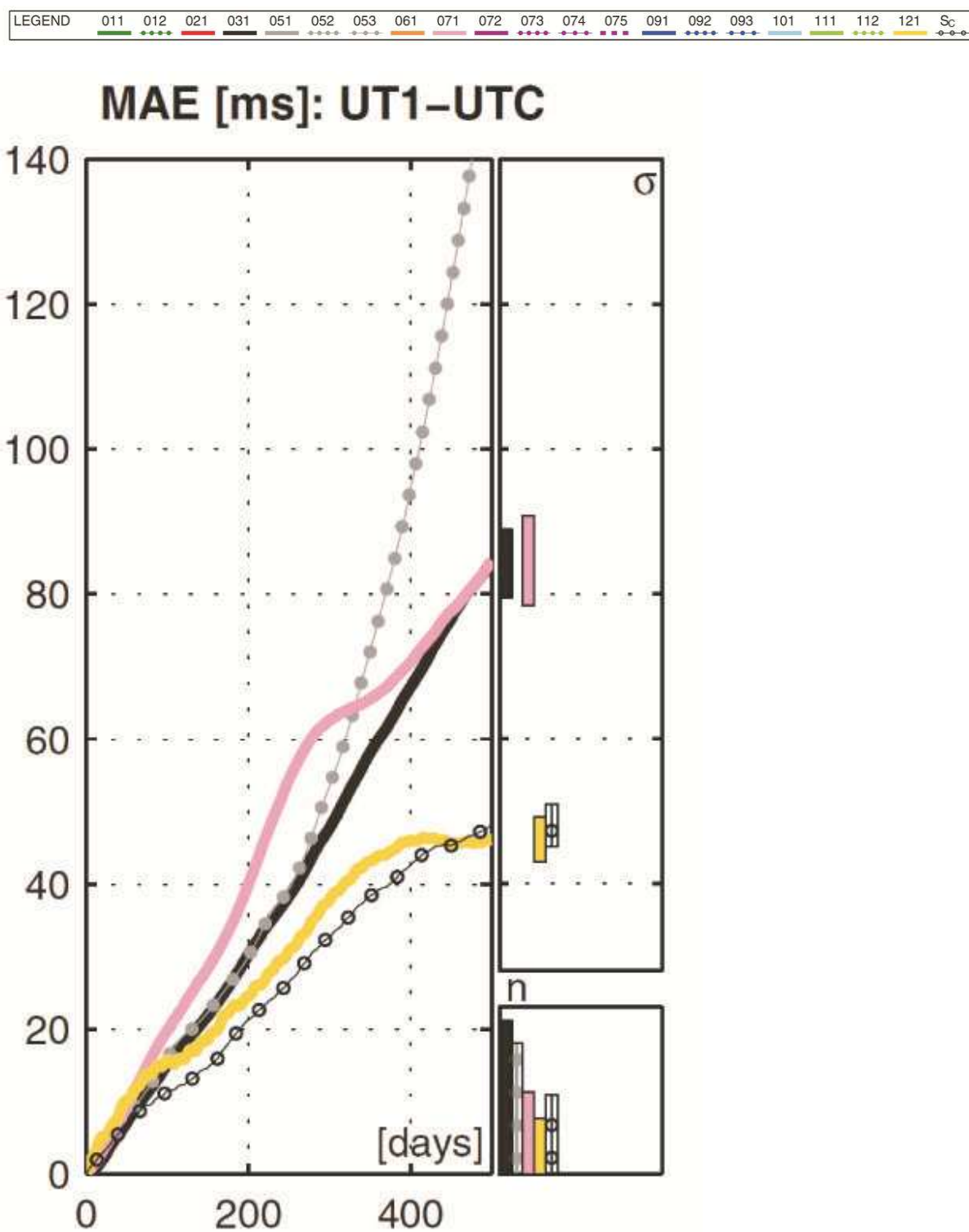
### 5.2.3. Резултати тридесетодневних предикција



Слика 5.3 Средња апсолутна грешка тридесетодневних предикција

Гросова метода је и овде била супериорна (<4ms ). НЕ метода је имала грешку између 6 ms и 7ms на тридесетом дану. ([94])

### 5.2.4. Резултати петстодневних предикција



Слика 5.4 Средња апсолутна грешка петстодневних предикција

Овде је НЕ метода била убедљиво најбоља. На 500-том дану је имала средњу апсолутну грешку мању од 50 ms, што је скоро дупло мање од друге две конкурентске методе. ([94])

Битне карактеристике предикција НЕ методом, које су могу уочити са збирних графика на сликама 5.2, 5.3 и 5.4 посебно су издвојене у Табели 5.2.

**Табела 5.2** Средње апсолутне грешке (MAE), стандардне девијације и број израчунатих предикција НЕ методом током ЕОРРС-а по врстама предикција.

пред. интервал [дан]	MAE [ms]	ст. девијација [ms]	број предикција
10	1.03	0.07	45
30	6.49	0.44	42
500	45.96	3.20	31

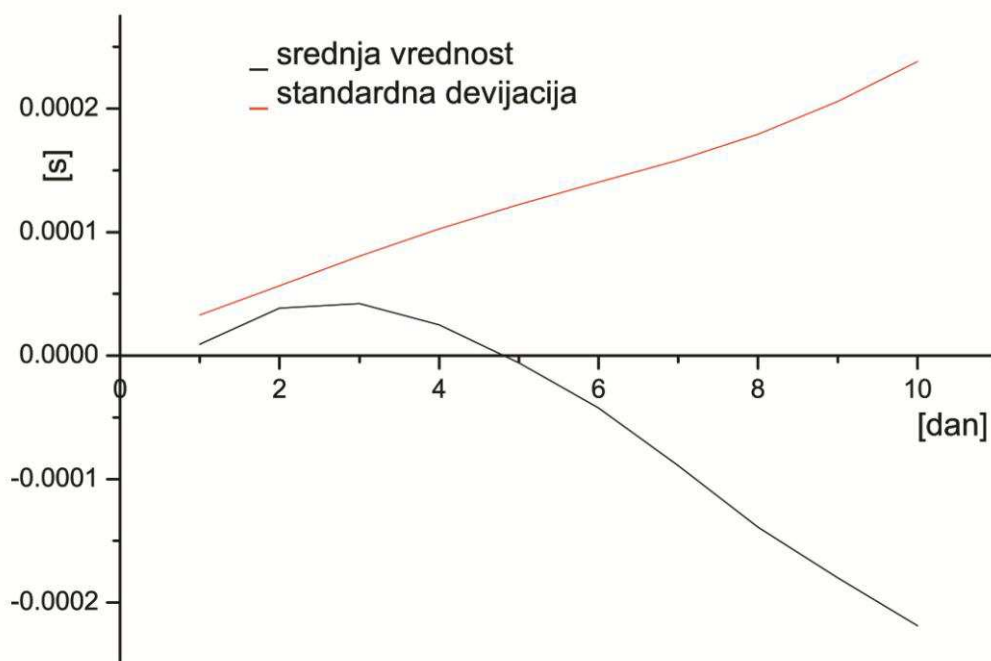
#### 5.2.5. Средња одступања предикција изведених НЕ методом

Да бисмо проверили евентуална систематска одступања у резултатима свих предикција које су извршене НЕ методом, израчунали смо средње вредности одступања од реализованих вредности параметра UT1-UTC за сваки дан у предикционом интервалу, заједно са њиховим стандардним девијацијама. Резултати су представљени графички на сликама 5.5, 5.6 и 5.7, за сваку врсту предикције посебно.

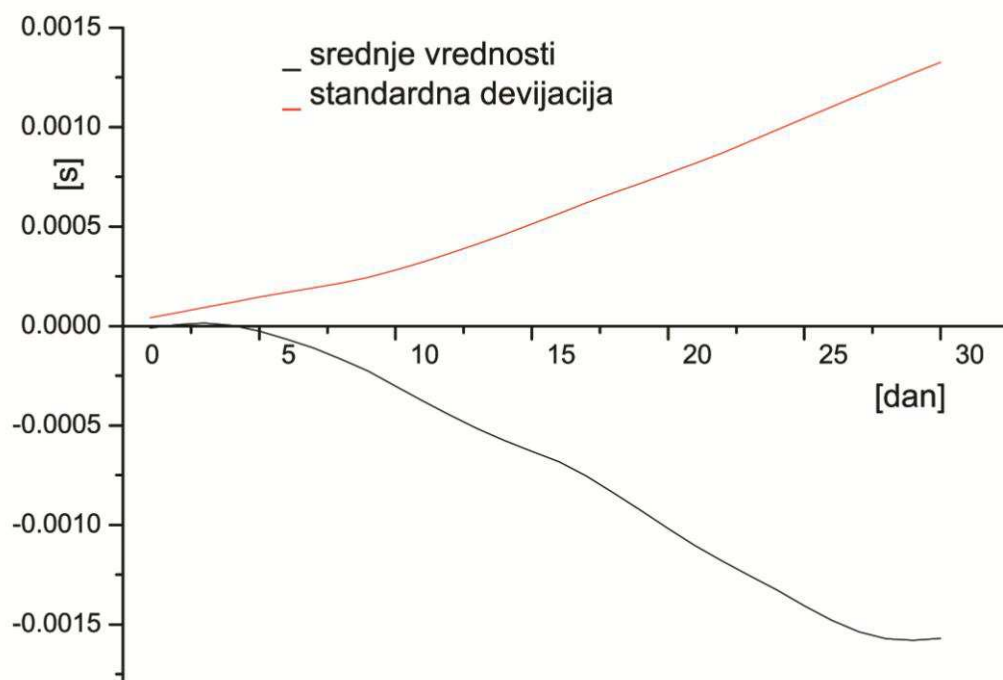
Можемо приметити да је у случају 10-дневних и 30-дневних предикција максимално одступање средине резидуа на последњем дану по апсолутној вредности значајно мање од средњег апсолутног одступања (око 0.2 ms према 1 ms, за 10-дневне, и 1.5 ms према 6.5 ms, за 30-дневне предикције) и да су стандардне девијације у оба случаја скоро једнаке апсолутној вредности одговарајуће средине резидуа.

У случају 500-дневних предикција средина резидуа на последњем дану је упоредива са средњим апсолутним одступањем (35 ms према 45 ms), а стандардна девијација је око четири пута мања. То значи да је регистрован систематски помак на 500-том дану, који је приближан средњем апсолутном одступања.

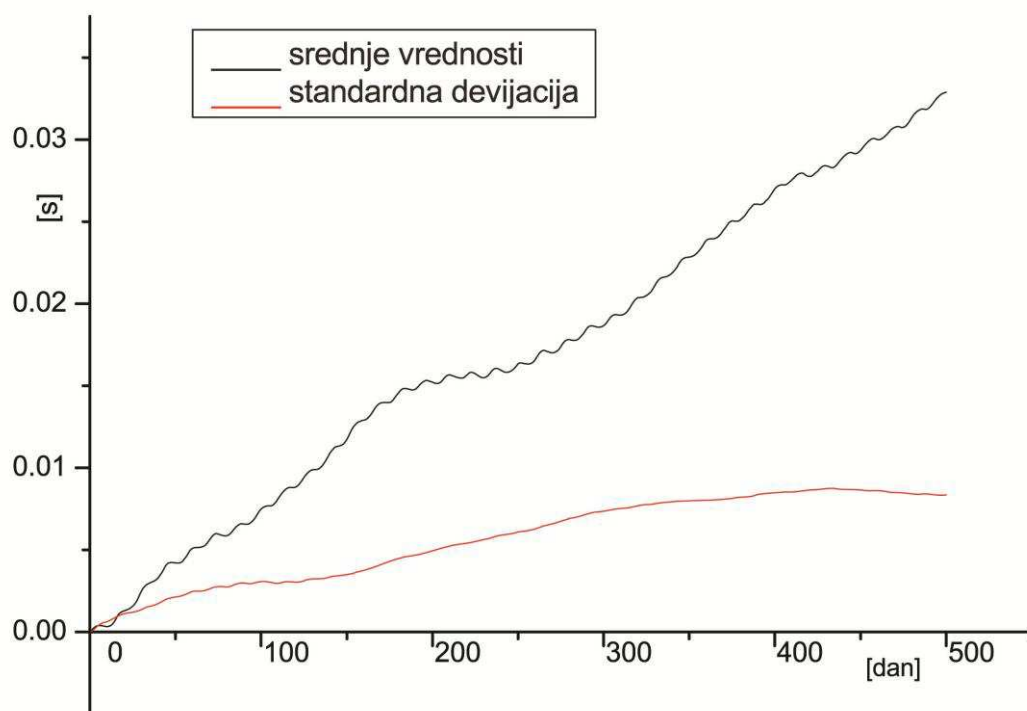
У табелама 5.3, 5.4, 5.5 дате су нумеричке вредности средина резидуа и њихове стандардне девијације за 10 равномерно распоређених података (дана).



Слика 5.5 Средња одступања 10-дневних предикција по данима (црна линија) са стандарним девијацијама (црвена линија).



Слика 5.6 Средња одступања 30-дневних предикција по данима (црна линија) са стандарним девијацијама (црвена линија)



Слика 5.7 Средња одступања 500-дневних предикција по данима (црна линија)са стандарним девијацијама (црвена линија).

Подаци са графика 5.5, 5.6 и 5.7:

Табела 5.3 (Сл.5.5)

дан	средина	ст. дев.
1	.0000094	.0000328
2	.0000386	.0000566
3	.0000421	.0000804
4	.0000248	.0001026
5	-.0000059	.0001223
6	-.0000424	.0001403
7	-.0000890	.0001584
8	-.0001387	.0001792
9	-.0001799	.0002059
10	-.0002186	.0002380

Табела 5.4 (Сл.5.6)

дан	средина	ст. дев.
1	-.0000102	.0000420
4	.0000027	.0001202
7	-.0001108	.0001926
10	-.0003007	.0002814
13	-.0005158	.0004127
16	-.0006826	.0005659
19	-.0009270	.0007185
22	-.0011830	.0008713
25	-.0014053	.0010448
28	-.0015714	.0012168

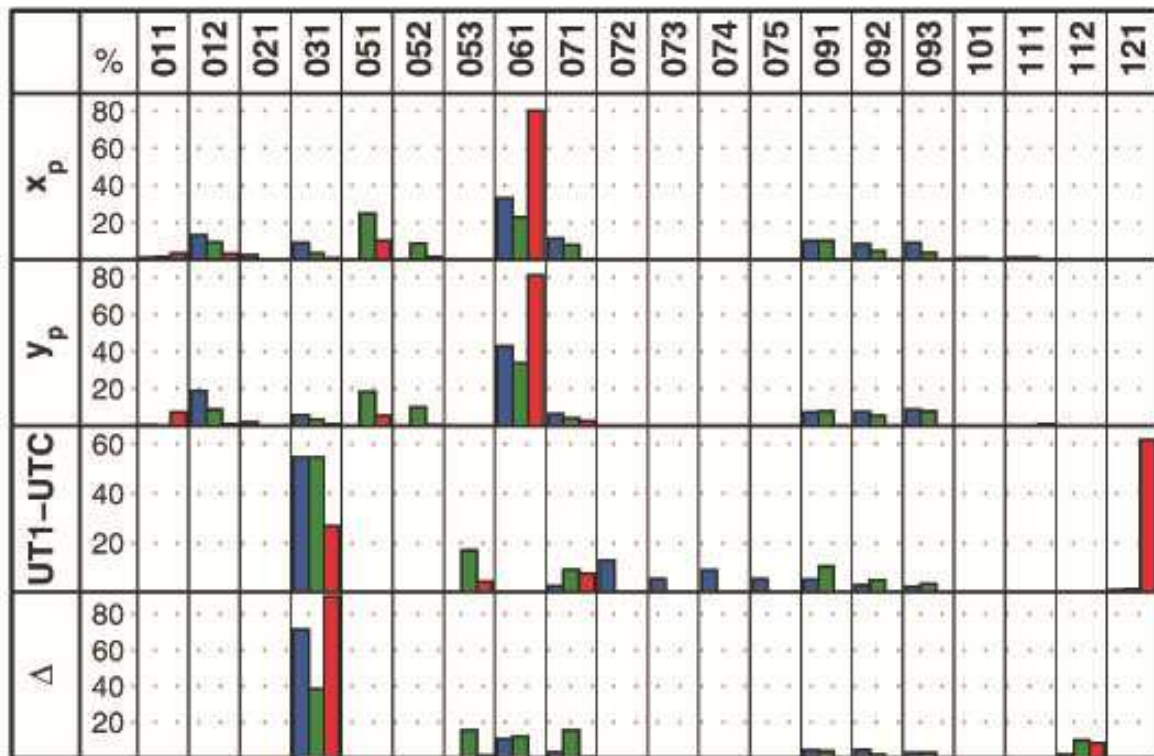
Табела 5.5 (Сл.5.7)

дан	средина	ст. дев
1	.0000892	.0000598
51	.0041917	.0021483
101	.0075870	.0030766
151	.0119312	.0035126
201	.0151737	.0049704
251	.0163785	.0061083
301	.0187555	.0073685
351	.0228449	.0080076
401	.0271087	.0084882
451	.0294559	.0086337

### 5.2.6. Број предикција и тежине метода у ЕОРПСС-у

ID	011	012	021	031	051	052	053	061	071	072	073	074	075	091	092	093	101	111	112	121	
$x_p$	124/3 87/0 87/0	127/0 87/0 87/0	80/0 40/0 13/27	125/0 85/0 85/0	87/0 87/0 87/0	87/0 87/0 87/0		127/0 87/0 87/0	108/0 69/0 47/0					105/0 60/0 60/0	105/0 60/0 60/0	105/0 60/0 60/0	43/0 43/0 43/0	68/0 68/0 68/0			
$y_p$	116/11 82/5 87/0	127/0 87/0 87/0	79/1 38/2 7/33	124/1 85/0 85/0	87/0 87/0 87/0	87/0 87/0 87/0		127/0 87/0 87/0	108/0 68/1 47/0					105/0 60/0 60/0	105/0 60/0 60/0	104/1 60/0 60/0	10/31 13/28 13/28	63/5 60/8 68/0			
UT1-UTC				123/2 85/0 85/0			74/0 73/1		104/4 68/1 46/1	56/1	56/0	55/1	55/0	105/0 60/0 60/0	105/0 60/0 60/0	104/1 60/0 60/0	10/31 13/28 13/28		1/0 1/0 1/0	45/2 42/1 31/1	
$\Delta$			80/0	125/0 85/0 85/0			74/0 73/1	74/0 74/0	54/0 55/0 41/0	20/1	19/1	19/1	18/1	104/1 60/0 60/0	99/6 59/1 59/1	103/2 59/1 59/1	12/0 12/0 12/0		67/1 68/0 68/0		

Слика 5.8 Број прихваћених према броју одбачених предикција. Плавом бојом су означене 10-дневне, зеленом 30-дневне, а црвеном 500-дневне предикције. ([94])



Слика 5.9 Хистограм додељених тежина свакој предикционој методи појединачно по врстама предикције, приликом извођења комбинованих резултата свих предикција које су учествовале на ЕОРПСС-у. Тежине, саме по себи, одсликавају тачност и поузданост метода. Као што се може видети, НЕ методи је за 500-дневне предикције UT1-UTC придодела највећа тежина (двоструко већа него Гросовој методи са Калмановим филтером). ([94])

### 5.3 ДУГОВРЕМЕНЕ ПРЕДИКЦИЈЕ

У овом одељку приказујемо резултате 10-годишње предикције одступања светског времена UT1 од атомског времена TAI, а самим тим, посредно и од скале TT времена, обзиром на чињенице које су наведене у трећој и четвртој глави. Та предикција је још у току, али, пошто се већ 80% ње може већ сада проверити, проанализирајмо њен досадашњи резултат.

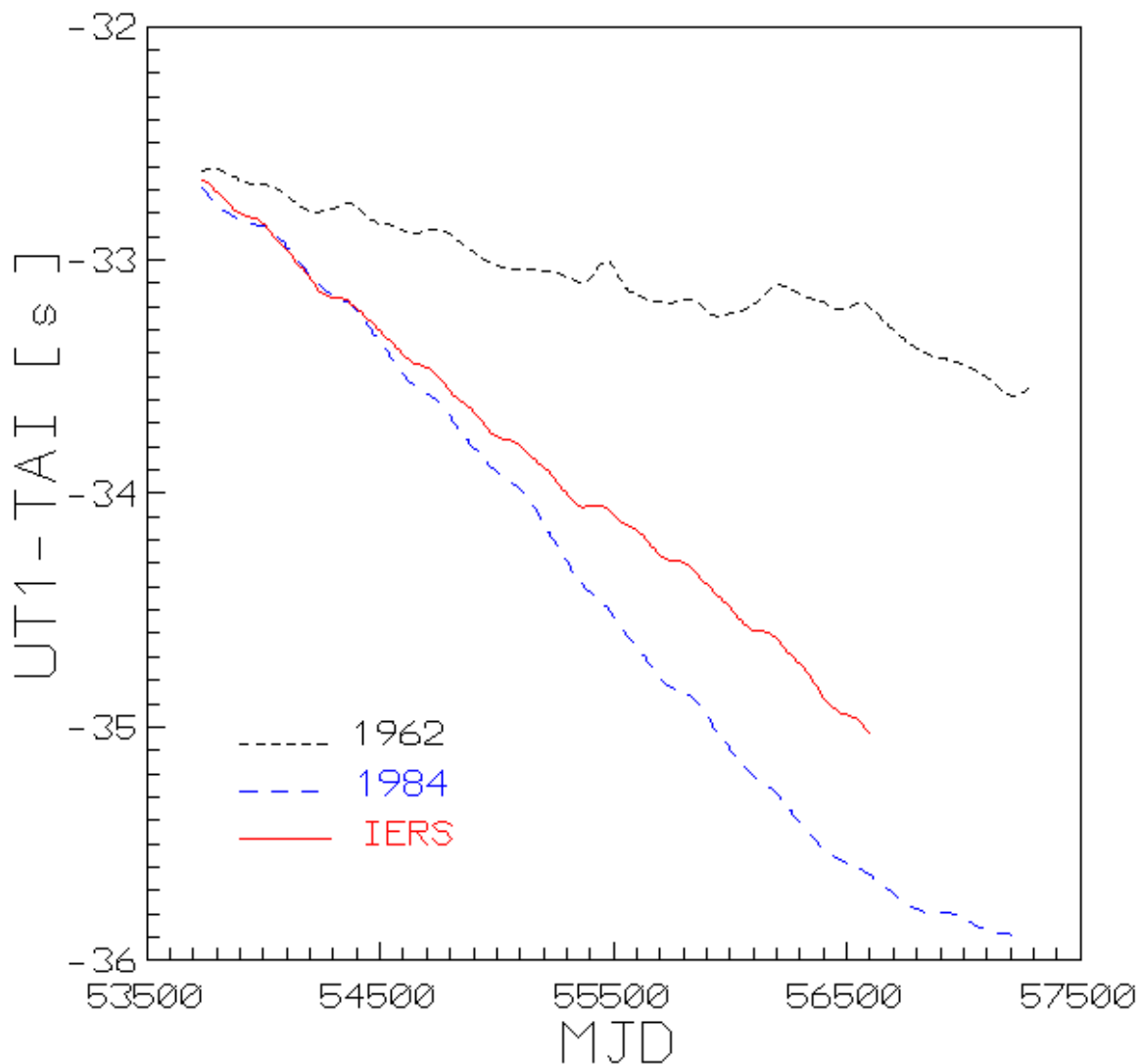
#### 5.3.1. Резултати десетогодишње предикције.

Коришћена је иста улазна IERS-ова датотека са једнодневним вредностима параметара Земљине ротације, као за EOPCC, само што је временски интервал који су покривали улазни подаци био од 1.1.1962 до 13.9.2005. На основу тога изведена је апроксимативна функција HE методом којом су ти подаци екстраповани за 10 годишњи период, од 1.1.2006. до 1.1.2015.

Направљене су две верзије тих предикција. Једна је обухватала све податке у поменутом периоду, а друга само оне после 1984. године, када су се параметри Земљине ротације почели одређивати искључиво са новим радио интерферометријским и ласерским техникама. На слици 5.10 и у табелама 5.6 и 5.7, види се резултат те предикције после 8 година.

Екстраполационе функције, којима су направљене те предикције су приказане у табелама 5.8 и 5.9. Оне се, као што можемо видети, састоје само од хармоника (компонентне функције експонентног типа нису детектоване), међу којима је један доминантан секуларни члан, док су остале регистроване периодичне компоненте последица препознатљивих декадних варијација и/или сезонских утицаја.

На крају су, у одељку 5.3.2., у табелама 5.10 и 5.11., поређења ради, дате званичне IERS-ове процене предикционих грешака на временским интервалима различите дужине.



**Слика 5.10** Две предикције разлике UT1-TAI за интервал 1.1.2006. (MJD 53736)-1.10.2015. (MJD 57296). Једна је изведена на основу IERS-ових C04 података који покривају временски опсег од 1.1.1962. до 13.9.2005. (црна испрекидана линија), а друга је изведена на основу дела истих података, од 1.1.1984. до 13.9.2005., када се оптичка астрометрија више није користила у праћењу Земљине ротације (плава испрекидана линија). Стварне вредности UT1-TAI, које су се у међувремену оствариле, представљене су пуном црвеном линијом.

Тачнији улазни подаци од 1984. године, иако на краћем временском интервалу и скоро дупло мањег обима, омогућили су веома прецизну предикцију НЕ методом. Грешка после 8 година је свега око 0.6 s, са тенденцијом да она буде још мања до краја предикционог интервала. Нумерички подаци са графика, представљених на Слици 5.10, дати су у Табели 5.6, заједно са током њихових стварних грешака.



Табела 5.6 Предикција разлика UT1-TAI изведена НЕ методом на основу података IERS C04 од 1.1.1962. до 13.9.2005. (црна боја) и иста предикција само на основу података од почетка 1984., када су се параметри Земљине ротације почели одређивати само путем VLBI мерења и сателитске и ласерске даљинometriје (плава боја). До сада реализоване вредности UT1-TAI су обележене црвеном бојом. Последње две колоне садрже грешке обе предикције.

година	мес	дан	MJD	HE62	HE84	UT1-TAI	$\Delta 62$	$\Delta 84$
				(1)	(2)	(3)	(1) - (3)	(2) - (3)
2006	1	1	53736	-32.615	-32.693	-32.661	0.046	-0.032
2006	4	1	53826	-32.620	-32.783	-32.733	0.113	-0.050
2006	7	1	53917	-32.669	-32.840	-32.805	0.136	-0.035
2006	10	1	54009	-32.678	-32.860	-32.853	0.175	-0.007
2007	1	1	54101	-32.726	-32.943	-32.962	0.236	0.019
2007	4	1	54191	-32.787	-33.055	-33.065	0.278	0.010
2007	7	1	54282	-32.787	-33.142	-33.157	0.370	0.015
2007	10	1	54374	-32.758	-33.192	-33.187	0.429	-0.005
2008	1	1	54466	-32.833	-33.307	-33.273	0.440	-0.034
2008	4	1	54557	-32.857	-33.428	-33.361	0.504	-0.067
2008	7	1	54648	-32.886	-33.540	-33.445	0.559	-0.095
2008	10	1	54740	-32.867	-33.600	-33.492	0.625	-0.108
2009	1	1	54832	-32.915	-33.716	-33.593	0.678	-0.123
2009	4	1	54922	-32.985	-33.826	-33.676	0.691	-0.150
2009	7	1	55013	-33.028	-33.919	-33.767	0.739	-0.152
2009	10	1	55105	-33.042	-33.985	-33.800	0.758	-0.185
2010	1	1	55197	-33.045	-34.121	-33.886	0.841	-0.235
2010	4	1	55287	-33.068	-34.269	-33.984	0.916	-0.285
2010	7	1	55378	-33.092	-34.402	-34.057	0.965	-0.345
2010	10	1	55470	-33.002	-34.486	-34.060	1.058	-0.426
2011	1	1	55562	-33.126	-34.613	-34.141	1.015	-0.472
2011	4	1	55652	-33.171	-34.723	-34.212	1.041	-0.511
2011	7	1	55743	-33.183	-34.832	-34.291	1.108	-0.541
2011	10	1	55835	-33.171	-34.869	-34.322	1.151	-0.547
2012	1	1	55927	-33.238	-34.994	-34.419	1.181	-0.575
2012	4	1	56018	-33.226	-35.115	-34.509	1.283	-0.606
2012	7	1	56109	-33.187	-35.220	-34.587	1.400	-0.633
2012	10	1	56201	-33.106	-35.291	-34.626	1.520	-0.665
2013	1	1	56293	-33.148	-35.404	-34.723	1.575	-0.681
2013	4	1	56383	-33.177	-35.503	-34.842	1.665	-0.661
2013	7	1	56474	-33.211	-35.572	-34.943	1.732	-0.629
2013	10	1	56566	-33.186	-35.613	-34.988	1.802	-0.625
2014	1	1	56658	-33.261	-35.681			
2014	4	1	56748	-33.343	-35.751			
2014	7	1	56839	-33.403	-35.794			
2014	10	1	56931	-33.425	-35.793			
2015	1	1	57023	-33.460	-35.838			
2015	4	1	57113	-33.511	-35.873			
2015	7	1	57204	-33.582	-35.890			
2015	10	1	57296	-33.537	-35.846			

Табела 5.7 Подаци у табели се односе на предикције параметра  $\Delta T$  и изведени су из одговарајућих података Табеле 5.6, користећи формулу  $\Delta T = 32.184 - (UT1 - TAI)$ , наведену у (4.2).

година	мес	дан	MJD	HE62	HE84	$\Delta T$	$\Delta 62$	$\Delta 84$
				(1)	(2)	(3)	(3) - (1)	(3) - (2)
2006	1	1	53736	64.799	64.877	64.845	0.046	-0.032
2006	4	1	53826	64.804	64.967	64.917	0.113	-0.050
2006	7	1	53917	64.853	65.024	64.989	0.136	-0.035
2006	10	1	54009	64.862	65.044	65.037	0.175	-0.007
2007	1	1	54101	64.910	65.127	65.146	0.236	0.019
2007	4	1	54191	64.971	65.239	65.249	0.278	0.010
2007	7	1	54282	64.971	65.326	65.341	0.370	0.015
2007	10	1	54374	64.942	65.376	65.371	0.429	-0.005
2008	1	1	54466	65.017	65.491	65.457	0.440	-0.034
2008	4	1	54557	65.041	65.612	65.545	0.504	-0.067
2008	7	1	54648	65.070	65.724	65.629	0.559	-0.095
2008	10	1	54740	65.051	65.784	65.676	0.625	-0.108
2009	1	1	54832	65.099	65.900	65.777	0.678	-0.123
2009	4	1	54922	65.169	66.010	65.860	0.691	-0.150
2009	7	1	55013	65.212	66.103	65.951	0.739	-0.152
2009	10	1	55105	65.226	66.169	65.984	0.758	-0.185
2010	1	1	55197	65.229	66.305	66.070	0.841	-0.235
2010	4	1	55287	65.252	66.453	64.845	0.916	-0.285
2010	7	1	55378	65.276	66.586	66.241	0.965	-0.345
2010	10	1	55470	65.186	66.670	66.244	1.058	-0.426
2011	1	1	55562	65.310	66.797	66.325	1.015	-0.472
2011	4	1	55652	65.355	66.907	66.396	1.041	-0.511
2011	7	1	55743	65.367	67.016	66.475	1.108	-0.541
2011	10	1	55835	65.355	67.053	66.506	1.151	-0.547
2012	1	1	55927	65.422	67.178	66.603	1.181	-0.575
2012	4	1	56018	65.410	67.299	66.693	1.283	-0.606
2012	7	1	56109	65.371	67.404	66.771	1.400	-0.633
2012	10	1	56201	65.290	67.475	66.810	1.520	-0.665
2013	1	1	56293	65.332	67.588	66.907	1.575	-0.681
2013	4	1	56383	65.361	67.687	67.026	1.665	-0.661
2013	7	1	56474	65.395	67.756	67.127	1.732	-0.629
2013	10	1	56566	65.370	67.797	67.172	1.802	-0.625
2014	1	1	56658					
2014	4	1	56748					
2014	7	1	56839					
2014	10	1	56931					
2015	1	1	57023					
2015	4	1	57113					
2015	7	1	57204					
2015	10	1	57296					

Напомена: IERS-ова брза служба за предикције (IERS Rapid Service/Prediction Center), која оперативно функционише на Поморској опсерваторији САД (USNO), даје дугвремене предикције вредности параметра  $\Delta T$  за 3, 8 и 10 година са могућим грешкама од 1, 4 и 5 секунди, редом.

**Табела 5.8** Екстраполациона функција  $F(t)$  у облику тригонометријског развоја којом је направљена 10-годишња предикција HE62 за UT1-TAI. Наведена максимална грешка и стандардна девијација функције  $F(t)$  се односе на њене апроксимационе особине у односу на податке из којих је изведена

HE62 expansion of approximate function  $F(t)$   
input data: observed values of UT1-TAI in the interval 1962-2005  
argument  $t$  is expressed in MJD=JD-2400000.5

$$UT1-TAI = F(t) = \sum_i A_i \cos(\omega_i t + \varphi_i)$$

$i$	$A_i$	$\omega_i$	$\varphi_i$	PERIOD
	[second]	[radian/day]	[radian]	[day]
1	.3371003532614D+02	.8230585855502D-04	-.1511534717370D+01	.76339D+05
2	.6661970419679D+00	.8600907052595D-03	.2673100372293D+01	.73053D+04
3	.1773793802486D+00	.1390725464651D-02	.1931450283534D+01	.45179D+04
4	.4164675310217D-01	.2842820005649D-02	.2929679697852D+01	.22102D+04
5	.2257994726764D-01	.1720084084390D-01	.5496895309678D+00	.36528D+03
6	.1924759094091D-01	.7278941030841D-02	-.2244969852037D+01	.86320D+03
7	.1923333574645D-01	.3841116804496D-02	.2808486699828D+01	.16358D+04
8	.1734930310829D-01	.4913312597678D-02	-.1357003213679D+01	.12788D+04
9	.1517060298880D-01	.6623432821203D-02	-.2490022402604D+01	.94863D+03
10	.1188207519155D-01	.3440364591846D-01	.2430139012040D+01	.18263D+03
11	.8049149621032D-02	.1075590528148D-01	-.1013950753200D+01	.58416D+03
12	.7654234978791D-02	.8355502174396D-02	.1416461139001D+01	.75198D+03
13	.7324437532570D-02	.1193703139878D-01	-.1429466924648D+01	.52636D+03
14	.7082379369397D-02	.1374241132525D-01	.1509203971925D+00	.45721D+03
15	.6412238975743D-02	.9798764596028D-02	-.2687699918483D+01	.64122D+03
16	.5258435079661D-02	.1610021069066D-01	-.8113547219470D+00	.39025D+03
17	.5111935646990D-02	.1314989497140D-01	.2860509588320D+01	.47781D+03
18	.4744516387053D-02	.2097709328877D-01	-.2096333436799D+01	.29953D+03
19	.4522782460499D-02	.1550456056433D-01	.2397849283483D+01	.40525D+03
20	.4444764865194D-02	.2316502960798D-01	-.2820030905249D+01	.27124D+03
21	.4155470237532D-02	.2735012387273D-01	-.2859506617158D+01	.22973D+03
22	.4008337520800D-02	.2204361483346D-01	.1854226996838D+01	.28503D+03
23	.3968509137491D-02	.2839893480332D-01	.1578998145296D+01	.22125D+03
24	.3872451314981D-02	.2666460682832D-01	-.2583432028875D+01	.23564D+03
25	.3575253821409D-02	.1854252695962D-01	.1654784641059D+01	.33885D+03
26	.3542986814224D-02	.2417380783584D-01	-.2755396245282D+01	.25992D+03
27	.3541512529005D-02	.2515910051270D-01	-.2553635650146D+01	.24974D+03
28	.3320100670304D-02	.1963181232917D-01	-.1955667938065D+01	.32005D+03
29	.3316259173682D-02	.3094393596782D-01	-.2166367259311D+00	.20305D+03
30	.2800246766599D-02	.3310208815809D-01	.2270580927665D+00	.18981D+03
31	.2537123711778D-02	.3227259167175D-01	.3959910043914D+00	.19469D+03
32	.1907036248910D-02	.2957283065969D-01	.1141999867062D+01	.21246D+03

T1	TTT	EPS	NDAT	NN	NH	NE
.3766500000D+05	.1593000000D+05	90.000	178	32	32	0

MAX ERR = 0.39  
SIGMA = 0.08

Можемо приметити да је екстраполациона грешка  $\Delta 62$  функције  $F(t)$  скоро две године била мања од њене апроксимационе грешке MAX ERR (=390 ms) .

**Табела 5.9** Екстраполациона функција  $F(t)$  у облику тригонометријског развоја којом је направљена 10-годишња предикција HE84 за UT1-TAI. Наведена максимална грешка и стандардна девијација функције  $F(t)$  се односе на њене апроксимационе особине у односу на податке из којих је изведена.

HE84 expansion of approximate function  $F(t)$   
input data: observed values of UT1-TAI in the interval 1984-2005  
argument  $t$  is expressed in MJD=JD-2400000.5

$$UT1-TAI = F(t) = \sum_i A_i \cos(\omega_i t + \varphi_i)$$

$i$	$A_i$	$\omega_i$	$\varphi_i$	PERIOD
	[second]	[radian/day]	[radian]	[day]
1	.3526139889106D+02	.7469849907483D-04	-.1201919918011D+01	.84114D+05
2	.6948915829249D+00	.1043351469448D-02	.1417371239803D+00	.60221D+04
3	.2332236072788D-01	.1719887704835D-01	.4935342190966D+00	.36533D+03
4	.1700050971352D-01	.3231557849441D-02	.2056618159478D+01	.19443D+04
5	.1378402273730D-01	.6870381664949D-02	-.1435980591054D+01	.91453D+03
6	.9097951289769D-02	.3441412475950D-01	.2145699617952D+01	.18258D+03
7	.8475561412664D-02	.4326041966559D-02	.1320576856164D+01	.14524D+04
8	.6012620012019D-02	.8220737350459D-02	-.6805505295638D+00	.76431D+03
9	.4090839346843D-02	.9304540996026D-02	.2047373536244D+01	.67528D+03
10	.2681522484363D-02	.1593789999150D-01	-.1004299105101D+01	.39423D+03
11	.2661984332075D-02	.1259769345570D-01	-.2916834091343D+01	.49876D+03
12	.2213189770585D-02	.2904124791409D-01	-.5140439006256D+00	.21635D+03
13	.2160792213433D-02	.1361282338121D-01	-.7824887227164D+00	.46156D+03
14	.2113064261370D-02	.5554094390520D-02	.2733349297136D+01	.11313D+04
15	.2091043500295D-02	.1117472918338D-01	-.1394582957025D+01	.56227D+03
16	.1774340649322D-02	.2231982056711D-01	-.3100514769119D+01	.28151D+03
17	.1690195246706D-02	.1998433603092D-01	.2229007204286D+01	.31441D+03
18	.1629184310915D-02	.1850598306697D-01	-.7133501524512D+00	.33952D+03
19	.1349300989044D-02	.3118092132928D-01	-.1499058266344D+01	.20151D+03
20	.1127636094697D-02	.3285341113213D-01	-.3401869770342D+00	.19125D+03
21	.9598213188611D-03	.2520502854234D-01	-.5393022004249D+00	.24928D+03
22	.7155457399034D-03	.3014199883523D-01	.1000487990681D+01	.20845D+03
23	.7132708514512D-03	.2431124209899D-01	-.1318118736449D+01	.25845D+03
24	.4059593565351D-03	.2730534042055D-01	.1737074346735D+00	.23011D+03
25	.2399795795574D-03	.2118645693348D-01	-.1278556846764D+01	.29657D+03

T1	TTT	EPS	NDAT	NN	NH	NE
.4570000000D+05	.7920000000D+04	90.000	89	25	25	0

MAX ERR = 0.03  
SIGMA = 0.01

Можемо приметити да је стварна екстраполациона грешка  $\Delta 84$  функције  $F(t)$  била више од две године мања од њене апроксимационе грешке MAX ERR, иако она износи свега 30 ms са стандардном девијацијом од 10 ms. То значи да се апроксимационе функције  $F(t)$ , изведене HE методом, са истом тачношћу, могу користити и за екстраполације (предикције) Земљине оријентације на интервалима ширине 10% временског опсега на коме су дефинисани улазни подаци.

### 5.3.2. Процена предикционих грешака према IERS RS/PC IERS и IERS EOP PC

Ради поређења и оцене квалитета наших резултата, који су компаративно представљени на сликама 5.2, 5.3, 5.4 и 5.10 и у табелама 5.2, 5.6 и 5.7 наводимо значајне процене грешака IERS-ових предикција светског времена UT1 у табелама 5.10 и 5.11.

За кратковремене предикције, подаци су узети из циркулара *Bulletin A*, које IERS-ова брза служба за предикције (IERS Rapid Service/Prediction Center) објављује једном недељно, и из извештаја W. Wooden-а ('*Activities of the IERS Working Group on Predictions*') из 2007., а за дуговремене, употребљени су резултати из 2011. године који су наведени у [130] (Gambis et al.) и [58] (Gambis, Luzum), чији је први аутор D. Gambis, иначе актуелни директор IERS EOP PC-а (IERS Earth Orientation Parameters Product Center)

**Табела 5.10** Горња граница процењених грешака предикција UT1-UTC у *Bulletin A* (IERS RS/PC) током претходне две деценије (плава, зелена и црвена колона) и највећа одступања тих предикција од реализованих вредности разлика UT1-UTC за време ЕОРПСС-а (љубичасте колоне).

Предикциони интервал [дан]	Процењене грешке			Стварне грешке		
	(1991)	(2001)	(2011)	(2005)	(2006)	(2007)
	[ms]			[ms]		
10	1.4	1.7	1.4	0.94	1.06	1.07
20	3.1	2.8	2.4	3.30	3.11	4.00
40	7.0	4.8	4.0	5.98	6.88	9.38
90	13.8	8.8	7.3	7.61	22.10	12.10

**Табела 5.11** Средње и максималне грешке дуговремених предикција UT1-UTC. према [130] (плаве колоне) и [58] (црвене колоне). D. Gambis et al. ([130]) су примењивали стандардне IERS-ове предикционе технике на вредности -UTC у раздобљу (1963-2011), а Gambis и Luzum ([58]) су користили само део тих података из последње деценије. У оба рада није реч о правим предикцијама, јер су наведени само резултати тестирања могућности IERS-ове предикционе технике на подацима који су већ садржали и реализоване вредности UT1-UTC.

Предикциони интервал [година]	Средње грешке		Максималне грешке	
	[ms]		[ms]	
1	70	40	120	150
2	150	100	300	300
3	300	200	550	470
4	400	300	800	800

Подаци у табелама 5.10 и 5.11 јасно показују како се тачност IERS-ових предикција времена UT1 неуједначено смањује са повећањем предикционог интервала.

## 6. ЗАКЉУЧАК

Сумирајући на крају само најбитније теоријске и практичне чињенице које су изнете у овој дисертацији, а које на неки начин представљају лични допринос, изражен преко сопствених резултата, ставова и/или запажања, можемо укратко истаћи следеће:

◇ За разлику од уобичајеног приступа по коме се кретање описује у времену или простор-времену, као засебном ентитету, овде је приказано гледиште по коме се време третира као неодвојиво својство, или компонента, кретања. Полазећи од кретања, схваћеног на најопштији начин и поистовећеног са било којом променом стања, дефинисана је метрика времена и два начина заснивања временских скала.

◇ Из описа дефиниција, особина и анализе односа актуелних временских скала у протеклих пола века може се сагледати њихов развојни пут, али, уз то, и уочити неколико врло битних чињеница, нарочито оних који су у вези природе променљивости брзине Земљине ротације, а самим тим и варијација јединице UT1 скале.

– И без посебних испитивања приметно је да одступања времена UT1 од референтног (много униформнијег) времена (ET, TDT, TT или TAI, свеједно) имају правилнији ток у ери атомских сатова него што је то пре био случај. Њихов готово линеарни тренд јасно указује да велики прираштај у разликама UT1-TAI и  $\Delta T$  није последица успоравања брзине Земљине ротације, како се може срести у литератури, већ је *de facto* акумулација временске разлике, због тога што је у том периоду секунда UT1 времена била стално већа од метролошке (SI) секунде (јединице скала ET, TAI, TDT и TT).

– Штавише, брзина Земљине ротације се повећала од почетка 60-тих година, тако да се астрономски дан у просеку скратио за око 2 ms. То значи, већ сада се може рећи, да ће се око 2060. године, када се наврши 100 година, добити резултат, који ће се веома разликовати од просечног продужења дана за 1.7 ms по веку, како следи из историјских одређивања  $\Delta T$  у радовима Морисона и Стивенсона.

– Показано је да се квалитативно бољи резултати одређивања разлике UT1-TAI после 1984. године, који су добијени искључиво из VLBI мерења, могу знатно боље математички моделирати применом HE методе, него што је то случај са истим подацима, када се користе и резултати пре 1984. године. У Табелама 5.8 и 5.9, види се да аналитички развој HE84 има за ред величине мању апроксимациону грешку са 8 пута мањом стандардном девијацијом него развој HE62. То, заједно са значајно бољим предикционим својствима модела HE84 (Слика 5.10, Табеле 5.6 и 5.7), потврђује да прецизна алгебарска детекција скривених периодичних компоненети у улазним подацима, коју омогућава HE метода, у овом случају заиста има и физички смисао.

◇ Предикције варијација UT1 времена (а самим тим и параметра  $\Delta T$ ) које су у овом раду креиране применом оригиналног HE метода дале су потпуно задовољавајући резултат на свим предикционим интервалима, од вишедневних до вишегодишњих.

– Нарочито добар резултат је остварен у дуговременим предикцијама, 500-дневним и вишегодишњим, као што се може видети на Сликама 5.4 и 5.10 и Табелама 5.2, 5.6 и 5.7.

– Средине предикционих грешака по данима и њихове стандардне девијације (Слике 5.5, 5.6, 5.7; Табеле 5.3, 5.4, 5.5) показују високу статистичку стабилност свих предикција изведених HE методом, које су десетинама пута понављане током извршења пројекта ЕОРПСС (10-дневне, 30-дневне и 500-дневне предикције).

◇ Реално је очекивати да ће теоријско појачање HE методе (нпр. детекцијом и пригушених хармоника) и практична реализација пратеће програмске подршке са већом нумеричком прецизношћу (нпр. у фортранској четворострукој прецизности) унапредити апроксимациона и предикциона својства HE модела и превазићи овде приказане резултате.

## ЛИТЕРАТУРА

- [1] Абалакин ВК (1979) *ОСНОВЫ ЭФЕМЕРИДНОЙ АСТРОНОМИИ*, Наука, Москва
- [2] Allan DW (1966) Statistics of Atomic Frequency Standards, *Proc. IEEE*, **54**(2), pp 221-230
- [3] Allan DW, Barnes JA (1981) A Modified "Allan Variance" with increased Characterization Ability, *Proc. 35th Ann. Freq. Control Symposium*, pp 470-474
- [4] Allen S (blog) Time Scales, <http://www.ucolick.org/~sla/leapsecs/timescales.html>
- [5] Allen S (blog) Future of Leap Seconds, <http://www.ucolick.org/~sla/leapsecs/timescales.html>
- [6] Altamimi Z, Collileux X, Métyvier L (2011) ITRF2008: an improved solution of the international terrestrial reference frame, *J Geod*, DOI 10.1007/s00190-011-0444-4
- [7] Анђелић Т (1973) *ТЕНЗОРСКИ РАЧУН*, Научна књига, Београд
- [8] Aoki S, et al (1982) The new definition of universal time, *Astron Astrophys*, **105**, pp 359-361
- [9] Argus DF, Gordon RG (1991) No-net-rotation model of current plate velocities incorporating plate motion model NUVEL-1, *Geophys Res Lett*, **18**(11), pp 2039-2042, DOI: 10.1029/91GL01532
- [10] Arias EF (2009) Current and future realizations of coordinate time scales, *Proc IAU*, Vol **5**, S261, pp 95-101
- [11] Arias EF, Charlot P, Feissel M, Lestrade J-F (1995) The extragalactic reference system of the International Earth Rotation Service ICRS, *Astron Astrophys*, **303**, pp 604-608
- [12] Arias EF, Feissel M, Lestrade J-F (1988) An extragalactic celestial reference frame consistent with the BIH Terrestrial System (1987), *BIH Annual Report for 1987*, pp D113-D121
- [13] Arias EF, Guinot B (2005) Coordinated Universal Time UTC: Historical background and perspectives, *Journées 2004* (Capitaine N ed)
- [14] Arias EF, Guinot B, Quinn TJ (2003) Proposal for a new dissemination of time scales, *Proc ITU-R SRG Coloq on the UTC Timescale*, IEN Ferraris, Torino ([http://www.iurim.it/luc/cesio/itu/arias\\_2.pdf](http://www.iurim.it/luc/cesio/itu/arias_2.pdf))

- [15] Arias EF, Panfilo G, Petit G (2011) Timescales at the BIPM, *Metrologia*, **48**(4), S145
- [16] Arias EF, Petit G (2005) Estimation of the duration of the scale unit of TAI with primary frequency standards, *Proc joint IEEE frequency Control Symp. and PTTI*, pp 312-315
- [17] Ashby N, Nelson R. (2010) The global positioning system, relativity and extraterrestrial navigation, *Proc IAU Symp 261*, pp 22-30
- [18] Audoin C, Guinot B (2001) *THE MEASUREMENT OF TIME*, Cambridge University Press
- [19] Azoubib J, Graveaud M, Guinot B (1977) Estimation of the scale unit duration of time scales, *Metrologia*, **13**, pp 87-93
- [20] Bailes M (2010) The art of precision pulsar timing, *Proc IAU Symp 261*, pp 212-217
- [21] Бакулин ПИ, Блинов НС (1977) *СЛУЖБА ТОЧНОГО ВРЕМЕНИ*, Наука, Москва
- [22] Baugh RA (1971) Frequency Modulation Analysis with the Hadamard Variance, *Proc. 25th Ann. Symp. on Freq. Control*, pp 222-225
- [23] ВИИ, *Annual Report 1974*
- [24] ВИИ, *Annual Report 1975*
- [25] BIPM (2006) *The International System of Units (SI)*, 8th edition, Organisation Intergouvernementale de la Convention du Mètre  
([http://www.bipm.org/utis/common/pdf/si\\_brochure.8\\_en.pdf](http://www.bipm.org/utis/common/pdf/si_brochure.8_en.pdf))
- [26] BIPM (2011) *Annual Report on Time Activities (2010)*, Vol **5**
- [27] BIPM (2013) TT(BIPM12), [ftp://tai.bipm.org/TFG/TT\(BIMP\)/TTBIMP.12](ftp://tai.bipm.org/TFG/TT(BIMP)/TTBIMP.12)
- [28] Bregni S, Jmoda L (2006) Improved estimation of the hurst parameter of long-range dependent traffic using the modified hadamard variance, *Proceeding of the 2006 IEEE International Conference on Communications*, pp 566-572
- [29] Capitaine N, Chapront J, Lambert S (2003) Expressions for the Celestial Intermediate Pole and Celestial Ephemeris Origin consistent with the IAU 2000A Precession-Nutation model, *Astron Astrophys*, **400**(3), pp 1145-1154
- [30] Capitaine N, Guinot B, McCarthy DD (2000) Definition of the Celestial Ephemeris Origin and of UT1 in the International Celestial Reference Frame, *Astron Astrophys*, **355**(1), pp 398-405



- [31] Capitaine N, Wallace PT (2006) High precision methods for locating the Celestial Intermediate Pole and Origin, *Astron Astrophys*, **450**, pp 855-872
- [32] Capitaine N, Wallace PT, Chapront J (2003) Expressions for IAU 2000 Precession Quantities, *Astron Astrophys*, **412**(2), pp 567-586
- [33] Carrol SM (1997) *Lecture Notes on General Relativity*, Institute for Theoretical Physics, University of California
- [34] Cheng D et al (2010) Time Standard and Ensemble Pulsar Time Scale, *NTSC*, CAS (<http://www.atnf.csiro.au/research/pulsar/orange10/pdf/DingChenOrange2010.pdf>)
- [35] Chris Rizos (1999), Principles and Practice of GPS Surveying, ([www.gmat.unsw.edu.au/snap/gps/gps\\_survey/principles\\_gps.htm](http://www.gmat.unsw.edu.au/snap/gps/gps_survey/principles_gps.htm))
- [36] Clemence GM (1948) On the System of Astronomical Constants, *Astron J*, **53**, 169-79
- [37] Danjon A (1929) Le temps, sa définition pratique, sa mesure, *L'astronomie*, **43**, 13-22
- [38] DeMets C, Gordon RG, Argus DF, Stein S (1990) *Current plate motions*, *Geophys J Int*, **101**(2), pp 425-478, DOI: 10.1111/j.1365246X.1990.tb06579.x
- [39] DeMets C, Gordon RG, Argus DF, Stein S (1994) Effect of recent revisions to the geomagnetic reversal time scale on estimates of current plate motions, *Geophys Res Lett*, **21**(20), pp 2191-2194, DOI: 10.1029/94GL02118
- [40] Dicke RH (1964) *The Theoretical Significance of Experimental Relativity* (Gordon and Breach, New York), p 8
- [41] Dirac PAM (1975) *GENERAL THEORY OF RELATIVITY*, John Wiley and Sons, New York
- [42] Eichhorn H (1974) *ASTRONOMY OF STAR POSITIONS*, F Ungar Publ Co, New York
- [43] ESA (1997) *THE HIPPARCOS AND TYCHO CATALOGUES*, ESA Publications, Noordwijk, SP-1200, 19 Volumes
- [44] *EXPLANATORY SUPPLEMENT TO THE ASTRONOMICAL ALMANAC* (Edt: Seidelmann PK) (1992), University Science Books, Sausalito CA
- [45] *EXPLANATORY SUPPLEMENT TO THE ASTRONOMICAL EPHEMERIS AND THE AMERICAN EPHEMERIS AND NAUTICAL ALMANAC* (Edt: Wilkins GA) (1961), Her Majesty's Stationery Office, London

- [46] Fairhead L, Bretagnon P (1990) An analytic formula for the time transformation TB-TT, *Astron Astrophys*, **229**, 240-7
- [47] Feissel M (1980) Determination of the Earth rotation parameters by the Bureau International de l'Heure 1962-1972, *Bull Géod*, **34**, pp 81-102
- [48] Feissel M, Mignard F (1998) The adoption of ICRS on 1 January 1998: meaning and consequences, *Astron Astrophys*, **331**, L33-L36
- [49] Fey AL et al (2004) The Second Extension of the International Celestial Reference Frame: ICRF-EXT.1, *Astron J*, **127**(6), pp 3587-3608
- [50] Finkleman D, Seago JH, Seidelmann PK (2010) The Debate over UTC and Leap Seconds, *AIAA Guidance, Navigation, and Control Conference*, AIAA Paper 2010-8391
- [51] Finkleman D et al (2011) The Future of Time: UTC and the Leap Second, *American Scientist*, Vol **99**(4), pp 312-319
- [52] Folkner WM, Williams JG, Boggs DH (2009) The Planetary and Lunar Ephemeris DE 421, IPN Progress Report 42-178
- [53] Fricke W (1982) Determination of the equinox and equator of the FK5, *Astron Astrophys*, **107**(1), L13-L16
- [54] Fricke W, et al (1963) FK4, *Veröff des Astron Rechen-Institut Heildelberg*, **10**
- [55] Fricke W, et al (1988) Fifth Fundamental Catalogue (Part I), *Veröff Astron Rechen-Institut Heildelberg*, **32**
- [56] Fricke W, et al (1991) Fifth Fundamental Catalogue (Part II), *Veröff Astron Rechen-Institut Heildelberg*, **33**
- [57] Fricke W, et al (1994) Fifth Fundamental Catalogue (Part III), *Veröff Astron Rechen-Institut Heildelberg*, **34**
- [58] Gambis D, Luzum B (2011) Earth rotating monitoring, UT1 determination and prediction, *Metrologia*, **48**, S165-S169
- [59] Greenhall CA, Howe DA, Percival DB (1999) Total variance, an estimator of long-term frequency stability, *IEEE Trans Ultrason Ferroelectr Freq Control*, UFFC-46, 1183-91
- [60] Guinot B (1979) Basic Problems in the Kinematics of the Rotation of the Earth, in *TIME AND EARTH'S ROTATION*, McCarthy DD, Pilkington JD (eds), D Reidel Publishing Company, pp 7-18

- [61] Guinot B (1986) Is the International Atomic Time TAI a Coordinate Time or a Proper Time?, *Celest Mech*, **38**, pp 155-161
- [62] Guinot B (1987) Some properties of algorithms for atomic time scales, *Metrologia*, **24**, pp 194-198
- [63] Guinot B (1988) Atomic time scales for pulsar studies and other demanding applications, *Astron Astrophys*, **192**, pp 370-373
- [64] Guinot B (2011) Time scales in the context of general relativity, *Phil Trans R Soc A*, **369**, pp 4131-4142
- [65] Guinot B, Arias EF (2005) Atomic time-keeping from 1955 to the present, *Metrologia*, **42**, S20-30
- [66] Guinot B, Petit G (1991) Atomic time and the rotation of pulsars, *Astron Astrophys*, **248**, 292
- [67] Guinot B, Thomas C (1988) Establishment of International Atomic Time, *Annual Report of the BIPM Time Section*, Vol **1**
- [68] Hafele JC, Keating RE (1972) *Science* **177**, 166
- [69] Hide R, Dickey JO (1991) Earth's Variable Rotation, *Science AAAS (New Series)*, **253** (5020), 629–637
- [70] Hazewinkel M (ed) (2001) Einstein equations, *Encyclopedia of Mathematics*, Springer
- [71] Hobbs G, Coles W, Manchester R, Chen D (2010) Developing a Pulsar/based Timescale, arXiv:1011.5285v1 [astro-ph.sr]
- [72] Howe DA (2006) *Metrologia*, **43**(4), S322
- [73] Howe DA, Greenhall CA (1997) Total variance: a progress report on a new frequency stability characterization, *Proc. 29th PTTI Systems and Applications Meeting*, pp 39-48
- [74] Howe DA, Vernote F (1999) Generalization of the total variance approach to the modified Allan variance, *Proceedings of 31st PTTI Systems and Applications Meeting*, pp 267-76
- [75] Howe DA et al (2005) Enhancements to GPS operations and clock evaluations using a 'total' hadamard deviation, *IEEE Trans Ultras Ferroelec Freq Control*, **52**, 1253-61
- [76] Huggett N, Hofer C (2009) Absolute and Relational Theories of Space and Motion, *The Stanford Encyclopedia of Philosophy*, Edward N Zalta (ed), URL = <<http://plato.stanford.edu/archives/fall2009/entries/spacetime-theories/>>

- [77] Hutsell ST (1995) Relating the hadamard variance to MCS Kalman filter clock estimation, *Proceeding of 27th PTTI Meeting*, pp 291-302
- [78] IAU (1997) Resolution B2, On the International Celestial Reference System (ICRS), 23rd IAU GA, Kyoto (<http://www.iau.org/static/resolutions/IAU1997.French.pdf>)
- [79] IAU (2001) *Information Bulletin*, **88**
- [80] IERS (1997) Definition and realization of the International Celestial Reference System by VLBI Astrometry of Extragalactic Objects, Ma C & Feissel M (eds), *IERS Technical Note 23*, Observatoire de Paris (<http://www.iers.org/TN23>)
- [81] IERS (1999) *IERS Annual Report for 1998*, Observatoire de Paris
- [82] IERS (2004) IERS Conventions (2003) (eds: McCarthy DD & Petit GP), *IERS Technical Note 32*, Verlag des Bundesamts für Kartographie und Geodäsie, Frankfurt am Main
- [83] IERS (2009) The Second Realization of the international Celestial Reference Frame by VLBI (Eds: Fey AL, Gordon D & Jacobs CS ), *IERS Technical Note 35*, Frankfurt am Main: Verlag des Bundesamts für Kartographie und Geodäsie, 204 p
- [84] IERS (2010) IERS Conventions (2010) (eds: Petit G, Luzum B), IERS Technical Note No. **36**, Verlag des Bundesamts für Kartographie und Geodäsie, Frankfurt am Main, ISSN: 1019-4568
- [85] Irwin AW, Fukushima T (1999) A numerical time ephemeris of the Earth, *Astron Astrophys*, **348**, 642-652
- [86] Ives HE (1937) *J Opt Soc Am* **27**, 177
- [87] Ives HE, Stilwell GR (1938) *J Opt Soc Am* **28**, 215
- [88] Jennifer A, McGee JA, David A, Howe DA (2007) Thêo-Hybrid, *IEEE Trans Ultrason Ferroelectr Freq Control*, **54**(2), 448-52, PMID: 17328343
- [89] Jones T (2000) *SPLITTING THE SECOND - The Story of Atomic Time*, IOP Publishing, Bristol and Philadelphia, ISBN 0 7503 0640 8 pbk
- [90] Jovanović B (1987) An Approximation of Tabulated Function, *Publ. Inst. Math. Belgrade*, **41** (55), 143-148.
- [91] Jovanović B (1989) An Analytical Representation of Ephemeris Data, *Celest Mech*, **45**, 317-320.

- [92] Jovanović B (1997) Aproksimativno predstavljanje efemerida u dinamičkoj astronomiji, *Magistarski rad*, Matematički fakultet Univerziteta u Beogradu
- [93] Jovanović B (2001) On Approximating by Sums of Trigonometric and Exponential Functions, *Proceedings of the 10th Congress of Yugoslav Mathematicians*, 371 – 378
- [94] Kalarus M, Schuh H, Kosek W, Akyilmaz O, Bizouard Ch, Gambis D, Gross R, Jovanović B, Kumakshev S, Kutterer H, Mendes Cerveira PJ, Pasynok S, Zotov L (2010) Achievements of the Earth orientation parameters prediction comparison campaign, *J Geod*, **84**, 587 – 596, DOI 10.1007/s00190-010-0387-1
- [95] Klioner SA, et al (2009) Units of relativistic time scales and associated quantities, Proc IAU, Vol **5**, S261, pp 85-84
- [96] Kopff A (1937) FK3, *Veröff Astron Rechen-Institut*, Heilderberg, **54**
- [97] Kovalevsky J et al (1997) The Hipparcos Catalogue as a realization of the extragalactic reference system, *Astron Astrophys*, **323**(2), pp 620-633
- [98] Kovalevsky J, Seidelmann PK (2004) *FUNDAMENTALS OF ASTROMETRY*, Cambridge University Press
- [99] Lambeck K (1980) *THE EARTH'S VARIABLE ROTATION: Geophysical Causes and Consequences*, Cambridge University Press, ISBN 0 521 22769 0
- [100] Lambert S, Bizouard C (2002) Positioning the Terrestrial Ephemeris Origin in the International Terrestrial Reference Frame, *Astron Astrophys*, **394** (1), pp 317-321
- [101] Lambourne RJA (2010) *RELATIVITY, GRAVITATION AND COSMOLOGY*, Cambridge University Press
- [102] Lieske JH et al (1977) Expressions for the Precession Quantities Based upon the IAU (1976) System of Astronomical Constants, *Astron Astrophys*, **58** (1-2), pp 1-16
- [103] Ma C et al (1998) International Celestial Reference Frame as realized by Very Long Baseline Interferometry, *Astron J*, **116**(1), pp 516-546
- [104] Markosian N (2013) Time, *The Stanford Encyclopedia of Philosophy*, Edward N Zalta (ed), URL = <<http://plato.stanford.edu/archives/fall2013/entries/time/>>
- [105] Markowitz W, Hall RG, Essen L, Parry JVL (1958) Frequency of Caesium in Terms of Ephemeris Time, *Phys Rev Letters*, **1**, pp 105-107

- [106] Mathew PM, Herring TA, Buffett BA (2002) Modeling of nutation and precession: New nutation series for nonrigid Earth, and insights into the Earth's interior, *J Geophys Res*, **107**(B4)
- [107] Matsakis DN, Taylor JH, Eubanks TM (1997) A statistic for describing pulsar and clock stabilities, *Astron Astrophys*, **326**, pp 924-928
- [108] McCarthy DD, Babcock A (1986) The length of day since 1656 *Phys Earth Planet Inter*, **44**, 281-92
- [109] McCarthy DD, Klepczynski WJ (1999) GPS and Leap Seconds, *GPS World*, November, pp 50-54
- [110] McCarthy DD, Luzum BJ (2003) An Abridged Model of the Precession-Nutation of the Celestial Pole, *Celest Mech Dyn Astr*, **85** (1), pp 37-49
- [111] McCarthy DD, Seidelmann PK (2009) *TIME - From Earth Rotation to Atomic Physics*, WILEY-VCH Verlag GmbH & Co. KGaA, Weinheim, ISBN: 978-3-527-40780-4
- [112] Melbourne W et al (1983) *PROJECT MERIT STANDARDS*, USNO Circular, No 167
- [113] Morgan HR (1952) N30, *Astron Papers Am Ephemeris and Naut Alm*, **13**, part 3
- [114] Morrison LV (1979) An analysis of lunar occultations in the years 1943–1974 for corrections to the constants in Brown's theory, the right ascension system of the FK4, and Watts' lunar-profile datum, *MNRAS*, **187**, 41–82
- [115] Morrison LV, Stephenson FR (2001) Historical eclipses and the variability of the earth's rotation, *JG*, **32**, 247-65
- [116] Morrison LV, Stephenson FR (2004) Historical values of the Earth's clock error  $\Delta T$  and the calculations of eclipses, *JHA*, **35**, 327–336
- [117] Morrison LV, Stephenson FR (2005) Historical values of the Earth's clock (Addendum), *JHA*, **36**, 339
- [118] Mueller II (1969) *SPHERICAL AND PRACTICAL ASTRONOMY (as applied to geodesy)*, Frederick Ungar, New York
- [119] Munk WH, MacDonald GJF (1960) *THE ROTATION OF THE EARTH – A Geophysical Discussion*, Cambridge University Press
- [120] Nelson RA et al (2001) Leap second: Its history and possible future, *Metrologia*, **38**, pp 509-529

- [121] Newcomb S (1895) *ASTRONOMICAL PAPERS PREPARED FOR THE USE OF THE AMERICAN EPHEMERIS AND NAUTICAL ALMANAC*, Vol VI, Part I: *TABLES OF THE SUN*, US Government Printing Office, Washington, DC, p 9
- [122] Newcomb S (1895) *THE ELEMENTS OF THE FOUR INNER PLANETS AND THE FUNDAMENTAL CONSTANTS OF ASTRONOMY*, US Government Printing Office, Washington
- [123] Newcomb S (1898) *TABLES OF THE MOTION OF THE EARTH ON ITS AXIS AROUND THE SUN*, *Astronomical Papers of AENA*, Washington
- [124] Peters J (1907) NFK, *Veröff des König Astron Rechen-Instituts zu Berlin*, **33**
- [125] Petit G (2003) A new realization of Terrestrial Time, *Proc 35th PTTI*, pp 307-317
- [126] Petit G, Tavella P (1996) Pulsars and Time Scales, *Astron Astrophys*, **308**, pp 290-298
- [127] Post EJ (1967) *Rev Mod Phys* **39**, 475
- [128] Pound RV, Rebka GA (1960) *Phys Rev Lett* **4**, 337
- [129] Schuh H, Kosek W, Kalarus M, Akyilmaz O, Gambis D, Gross R, Jovanović B, Kumakshiev S, Kutterer H, Mendes Cerveira PJ, Pasynok S, Zotov L (2008) Earth orientation parameters prediction comparison campaign – First summary, *Geophysical Research Abstracts*, Vol.10, EGU Gen. Assem. 2008, Sref-ID: 1607-7962/gra/EGU2008-A-07644
- [130] Seago JH, Seaman RL, Allen SL (Eds) (2011) *DECOUPLING CIVIL TIME FROM EARTH ROTATION*, *Proc Colloq Exploring Implications of Redefining UTC*, AAS, Vol **113**, Science and Technology Series
- [131] Seidelmann PK (1982) 1980 IAU theory of nutation: The final report of the IAU Working Group on Nutation, *Celest Mech*, **27**(1), pp 79-106
- [132] Seidelmann PK, Fukushima T (1992) Why new time scales, *Astron Astrophys*, **265**, 833-8
- [133] de Sitter W (1913) *Proc Amsterdam Acad* **15**, 1297
- [134] de Sitter W (1927) *Bull Astron Inst of the Netherlands*, **IV**, 21-38
- [135] Soffel MH (2000) Towards Models and constants for Sub-Microarcsecond Astrometry, Johnston KJ, McCarthy DD, Luzum BJ & Kaplan GH (Eds), IAU Colloquium 180, Publ US Naval Observatory, Washington DC, 283-292
- [136] Spencer Jones H (1939) The rotation of the Earth, and the secular accelerations of the Sun, Moon and planets, *MNRAS*, **99** (7), 541-558

- [137] Standish EM (1998) Time scales in the JPL and CfA ephemerides, *Astron Astrophys*, **336**, 381-4
- [138] Standish EM et al (1997) JPL Planetary and Lunar Ephemerides, Willman-Bell, Richmond VA
- [139] Stephenson FR, Morrison LV (1984) Long-term changes in the rotation of the Earth: 700 B.C. to A.D. 1980, *Phil Trans R Soc Lond A*, **313**, 47–70
- [140] Stephenson FR, Morrison LV (1995) Long-term fluctuations in the Earth's rotation: 700 BC to AD 1990, *Phil Trans R Soc Lond A*, **351**, 165–202
- [141] Stephenson FR, Morrison LV (2000) Historical eclipses and the Earth's rotation, *Science Progress*, **83** (1), 55–76
- [142] Stephenson FR (2008) How reliable are archaic records of large solar eclipses, *JHA*, **39**, 229–250
- [143] Stoyko N (1937) *Comptes-rendus de l' Académie des Sciences*, **250**, 79-82
- [144] Tavella P, Thomas C (1991) Comparative study of time scale algorithms, *Metrologia*, **28**, pp 57-63
- [145] Thomas C, Azoubib J (1996) TAI computation: study of an alternative choice for implementing an upper limit of clock weights, *Metrologia*, **33**, pp 227-240
- [146] Thomas C, Wolf P, Tavella P (1994) Time Scales BIPM, *Monographie*, 94/1
- [147] Wahr JM (1981) The forced nutations of an elliptical, rotating, elastic and oceanless Earth, *Geophys J Roy astr Soc*, **64**(3), pp 705-727, DOI:10.1111/j.1365-246X.1981.tb02691.x
- [148] Wilkins GA (ed) (1980) *PROJECT MERIT*, Royal Greenwich Observatory
- [149] Winkler GMR, Van Flandern TC (1977) Ephemeris time, relativity, and the problem of uniform time in astronomy, *Astron J*, **82** (1), 84–92



## ПРИЛОЗИ

*Избор важнијих Резолуција Међународне астрономске уније  
које се тичу временских скала и референцијних система*

- (П1) XXI Генерална скупштина IAU (Buenos Aires, 1991.)
- (П2) XXIV Генерална скупштина IAU (Manchester, 2000.)

XXIst General Assembly

Buenos Aires  
Argentina

1991

Resolution No. A 4

*Recommendations from the Working Group on Reference Systems*  
*Recommandation du Groupe de Travail sur les Systèmes de référence*

Recommendations I to IX

The XXIst General Assembly of the International Astronomical Union,

RECOMMENDATION I

considering,

that it is appropriate to define several systems of space-time coordinates within the framework of the General Theory of Relativity,

recommends,

that the four space-time coordinates ( $x^0 = ct, x^1, x^2, x^3$ ) be selected in such a way that in each coordinate system centred at the barycentre of any ensemble of masses, the squared interval  $ds^2$  be expressed with the minimum degree of approximation in the form:

$$ds^2 = -c^2 d\tau^2 \\ = - \left(1 - \frac{2U}{c^2}\right) (dx^0)^2 + \left(1 + \frac{2U}{c^2}\right) [(dx^1)^2 + (dx^2)^2 + (dx^3)^2],$$

where  $c$  is the velocity of light,  $\tau$  is proper time, and  $U$  is the sum of the gravitational potentials of the above mentioned ensemble of masses, and of a tidal potential generated by bodies external to the ensemble, the latter potential vanishing at the barycentre.

RECOMMENDATION II

considering,

- a) the need to define a barycentric coordinate system with spatial origin at the centre of mass of the solar system and a geocentric coordinate system with spatial origin at the centre of mass of the Earth, and the desirability of defining analogous coordinate systems for other planets and for the Moon,
- b) that the coordinate systems should be related to the best realization of reference systems in space and time, and,
- c) that the same physical units should be used in all coordinate systems,

recommends that,

1. the space coordinate grids with origins at the solar system barycentre and at the centre of mass of the Earth show no global rotation with respect to a set of distant extragalactic objects,
2. the time coordinates be derived from a time scale realized by atomic clocks operating on the Earth,
3. the basic physical units of space-time in all coordinate systems be the second of the International System of Units (SI) for proper time, and the SI meter for proper length, connected to the SI second by the value of the velocity of light  $c = 299792458 \text{ ms}^{-1}$ ,

#### RECOMMENDATION III

considering,

the desirability of the standardisation of the units and origins of coordinate times used in astronomy,

recommends that,

1. the units of measurement of the coordinate times of all coordinate systems centred at the barycentres of ensembles of masses be chosen so that they are consistent with the proper unit of time, the SI second,
2. the reading of these coordinate times be 1977 January 1,  $0^h 0^m 32.184^s$  exactly, on 1977 January 1,  $0^h 0^m 0^s$  TAI exactly (JD = 2443144.5, TAI), at the geocentre,
3. coordinate times in coordinate systems having their spatial origins respectively at the centre of mass of the Earth and at the solar system barycentre, and established in conformity with the above sections (1) and (2), be designated as Geocentric Coordinate Time (TCG) and Barycentric Coordinate Time (TCB).

#### RECOMMENDATION IV

considering,

- a) that the time scales used for dating events observed from the surface of the Earth and for terrestrial metrology should have as the unit of measurement the SI second, as realized by terrestrial time standards,
- b) the definition of the International Atomic Time, TAI, approved by the 14th Conférence Générale des Poids et Mesures (1971) and completed by a declaration of the 9th session of the Comité Consultatif pour la Définition de la Seconde (1980).

recommends that,

- 1) the time reference for apparent geocentric ephemerides be Terrestrial Time, TT,
- 2) TT be a time scale differing from TCG of Recommendation III by a constant rate, the unit of measurement of TT being chosen so that it agrees with the SI second on the geoid,
- 3) at instant 1977 January 1,  $0^h 0^m 0^s$  TAI exactly, TT have the reading 1977 January 1,  $0^h 0^m 32.184^s$  exactly.

#### RECOMMENDATION V

considering,

that important work has already been performed using Barycentric Dynamical Time (TDB), defined by IAU Recommendation 5 (1976) of IAU Commissions 4, 8 and 31, and Recommendation 5 (1979) of IAU Commissions 4, 19 and 31,

recognizes,

that where discontinuity with previous work is deemed to be undesirable, TDB may be used.

#### RECOMMENDATION VI

considering,

the desirability of implementing a conventional celestial barycentric reference system based upon the observed positions of extragalactic objects, and,

noting,

the existence of tentative reference frames constructed by various institutions and combined by the International Earth Rotation Service (IERS) into a frame used for Earth rotation series,

recommends,

1. that intercomparisons of these frames be extensively made in order to assess their systematic differences and accuracy,
2. that an IAU Working Group consisting of members of Commissions 4, 8, 19, 24, 31 and 40, the IERS, and other pertinent experts, in consultation with all the institutions producing catalogues of extragalactic radio sources, establish a list of candidates for primary sources defining the new conventional reference frame, together with a list of secondary sources that may later be added to or replace some of the primary sources, and,

requests,

1. that such a list be presented to the XXIInd General Assembly (1994) as a part of the definition of a new conventional reference system,
2. that the objects in this list be systematically observed by all VLBI and other appropriate astrometric programmes.

#### RECOMMENDATION V

considering,

that important work has already been performed using Barycentric Dynamical Time (TDB), defined by IAU Recommendation 5 (1976) of IAU Commissions 4, 8 and 31, and Recommendation 5 (1979) of IAU Commissions 4, 19 and 31.

recognizes,

that where discontinuity with previous work is deemed to be undesirable, TDB may be used.

#### RECOMMENDATION VI

considering,

the desirability of implementing a conventional celestial barycentric reference system based upon the observed positions of extragalactic objects, and,

noting,

the existence of tentative reference frames constructed by various institutions and combined by the International Earth Rotation Service (IERS) into a frame used for Earth rotation series,

recommends,

1. that intercomparisons of these frames be extensively made in order to assess their systematic differences and accuracy,
2. that an IAU Working Group consisting of members of Commissions 4, 8, 19, 24, 31 and 40, the IERS, and other pertinent experts, in consultation with all the institutions producing catalogues of extragalactic radio sources, establish a list of candidates for primary sources defining the new conventional reference frame, together with a list of secondary sources that may later be added to or replace some of the primary sources, and,

requests,

1. that such a list be presented to the XXIVth General Assembly (1994) as a part of the definition of a new conventional reference system,
2. that the objects in this list be systematically observed by all VLBI and other appropriate astrometric programmes.

## XXIVth General Assembly

Manchester, UK

2000

#### Resolution No. B1.1

*Maintenance and establishment of  
reference frames and systems*

*Suivi et construction de repères  
Et de systèmes de référence*

The XXIVth International Astronomical Union General Assembly,

#### Noting

1. that Resolution B2 of the XXIIIrd General Assembly (1997) specifies that "the fundamental reference frame shall be the International Celestial Reference Frame (ICRF) constructed by the IAU Working Group on Reference Frames",
2. that Resolution B2 of the XXIIIrd General Assembly (1997) specifies "That the Hipparcos Catalogue shall be the primary realisation of the International Celestial Reference System (ICRS) at optical wavelengths", and
3. the need for accurate definition of reference systems brought about by unprecedented precision, and

#### Recognising

1. the importance of continuing operational observations made with Very Long Baseline Interferometry (VLBI) to maintain the ICRF,
2. the importance of VLBI observations to the operational determination of the parameters needed to specify the time-variable transformation between the International Celestial and Terrestrial Reference Frames,
3. the progressive shift between the Hipparcos frame and the ICRF, and
4. the need to maintain the optical realisation as close as possible to the ICRF,

#### Recommends

1. that IAU Division I maintain the Working Group on Celestial Reference Systems formed from Division I members to consult with the International Earth Rotation Service (IERS) regarding the maintenance of the ICRS,
2. that the IAU recognise the International VLBI service (IVS) for Geodesy and Astrometry as an IAU Service Organisation,
3. that an official representative of the IVS be invited to participate in the IAU Working Group on Celestial Reference Systems,
4. that the IAU continue to provide an official representative to the IVS Directing Board,
5. that the astrometric and geodetic VLBI observing programs consider the requirements for maintenance of the ICRF and linking to the Hipparcos optical frame in the selection of sources to be observed (with emphasis on the Southern Hemisphere), design of observing networks, and the distribution of data, and
6. that the scientific community continue with high priority ground- and space-based observations (a) for the maintenance of the optical Hipparcos frame and frames at other wavelengths and (b) for links of the frames to the ICRF.

#### Resolution No. B1.2

##### *Hipparcos celestial reference frame*

##### *Le repère de référence céleste Hipparcos*

The XXIVth International Astronomical Union General Assembly,

#### Noting

1. that Resolution B2 of the XXIIIrd General Assembly (1997) specifies, "That the Hipparcos Catalogue shall be the primary realisation of the International Celestial Reference System (ICRS) at optical wavelengths",
2. the need for this realisation to be of the highest precision,
3. that the proper motions of many of the Hipparcos stars known, or suspected, to be multiple are adversely affected by uncorrected orbital motion,
4. the extensive use of the Hipparcos Catalogue as reference for the ICRS in extension to fainter stars,
5. the need to avoid confusion between the International Celestial Reference Frame (ICRF) and the Hipparcos frame, and
6. the progressive shift between the Hipparcos frame and the ICRF,

#### Recommends

1. that Resolution B2 of the XXIIIrd IAU General Assembly (1997) be amended by excluding from the optical realisation of the ICRS all stars flagged C, G, O, V and X in the Hipparcos Catalogue, and
2. that this modified Hipparcos frame be labelled the Hipparcos Celestial Reference Frame (HCRF).

#### Resolution No. B1.3

##### *Definition of barycentric celestial reference system and geocentric celestial reference system*

##### *Définition du système de référence céleste barycentrique et du système de référence céleste géocentrique*

The XXIVth International Astronomical Union General Assembly,

#### Considering

1. that the Resolution A4 of the XXIst General Assembly (1991) has defined a system of space-time coordinates for (a) the solar system (now called the Barycentric Celestial Reference System, (BCRS)) and (b) the Earth (now called the Geocentric Celestial Reference System (GCRS)), within the framework of General Relativity,
2. the desire to write the metric tensors both in the BCRS and in the GCRS in a compact and self-consistent form,
3. the fact that considerable work in General Relativity has been done using the harmonic gauge that was found to be a useful and simplifying gauge for many kinds of applications,

#### Recommends

1. the choice of harmonic coordinates both for the barycentric and for the geocentric reference systems,
2. writing the time-time component and the space-space component of the barycentric metric  $g_{\mu\nu}$  with barycentric coordinates  $(t, \mathbf{x})$  ( $t =$  Barycentric Coordinate Time (TCB)) with a single scalar potential  $w(t, \mathbf{x})$  that generalises the Newtonian potential, and the space-time component with a vector potential  $w^i(t, \mathbf{x})$ ; as a boundary condition it is assumed that these two potentials vanish far from the solar system,

explicitly,

$$g_{00} = -1 + \frac{2w}{c^2} - \frac{2w^2}{c^4},$$
$$g_{0i} = -\frac{4}{c^3}w^i,$$
$$g_{ij} = \delta_{ij} \left( 1 + \frac{2}{c^2}w \right),$$

with

$$w(t, \mathbf{x}) = G \int d^3x' \frac{\sigma(t, \mathbf{x}')}{|\mathbf{x} - \mathbf{x}'|} + \frac{1}{2c^2} G \frac{\partial^2}{\partial t^2} \int d^3x' \sigma(t, \mathbf{x}') |\mathbf{x} - \mathbf{x}'|,$$

$$w^i(t, \mathbf{x}) = G \int d^3x' \frac{\sigma^i(t, \mathbf{x}')}{|\mathbf{x} - \mathbf{x}'|}.$$

here,  $\sigma$  and  $\sigma^i$  are the gravitational mass and current densities respectively,

3. writing the geocentric metric tensor  $G_{ab}$  with geocentric coordinates  $(T, \mathbf{X})$  ( $T$ = Geocentric Coordinate Time (TCG)) in the same form as the barycentric one but with potentials  $W(T, \mathbf{X})$  and  $W^a(T, \mathbf{X})$ ; these geocentric potentials should be split into two parts - potentials  $W_E$  and  $W_E^a$  arising from the gravitational action of the Earth and external parts  $W_{ext}$  and  $W_{ext}^a$  due to tidal and inertial effects; the external parts of the metric potentials are assumed to vanish at the geocenter and admit an expansion into positive powers of  $\mathbf{X}$ ,

explicitly,

$$G_{00} = -1 + \frac{2W}{c^2} - \frac{2W^2}{c^4},$$

$$G_{0a} = -\frac{4}{c^3} W^a,$$

$$G_{ab} = \delta_{ab} \left( 1 + \frac{2}{c^2} W \right),$$

the potentials  $W$  and  $W^a$  should be split according to

$$W(T, \mathbf{X}) = W_E(T, \mathbf{X}) + W_{ext}(T, \mathbf{X}),$$

$$W^a(T, \mathbf{X}) = W_E^a(T, \mathbf{X}) + W_{ext}^a(T, \mathbf{X}),$$

the Earth's potentials  $W_E$  and  $W_E^a$  are defined in the same way as  $w$  and  $w^i$  but with quantities calculated in the GCRS with integrals taken over the whole Earth,

4. using, if accuracy requires, the full post-Newtonian coordinate transformation between the BCRS and the GCRS as induced by the form of the corresponding metric tensors,

explicitly, for the kinematically non-rotating GCRS ( $T$ =TCG,  $t$ =TCB,  $r_E^i = x^i - x_E^i(t)$ , and a summation from 1 to 3 over equal indices is implied),

$$T = t - \frac{1}{c^2} [A(t) + v_E^i r_E^i] + \frac{1}{c^4} [B(t) + B^i(t) r_E^i + B^{ij}(t) r_E^i r_E^j + C(t, \mathbf{x})] + O(c^{-5}),$$

$$X^a = \delta_{a1} \left[ r_E^1 + \frac{1}{c^2} \left( \frac{1}{2} v_E^i v_E^j r_E^i r_E^j + w_{ext}(x_E) r_E^1 + r_E^1 a_E^1 r_E^1 - \frac{1}{2} a_E^1 r_E^1 \right) \right] + O(c^{-4}),$$

where

$$\frac{d}{dt} A(t) = \frac{1}{2} v_E^2 + w_{ext}(\mathbf{x}_E),$$

$$\frac{d}{dt} B(t) = -\frac{1}{8} v_E^4 - \frac{3}{2} v_E^2 w_{ext}(\mathbf{x}_E) + 4v_E^i w_{ext}^i(\mathbf{x}_E) + \frac{1}{2} w_{ext}^2(\mathbf{x}_E),$$

$$B^i(t) = -\frac{1}{2} v_E^i v_E^2 + 4w_{ext}^i(\mathbf{x}_E) - 3v_E^i w_{ext}(\mathbf{x}_E),$$

$$B^{ij}(t) = -v_E^i \delta_{aj} Q^a + 2 \frac{\partial}{\partial x^j} w_{ext}^i(\mathbf{x}_E) - v_E^i \frac{\partial}{\partial x^j} w_{ext}(\mathbf{x}_E) + \frac{1}{2} \delta_{ij} \dot{w}_{ext}(\mathbf{x}_E),$$

$$C(t, \mathbf{x}) = -\frac{1}{1Q} r_E^a (\dot{a}_E^1 r_E^1),$$

here  $x_E^i$ ,  $v_E^i$ , and  $a_E^i$  are the components of the barycentric position, velocity and acceleration vectors of the Earth, the dot stands for the total derivative with respect to  $t$ , and

$$Q^a = \delta_{a1} \left[ \frac{\partial}{\partial x^1} w_{ext}(\mathbf{x}_E) - a_E^1 \right].$$

The external potentials,  $w_{ext}$  and  $w_{ext}^i$ , are given by

$$w_{ext} = \sum_{A \neq E} w_A, \quad w_{ext}^i = \sum_{A \neq E} w_A^i,$$

where  $E$  stands for the Earth and  $w_A$  and  $w_A^i$  are determined by the expressions for  $w$  and  $w^i$  with integrals taken over body  $A$  only.

## Биографија кандидата

Мр Бора Јовановић је рођен 13.01.1953. у Београду. Био је ђак Седме београдске гимназије, а затим студент астрономије на Природно-математичком факултету Универзитета у Београду. Стекао је назив дипломираног астронома 1981. године, по одслужењу војног рока.

Од марта 1982. године запослен је у Служби времена Астрономске опсерваторије у Београду. Уз рад је 1991. године завршио специјалистичке последипломске студије из области астродинамике на Одсеку за механику Математичког факултета (смер Рационална механика), одбранивши специјалистички рад под називом "Прелети између кружних компланарних орбита", а такође, завршио је и магистарске студије 1997. године на Одсеку за астрономију истог факултета (смер Небеска механика и теоријска астрономија), одбранивши магистарску тезу "Апроксимативно представљање ефемерида у динамичкој астрономији".

Највећим делом, професионална активност кандидата је била у области Земљине ротације и астрономског одређивања времена, али је она исто тако обухватала и поједине области небеске механике, ефемеридске астрономије и нумеричке математике. Његова библиографија тренутно садржи 39 наслова самосталних или заједничких радова, који су објављивани у разним међународним и домаћим часописима или у зборницима са конференција. Међу њима се налази и једна монографија, објављена у Публикацијама Астрономске опсерваторије.

Прилог 1.

## Изјава о ауторству

Потписани-а мр Бора Јовановић

---

број индекса \_\_\_\_\_

### Изјављујем

да је докторска дисертација под насловом

Одређивање разлике динамичког и светског времена и предвиђања промена у  
брзини Земљине ротације

---

---

- резултат сопственог истраживачког рада,
- да предложена дисертација у целини ни у деловима није била предложена за добијање било које дипломе према студијским програмима других високошколских установа,
- да су резултати коректно наведени и
- да нисам кршио/ла ауторска права и користио интелектуалну својину других лица.

Потпис докторанда

У Београду, 6.12.2013.

Бора Јовановић



Прилог 2.

## Изјава о истоветности штампане и електронске верзије докторског рада

Име и презиме аутора \_\_\_\_\_ Бора Јовановић

Број индекса \_\_\_\_\_

Студијски програм \_\_\_\_\_

Наслов рада \_\_Одређивање разлике динамичког и светског времена и предвиђања\_промена у брзини Земљине ротације

Ментор \_\_\_\_\_ Проф. др Стево Шеган

Потписани/а \_\_\_ мр\_ Бора Јовановић \_\_\_\_\_

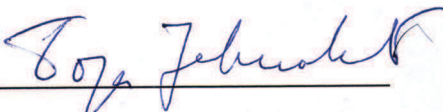
Изјављујем да је штампана верзија мог докторског рада истоветна електронској верзији коју сам предао/ла за објављивање на порталу **Дигиталног репозиторијума Универзитета у Београду**.

Дозвољавам да се објаве моји лични подаци везани за добијање академског звања доктора наука, као што су име и презиме, година и место рођења и датум одбране рада.

Ови лични подаци могу се објавити на мрежним страницама дигиталне библиотеке, у електронском каталогу и у публикацијама Универзитета у Београду.

Потпис докторанда

У Београду, \_\_\_ 6.12.2013. \_\_\_\_\_



Прилог 3.

## Изјава о коришћењу

Овлашћујем Универзитетску библиотеку „Светозар Марковић“ да у Дигитални репозиторијум Универзитета у Београду унесе моју докторску дисертацију под насловом:

Одређивање разлике динамичког и светског времена и предвиђања промена у брзини Земљине ротације

---

---

која је моје ауторско дело.

Дисертацију са свим прилозима предао/ла сам у електронском формату погодном за трајно архивирање.

Моју докторску дисертацију похрањену у Дигитални репозиторијум Универзитета у Београду могу да користе сви који поштују одредбе садржане у одабраном типу лиценце Креативне заједнице (Creative Commons) за коју сам се одлучио/ла.

1. Ауторство

2. Ауторство - некомерцијално

3. Ауторство – некомерцијално – без прераде

4. Ауторство – некомерцијално – делити под истим условима

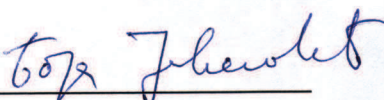
5. Ауторство – без прераде

6. Ауторство – делити под истим условима

(Молимо да заокружите само једну од шест понуђених лиценци, кратак опис лиценци дат је на полеђини листа).

Потпис докторанда

У Београду, \_\_\_\_\_ 6.12.2013. \_\_\_\_\_

  
\_\_\_\_\_