

## Starověký mechanismus z řecké Antikythery – model vesmíru

Tony Freeth<sup>\*†</sup>, David Higgon<sup>\*</sup>, Aris Dacanalís<sup>\*</sup>, Lindsay MacDonald<sup>‡</sup>,  
Myrto Georgakopoulou<sup>§\*\*</sup> & Adam Wojcik<sup>\*††</sup>

(Překlad práce *A model of the Cosmos in the ancient Greek Antikythera Mechanism* uveřejněné 12. 3. 2021 na [www.nature.com/scientificreports](http://www.nature.com/scientificreports), přeložil Josef Chmel)

*Mechanismus z Antikythery, starověký řecký astronomický počítač, se stal výzvou pro badatele již od svého objevu v roce 1901. V současné době nález sestává z 82 fragmentů, zachovala se však jen třetina původního zařízení, obsahující 30 zkorodovaných bronzových ozubených kol. V roce 2005 byla metodou mikrofokální rentgenové počítačové tomografie odhalena struktura zadní části stroje, ale jeho přední strana zůstala do značné míry nevyřešena. Tomograf také odkryl nápisy popisující pohyby Slunce, Luny a všech pěti ve starověku známých planet a jejich zobrazení na přední straně stroje jako modelu vesmíru tak jak jej vnímali Řekové Starověku. Nápisy specifikující složité planetární cykly vedly k novému pohledu na mechanickou funkci tohoto modelu vesmíru, žádná předchozí rekonstrukce zařízení se nepřiblížila k souhlasu se skutečností. Naše objevy vedly k novému modelu, který je s reálnými daty v uspokojivé shodě. Řešení tohoto komplexního 3D rébusu odhaluje práci genia kombinujícího cykly z babylonské astronomie, matematiku z Platonovy akademie a astronomické teorie starověkého Řecka.*

Mechanismus z Antikythery je kulturním pokladem, který fascinoval vědce napříč mnoha obory. Jedná se o mechanický počítač s bronzovými ozubenými koly, který používá převratnou techniku pro astronomické predikce pomocí mechanizace astronomických cyklů a teorií [1]-[9]. Hlavní dochované fragmenty Mechanismu jsou označeny písmeny A-G a menší fragmenty číslly 1-75 [7]. Zlomky jsou neúplné, poškozené, zkorodované a pokryté usazeninami (obr. S1 Doplněk). Nicméně, jsou bohaté na informace na milimetrové úrovni – s jemnými detaily mechanických součástek a tisíci drobných textových údajů pohřbených uvnitř fragmentů a nepřechtených déle než 2000 let. Fragment A obsahuje 27 ze zachovaných 30ti ozubených kol, každý z fragmentů B, C a D [2],[5],[7],[10] obsahuje jeden převod. Fragmenty jsou 3D objekty s velkou složitostí.

V roce 2005 poskytla podstatné nové údaje metoda mikrofokální rentgenové počítačové tomografie (X-ray CT) a polynomiálního mapování textur (PTM) všech 82 fragmentů Mechanismu [7]. To vedlo k řešení zadní části stroje [4],[7]-[9] s objevením systému předpovědí zatmění a mechanického řešení odchylek pohybu Luny [7] (obr. S20 Doplněk). Přední část zůstala silně kontroverzní v důsledku nedostatku dochovaných fyzických dat.

Bylo učiněno mnoho neúspěšných pokusů sladit reálná data pohybu Slunce, Luny a všech pěti planet známých ve starověku s modelem vesmíru Mechanismu z Antikythery. V letech 1905-06 uvedl Rehm [1] v *Mein Planetarium* pozoruhodné poznámky, které předpokládaly, že jde o model pohybu planet s prstencovými číselníky, jaký zde představujeme my – ale mechanicky byl zcela nesprávný, protože v té době nebyl dostatek potřebných údajů (obr. S17 Doplněk). V klasické práci *Gears from the Greeks* [2] navrhl Price způsob řešení nedochovaných ozubených převodů, které by řešily planetární pohyby, ale nepokusil se o rekonstrukci. Pak Wright postavil první funkční systém modelu vesmíru s koaxiálními ukazateli – ručičkami, který počítal planetární pohyby a cykly, a ověřil jeho mechanickou proveditelnost [3] (obr. S18 Doplněk). Později se pokusili Freeth a Jones [9] (obr. S19 Doplněk) a nezávisle také Carman, Thorndike a Evans [11] o zjednodušené ozubené převody, omezené na základní periody planet. Většina dosavadních rekonstrukcí používala jako ukazatele planetárních pohybů ručičky, které měly vážné problémy s paralaxou [3],[9] a byly v rozporu s nově získanými textovými údaji – viz část *Textová svědectví z napsíů*. Žádné z těchto modelů nejsou kompatibilní se všemi aktuálně známými údaji.

<sup>\*</sup>Department of Mechanical Engineering, University College London (UCL), London, UK.

<sup>†</sup>email: [tony@images-first.com](mailto:tony@images-first.com)

<sup>‡</sup>Department of Civil, Environmental and Geomatic Engineering, University College London (UCL), London, UK.

<sup>§</sup>UCL Qatar, University College London (UCL), Doha, Qatar.

<sup>\*\*</sup>Science and Technology in Archaeology and Culture Research Center (STARC), The Cyprus Institute (CyI), Nicosia, Cyprus.

<sup>††</sup>email: [a.wojcik@ucl.ac.uk](mailto:a.wojcik@ucl.ac.uk)

Výzvou pro nás bylo vytvořit nový model, který by odpovídal všem dochovaným materiálům a údajům. Funkce spojené s hlavním hnacím kolem naznačovaly, že jsou počítány planetární pohyby se složitým systémem epicyklů (převody namontované na dalších převodových kolech), ale jejich provedení zůstávalo záhadou. Tomografie odhalila bohatství nečekaných stop v textech, popisujících tento starověký řecký model vesmíru [9] na přední straně stroje, ale pokusy o vyřešení systému převodů nevedly k souhlasu se všemi daty [1]-[3],[6],[9].

Získaná data definují pro přední stranu stroje systém epicyklů [9], ale prostor k dispozici pro potřebné převody je velmi omezený. Ve fragmentu D se také vyskytovaly nevysvětlené komponenty, odhalené rentgenovou tomografií a technické obtíže se objevily také v souvislosti s počítáním fází Luny [9]. Tomografie navíc objevila překvapivě složité cykly pro planety Venuši a Saturn, ukázalo se, že úkol je mnohem obtížnější [12].

## Diskuse a výsledky

Chtěli jsme pro tento model vesmíru určit cykly pro všechny planety (nejen objevené cykly pro Venuši a Saturn), začlenit tyto cykly do složitých mechanismů odpovídajících objektivním faktům a zajistit aby jejich výstupy odpovídaly níže popsanému *obvyklému kosmologickému pořadí* (dále CCO – zkratka *Customary Cosmological Order*). Ukážeme zde, jak jsme vytvořili převody a zobrazení, respektující objevené textové popisky: systém prstenců s devíti výstupy - Luna, Lunární uzly, Merkur, Venuše, Slunce, Mars, Jupiter, Saturn a datum - realizovanými pomocí vnořených trubiček s rameny držícími jednotlivé prstence. Výsledkem je radikálně nový model, který odpovídá všem datům a vyniká elegantním zobrazením modelu vesmíru starověkého Řecka. I s tolika chybějícími informacemi zajišťujeme přísný soulad našeho modelu s *Principy rekonstrukce* (diskuse S1 Doplnku) a pečlivě posuzujeme údaje, které odůvodňují každý prvek. Skutečnost, že se nedochovaly některé údaje by mohla připouštět mnoho variant modelu (rozebíráno v diskusi S1 Doplnku). Co nás však silně zasáhlo při vytváření současného modelu je právě to, jak málo je těchto možností: omezení daná dochovanými fakty jsou přísná a velmi nesnadně splnitelná.

## Textová svědectví z nápisů

Rekonstrukce zobrazení modelu vesmíru na přední straně Mechanismu z Antikythery začala analýzou některých pozoruhodných nápisů. Obr. 1 ukazuje texty na předním krytu (dále FCI – zkratka *Front Cover Inscription*) a na krytu zadním (dále BCI – zkratka *Back Cover Inscription*) [9],[12],[13], které jsou důležité pro pochopení tohoto zařízení. Byly využity předchozí analýzy [13] a náš vlastní výzkum textů BCI řádek po řádku. Text BCI popisuje zobrazení na přední straně jako *planetárium* [9],[13] : Vesmír uspořádaný v kružicích, s planetami označenými jako "malé koule" a Sluncem jako "malou zlatou kouli" s "paprsky" a "ukazatelem" (obr. 1c, tab. S1 Doplnku, obr. S2 a S3 Doplnku). Text na FCI uvádí seznamy synodických cyklů planet (cyklů vzhledem ke Slunci) [12]. Jedná se o systematický seznam, rozepisující synodické události a intervaly mezi nimi ve dnech. Planety jsou uvedeny ve stejném geocentrickém pořadí jako na BCI. Přidáním Luny a Slunce dostáváme obvyklé kosmologické pořadí (dále CCO – zkratka *Customary Cosmological Order*): Luna, Merkur, Venuše, Slunce, Mars, Jupiter, Saturn (obr. S4 Doplnku). Původ tohoto pořadí je rozebírán v diskusi S2 Doplnku.

## Periodické vztahy v astronomických teoriích starověkého Řecka

Starověcí astronomové byli fascinováni pohyby planet. Díváme-li se ze Země, vykazují planety v čase periodické obracení směru pohybu vzhledem ke hvězdám<sup>[14]</sup>. V babylonské astronomii byly tyto *synodické cykly* základem pro předpovídání pohybu planet<sup>[15]</sup>. Např. pro Venuši existuje *periodický vztah 5 synodických cyklů za 8 let*<sup>††</sup>, kterou označujeme výrazem (5, 8). FCI popisuje *synodické události*, jako jsou *stacionární body* a intervaly mezi těmito událostmi (obr. 1, část b, obr. S4 Doplnku a diskuse S2 Doplnku).

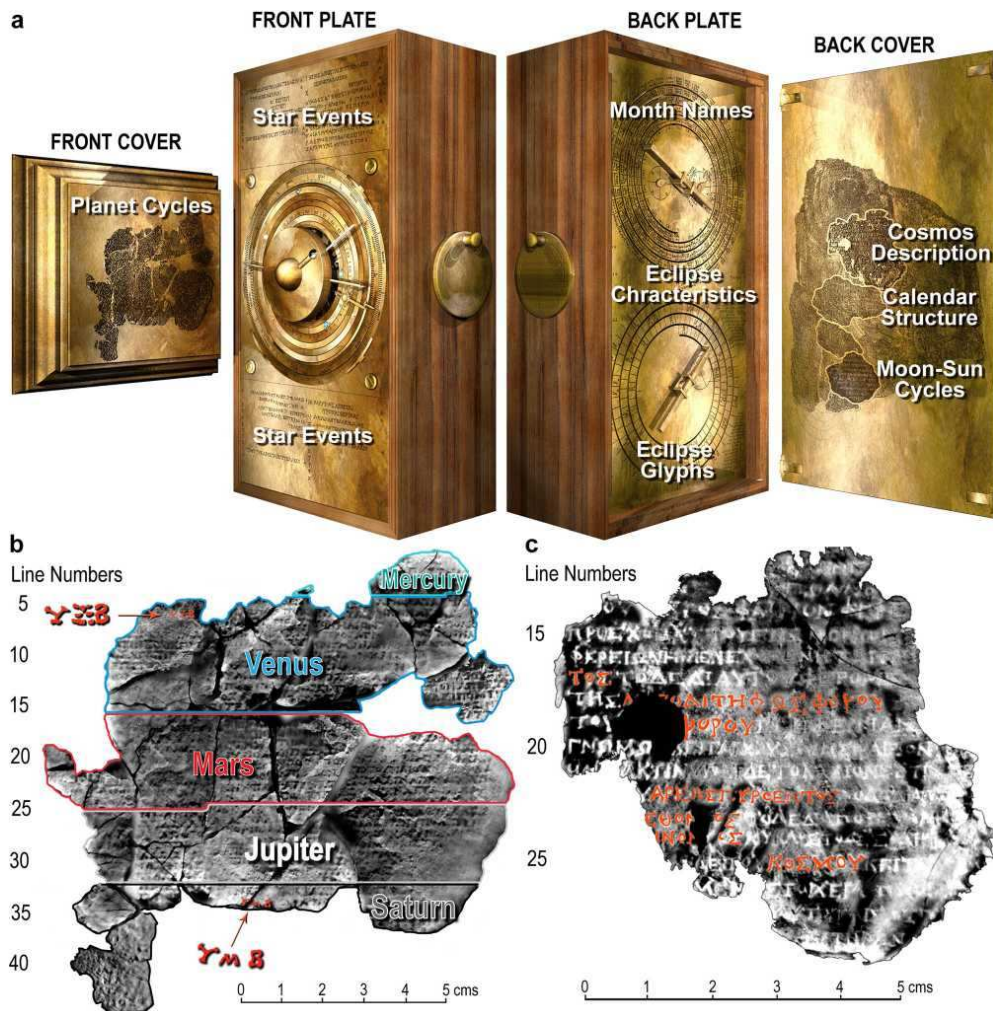
Apollonios z Pergu (3. – 2. století př. n. l.) vytvořil elegantní (i když nepřesné) teorie epicyklů, aby tím vysvětlil tyto anomální pohyby jako součet dvou rovnoměrných kruhových pohybů, jejichž periody definoval periodický vztah typu *deferent a epicykl* [15] (diskuse S3 Doplnku a obr. S6, S7 a S8

<sup>††</sup> Znamená to, že po určité konjunkci Venuše se Sluncem má dojít k právě 5 jejich bezprostředně následujícím konjunkcím a přitom uplynout čas 8 "egyptských" let (tj. 8 x 365 dní) a ta 5. konjunkce nastane ve stejném znamení v jakém byla ona poslední konjunkce před nastalými pěti a dokonce nastane na skoro stejném stupni znamení – pozn. editora.

Doplňku). V Mechanismu z Antikythery byly takové teorie nepochybně použity, mechanizace Luny byla vyřešena za použití podobného postupu s epicykly [7]. *Pravé Slunce* – Slunce s jeho variabilním pohybem - bylo ve starověkém Řecku také vysvětlováno excentrickými a odpovídajícími epicyklickými modely [14].

Babylonské texty poskytují seznam planetárních periodických vztahů a jejich odchylky: kratší, méně přesné periody v tzv. *textech cílového roku* (dále GYT – zkratka *Goal-Year Texts*) a delší, přesnější periody v pozdějších *astronomických klínopisných textech* (dále ACT – zkratka *Astronomical Cuneiform Texts*) [15] (tabulky S3 a S4 Doplňku). Periody GYT mohly být odvozeny z pozorování, ale delší periody ACT jako např. pro Venuši (**720, 1151**) nikoliv (Diskuse S3 Doplňku). Pochopení a odvození periodických vztahů, které byly zabudovány do Mechanismu z Antikythery, bylo těžkým problémem. Starověký konstruktér modelu Venuše čelil dilematu: známý periodický vztah (**5, 8**) byl velmi nepřesný, zatímco přesnější periodický vztah z ACT (**720, 1151**) nebyl mechanicky realizovatelný, protože 1151 je prvočíslo, což by vyžadovalo ozubené kolo s 1151 zuby. V roce 2016 však došlo k pozoruhodnému objevu v textech FCI [12]. Neočekávaná čísla  $\Psi\Xi\text{B}$  (462) v části Venuše a  $\Psi\text{MB}$  (442) v části Saturna, byla převedena do vysoce přesných periodických vztahů: pro Venuši (**289, 462**) a Saturna (**427, 442**) (obr. 1b a obr. S4 Doplňku). A co je rozhodující, tato čísla jsou rozložitelná na menší prvočísla, což znamená, že relace mohou být mechanicky realizovány se středně velkými ozubenými koly, s počty zubů odpovídajícími těmto prvočísly. Aby se mechanika daná geometrií systému epicyklů vešla do zařízení, musí v ní být obsažena převodová kola s nejvýše 100 zuby: periodické vztahy musí poskytovat prvočísla  $<100$ . Pro planety existuje několik takových přesných periodických vztahů (Tabulky S5 a S6 Doplňku).

Skutečnost, že nové periodické vztahy pro Venuši a Saturna z FCI obsahují hodnoty rozložitelné na prvočísla silně podporuje myšlenku, že byly využity v ozubených převodech pro planety v Mechanismu z Antikythery [16]. Periodické vztahy pro ostatní planety jsou nečitelné (v chybějících nebo poškozených oblastech FCI). Abychom vybudovali náš model, bylo důležité objevit periodické relace realizované v převodech pro všechny planety. Předchozí publikace [12],[16] odvodily periodické vztahy i pro Venuši (**289, 462**) jako iterativní aproximaci známého babylonské periodického vztahu (**720, 1151**), s využitím řady ekvivalentních postupů: *metody řetězových zlomků*, *anthyphairézy (recipročního odečítání)* nebo *euklidovského algoritmu* [17],[18]. Pro periodický vztah Saturna (**427, 442**) nelze nalézt žádnou podobnou metodu pro odvození, takže tento typ iterativní aproximace nebyl starými Řeky téměř jistě použit k odvození původních periodických vztahů.



**Obr. 1. Nápis na Mechanismu z Antikythery**

(a) PŘEDNÍ KRYT: Planetární cykly [9],[12], s vlysem podle fragmentu 3 (obr. S5 Doplnku). PŘEDNÍ DESKA: *Parapegma* [1],[2],[25], hvězdné události nad a pod displejem modelu vesmíru, odkazy na prstenec zvěrokruhu. ZADNÍ DESKA: Názvy měsíců na metonickém kalendáři[4],[8]. Charakteristiky zatmění, prstence metonického kalendáře a prstence predikce zatmění cyklu Saros[7],[8] – s odkazy. Glyfy zatmění s odkazy na prstenec Saros [8]. ZADNÍ KRYT: Uživatelská příručka, obsahující popis modelu vesmíru na přední straně [9],[13] (diskuse S3 Doplnku), struktura kalendáře[8] a lunisolární cykly [1],[2].

(b) Nápis na předním krytu (FCI): kompozice snímků z rentgenové tomografie fragmentů G, 26 a 29 a dalších malých fragmentů [9],[12] s očíslováním řádků. FCI popisuje synodické cykly planet a je rozdělen do regionů pro každou planetu v pořadí CCO (diskuse S2 Doplnku). Číslo  $\Psi\Xi\text{B}$  (462) v sekci Venuše a  $\Psi\text{M}\text{B}$  (442) v části týkající se Saturna jsou zvýrazněna [12] (obr. S4 Doplnku).

(c) Nápis zadního krytu (BCI) [13](diskuse S2 Doplnku): kompozice snímků z rentgenové tomografie fragmentů A a B. *Uživatelská příručka*: Horní část je popisem modelu vesmíru [9] na přední straně s planetami v pořadí CCO; červeně jsou názvy planet, stejně jako slovo  $\text{KO}\Sigma\text{MOY}$  – Vesmír (Pozn. ed.: Barvy a tím i přesnější rozlišení v detailu lze získat v online verzi).

## Vypátrání cyklů v Mechanismu z Antikythery

Babylonská astronomie tyto nově objevené periodické vztahy pro Venuši a Saturna neznala. Obr. 2 ukazuje, jakými postupy mohly být tyto periodické vztahy odvozeny. Vodítkem bylo použití babylonských znalostí metody lineárních kombinací periodických vztahů, jejímž cílem bylo minimalizovat pozorované chyby [14]. V části 2a ukazuje, jak mohly být generovány periodické vztahy pro Venuši a Saturna, ale výběr správných lineárních kombinací se v podstatě řídí znalostí odchylek známých periodických vztahů od skutečných hodnot. Nedostatek možností jemných odhadů chyb v tehdejší době vylučuje použití těchto metod pro náš model: pozorování chyb, jako je  $<1^\circ$  za 100 let pro periodický vztah **(720, 1151)** pouhým okem bylo mimo možnosti astronomie helénistického věku.

Vytvořili jsme novou teorii o tom, jak byly nalezeny periodické vztahy pro Venuši a Saturna a aplikovali jsme ji na obnovení chybějících periodických vztahů ostatních planet. Platonův dialog [19] (5. – 4. století př.n.l.) byl pojmenován podle filozofa Parmenida z Elea (6. - 5. století př.n.l.). Viz Parmenidovy Téze [17],[18]:

Aproximujeme-li  $\theta$ , předpokládejme zlomky  $p/q$  a  $r/s$ , pro které  $p/q < \theta < r/s$ .

Pak  $(p + r)/(q + s)$  je nový odhad mezi  $p/q$  a  $r/s$ :

Pokud je to dolní odhad, je to lepší dolní odhad než  $p/q$ .

Pokud je to horní odhad, je to lepší horní odhad než  $r/s$ .

Za předpokladu, že je to lepší dolní odhad, kombinujeme jej v dalším kroku s původním horním odhadem a vytvoříme  $(p + 2r)/(q + 2s)$ . To by mělo být testováno proti  $q$  a krok je opakován. Ze dvou vstupních zlomků můžeme tímto postupem generovat stále přesnější lineární kombinace, které konvergují k  $\theta$ . Parmenidův postup by byl usnadněn a zkrácen pokud bychom znali  $\theta$ , což by nám umožnilo zjistit, zda je každý nový odhad dolním nebo horním odhadem. Uvedený brázek v části 2b ukazuje, jak může konvenční Parmenidův postup generovat naše cílové periodické vztahy, ale opírá se opět o nedostupné informace o chybách. Klíčovým krokem pro objevování chybějících cyklů je úprava Parmenidova postupu tak, že není omezen neznalostí odchylek – neomezený Parmenidův postup (dále UPP – zkratka *Unconstrained Parmenides Process*). Části 2c a 2d ukazují kompletní lineární kombinace, které jsou tímto postupem systematicky generovány. Jak bychom měli rozhodnout, které periodické vztahy jsou vhodné pro náš model? Pro jejich výběr byla nepochybně používána dvě kritéria: přesnost a rozložitelnost na prvočísla. Nutnost montáže systémů ozubených převodů do velmi těsných prostorů a geniální sdílení ozubených kol v dochovaných soukolích (obr. S20 Doplnku) vede k použití třetího kritéria: je to úspornost, se kterou jsou jednotlivé periodické vztahy realizovány pomocí úsporných soukolí s využitím *společných převodů*, řešení synodických cyklů s využitím *sdílených prvočísel* [7] (diskuse S3 a S6 Doplnku).

Objasníme zde, jak by bylo podle našeho názoru postupováno při návrhu mechanismu. Konstruktor by vytvořil lineární kombinace pomocí UPP. V každé kroku by byly vzniklé periodické vztahy zkoumány, zda vyhovují konstruktérovým kritériím přesnosti, rozložitelnosti na prvočísla a úspornosti. Nejsnadněji lze posoudit kritérium rozložitelnosti čísel. Kritérium přesnosti je problematičtější, protože nevěříme, že starověcí astronomové měli schopnost provést velmi přesná astronomická pozorování, viz babylonské záznamy (tabulky S3 a S4 Doplnku). Úspornost musí být ověřována s ohledem na periodické vztahy vnějších a vnitřních planet tak, aby došlo k souladu ve sdílených prvočíslech.

Venuše je dobrým příkladem. Starověcí Babyloňané věděli, že vztah **(5, 8)** pro Venuši je velmi nepřesný a z pozorování odchylek v 8-letém cyklu odvodili (nerozložitelný) vztah **(720, 1151)** (Diskuse S3 Doplnku). Takové periodické vztahy byly často popisovány ve starověkém světě jako "přesné periody", i když samozřejmě ze současných požadavků tomu tak není. Když by byl pomocí UPP objeven rozložitelný vztah **(289, 462)**, bylo by snadné spočítat, že je ve skutečnosti velmi blízko "přesné periodě" **(720, 1151)**. Konstruktor by si byl jist, že to je správný periodický vztah. Vztah **(289, 462)** by pak byl porovnán se periodickým vztahem **(1513, 480)** pro Merkura a ukázalo by se, že sdílejí společný dělitel 17 v počtu synodických cyklů – což znamená, že by bylo vhodné pro ně navrhnout sdílený ozubený převod a mohou vyhovět tak kritériu úspornosti. Až by konstruktor objevil obdobné relace, které by vyhovovaly všem kritériím, proces iterací by byl zastaven, protože další iterace by pravděpodobně vedly ke složitějšímu řešení.

UPP v kombinaci s našimi třemi kritérii vede k pozoruhodně jednoduchým odvozením periodických

vztahů Venuše a Saturna. Pro Venuši, obr. 2 v části d ukazuje, že první rozložitelný periodický vztah je  $(1445, 2310) = 5 \times (289, 462) \rightarrow (289, 462)$ . Po rozložení  $(289, 462) = (17^2, 2 \times 3 \times 7 \times 11)$ , jak je uvedeno v FCI. Pro Saturna je  $(427, 442) = (7 \times 61, 2 \times 13 \times 17)$ , opět z FCI. Tento objev umožňuje odvození chybějících planetárních period. Aby bylo zajištěno naše třetí kritérium *úspornosti*, musí být některé z prvočísel synodických cyklů začleněno do prvního pevného převodu soukolí planet. Pro Merkura hledáme činitel 17 v počtu synodických cyklů, které mohou být sdíleny s Venuší. První rozložitelná iterace je  $(1513, 480) = (17 \times 89, 25 \times 3 \times 5)$  – sdílí činitel 17 s relací  $(289, 462)$  pro Venuši – což je velmi dobrá volba. Vynásobením celými čísly, abychom získali životaschopné převody, vede k úsporným návrhům s jedním pevným 51zubovým ozubeným kolem sdíleným mezi Merkurem a Venuší (obr. 3, části c, e) [16]. Pro vnější planety, Mars a Jupiter hledáme synodické cykly, které sdílejí činitel 7 se Saturnem (obr. 3, části d, f). Jen několik iterací přináší vhodné synodické cykly, které vedou k velmi úsporným návrhům s jedním 56tízubovým pevným převodem pro všechny tři vnější planety a *pravé Slunce*.

Chybějící periodické relace pro Merkura a Marta jsou naším postupem jednoznačně určeny v diskuzi S3 Doplnku v tabulkách S5 a S6. Existují dvě další možnosti pro Jupiter, které sdílejí činitel 7 v počtu synodických cyklů (tabulka S6 Doplnku). V diskuzi S3 Doplnku ukazujeme, že jedna z nich však není použitelná a druhá je velmi nepravděpodobná. UPP v kombinaci s kritérii *přesnosti, rozložitelnosti a úspornosti* vysvětluje periodický vztah Venuše a Saturna a (téměř) jednoznačně vytváří vztahy, které se v objeveném torzu nedochovaly.

### a: Kombinace periodických relací

**VENUŠE**  $(5, 8) + 2 \times (720, 1151) = (1445, 2310) = 5 \times (289, 462) \equiv (289, 462)$   
**SATURN**  $-1 \times (29, 30) + 8 \times (57, 59) = (427, 442)$   
 $3 \times (57, 59) + (256, 265) = (427, 442)$

### b: Omezený Parmenidův proces

#### VENUŠE

Dolní	Nový	Horní	Dolní	Nový	Horní
(5, 8)	(725, 1159)	(720, 1151)	(57, 59)	(313, 324)	(256, 265)
(725, 1159)	(1445, 2310)	(720, 1151)	(57, 59)	(370, 383)	(313, 324)
	→ (289, 462)		(57, 59)	(427, 442)	(370, 383)

### c: Neomezený Parmenidův proces

Iterace 1:  $(p + r, q + s)$   
 Iterace 2:  $(2p + r, 2q + s), (p + 2r, q + 2s)$   
 Iterace 3:  $(3p + r, 3q + s), (p + 3r, q + 3s)$   
 Iterace 4:  $(4p + r, 4q + s), (3p + 2r, 3q + 2s), (2p + 3r, 2q + 3s), (p + 4r, q + 4s)$

### d: Neomezený Parmenidův proces

#### MERKUR

p	q	r	s
145	46	684	217
p+r	q+s		
829	263		
2p+r	2q+s	p+2r	q+2s
974	309	1513	480
3p+r	3q+s	p+3r	q+3s
1119	355	2197	697

#### MARS

p	q	r	s
22	47	37	79
p+r	q+s		
59	126		
2p+r	2q+s	p+2r	q+2s
81	173	96	205
3p+r	3q+s	p+3r	q+3s
103	220	133	284

#### VENUŠE

p	q	r	s
5	8	720	1151
p+r	q+s		
725	1159		
2p+r	2q+s	p+2r	q+2s
730	1167	1445	2310
3p+r	3q+s	p+3r	q+3s
735	1175	2165	3461

#### JUPITER

p	q	r	s
76	83	87	95
p+r	q+s		
163	178		
2p+r	2q+s	p+2r	q+2s
239	261	250	273
3p+r	3q+s	p+3r	q+3s
315	344	337	368

#### SATURN

p	q	r	s
57	59	256	265
p+r	q+s		
313	324		
2p+r	2q+s	p+2r	q+2s
370	383	569	589
3p+r	3q+s	p+3r	q+3s
427	442	825	854

### e: Periodické relace pro Mechanismus z Antikythery

Planeta	Synodické cykly	Roky	Prvočísla	Prvočísla	Chyba $\epsilon_\gamma$ /y	Chyba $\epsilon_\gamma$ /syn
MERKUR	1513	480	17 x 89	2 <sup>5</sup> x 3 x 5	-0.005022	-0.001593
VENUŠE	289	462	17 <sup>2</sup>	2 x 3 x 7 x 11	0.008576	0.013710
MARS	133	284	7 x 19	2 <sup>2</sup> x 71	0.003089	0.006596
JUPITER	315	344	3 <sup>2</sup> x 5 x 7	2 <sup>3</sup> x 43	0.000802	0.000876
SATURN	427	442	7 x 61	2 x 13 x 17	0.004208	0.004509

Obr. 2. Hledání periodických relací

Modrá čísla (Pozn. ed.: jsou to první čísla ve dvojici periodického vztahu; barvy lze pozorovat v online verzi) se týkají synodických cyklů; červená čísla (Pozn. ed.: jsou to druhá čísla ve dvojici periodického vztahu; barvy lze pozorovat v online verzi) odkazují na roky. Všechny výchozí periody pro tyto procesy jsou známy z babylonské astronomie (tabulky S5 a S6 Doplněk).

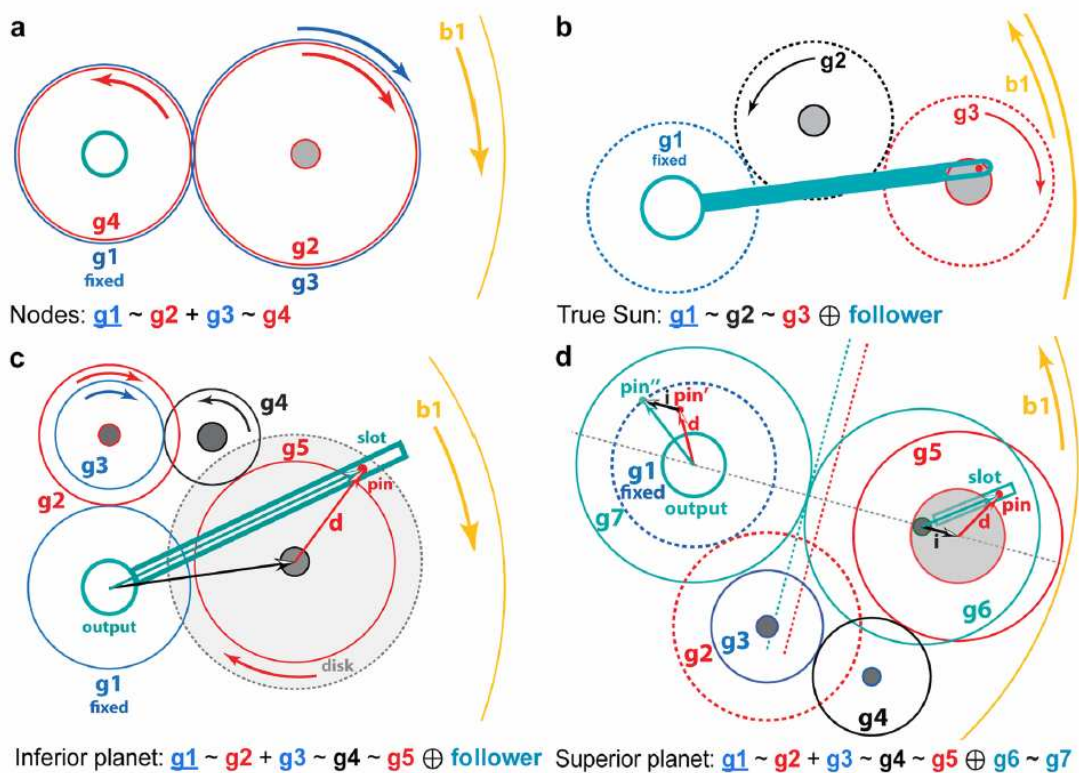
(a) Lineární kombinace babylonských periodických vztahů, ze kterých jsou odvozeny vztahy pro Venuši a Saturna nalezené na krytu FCI. (b) Obdobné vztahy vytvořené konvenčním Parmenidovým procesem, který také poskytuje relace pro Venuši a Saturna z FCI. (c) Iterace neomezeného Parmenidova procesu. Kombinace  $(2p+2r, 2q+2s)$  je vynechána z iterace 3, protože je totožná s  $2 \times (p+r, q+s)$ . (d) Tři iterace neomezeného Parmenidova procesu. Páry vyznačené barvou jsou rozložitelné na prvočísla  $< 100$ . Šedě

stínované periodické vztahy jsou ty, které jsou známy z FCI. Všimněte si, že pro Venuši (1445, 2310)  $\equiv$  (289, 462) a (735, 1175)  $\equiv$  (147, 235). Stejná tabulka s chybami je v tabulce S5 (v Doplnku). (e) Periody odvozené neomezeným Parmenidovým procesem pro náš model Mechanismu z Antikythery a jejich chyby, s využitím našich tří kritérií: přesnosti, rozložitelnosti na prvočísla a úspornosti. S výjimkou periodických vztahů pro Venuši a Saturna, byly všechny finální periodické vztahy známy již v babylonské astronomii. Chybové parametry jsou probírány v diskuzi S3 Doplnku.

### Teoretické mechanismy pro náš model

Výpočet pozice Luny ve zvěrokruhu a její fáze jsou definovány dochovanými fyzickými údaji<sup>[7],[10]</sup>. Vzhledem k tomu, že chybí údaje pro Slunce a planety, musíme vyvinout teoretické mechanismy založené na námi identifikovaných periodických vztazích. Obr. 3 ukazuje teoretická ozubená soukolí pro střední Slunce, Lunární uzly a planety.

Geometrické parametry pro planetární mechanismy v obr. 3, části c a d jsou v tabulce S9 Doplnku.



e	Paprsek	Úloha	Synod.	Roky	Prvočísla	Násob.	Epicyklické soukolí
A	MERKUR	1513	480	17x89	2 <sup>5</sup> x3x5	x 3	51 ~ 72 + 89 ~ 40 ~ 20 $\oplus$ follower
B	UZLY	98	93	2 x 7 <sup>2</sup>	3x31	x 32	49 ~ 62 + 64 ~ 48
C	VENUŠE	289	462	17 <sup>2</sup>	2x3x7x11	x6	51 ~ 44 + 34 ~ 26 ~ 63 $\oplus$ follower
D	STŘEDNÍ SLUNCE	1	1	1	1	-	Žádné

f	A	SATURN	427	442	7x61	2x13x17	x 8	56 ~ 52 + 61 ~ 40 ~ 68 $\oplus$ 86 ~ 86
B	JUPITER	315	344	3 <sup>2</sup> x5x7	2 <sup>3</sup> x43	x 8	56 ~ 64 + 45 ~ 40 ~ 43 $\oplus$ 65 ~ 65	
C	MARS	133	284	7x19	2 <sup>2</sup> x71	x 16	56 ~ 64 + 38 ~ 40 ~ 71 $\oplus$ 80 ~ 80	
D	PRAVÉ SLUNCE	1	1	1	1	x 56	56 ~ 52 ~ 56 $\oplus$ follower	

Obr. 3. Mechanismy s epicykly pro model vesmíru

Pevná kola jsou označena podtržením; modrá kola (Pozn. ed.: Například g1 pro pravé Slunce v části b; barvy lze pozorovat v online verzi.) počítají synodické cykly; červená kola (Pozn. ed.: Například g3 pro pravé Slunce v části b; barvy lze pozorovat v online verzi.) počítají roky; černá kola jsou mezikola; všechna kola jsou značena počtem zubů. Symbol “~” znamená “je v záběru s kolem”, “+” znamená “je

pevně na hřídeli s kolem”, “. ” znamená “mechanismus typu *kolíček-kulisa s bodem otáčení na centrální ose* (dále je kulisa značena také jako kulisa **follower**)“, nebo „mechanismus typu *kolíček-drážka s bodem otáčení na excentrické ose*“. Tyto mechanismy vytvářejí nepravidelný pohyb planet (barva modrozelená). *Kulisy* jsou ramínka s drážkou, která sledují kolíček na ozubeném kole epicyklu otáčejícím se kolem centrální osy. Na schématech ozubených převodů jsou **nodes** lunární uzly, **True Sun** pravé Slunce, **Inferior planet** vnitřní planeta, **Superior planet** vnější planeta. Každý mechanismus má ve středu upevněné kolo v záběru s prvním epicyklickým kolem, které je unášeno ve směru **b1** nebo deskou **CP**. (a) 4-kolový epicyklický systém pro uzlovou přímkou. (b) 3-kolový přímý model pro pravé Slunce. (c) 5-kolový přímý model pro vnitřní planetu se složitými periodickými vztahy, kde proměnlivý pohyb je realizován systémem *kolíček a kulisa s drážkou*. (d) 7-kolový nepřímý model pro vnější planetu se složitými periodickými relacemi, kde proměnlivý pohyb je realizován systémem typu *kolíček-drážka s bodem otáčení na excentrické ose*. (e) Periodické vztahy a ozubená soukolí na hlavním hnacím kole **b1**; Merkur a Venuše sdílejí pevné kolo **51**. (f) Periodické relace a ozubená soukolí na kruhové desce **CP** sdílejí pevné kolo **56**; Dále jsou sdílena kola mezi Saturnem a pravým Sluncem a mezi Martem a Jupiterem (diskuze S4 Doplnku).

Způsob, jakým cyklus Saros zobrazený na zadní straně stroje předpovídá zatmění, v sobě v podstatě zahrnuje též *lunární uzly*, které ale nejsou v dochovaných textech popsány. Vzhledem k jejich integrální roli při zatmění je však začlenění obrazu uzlů logickým sjednocením přední a zadní strany. Pro maximalizaci zobrazených informací jsme vytvořili mechanismus pro hypotetickou *Dračí ručku* k označení *linie uzlů Luny*, jak je zahrnuta v mnoha pozdějších astronomických hodinových strojích [20] (obr. S2 Doplnku). Měli bychom zdůraznit, že se nedochovaly přímé fyzické doklady ohledně zobrazení linie lunárních uzlů. Přidali jsme tuto funkci jako hypotetický prvek z tematických důvodů, které již byly vysvětleny, a protože je to funkce snadno mechanicky realizovatelná s dobrou přesností s jednoduchým 4převodovým epicyklickým systémem na paprsku B1. Je to zajímavá možnost k úvaze pro čtenáře a je v souladu se zjevným úsilím dávného konstruktéra o vytvoření astronomické příručky zobrazující většinu astronomických parametrů, zaujímaných helénistickou astronomií.

Všechny mechanismy modelu vesmíru musí vystupovat v pořadí CCO, takže jsou v souladu s popisem v BCI. Ve středu tohoto vesmíru je Země, pak poloha Luny v zvěrokruhu a lunární fáze. Poloha Luny je nesena centrálním hřídelem spojeným s (z větší části) dochovaným epicyklickým systémem, který vypočítává variabilní pohyb Luny zobrazený na zadní straně Mechanismu [7] (obr. S1 Doplnku). Držíme se původního návrhu [10] pro zařízení zobrazující lunární fáze pomocí jednoduchého soukolí, které odečítá sluneční pohyb od lunárního a vypočítává fázi, která je zobrazována na malé černo-bílé kouli.

Periodický vztah (**12, 223**) pro linii lunárních uzlů, odvozený z cyklu Saros a Metonova cyklu, nemohl být mechanicky řešen z důvodu velkého prvočísla 223. Ukazujeme, že jednodušší vztah (5, 93), s přesnější periodou 18,6 let [14], může být řešen 4převodovým epicyklickým soukolím (obr. 3, část a a obr. S21 a S22 Doplnku). To otáčí hypotetickým dračím ukazatelem [20], jehož hlava ukazuje vzestupný uzel Luny a ocas její sestupný uzel.

S využitím námi identifikovaných periodických vztahů jsme pro všechny planety navrhli nové teoretické planetární mechanismy vyjadřující epicyklické teorie, které odpovídají fyzickým datům. Předchozí 2převodové mechanismy pro vnitřní planety [3],[9],[21] jsou nedostatečné pro složitější periodické vztahy, protože převody by byly příliš velké. Nezbytná jsou dvoustupňová složená soukolí s vloženými koly, což vede k novým 5převodovým mechanismům se systémem kolíček-drážková kulisa pro realizaci proměnných pohybů [7],[9],[21] (obr. 3, část c). Předchozí modely používaly pro vnější planety [3],[16] přímé mechanismy, reflektující přímo teorii epicyklů se systémem kolíček-drážková kulisa. Zde navrhujeme nové 7převodové nepřímé mechanismy se systémem kolíček-drážková kulisa [7],[9] pro variabilní pohyby (obr. 3d), analogické s propracovaným mechanismem, který řídí lunární anomálie [7]. Ve srovnání s přímými mechanismy jsou úspornější. Lépe odpovídají skutečnosti a realizují periodické vztahy s vyšší přesností. (Rozhodující výhody nepřímých mechanismů jsou rozvedeny diskuzi S4 Dodatku.) Bez těchto kompaktních systémů, které mohou být všechny namontovány na stejné desce by nebylo možné vměstnat potřebné převodové mechanismy z obr. 3 do prostoru, který je k dispozici. (Důkazy že mechanismus na obr. 3 správně počítá podle starých řeckých teorií epicyklů jsou obsaženy v diskuzi S4 Doplnku.)

Klíčová otázka: Odpovídají naše teoretické mechanismy fyzickým datům? Obr. 4 znázorňuje některá náročná data z fragmentu A7 [7],[22] (obr. S9, S10, S11 A S12 Doplnku) a fragmentu D1 [1]-[3],[7],[9] (obr. S13 a S14). Každý model musí být v souladu s těmito údaji (diskuze S5 Doplnku), jakož i v souladu s inženýrskými principy stavby orlojů vyplývajících ze zbytků Mechanismu (obr. S15 a S16 Doplnku).

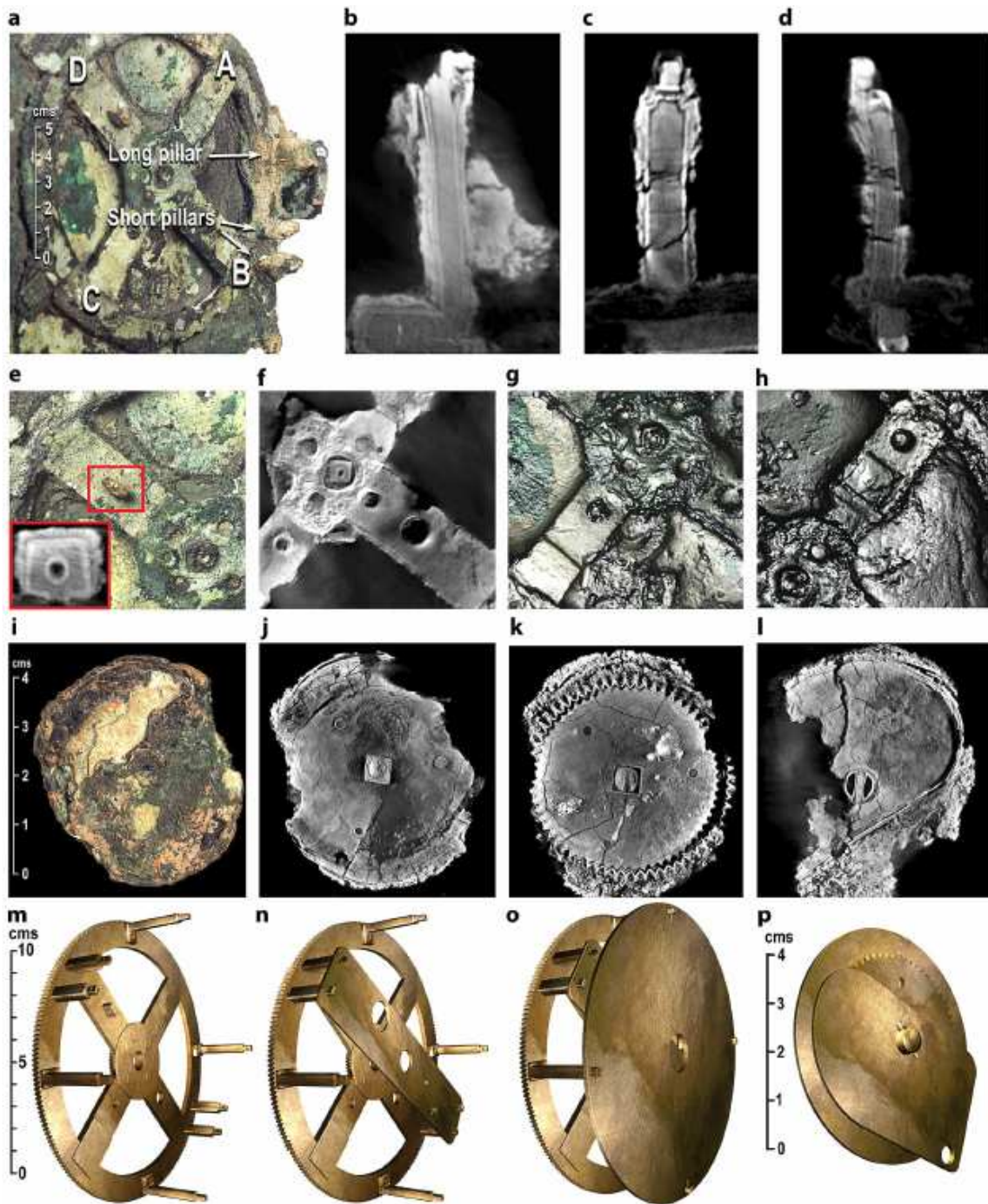
### **Fragment A: Základní rámec pro rekonstrukci**

Hlavní hnací kolo, **b1**, má čtyři paprsky **A, B, C, D** s nápadnými otvory, plochými oblastmi a poškozenými sloupky na svém obvodu (obr. 4, části a-h, obr. S11 a S12 Doplnku) – nepochybný důkaz komplexního epicyklického systému [1]-[3],[9]. V původním Mechanismu byly čtyři krátké a čtyři dlouhé sloupky s rameny a otvory pro upevňovací kolíky, jak je znázorněno na obr. 4a-d včetně rentgenových CT snímků. To naznačuje, že sloupky nesly následující desky: pravoúhlou desku na krátkých sloupcích – *třmen* a desku na dlouhých sloupcích – *kruhovou desku (CP)* (obr. 4, části m-o) [9]. Toto kolo je základním rámcem pro jakoukoliv věrnou rekonstrukci, se čtyřmi paprsky zastávajícími čtyři různé funkce (obr. 4, části e-h). Nejprve rekonstruujeme mechanismy mezi **b1** a *třmenem*.

### **Fragment D: Epicyklické komponenty pro Venuši**

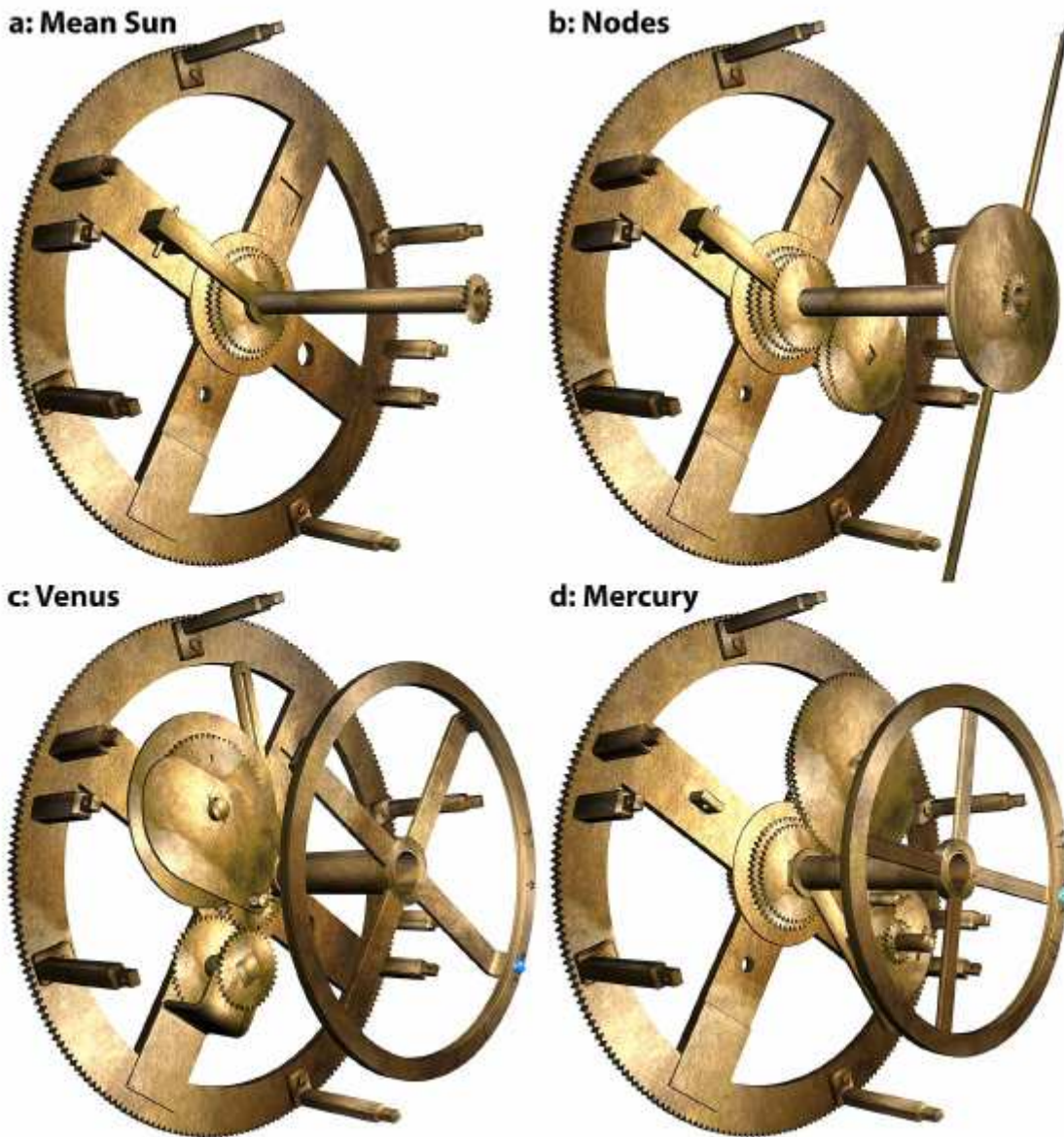
Obr. 4i-l (obr S13 Doplnku) ukazuje pozůstatky po klíčových komponentách ve fragmentu D. Dřívější studie [2],[4],[5] naznačovaly, že ve fragmentu D se nacházejí dvě ozubená kola, ale tato je iluze která vznikla, protože hlavní hřídel v tomto paprsku je dělený [7],[9] – jak se uznává v diskuzi S 5 Doplnku a na obr. S13 Doplnku. Počet 63 zubů kola byl hodnověrně určen z pouhých tří dochovaných zubů [5],[7],[9]. Základními složkami fragmentu D jsou disk, ozubené kolo a deska, zde označovaná jako *D-deska* a hřídel spojující všechny tři prvky. Disk a kolo jsou snýtovány a uprostřed mají čtvercové otvory odpovídající čtyřhranné sekci na jednom konci hřídele. Uvnitř tloušťky ozubeného kola hřídel přechází ze čtvercového na kruhový profil, kterým prochází do *D-desky*. Na tomto hřídeli už není místo pro uložení žádného jiného ozubeného kola a hřídel je otočně uložen v *D-desce*, která slouží také jako mezikus pro správné uložení epicyklických komponent a jako ložisko pro vložené kolo **26** soukolí Venuše.

Žádné jiné dochované ozubené kolo v Mechanismu nemá připojený disk. V mechanismu pro vnitřní planety je třeba aby systém kolíček-kulisa s drážkou měl kolíček umístěn na epicyklickém kole, avšak mimo jeho okraj [3],[21]: připojený disk má pak správnou velikost pro umístění kolíčku ve správné vzdálenosti od středu pro modelování maximálních elongací Venuše. Jasně jsme zde potvrdili původní návrh, že se jedná o epicykly Venuše. Z odstupů krátkých sloupků vyplývají i souměřitelné šířky *D-desky* a *třmenu*.



**Obr. 4. Údaje z fragmentů A & D. Rekonstruované desky a kola**

(a) Fotografie fragmentu A, zobrazující sloupky (long pillar-dlouhý sloupek, short pillars-krátké sloupky) na obvodu **b1** a vzhled paprsků A, B, C, D. (b) rentgenový tomogram (CT) dlouhého sloupku. (c-d) CT krátkých sloupků. (b-d) kvalitnější CT snímky<sup>[22]</sup>. Všechny sloupky mají osazené konce s bočními otvory. (e-h) Fotografie, PTM, CT: Detaily na paprcích D, B, C, A, včetně otvorů, kruhových depresí a plochých oblastí. Na snímku (e) je červeně zvýrazněn propíchnutý blok na paprsku D, s vloženým detailem pořízeným rtg. tomografií (CT) v kolmém směru. (i-l) Fotografie a CT fragmentu D, zobrazující disk, ozubené kolo a desku. (m-o) Počítačová rekonstrukce, zobrazující **b1**, **třmen** na krátkých sloupcích a kruhovou desku (CP) na dlouhých sloupcích. (p) Počítačová rekonstrukce funkcí ve fragmentu D, kterou rekonstruujeme jako komponenty mechanismu s epicyklem pro Venuši.



**Obr. 5. Mechanismy mezi b1 a třmenem**

(a) **střední Slunce**: rameno středního Slunce připojené k propíchnutému bloku na paprsku D znázorněném na obr. 4e, trubka a ozubené kolo pro vstup do mechanismu lunárních fází. (b) **Uzly**: převody mechanismu uzlů, odpovídá ložisku na Obr. 4f - soukolí  $49 \sim 62 + 64 \sim 48$  - s výstupní trubicí a *Dračí ručkou* se dvěma konci. (c) **Venuše**: Základní soukolí mechanismu Venuše odpovídá detailům na obr. 4g. Soukolí  $51 \sim 44 + 34 \sim 26 \sim 63$ -s komponentami z fragmentu D, jak je rekonstruován na obr. 4p, dále je vidět výstupní trubice a prsteneček Venuše s lazuritovým modrým kamenem. Epicyklický ozubený převod  $26 \sim 63$  pro Venuši se otáčí v D-desce, která je připojena ke třmenu (není to znázorněno). Za diskem lze vidět konec kulisy s drážkou. (d) **Merkur**: Základní ozubená kola mechanismu Merkura jsou v souladu s obr. 4h. Soukolí  $51 \sim 72 + 89 \sim 40 \sim 20$  - plus výstupní trubka a prsteneček Merkura s tyrkysovým kamenem. Epicyklický ozubený převod  $40 \sim 20$  pro Merkura se otáčí přímo ve třmenu (není znázorněno). Pod levým okrajem prstence Merkura lze vidět kulisu s drážkou.

## Mechanismy mezi b1 a třmenem

Obr. 5 a obr. S22 Doplnku ukazují, jak jsou střední Slunce, uzly a vnitřní planety složitě konstruovány v 15 mm mezeře [9] mezi **b1** a třmenem v devíti těsně přiléhajících vrstvách. Ukazují to zjištěná fakta a hustota vrstev dochovaných ozubených převodů (obr. S16, S20 a S21 Doplnku a video S1 Doplnku). Mechanismy jsou prokládány tak, že jejich výstupní trubice jsou vnořeny v pořadí CCO, s lunárním výstupem na centrálním hřídeli.

Mechanismus generující lunární fáze [10] musí mít přístup k převodům pro oběh Luny a Slunce, protože fáze je rozdíl mezi těmito rotacemi. Zdá se, že systém výstupních prstenců vyžaduje výpočet pravého Slunce dvakrát<sup>[9]</sup> – jednou pro výpočet fáze Luny a jednou pro prsteneček pravého Slunce, což je třetí výstup v systému prstenců, takže je mechanicky oddělený od lunárního centrálního hřídele. Zde řešíme tento klíčový problém pomocí výstupu pro střední Slunce, jeho přivedením do mechanismu lunárních fází jako první výstupní trubice sousedící s centrálním lunárním hřídelem. Kolo **b1** nese mechanismus středního Slunce, ale výstup středního Slunce není možné připojit na jeho střed, protože centrální pevná ozubená kola to neumožňují: polovina délky paprsku D je potřebná pro přemostění pevných kol. To je důvod, proč je výstup středního Slunce připojen pomocí pásu ke dřívě záhadnému děrovanému bloku na paprsku D (obr.4, část e). Tato důležitá myšlenka umožňuje zobrazovat prstence pro planety, s jedním výstupem pravého Slunce pro solární prsteneček. Malá nepřesnost při použití středního Slunce namísto pravého slunce při výpočtu fází Luny je zanedbatelná při zobrazení modelu Luny na kuličce o průměru 6 mm.

Systém zobrazení výstupů Mechanismu pomocí prstenců má velké výhody ve srovnání se zobrazením pomocí ukazatelů – ručiček. Shoduje se mnohem lépe s popisem výstupního zobrazení v BCI. Je eliminována závažná paralaxa, kterou trpí systém ručiček s devíti výstupy. Zobrazení pomocí prstenců obohacuje astronomické výstupy tím, že umožňuje synodické fáze planet popsat odkazy na poznámky, jak diskutujeme dále (obr. 8). Vede to k robustnímu a elegantnímu zobrazení.

Velmi dobrou shodu mezi námi navrhovanými mechanismy a dostupnými daty ukazuje obr. 4. Čtyři paprsky kola **b1** naznačují čtyři různé funkce (obr. S12 Doplnku). Tři z nich jsou zabrány středním Sluncem a vnitřními planetami. Jaká je funkce nápadného ložiska na paprsku B (obr. 4, část f)? Obr. 5b ukazuje řešení: Ložisko umožňuje montáž čtyřkolového epicyklického systému, který vypočítává lunární uzly. Z námi navržených počtů zubů pro ozubená kola a jejich modulů vyplývá (diskuze S4 Doplnku), že ložisko je na přesně správném místě na paprsku B. Dřívější úvahy nenalezly pro toto ložisko žádné jiné použití.

Komplexní dedukce vedou k jedinečným rekonstrukcím soukolí Venuše a Merkura (diskuze S5 Dodatku). Dokazujeme, že fragment D zahrnuje epicyklické komponenty pro Venuši (obr. 4, obr. S13 a obr. S14 Doplnku), že soukolí splňují náš 5-převodový návrh (obr. 3) a že všechny musí zapadnout do rámce vytvořeného sloupky (obr. 4). Prvočísla v periodických vztazích v kombinaci s fyzikálními údaji pak určují ozubená soukolí (obr. 3, části c, e, obr. 4, části g, h, obr. 5, části c, d). Zejména ukazujeme, že astronomický význam kola s 63 zuby je, že sdílí prvočísla  $3 \times 7$  s periodickým vztahem pro Venuši,  $(289, 462) = (17^2, 2 \times 3 \times 7 \times 11)$ . Osa třmenu svírá s paprsky úhel  $11^\circ$  aby vyhověla uložení epicyklických ozubených kol pro Merkura a Venuši – to vysvětluje úhel krátkých sloupek vzhledem k **b1**. Je to poprvé, co jsou hlavní funkce **b1** a komponenta z fragmentu D plně vysvětleny (obr. 4, 5 a obr. S21 Doplnku, diskuze S5 Doplnku a video S1 Doplnku). Došli jsme k závěru, že naše převodová soukolí pro Venuši a Merkura reálně vyhovují fyzickým údajům o Mechanismu.

## Mechanismy mezi třmenem a deskou CP

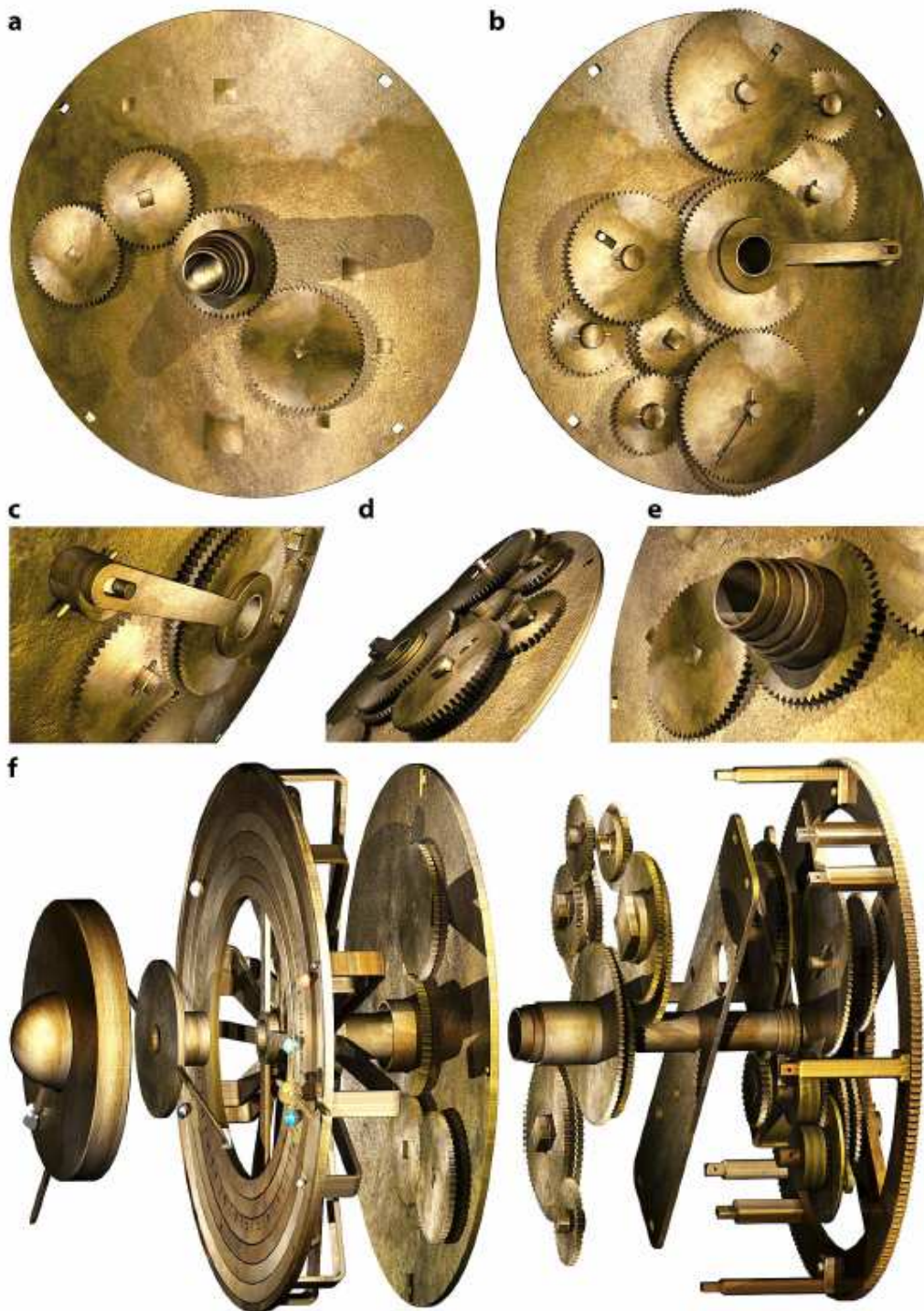
O systémech převodů, které řeší pohyb pravého Slunce a vnějších planet se nedochovaly žádné přímé doklady. Nevyhnutelně to znamená možnost volby, nicméně prostor, který je k dispozici tuto volbu silně omezuje – pro řešení perspektivních periodických vztahů jsou nezbytné velmi kompaktní mechanické systémy. Obrázek 6a-e ukazuje, že většina převodů pro pravé Slunce a vnější planety jsou rekonstruována v prostoru šířky 9,7 mm mezi třmenem a CP.

Pro snadnější zvládnutí prostorových problémů jsou výchozí ozubená kola pro tyto systémy uložena před CP (obr. 6a) a poskytují robustní mechanické řešení bez nutnosti použití podpěr mechanismů jako v předchozím modelu [9]. Pevné ozubené kolo 56 ve středu navazuje na složité epicyklické soukolí na CP, řešící synodické oběhy Slunce / planet vzhledem k CP. Hřídele tří kol **52**, **56** a **64** procházejí CP a

pohánějí mechanismy v zadní části.

Mechanismy mají své výstupy uspořádány v pořadí CCO, seřazené na hlavních osách pro usnadnění kalibrace. Planetární cykly a soukolí jsou v tabulce na obr. 3, část f a schematický náčrt je zobrazen na obr. S23 Doplnku. Vzhledem k tomu, že počet zubů musí zahrnovat prvočísla periodických relací, existuje jen několik použitelných možností. Mechanismus pro pravé Slunce je již dříve navržený [3] jednoduchý 3převodový systém (obr. 3, část b), který vychází ze starověké řecké epicyklické teorie pravého Slunce. Sdílí pevné kolo **56** se všemi vnějšími planetami a navíc kolo **52** s mechanismem Saturna. Proto potřebuje pouze jeden další převodový stupeň **56**. Vnější planety, Mars, Jupiter a Saturn, jsou uspořádány ve směru hodinových ručiček od shora – obr. 6, část b. Všechny jejich mechanismy sdílejí pevné kolo **56** a následuje úsporné 7převodové soukolí znázorněné na obr. 3, část d.

Rozložený diagram na obr. 6f ilustruje, jak všechny převody modelu do sebe zapadají. Provedli jsme rekonstrukci **34** ozubených kol před hlavním hnacím kolem **b1** Mechanismu. Dochované systémy zahrnují 35 ozubených kol za **b1** (tabulka S8 Doplnku a obr. S20 Doplnku), což je celkem 69 ozubených kol (videa S2 a S3 Doplnku). Model vychází ze všech našich principů rekonstrukce a odpovídá všem faktům (diskuze S1 Doplnku).



**Obr. 6. Pravé Slunce, vnější planety a rozložené soukolí modelu vesmíru**

a) Převody na přední straně desky CP. Střed v (a): pevné kolo **56**, přinýtované do pomocné desky (není vidět). Vpravo dole v (a): kolo **64**, sdílené mezi Martem a Jupiterem. Vlevo nahoře v (a): kolo **52**, sdílené mezi pravým Sluncem a Saturnem. Vlevo v (a): kolo **56** je epicyklické kolo pro převody pravého Slunce. (b) mechanismy viditelné ze zadní strany desky CP. Od shora ve směru hodinových ručiček: Saturn, pravé Slunce, Mars, Jupiter. (c) Detail mechanismu pravého Slunce. (d) Detail ozubených kol, ukazující uložení ve vrstvách. (e) Detail výstupních trubek. (f) Rozložený mechanismus převodů modelu vesmíru, zprava doleva: kolo **b1**, převody pro *střední Slunce, uzly, Merkur, Venuše; pravé Slunce a vnější planety*; deska CP a sdílená kola, zobrazované prstence, *Dračí ručka*; mechanismus pozice a fáze *Luny*.

## Zobrazení vesmíru

Obr. 7 ukazuje elegantní mechanický model vesmíru starověkého Řecka na přední straně Mechanismu z Antikythery, ve kterém jsou uplatněny naše současné objevy.

Planety jsou znázorněny kuličkami z polodrahokamů na planetárních prstencích (obr. S3 a obr. S24 Doplnku, diskuze S6 Doplnku, videa S1 a S3 Doplnku). Stupnice stáří Luny ve dnech [3] na prstenci pravého Slunce se čte ukazatelem Luny; vzhledově vychází z Cicerova popisu Archimedova zařízení (diskuze S2 Doplnku): ... *bylo skutečně pravdou, že Luna byla vždy tolik otáček za Sluncem na bronzovém přístroji, jako by to souhlasilo s počtem dní, kolik byla za ním na obloze ...* .

Dračí ručka naznačuje zatmění když se přiblíží k ukazateli pravého Slunce při novoluní nebo úplňku. Blížkost k uzlům určuje blíže na Mechanismu z Antikythery sofistikovanou predikci zatmění [8],[23] se symetrickými limity pro zatmění Luny a asymetrickými limity pro zatmění Slunce, podle toho, zda je Luna na sever nebo na jih od uzlu [8],[23]. Tyto širší a užší limity jsou označeny trojúhelníky na prstenci pravého Slunce. Když je dračí ručka v rámci příslušných limitů, lze nalézt předpověď zatmění na zadní straně Mechanismu na rytině displeje cyklu Saros, s popisem zatmění [8],[23],[24]. Pokud se dračí ručka nachází v širších limitech, nastává období zatmění [23] – vyskytuje se dvakrát v každém roce ve kterém dochází k zatmění, jedná se o periodu oběhu Slunce vzhledem k Dračí ručce. Jako v uživatelské příručce mohou být tyto funkce popsány na ploše zadního krytu BCI (obr. 1, část c) v nedochované oblasti nad planetami (obr. 1, část a).



Obr. 7. Počítačový model zobrazení modelu vesmíru

Uprostřed je kopule Země, fáze Luny a její poloha ve zvěrokruhu, pak následují prstence *Merkura*,

*Venuše, pravého Slunce, Marta, Jupitera, Saturna a datový prstenec*, polohy těles jsou vyznačeny "malou koulí" a opozice menšími kuličkami. Na planetových prstencích jsou vyznačeny stupnice a odkazovací písmena na synodické cykly planet. Planety obklopuje stupnice zvěrokruhu a prstenec egyptského kalendáře [2].

Na prstenci pravého Slunce je poloha vyznačena "malou zlatou koulí" s "ukazatelem", jak je popsáno v BCI [9]. Když mají ukazatelé Luny a Slunce shodnou polohu, Luna ukazuje černou polokouli – Nov, když jsou ukazatelé na opačných stranách, Luna ukazuje bílou polokouli – úplněk [10]. Hlava Dračí ručky ukazuje vzestupný lunární uzel, Ocas sestupný uzel. Malé trojúhelníky na prstenci pravého Slunce, v blízkosti ukazatele, vyznačují širší a užší limity zatmění. Zatmění mohou nastat, pokud se Hlava dračí ručky nachází v těchto limitech. Pokud je ukazatel Luny před Dračí hlavou, Luna je jižně od uzlu, Za Dračí hlavou je Luna severně od uzlu - pro sestupný uzel to platí obráceně. Na úzkém datovém prstenci upevněný datový ukazatel směřuje na datum v egyptském kalendáři [2].

### **Textové odkazy na synodické události na planetárních prstencích**

Na stupnicích planetárních prstenců Mechanismu z Antikythery zpravidla existují písemné značky, odkazující na textový popis formulí a opakujících se událostí, které se k nim vztahují: Například odkaz textu *parapegma* ke stupnici zvěrokruhu [1],[2],[7],[25] a odkaz popisu zatmění ke stupnici prstence cyklu Saros [8],[12],[23]. Pro každou planetu odkazy na její synodické události - maximální elongace, stacionární body, konjunkce a opozice - nastávající když je planeta v charakteristickém úhlu ke Slunci. Otáčením Mechanismu můžeme zaznamenat polohu Slunce na planetárním prstenci pro každou synodickou událost (obr. 7). Navrhujeme, aby planetární prstence byly opatřeny značkami – písmeny odkazujícími na text k těmto událostem, čitelnými pod ukazatelem polohy Slunce, které by byly přidruženy k příslušným stupnicím. Obr. 8 ukazuje, jak by písmena odkazovala na vzorce a opakované události uvedené na krytu FCI.

I když toto schéma odkazování není u originálu Mechanismu prokazatelné, protože začátky řádků textu jsou ztraceny (obr. 1b, obr. S4 Doplněk), má tento přístup pozitivní význam pro obohacení astronomie modelu vesmíru a přesně se hodí do struktury textu na FCI. Je pozoruhodné, že na FCI jsou pouze synodické události s odkazem z planetárních prstenců: běžné objevení a zmizení planety je ignorováno, což mluví ve prospěch hypotézy odkazů.

Lze si jen těžko představit, jak by uživatel používal informace z FCI bez takového systému odkazů, který navíc dále odůvodňuje realizaci našeho systému prstencových výstupů.

FCI [9],[12] vyčísľuje intervaly ve dnech mezi synodickými událostmi – pravděpodobně vypočítané z epicyklických modelů, nikoli získané pozorováním, protože skutečné intervaly jsou tak proměnlivé (obr. 1, část b). Nevyvinutá trigonometrie hellénistické doby [26] by těžko prováděla potřebné výpočty. Zde předkládáme možnost, že Mechanismus z Antikythery sám vypočítával tyto synodické intervaly počítáním dnů na kalendářní stupnici, mezi synodickými událostmi – značkami synodické stupnice na planetárních prstencích – zcela bez trigonometrie.

## MERKUR

---

1	<i>Dolní konjunkce</i>	<b>Δ</b>	] vracející [
2	<i>Největší ranní elongace</i>	<b>E</b>	] největší elongace [
3	<i>Ranní zastávka</i>	<b>Z</b>	] počáteční... [

## VENUŠE

---

4	<i>Jméno planety</i>		]... v následujícím směru. Pho[sphoros (Venuše)
5	<i>Periodická relace</i>		] znamená zvířetníku (?). ve stejných 4[6]2 letech, návraty... [
6	<i>Synodická perioda</i>		]... 462. A každý návrat v 5(84) dnech [
7	<i>Horní konjunkce</i>	<b>H</b>	]... a po konjunkci se Sluncem se vrací [
8	<i>Největší večerní elongace</i>	<b>Θ</b>	] největší elongace ve 224 dnech. Blíží se ke Slunci [
9	<i>Večerní zastávka</i>	<b>I</b>	] dosahuje večerní zastávky, vzdálená od [Slunce
10	<i>Dolní konjunkce</i>	<b>K</b>	] blíží se po krocích ke Slunci, a... konjunkce [
11	<i>Největší ranní elongace</i>	<b>Λ</b>	] do největší elongace po dalších 68 dnech... [
12	<i>Ranní zastávka</i>	<b>M</b>	] ranní zastávka... postupuje. Stojící daleko od Slunce...[
13			] ve 49 (?) dnech se vrací do největší ranní elongace [
14			] největší elongace blíží se ke Slunci při návratu [
15			]...[

## MARS

---

16	<i>Jméno planety?</i>		]...[
17	<i>Periodická relace?</i>		] každý návrat do původního stavu v méně než [...] dnech [
18	<i>Synodická perioda?</i>		]... začíná se vracet... je vzdálen [od Slunce
19	<i>Večerní zastávka</i>	<b>N</b>	] večerní zastávka, začíná se vracet s končícím ránem [
20	<i>Konjunkce</i>	<b>E</b>	]... 349 dnů jde do konjunkce se Sluncem... [
21	<i>Ranní zastávka</i>	<b>O</b>	] 349 [dnů] do ranní zastávky, kdy je vzdálen od Slunce... [
22	<i>Opozice</i>	<b>H</b>	] 82 a vstupuje do večerní zastávky, kdy je vzdálen od [Slunce
23			]... 8 (?) dní, opět... se vrací. V... [

## JUPITER

---

24	<i>Jméno planety</i>		]... v zastávce. Phaethon (Jupiter) [dělá...] návraty [
25	<i>Periodická relace?</i>		] každý návrat do původního stavu v méně než [...] dnech [
26	<i>Synodická perioda?</i>		]... a jedna dvanáctina... začíná se vracet [
27	<i>Večerní zastávka</i>	<b>P</b>	]... [.. .]7 od večerní zastávky a vrací se [
28	<i>Konjunkce</i>	<b>Σ</b>	]... v časovém interval 139 dní, konjunkce. . [
29	<i>Ranní zastávka</i>	<b>T</b>	] dalších 139 [dní] do ranní zastávky, je vzdálený [od Slunce
30	<i>Opozice</i>	<b>Y</b>	]... po 8denní zastávce jde dopředu [...] dní [
31			]... a zase po zastávce 8 dní opět začíná (?) [

## SATURN

---

32	<i>Jméno planety</i>		]... 104 den přichází do diametrické opozice [
33	<i>Periodická relace</i>		] návraty do stejného stavu v 442... přechází přes [
34	<i>Synodická perioda?</i>		] každý] návrat opakuje v...f
35			] zpětný pohyb...
36	<i>Večerní zastávka</i>	<b>Φ</b>	] jde zpátky až k... [
37	<i>Konjunkce</i>	<b>X</b>	] vstupuje do konjunkce[
38	<i>Ranní zastávka</i>	<b>Ψ</b>	] v zastávce, vzdálený [od Slunce
39	<i>Opozice</i>	<b>Ω</b>	]dní[
40			] po zastávce 8 [dní
41			] v diametrické opozici [
42			]...[
43			]...[

Obr. 8. Schéma hypotetického systému odkazů pro FCI

Český překlad vychází z překladu z řečtiny do angličtiny v publikaci [12], kde lze také vidět přepis původního řeckého textu. Písmena systému odkazů jsou v červené barvě (je vidět v online verzi tohoto textu). Celý systém používá písmena řecké abecedy od A do Ω, ale prvních několik řádků pro Merkura chybí. Fragmentární data ukazují, že v řádcích textu ještě existuje mnoho nejistot.

## Závěr

Obr. 7, obr. S24 a S25 Doplnku vizualizují náš nový model. Je vyvrcholením významného interdisciplinárního úsilí o objasnění přední části Mechanismu z Antikythery. Předchozí výzkum odhalil důmyslnost mechanismů zobrazujících data na zadní straně stroje, my zde ukazujeme bohatství modelu vesmíru v jeho přední části. Hlavní strukturální vlastnosti našeho modelu jsou diktovány fyzickými daty, hodnotami prvočísel v obnovených periodických vztazích planet a popisy planetárních prstenců v BCI. Další – hypotetické vlastnosti Mechanismu značně obohacují a ospravedlňují zobrazení modelu vesmíru: tématické propojení zobrazení přední a zadní strany Dračí ručkou a existence systému textových odkazů pro synodické události planet.

Vzhledem ke ztrátě původních dat nemůžeme tvrdit, že náš model je replikou originálu, ale naše řešení tohoto spletitého 3D rébusu čerpá mocnou podporu z logiky našeho modelu a z přesné shody s dochovanými daty. Mechanismus z Antikythery byl výpočetním nástrojem pro matematickou astronomii, když v sobě spojil cykly z babylonské astronomie a řecký smysl pro geometrii. Počítal ekliptikální délky Luny [7], Slunce [3] a planet [1]-[3],[9],[11]; fáze Luny; stáří Luny; synodické fáze planet; vyloučené dny metonického kalendáře [8]; pro zatmění [7],[8],[23] řešil možnosti výskytu, časy, charakteristiky, roky a období; počítal heliakální východy a západy významných hvězd a souhvězdí [1],[2],[7],[25] a cyklus olympiád [8] – ohromující a ambiciózní přehled starověké řecké astronomie. Jedná se o první známé zařízení, které mechanizovalo předpovědi racionálních teorií a mohlo by automatizovat mnohé výpočty potřebné pro vlastní design (diskuze S6 Doplnku) – učinit první kroky k mechanizaci matematiky a vědy. Naše práce odhaluje Mechanismus z Antikythery jako krásnou koncepci, realizovanou vynikajícím inženýrstvím v geniálním zařízení. Vyzývá nás k přehodnocení všech našich předsudků o technologických schopnostech starých Řeků.

## Metody

Použité metody viz níže v části Dodatečné informace

## Dostupnost dat

Příslušní autoři vyhoví rozumným požadavkům na poskytnutí údajů, ze kterých vycházejí zjištění této studie.

Na [www.nature.com](http://www.nature.com) byl text přijat 30. září 2020, akceptován 22. ledna 2021, publikován online 12. března 2021.

## Literatura

- [1] Rehm, A. Notizbuch (unpublished notebooks), research manuscripts and photographs from 1905-1906. Bayerische Staatsbibliothek, Munich, Germany. Rehmiana III/7 and III/9 (1905-1906).
- [2] Price, D. & de, S. Gears from the Greeks: the Antikythera Mechanism – a calendar computer from ca. 80 BC. American Philosophical Society. Trans. Am. Philos. Soc. New Ser. 64, 1-70 (Philadelphia (1974); reprinted by Science History Publications, New York) (1975).
- [3] Wright, M. T. A planetarium display for the Antikythera mechanism. *Horol. J.* 144(5), 169-173 (2002).
- [4] Wright, M. T. Counting months and years: the upper back dial of the Antikythera mechanism. *Bulletin of the Scientific Instrument Society*, No. 87 (2005).
- [5] Wright, M. T. The Antikythera mechanism: a new gearing scheme. *Bulletin of the Scientific Instrument Society*, No. 85 (2005).
- [6] Wright, M. T. Epicyclic gearing and the Antikythera mechanism, part II. *Antiquarian Horol.* 29(2), 2005 (2005).
- [7] Freeth, T. et al. Decoding the ancient Greek astronomical calculator known as the Antikythera mechanism. *Nature* 444, 587-591 (2006).
- [8] Freeth, T., Jones, A., Steele, J. M. & Bitsakis, Y. Calendars with Olympiad display and eclipse prediction on the Antikythera mechanism. *Nature* 454, 614-617 (2008).
- [9] Freeth, T. & Jones, A. The cosmos in the Antikythera mechanism. *ISAW Papers* 4, February 2012.

<http://dlib.nyu.edu/awdl/isaw/isaw-papers/4/> (2012).

- [10] Wright, M. T. The Antikythera mechanism and the early history of the moon phase display. *Antiquarian Horol.* 29, 319-329 (2006).
- [11] Carman, C., Thorndike, A. & Evans, J. On the pin-and-slot device of the Antikythera Mechanism, with a new application to the superior planets. *JHA* 43, 93-116 (2012).
- [12] Anastasiou, M. et al. The inscriptions of the Antikythera mechanism paper 6: the front cover inscription. *Almagest* VII(1), 250-297 (2016).
- [13] Bitsakis, Y. & Jones, A. The inscriptions of the Antikythera mechanism paper 5: the back cover inscription. *Almagest* VII(1), 216-249 (2016).
- [14] Neugebauer, O. *A History of Ancient Mathematical Astronomy* (Springer, New York, 1975).
- [15] Neugebauer, O. *Astronomical Cuneiform Texts, Vols I-III*. 1st edition, Lund Humphries London (1974). Reprinted by SpringerVerlag (1983).
- [16] Wright, M. T. The Antikythera mechanism: compound gear-trains for planetary indications. *Almagest*. <https://doi.org/10.1484/J.ALMAGEST.1.103717> (2013).
- [17] Fowler, D. H. *The Mathematics of Plato's Academy: A New Reconstruction* (Clarendon Press, Oxford, 1987).
- [18] Fowler, D. H. Ratio in early Greek mathematics. *Bull. Am. Math. Soc.* 1(6), 807-846 (1979).
- [19] Lawlor, R. & Lawlor, D. Theon of Smyrna: mathematics useful for understanding Plato, III, 15, translated from the 1892 Greek/ French edition of J. Dupuis (1892).
- [20] King, H. C. & Millburn, J. R. *Geared to the Stars: The Evolution of Planetariums (Orreries and Astronomical Clocks)*. University of Toronto, Toronto Press, 1978).
- [21] Freeth, T. The Antikythera mechanism: 2—Is it Posidonius' Orrery?. *Mediterr. Archaeol. Archaeom.* 2(2), 21-35 (2002).
- [22] Pakzad, A. et al. Improved X-ray computed tomography reconstruction of the largest fragment of the Antikythera Mechanism, an ancient Greek astronomical calculator. *PLoS ONE* <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0207430> (2018).
- [23] Freeth, T. Eclipse prediction on the ancient Greek astronomical calculating machine known as the Antikythera Mechanism. *PLoS ONE* <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0103275> (2014).
- [24] Anastasiou, M. et al. The inscriptions of the Antikythera mechanism, paper 4: the back dial and back plate inscriptions. *Almagest* 7(1), 138-215 (2016).
- [25] Bitsakis, Y. & Jones, A. The inscriptions of the Antikythera mechanism, paper 3: the front dial and parapegma inscriptions. *Almagest* VII(1), 68-137 (2016).
- [26] Van Brummelen, G. *The Mathematics of the Heavens and the Earth: The Early History of Trigonometry* (Princeton, Princeton University Press, 2009).
- [27] Doplněk – viz níže (v nich je uvedeno i jaké části jsou obsahem “Doplnku”, na který se odkazuje poznámkami autorů v textu článku)

## Poděkování

Děkujeme University College London (UCL), oddělení strojírenství, za poskytnutí technických prostředků pro tento výzkum. Jsme vděční za podporu z Foundation A. G. Leventis a DH a také od Worshipful Company of Clockmakers. Oceňujeme spolupráci a vybavení Charles Frodsham & Co., Chronometer, Watch & Clock Makers. Jsme vděční za epigrafickou radu, kterou poskytl S. Colvin (UCL), za podporu W. Suen (UCL) a za konzultace s C. Cullen (Cambridge University). Data PTM jsou publikována s laskavým svolením Hewlett-Packard a data rentgenové CT s laskavým svolením společnosti Nikon X-TEK Systems. Děkujeme jim za oprávnění k použití dat. Zařízení zapůjčené X-TEK Systems bylo použito pro shromažďování rentgenových dat. Za shromažďování dat z r. 2005 si zaslouží velké díky N. Kaltsas a jeho tým personálu a konzervátorů z Národního archeologického muzea v Aténách, T. Malzbender s týmem odborníků na zobrazování od firmy Hewlett-Packard, R. Hadland s týmem rentgenových specialistů z X-Tek Systems a anglo-řecký tým vědců, kteří to umožnili. Na práce při shromažďování a analýze dat, na kterých tento výzkum závisel, poskytli nezbytné finanční prostředky Leverhulme Trust, Walter Hudson Bequest, Výzkumný výbor University of Athens, Národní banka Řecké kulturní nadace a nadace J.F. Costopoulos a AG Leventis .

## Autorské příspěvky

Všichni autoři přispěli k návrhu výzkumu. T.F., D.H. a A.D. zkoumali planetární periody a jejich odvození. A.D. analyzoval nápisy a zkoumal babylonský původ planetárních period. D.H. a T.F. vyvinuli nové a úsporné mechanismy pro lunární uzly a planety a ukázali, jak mohou být kombinovány tak, aby odpovídaly datům. T.F. dal do souvislosti strukturu a odkazy zobrazení modelu vesmíru a vytvořil obrázky článku. Vytvořil koncept rukopisu

s příspěvky D.H., A.D., L.M., M.G. a A.W.

### **Konkurenční zájmy**

Autoři nedeklarují žádné konkurenční zájmy.

### **Doplňěk (Dodatečné informace)**

Doplňující informace, na které je odkazováno v předchozím textu, jsou k dispozici v anglické online verzi tohoto článku na adrese <https://doi.org/10.1038/s41598-021-84310-w>

Jsou to:

3 doplňující videosoubory S1, S2 a S3 s animací (ukazující skladbu celého stroje) a odkaz na rozsáhlou doplňující část s úvahami a diskusemi, obrázky a tabulkami.

Jejich označení a obsah je následující:

Doplňující diskuse S1: The Physical Evidence

Doplňující diskuse S2: Texts & Inscriptions

Doplňující diskuse S3: Planetary Periods

Doplňující diskuse S4: Theoretical Mechanisms

Doplňující diskuse S5: Matching the Evidence

Doplňující diskuse S6: Reconstructing the Cosmos

Doplňující obrázky S1–S25.

Doplňující Tabulky S1–S9.

Image Credits & Software

Odkazy 1–26 & odkazy doplňku 27–61

Doplňující videosoubor S1

(Gear-by-gear computer reconstruction of the Cosmos of the Antikythera Mechanism.

Doplňující videosoubor S2

(A track round all the surviving and reconstructed gears of the Antikythera Mechanism.

Doplňující videosoubor S3

(An exploded model of the Antikythera Mechanism assembles itself into the complete device.

Korespondence a žádosti o materiály adresujte panu Tonyemu Freeth nebo panu Adamu Wojcik

**Informace o reprintech a autorských právech** jsou k dispozici na [www.nature.com/reprints](http://www.nature.com/reprints)

**Vydavatelská poznámka:** Springer Nature zůstává neutrální s ohledem na jurisdikční nároky ve zveřejněných mapách a institucionálních spojeních.

**Otevřený přístup** Tento článek je licencován v rámci Creative Commons Attribution 4.0 International License, která umožňuje použití, sdílení, adaptaci, distribuci a reprodukci v každém médiu nebo formátu, pokud důvěřujete původním autorům a zdroji, poskytnete odkaz na licenci Creative Commons a označujete, zda byly provedeny změny. Obrázky nebo jiné materiály třetích stran v tomto článku jsou zahrnuty v licenci Creative Commons, pokud není v odkazu na licenci uvedeno jinak.

© The Author(s) 2021