

**Gymnázium Přírodní škola, z.ú.**  
**Profilová práce — třída Pí**  
**Nižší stupeň studia**  
**2024/2025**

**Magdalena Prouzová**

## **Testování přepínače svazků pro družici LISA**

**Vedoucí práce: RNDr. Marek Matura, Ph.D.**

**Datum odevzdání: 1. ledna 2025**

# PODĚKOVÁNÍ

Ráda bych vyjádřila své upřímné poděkování vedoucímu mé profilové práce RNDr. Marku Maturovi, Ph.D., za pomoc s úpravami textů, s plánováním a kontrolou postupu a trpělivé vedení, které mi věnoval během celého procesu psaní této práce.

Dále bych chtěla poděkovat svému odbornému konzultantovi, Mgr. Asenovi Christovovi, Ph.D., za jeho neocenitelnou pomoc, zejména při měřeních, při kterých mě celou dobu prováděl a vše mi vysvětloval, za ochotu vždy mi poradit a nasměrovat mě správným směrem.

Zvláštní poděkování patří mému tátovi, RNDr. Michaelu Prouzovi, Ph.D., díky jehož podpoře a inspiraci jsem se vůbec k této práci dostala. Bez jeho vlivu by tato práce nikdy nevznikla.

Všem, kteří mě během tohoto procesu podporovali, srdečně děkuji.

# OBSAH

<b>1. ÚVOD A CÍLE</b> .....	<b>1</b>
<b>2. PRŮBĚH REALIZACE PRÁCE</b> .....	<b>2</b>
<b>3. TEORETICKÁ ČÁST</b> .....	<b>3</b>
<b>3.1 GRAVITAČNÍ VLNY</b> .....	<b>3</b>
<b>Co jsou gravitační vlny?</b> .....	<b>3</b>
Jak se gravitační vlny projevují?.....	3
Proč jsou gravitační vlny pro nás tak zajímavé?.....	3
Jak a kde gravitační vlny vznikají?.....	4
Kdo gravitační vlny objevil?.....	5
Jak se gravitační vlny detekují na Zemi?.....	6
Proč je zajímavé gravitační vlny detekovat ve vesmíru?.....	8
<b>3.2 KONCEPT DRUŽIC LISA</b> .....	<b>9</b>
<b>3.3 ČESKÝ PODÍL NA VÝVOJI DRUŽICE</b> .....	<b>10</b>
<b>3.4 SOUČÁSTKA FSU</b> .....	<b>11</b>
<b>4. PRAKTICKÁ ČÁST</b> .....	<b>14</b>
<b>4.1 PŘÍTLAK A MĚŘENÍ DEFORMACÍ</b> .....	<b>14</b>
Postup měření.....	15
Gumový kroužek.....	17
První verze titanové pružinky vyrobené metodou EDM.....	19
Druhá verze titanové pružinky vyrobené metodou EDM.....	21
Alternativní design pružinky zvlněného CuBe plechu.....	24
Měření vybraného elementu v celém mechanismu.....	25
<b>4.2 MĚŘENÍ RYCHLOSTI OTÁČENÍ</b> .....	<b>28</b>
Postup měření.....	30
Otáčení součástky s trváním maxima impulsů 50 us.....	31
Otáčení součástky s trváním maxima impulsů 100 us.....	31
Otáčení součástky s trváním maxima impulsů 150 us.....	31
Otáčení součástky s trváním maxima impulsů 75 us.....	31
<b>5. ZÁVĚR</b> .....	<b>34</b>
<b>SEZNAM ZDROJŮ A LITERATURY</b> .....	<b>35</b>

# 1. ÚVOD A CÍLE

Na Fyzikálním ústavu AV ČR (FZU) vyvíjí jednu ze součástí - přepínač laserového svazku pro družicový detektor gravitačních vln LISA (Laser Interferometer Space Antenna). Jde o tři družice uspořádané do velikého trojúhelníku, které pomocí laserů budou nesmírně přesně měřit vzájemnou vzdálenost a budou vypuštěny do vesmíru roku 2034. Když prostorem, kde jsou družice, projde gravitační vlna z vzdálené galaxie, tak se družice vůči sobě začnou pravidelně nepatrně pohybovat a tuto změnu vzdálenosti budou schopny zaznamenat.

Já jsem se v rámci mé profilové práce podílela na dvou typech měření přepínače laserového svazku. Ve speciální laboratoři na FZU jsem dostala možnost provést několik desítek měření deformace jedné části součástky a několik stovek měření rychlosti otáčení součástky a sledování změny rychlosti toho otáčení v čase.

Mým hlavním cílem bylo pod vedením mého odborného konzultanta Mgr. Asena Christova, Ph.D., všechna měření vyhodnotit a navrhnout optimální konfiguraci součástky. Zabývali jsme se výběrem vhodného materiálu pružiny, která přitlačuje otáčející se optomechanický díl součástky. Pro správný provoz mechanismu je nezbytné, aby deformace pružiny byla přesně předpověditelná a aby se pružina chovala stejně při zvyšování i při snižování přítlaku. V další části měření jsme se pak zabývali určením závislosti rychlosti otáčení součástky na tvaru signálu a na délce trvání jednotlivých segmentů signálu pro piezoelektrický pohon součástky.

Dalším cílem pak bylo v textu mé profilové práce podrobněji vysvětlit fungování detektoru gravitačních vln a funkci součástky vyvíjené na FZU. Také jsem snažila popsat, co vlastně gravitační vlny jsou, a vysvětlit, jak byly gravitační vlny předpovězeny a jakými způsoby se je lidé pokoušeli detekovat.

## 2. PRŮBĚH REALIZACE PRÁCE

K dosažení cílů mé profilové práce jsem postupovala podle plánu, který jsem vytvořila ve spolupráci s mým odborným konzultantem Mgr. Asenem Christovem, Ph.D., a také za pomoci svého otce Michaela Prouzy. Metodika práce zahrnovala tři hlavní fáze: provedení měření v laboratoři, analýzu získaných dat a psaní teoretické části práce.

Prvním krokem bylo domluvit s odborným konzultantem, jaká měření a analýzy bych mohla provádět, a na základě toho jsem si stanovila záměr své profilové práce. Měření bylo navrženo tak, aby odpovídalo mým možnostem, zároveň však bylo přínosné pro vývoj přepínače laserového svazku. K tomu jsem měla k dispozici laboratorní vybavení na Fyzikálním ústavu AV ČR (FZU), kde jsem prováděla přesná měření a sledování chování testované součástky.

Samotné měření jsem realizovala během asi šesti návštěv laboratoře FZU, přičemž každá návštěva trvala přibližně 3–4 hodiny. Tyto návštěvy probíhaly nepravidelně, vždy podle možností mé i odborného konzultanta. Jak už jsem zmiňovala, soustředila jsem se na měření deformace součástky a měření rychlosti jejího otáčení. Při měření deformace jsem provedla několik desítek záznamů zaměřených na mechanické vlastnosti součástky, a při měření rychlosti otáčení jsem realizovala několik stovek měření sledujících změny této rychlosti v čase. Při měřeních jsem se snažila postupovat co nejvíce samostatně, ale odborný konzultant byl přítomen a dohlížel na správnost provedení. V průběhu měření jsem dostávala zpětnou vazbu, což mi umožnilo optimalizovat postupy a zajistit správnost výsledků.

Po ukončení experimentální části jsem se soustředila na analýzu naměřených dat. Tato fáze byla pro mě nejvíce časově i intelektuálně náročná, protože jsem musela nejen zpracovat výsledky, ale také je správně interpretovat. Data jsem analyzovala pomocí dostupných nástrojů a ve spolupráci s odborným konzultantem. Zároveň jsem pracovala na psaní teoretické části práce, která obsahovala přehled o gravitačních vlnách, detektoru LISA a principu přepínače laserového svazku. V průběhu celého procesu jsem konzultovala své texty s odborným konzultantem, který mi pomáhal zlepšovat jejich odbornou úroveň a přesnost. Výsledkem mé práce je souhrn teoretických informací, přehled výsledků měření a návrhy na vylepšení testované součástky.

## 3. TEORETICKÁ ČÁST

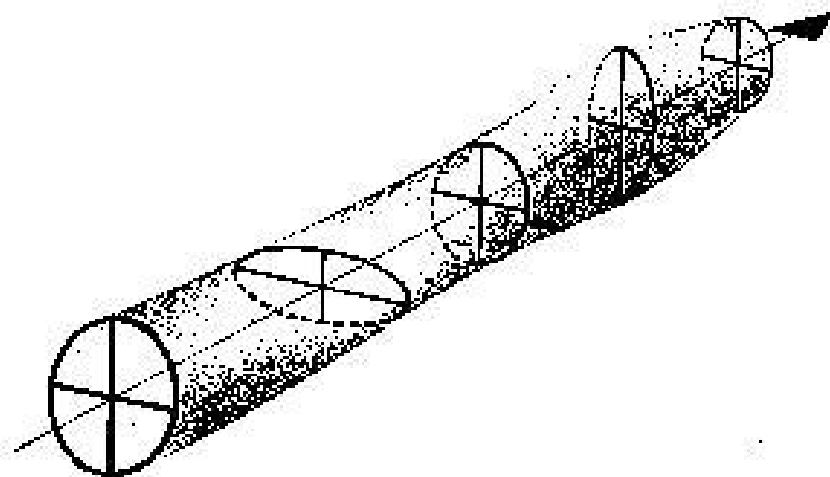
### 3.1 GRAVITAČNÍ VLNY

#### Co jsou gravitační vlny?

Gravitační vlny jsou jemné deformace prostoročasu, které se od svého zdroje šíří rychlostí světla. Prostoročas je čtyřrozměrná kombinace trojrozměrného prostoru a jednorozměrného času, který zavedl Albert Einstein ve svojí obecné teorii relativity. Gravitační vlny jsou generovány v nehomogenním gravitačním poli, typickým zdrojem gravitačních vln může být například splynutí dvou neutronových hvězd nebo splynutí dvou černých děr. [1,2]

#### Jak se gravitační vlny projevují?

Gravitační vlny přenášejí energii a jak se šíří prostorem, tak tento prostor periodicky deformují ve směru kolmém na svoje šíření. Kdybychom měli například kovový kroužek, který bychom postavili kolmo na přicházející gravitační vlny, tak by se střídavě deformoval v severo-j jižním a západo-východním směru. Detekce gravitačních vln je mimořádně obtížná, protože pro typické astrofyzikální zdroje je tato deformace nesmírně nepatrná, když je charakteristický rozměr objektu  $l$ , pak je velikost deformace ze silných astrofyzikálních zdrojů jen  $10^{-20} l$  až  $10^{-21} l$ , což znamená, že detektory gravitačních vln musí být schopny zaznamenat deformaci o velikosti asi jedné setiny atomového jádra v detektoru o rozměru několika kilometrů. [1,2,3]



Obr.1 - Znárodnění deformace prostoročasu při prostupu gravitační vlny. Převzato z [3].

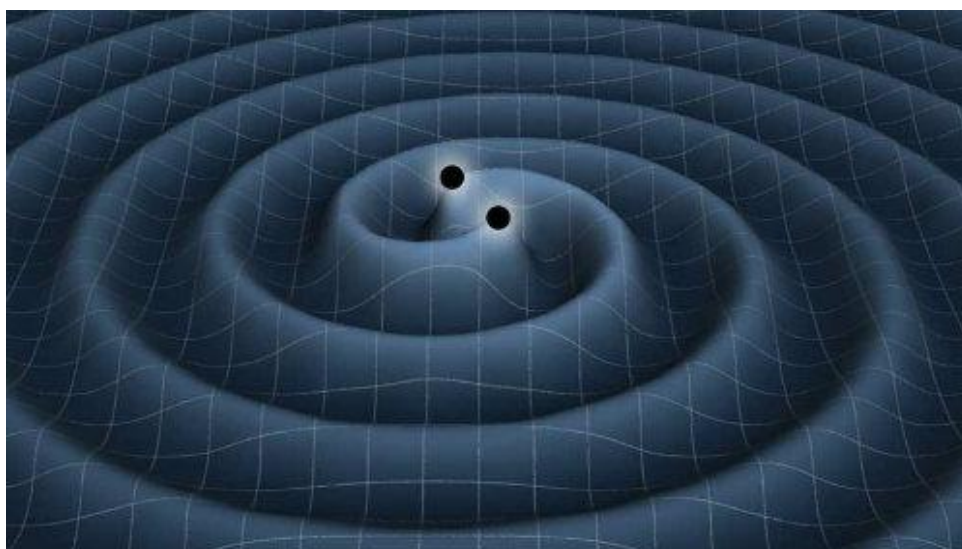
#### Proč jsou gravitační vlny pro nás tak zajímavé?

Doposud jsme získávali velkou většinu informací o vesmíru díky přicházejícím elektromagnetickým vlnám - díky viditelnému světlu, rádiovému záření, infra-

červenému a ultrafialovému záření, rentgenovému a gama záření. Některé informace pak přinášejí i přicházející částice - například rekordních energií dosahuje kosmické záření, kdy ze zdrojů ve vesmíru přilétají na Zemi elementární částice, anebo z nitra Slunce detekujeme neutrální částice neutrina, díky kterým můžeme zkoumat fungování termojaderných reakcí. Gravitační vlny jsou pro nás tedy zcela novým zdrojem informací - otevírají nám nové okno do vesmíru. Pomocí gravitačních vln lze studovat nejranější vesmír, z doby těsně po velkém třesku, který je pro nás v elektromagnetickém spektru nedosažitelný. Gravitační vlny se volně šířily i v období těsně po vzniku vesmíru, zatímco elektromagnetické záření se oddělilo od hmoty až asi 380 tisíc let po velkém třesku, kdy vzniklo takzvané reliktní záření. [3,4,5]

### **Jak a kde gravitační vlny vznikají?**

Gravitační vlny vznikají v okolí těles, která se vzájemně zrychleně pohybují. Významným zdrojem pro gravitační vlny, které jsme schopni detekovat na Zemi, jsou především srážky hvězd a srážky černých děr. V závěrečné fázi před svým splynutím kolem sebe krouží poutány gravitací a v posledních vteřinách předtím, než splynou, se časoprostor kolem nich doslova třese a vlní. Cesta tohoto signálu na zem může trvat miliardy let, jakkoli s gravitační vlny šíří rychlostí světla, a když konečně k naší planetě dorazí, jsou téměř nepostřehnutelně slabé, takže naše detektory musí být neobyčejně citlivé [1,4]. Sřet dvou černých děr o hmotnostech desítek Sluncí vytvoří v závěrečné fázi splynutí charakteristický signál, tzv. chirp, jehož frekvence se postupně zvyšuje a tyto frekvence se překrývají s frekvencemi slyšitelného zvuku. I proto se tento signál dá na zvuk dobře převést a s pomocí těchto zvukových efektů se gravitační vlny často popularizují. Kvůli tomu, že deformace prostoročasu jsou tak slabounké, žádné lidmi sestrojené zařízení gravitační vlny až do roku 2015 přímo nezachytilo.



*Obr. 2 - Model deformací prostoročasu těsně před splynutím dvou černých děr. Převzato z [6].*

## Kdo gravitační vlny objevil?

Historie gravitačních vln je velmi dlouhá a složitá. I když se to často tvrdí, gravitační vlny nebyly poprvé postulovány Albertem Einsteinem, jedním z nejvýznamnějších vědců všech dob, v roce 1915 jako součást jeho obecné teorie relativity. Je sice pravda, že existence gravitačních vln vyplývá z Einsteinovy obecné teorie relativity, která navzájem propojuje působení hmoty a prostoru, Einsteina ale v předpovědi gravitačních vln předešlo několik jiných vědců, kteří se snažili teorii gravitace uzpůsobit analogicky podle Maxwellovy teorie elektromagnetismu.

Zmíním alespoň nejvýznamnější dva z nich. První byl vynikající britský fyzik Oliver Heaviside, jehož článek s předpovědí gravitačních vln vyšel už v roce 1893. Heaviside například předpověděl, že gravitační vlny se budou šířit konečnou rychlostí, a to rychlostí světla. To řešilo starý paradox, který trápil již Isaaca Newtona, což bylo okamžité působení na dálku, které mělo podle Newtonovy teorie fungovat. Kdyby například zmizel Měsíc, pak by na Zemi přestal příliv a odliv okamžitě, bez jakéhokoli zpoždění. Heaviside ale svůj článek publikoval ještě dlouho před Einsteinovou speciální teorií relativity, takže mu vycházela rychlost světla proměnná. Přitom jedním z klíčových postulátů speciální teorie relativity je, že rychlost světla zůstává vždy konstantní. Tento nedostatek Heavisidovy teorie opravil ještě v roce 1905, bezprostředně po publikaci speciální teorie relativity Einsteinem, skvělý francouzský fyzik Henri Poincaré.

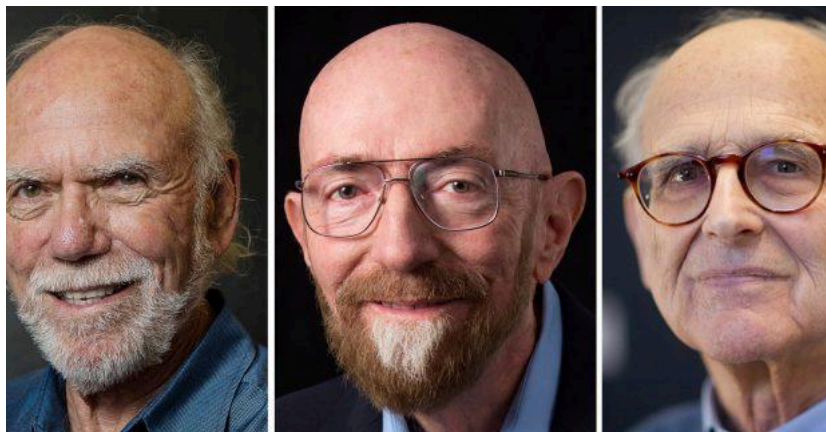
Plnohodnotný výpočet chování gravitačních vln byl ale možný až s Einsteinovou obecnou teorií relativity. Je zajímavé, že Einstein sám tento výpočet nejprve udělal špatně a v roce 1916 publikoval článek, že gravitační vlny neexistují. Tuto svoji chybu opravil v roce 1918, kdy v novém článku vyřešil vznik a chování gravitačních vln v několika zjednodušených případech. Plnou teorií gravitačních vln se Einstein zabýval až v třicátých letech dvacátého století v USA se svým asistentem Nathanem Rosenem, ale jejich článek z roku 1936 opět obsahuje chybu a jejich předpovědi jsou tak nesprávné. Zcela správnou teorii gravitačních vln, v plném souladu s Einsteinovou obecnou teorií relativity, tak publikovali až Hermann Bondi, Felix Pirani, Ivor Robinson a Andrzej Trautman na konci padesátých let dvacátého století, tedy až po Einsteinově smrti.

Vzhledem k tomu, že gravitační vlny jsou ale velice slabé a deformují prostoročas jen nepatrně, bylo nezbytné vyvinout napřed dostatečně přesné detektory, které by i tak malé deformace dokázaly zachytit. Průkopníkem byl zejména fyzik Joseph Weber, který působil na americké University of Maryland a který konstruoval detektory ve tvaru hliníkových válců - zejména v 60. a 70. letech 20. století, jejichž deformaci měřil pomocí piezoelektrických čidel. I když několikrát tvrdil, že gravitační

signál zachytil, jeho detektory nebyly ještě dostatečně citlivé a nyní jsme přesvědčeni o tom, že Weber zachytil jen náhodné jevy. Weber nicméně velmi zpopularizoval možnost přímé detekce gravitačních vln a na jeho práci navázali další fyzici, kteří se soustředili na detektory, které byly založeny na laserové interferometrii.

První důkaz o existenci gravitačních vln pak byl nepřímý. Podali jej Russel Hulse a Joseph Taylor, kteří v roce 1974 pozorovali binární (dvojitý) pulzar s pomocí radioteleskopu o průměru 300 metrů v Arecibu na ostrově Portoriko. Ukázalo se, že oběžná doba obou pulzarů se zkracuje, a to přesně v souladu s předpovědí obecné teorie relativity. Obecná teorie relativity říkala, že soustava dvou pulzarů bude ztrácet energii vyzařováním gravitačních vln, oba pulzary se tak budou postupně přibližovat a doba jejich oběhu se bude zkracovat. A pozorování Hulseho a Taylora tuto předpověď velmi přesně potvrdilo. Oba pak za tento objev dostali v roce 1993 Nobelovu cenu.

Přímé pozorování gravitačních vln ze Země se pak podařilo až v roce 2015 s pomocí laserového interferometru LIGO, ale o tom budu podrobněji psát níže. [4,5,7,8].



*Obr. 3 - Američtí vědci, kteří získali Nobelovu cenu za fyziku za rok 2017 “za rozhodující přínos konstrukci detektoru LIGO a za zachycení gravitačních vln”- zleva Barry C. Barish, Kip S. Thorne, Rainer Weiss. Převzato [7].*

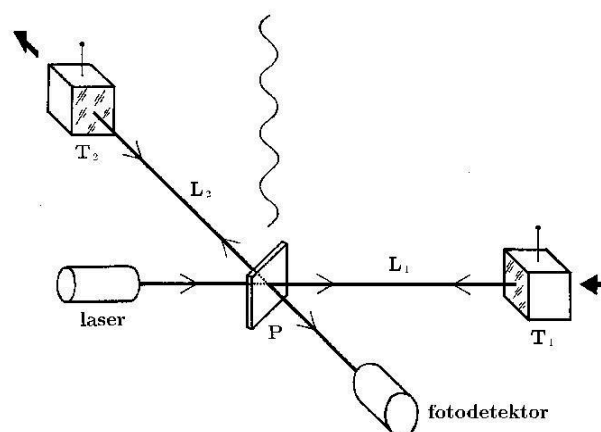
### **Jak se gravitační vlny detekují na Zemi?**

Gravitační vlny se na Zemi detekují pomocí zařízení nazývaných interferometry. V současné době se využívají tzv. laserové interferometry, kde jsou jako světelné zdroje využity lasery. Stabilizovaný laser vysílá paprsek, který se rozštěpí na dva kolmé svazky s pomocí polopropustného zrcátka. Dva paprsky pokračují dál kolmo na sebe v dlouhých, oddělených ramenech interferometru. Tato ramena musí být opravdu dlouhá, protože gravitační vlny jsou velice slabé a i když se v interferometru odrazí třeba milionkrát tam a zpátky, je stále potřeba velká vzdálenost, aby je vůbec

bylo možné zaznamenat. Cestují každým ramenem a odráží se od zrcadel na koncích ramen. Když se paprsky po mnoha odrazech vrátí, znovu se spojí a vytvoří interferenční obrazec. Ten je extrémně citlivý na změny vzdáleností mezi zrcadly. Když interferometrem projde gravitační vlna, způsobí nepatrné změny v délce ramen, a tím se změní i interferenční obrazec. Tyto změny jsou detekovány a analyzovány.

Na světě již fungovalo a funguje několik pozemských detektorů - nejvýznamnější z nich je americké LIGO, evropské Virgo a japonská KAGRA. Dosud nejcitlivějším detektorem gravitačních vln je LIGO, která má v USA dvě nezávislé observatoře. Obě observatoře mají dvě kolmá ramena, která jsou dlouhá 4 kilometry. Jedna z observatoří se nachází na severozápadě USA ve státě Washington, druhá z observatoří pak na jihovýchodě USA ve státě Louisiana. Vzdálenost mezi oběma observatořemi je tak asi 4000 kilometrů. Virgo se nachází v Itálii a má ramena dlouhá 3 kilometry. KAGRA je v Japonsku a je jiná tím, že se nachází pod zemí, aby snížila šum. Jeho ramena mají také 3 kilometry. Všechny tyto tři současné detektory gravitačních vln spolupracují globálně, aby mohly přesně lokalizovat zdroje gravitačních vln ve vesmíru.

Jak už jsem zmínila, gravitační vlny byly poprvé přímo detekovány v roce 2015, což se podařilo prakticky přesně po 100 letech - v plném souladu s Einsteinovou obecnou teorií relativity, která byla zveřejněna v roce 1915. K první detekci došlo 14. září 2015, kdy se na americkém systému LIGO podařilo zachytit signál ze srážky dvou černých děr. Jak vyplynulo z přesné analýzy dat, splynula černá díra o hmotnosti 35 Sluncí s černou dírou o hmotnosti 30 Sluncí a ke splynutí došlo ve vzdálenosti 1,2 miliard světelných let od Země. Do konce roku 2021 bylo třemi výše popsanými detektory zachyceno celkem přes 90 průkazných signálů. [4,5,8,9,10].



Obr. 4 - Schéma laserového interferometru. Převzato z [3].



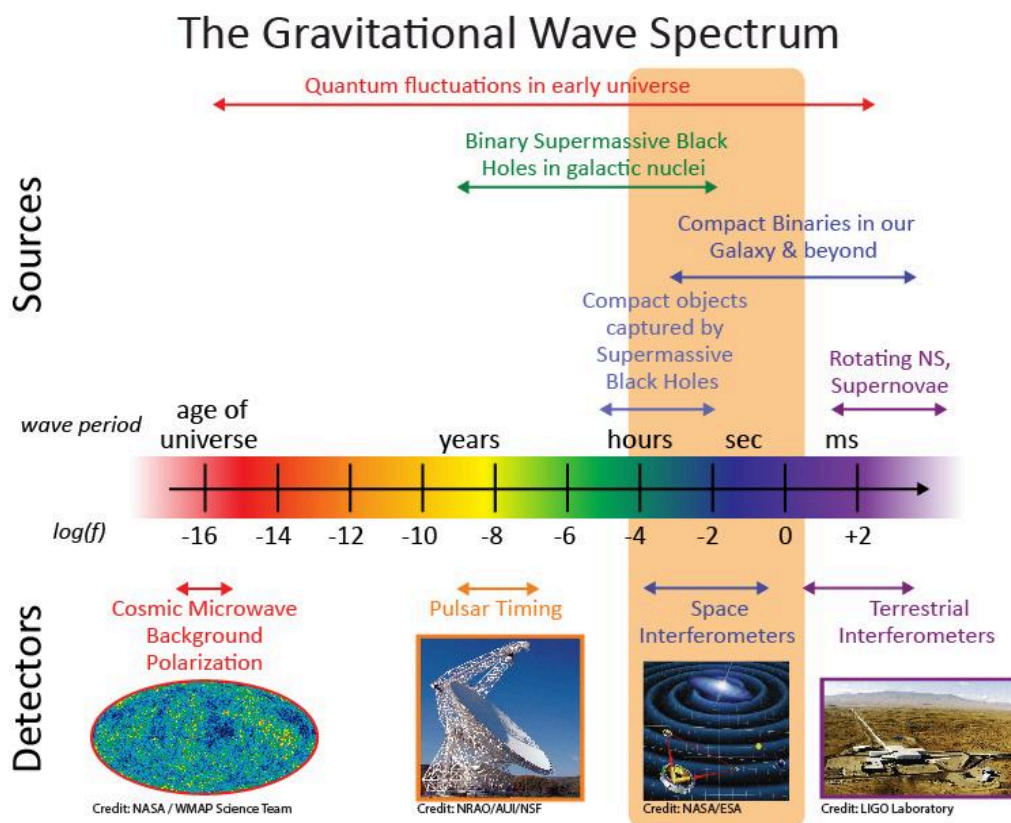
Obr. 5 - Pohled na detektor VIRGO z ptačí perspektivy. Převzato z [8].

### **Proč je zajímavé gravitační vlny detekovat ve vesmíru?**

I ve vesmíru lze využít pro detekci gravitačních vln laserových interferometrů, narozdíl od Země jsou ale jejich ramena (ve skutečnosti vlastně vzdálenosti jednotlivých družic) dlouhá nikoli jednotky kilometrů, ale dokonce miliony kilometrů. Vesmírná konfigurace proto umožňuje extrémně velkému detektoru studovat oblasti spektra gravitačních vln, které jsou ze Země nepřístupné.

Spektrum gravitačních vln totiž zahrnuje širokou škálu frekvencí, podobně jako spektrum světla zahrnuje různé barvy - různé vlnové délky. Znamená to, že gravitační vlny mohou mít různé frekvence, od velmi nízkých frekvencí (které vytvářejí např. supertěžké černé veledíry, které okolo sebe krouží ve velkých vzdálenostech v jádrech některých aktivních galaxií) po vysoké frekvence (např. při splynutí dvou neutronových hvězd).

LISA bude díky svým rozměrům v řádu milionů kilometrů ve vesmíru pracovat v rozsahu nízkých frekvencí (mezi 0,1 mHz a 1 Hz), narozdíl od LIGA, které pracuje s rozsahem frekvencí od 10 Hz do 1000 Hz. Znamená to, že LISA hledá gravitační vlny s delší vlnovou délkou. Delší vlnové délky podle vzorce ( $\lambda = c/f$  - tedy rychlost té vlny, dělená frekvencí) znamenají nižší frekvenci vln. Ve vesmíru se LISA také vyhne šumu ze Země a Seismickému šumu, který je způsoben například pohybem oceánů, ale i různými druhy lidských činností. [11,12].



Obr.6 - Graf popisující ukazující, jaké druhy zdrojů gravitačních vln jsou schopny zachytit různé druhy detektorů. Z hlediska družic LISA je nejdůležitější oblast s oranžovým podkladem. Převzato z [11].

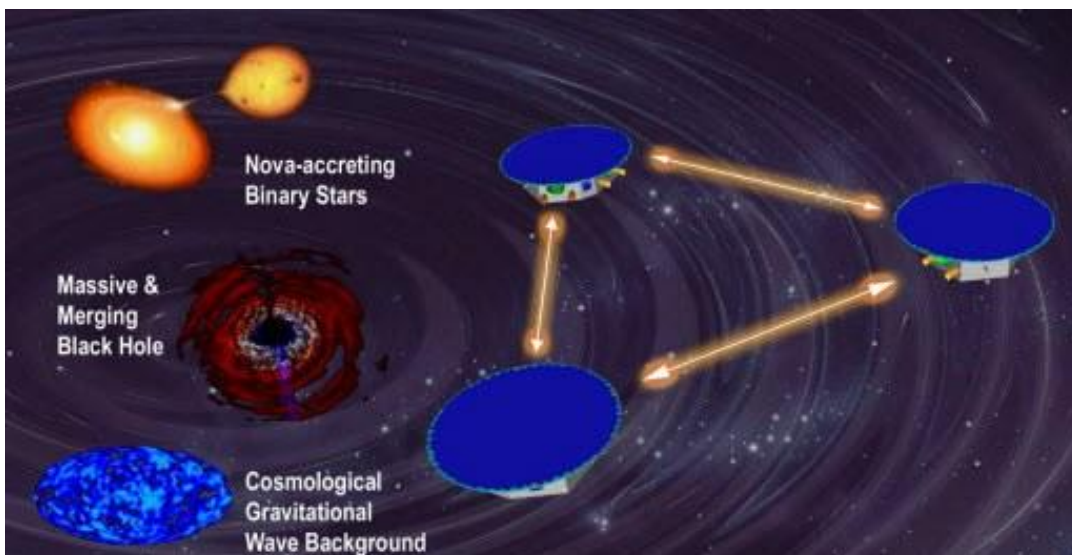
### 3.2 KONCEPT DRUŽIC LISA

Vesmírný projekt LISA neboli Laser Interferometer Space Antenna, je určený k velmi přesnému měření gravitačních vln - poprvé by přitom měly být měřeny gravitační vlny přímo ve vesmíru, a to s mnohem nižšími frekvencemi, než je možné na Zemi. Projekt připravuje primárně Evropská kosmická agentura ESA, což je evropská mezivládní organizace zaměřená na výzkum a využití vesmíru, ve spolupráci s americkou vesmírnou agenturou NASA, která má ale v projektu podstatně menší podíl. ESA má v současnosti 22 členských států z Evropy včetně České republiky. Sídlo ředitelství ESA je v Paříži, 8 dalších technologických center sídlí v dalších evropských zemích a kosmodrom ESA se nachází v Kourou ve Francouzské Guyaně na severu Jižní Ameriky.

Ve vesmíru mají být umístěny tři družice, které budou spolu se Zemí obíhat kolem Slunce. Družice budou uspořádány do rovnostranného trojúhelníku a vzdálenosti mezi nimi budou 2,5 milionu kilometru. K interferenci se budou vždy využívat dva

laserové paprsky ze sousedních družic, to znamená, že každá družice vyšle laserový paprsek k ostatním dvěma družicím, a tím budou družice mezi sebou propojeny. Interferenční měření i ve vesmíru funguje tak, že jsou velmi přesně měřeny změny vzdálenosti dálky mezi jednotlivými družicemi. Pokud tedy systémem projde nějaká gravitační vlna, vzdálenost mezi družicemi se nepatrně změní a změní se i pozorovaný interferenční obrazec. Cílem je detekovat nízkofrekvenční gravitační vlny, které ze Země nelze detekovat kvůli frekvenčním omezením podstatně menších pozemních detektorů. Další výhodou je, že družice ve vesmíru nejsou rušeny pozemskými zdroji, jako je pohyb oceánů a moří a lidská činnost (doprava, dolování, ...). Očekává se, že LISA přinese nové poznatky o astrofyzikálních jevech, jako jsou srážky superhmotných černých veleděr v jádrech galaxií, o struktuře vesmíru a jeho kosmologických parametrech.

K vypuštění všech tří družic tvořících systém LISA by podle současného plánu mělo dojít v roce 2035 s využitím evropské rakety Ariane 6. [11,12,13,14].



Obr.7 - V pravé části obrázku je schéma tří družic LISA, které tvoří rovnostranný trojúhelník o hraně s délkou 2,5 milionu kilometrů. V levé části jsou vybrané typy zdrojů, na které bude LISA citlivá. Převzato z [12].

### 3.3 ČESKÝ PODÍL NA VÝVOJI DRUŽICE

Česká republika je důležitým partnerem při přípravě mise LISA a podílí se primárně na vývoji součástky FSU (Fiber Switching Unit), která umožňuje přepínání mezi laserovými zdroji (mezi hlavním a záložním laserovým zdrojem). Každá ze tří družic v interferometru LISA bude obsahovat 4 hlavní lasery a 4 záložní lasery, čili bude potřebné vyrobit celkem 12 letových kusů jednotek FSU.

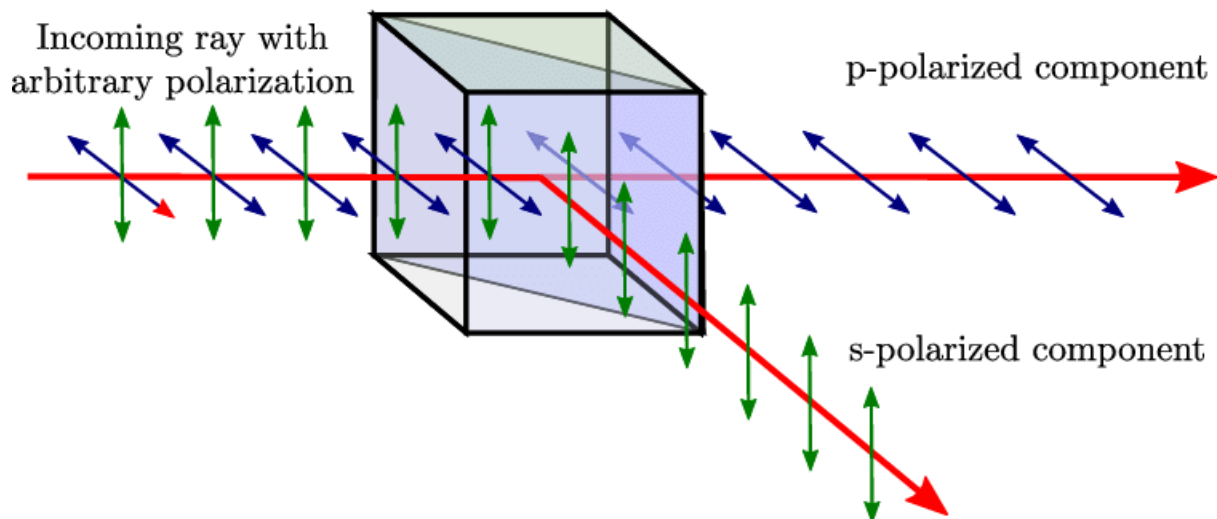
Jednotku FSU vyvíjí a testuje konsorcium čtyř ústavů Akademie věd ČR - Astronomického ústavu AV ČR, Fyzikálního ústavu AV ČR, Ústavu fyziky atmosféry AV ČR a Ústavu termomechaniky AV ČR - v rámci takzvaného programu ESA PRODEX. To znamená, že financování vývoje součástky zajišťuje a kontroluje přímo ESA (Evropská vesmírná agentura) a České republiky se i tímto způsobem vrací část národního příspěvku, který do ESA každoročně vkládá. Zmíněné konsorcium čtyř ústavů AV ČR je zodpovědné za návrh součástky, za výrobu a testování prototypu a následně i za výrobu letových i záložních kusů.

Kromě výroby této klíčové součástky se vědci z České republiky podílejí i činnosti vědeckého konsorcia LISA Consortium, které připravuje vědecký program mise LISA a potřebné softwarové nástroje na zpracování dat a interpretaci vědeckých výsledků. Kolegové z Matematicko-fyzikální fakulty Univerzity Karlovy, z Astronomického ústavu AV ČR a Fyzikálního ústavu AV ČR se podílejí zejména na co nejvěrnějších simulacích různých typů astrofyzikálních zdrojů gravitačních vln a na určení toho, jak dobře a jakým způsobem budou tyto zdroje detekovatelné pro vesmírný laserový interferometr LISA [15].

### 3.4 SOUČÁSTKA FSU

V rámci dlouhodobé přípravy celé mise LISA se někdy vyvíjí pojmenování některých částí družic, ale i způsob jejich využití. To se týká i součástky FSU, jejíž některé části jsem měřila a testovala v praktické části méj profilmové práce. Jednotka FSU se dříve jmenovala FSUA, neboli Fiber Switching Unit Actuator. Před několika měsíci byl název oficiálně zjednodušený pouze na FSU, vypadlo poslední slovo Actuator.

Stejně tak se někdy vyvíjí i způsob využití dané součástky. Původně se předpokládalo, že součástka FSU se bude používat spíše výjimečně, jen pokud přestane fungovat hlavní laser v dané části družice. Ukázalo se ale, že bude nutné mezi laserovými zdroji přepínat pravidelně, několikrát za rok. Ke změně došlo kvůli prevenci zhoršení vlastnosti laseru, která nastává pokud nejsou pravidelně v provozu. Navíc se tím zmenší pravděpodobnost, že v součástce FSU nedojde k tzv. *cold welding*, tedy *studenému svaru*, což je jev, který se vyskytuje především ve vakuu, kdy se k sobě kovové součásti mohou "přilepit", když se delší dobu vůči sobě nijak nepohybují.



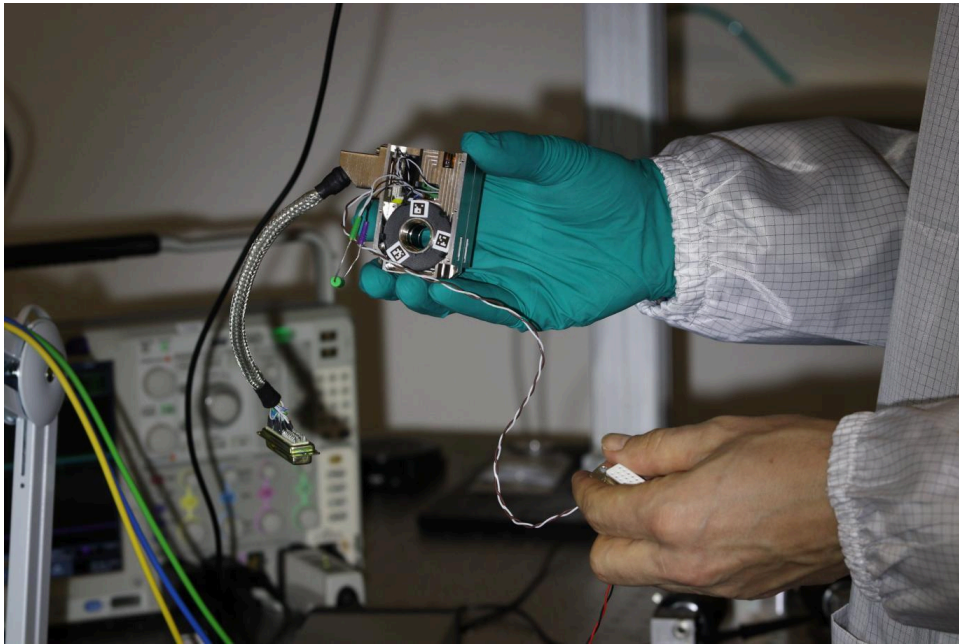
Obr. 8 - Ilustrační obrázek k práci s polarizovaným světlem. Na obrázku je dělič polarizovaného světla, kdy se na hranolu oddělí tzv. p-komponenta a na ní kolmá s-komponenta elektromagnetického záření. Součástka FSU rovněž pracuje s polarizovaným světlem, ale otáčí rovinu polarizovaného světla tak, aby v dalších částech optického stolu byla tato rovina vždy stejná, bez ohledu na to, zda je použitý jako zdroj primární anebo redundantní laser. Převzato z [10].

Součástka FSU je optomechanická součástka, kdy se využívá toho, že světlo laserových zdrojů je plně polarizované. Světlo z hlavního laseru má jednu rovinu polarizace a světlo ze záložního laseru je nastaveno tak, aby rovina polarizace byla kolmá na rovinu polarizace hlavního laseru. Součástka FSU pak obsahuje  $\lambda/2$  polarizační destičku a pomocí jejího otáčení lze otáčet rovinu polarizace procházejícího světla. Jde tedy o mechanismus, který musí velmi přesně otáčet polarizační destičkou, a korigovat polarizaci při přepnutí na druhý laser.

Po nastavení správné polarizace FSU nesmí generovat elektrické nebo magnetické pole, které by ovlivňovalo měření.

Musí být tedy využity vhodné materiály, které nejsou magnetické. Pro vlastní otáčení polarizačního filtru je využíváno piezoelektrických posunů a tzv. *slip stick* mechanismu, jehož fungování podrobněji vysvětluji v praktické části mé práce. Výsledkem je, že polarizační destičku se v součástce velmi přesně otáčí, po malých a přesně určených krocích, a pomocí tzv. kapacitních enkodérů dokážeme v každém

okamžiku velmi přesně určit, o jaký úhel se již polarizační filtr v součástce otočil. [15, dr. Asen Christov, osobní konzultace].



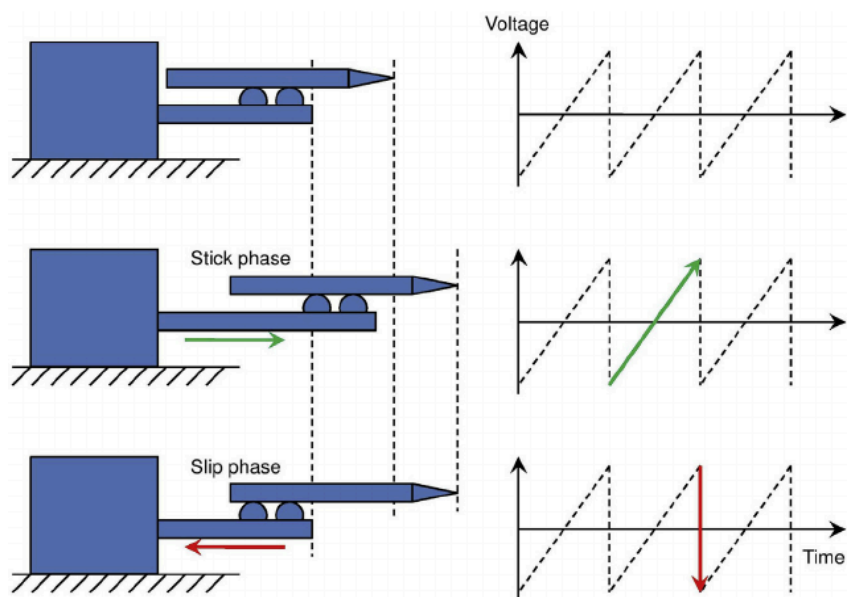
*Obr. 9 - Fotografie prototypu součástky FSU, jak byla představena tiskové konferenci 25. ledna 2024 v souvislosti s tzv. adopcí mise LISA, tedy událostí, kdy byla celá mise LISA oficiálně schválena k realizaci včetně časového harmonogramu. Fotografie je převzata z tiskové zprávy konsorcia čtyř ústavů AV ČR [15].*

## 4. PRAKTICKÁ ČÁST

Konsorcium čtyř ústavů Akademie věd ČR - Astronomického ústavu AV ČR, Fyzikálního ústavu AV ČR, Ústavu fyziky atmosféry AV ČR a Ústavu termomechaniky AV ČR - zajišťuje pro misi LISA vývoj a výrobu součástek FSU. FSU znamená Fiber Switching Unit a jedná se o jednotku, která umožňuje přepnutí mezi laserovými svazky - tedy z hlavního laseru na záložní, anebo naopak. Při reálném provozu laserového interferometru LISA bude mezi laserovými jednotkami přepínáno pravidelně, několikrát za rok, aby byly průběžně využívány hlavní i záložní laserové zdroje.

### 4.1 PŘÍTLAK A MĚŘENÍ DEFORMACÍ

Součástka využívá tzv. *slip stick* mechanismu, to je název pohonu. Výsledkem je trhavý pohyb posouvaného tělesa. V první fázi (Stick = přilnutí) je objekt pevně držen na místě třením mezi dvěma povrchy. To tření musí být dostatečně velké, aby zabránilo pohybu. V druhé fázi (Slip = skluz) je aplikovaná síla, která právě překoná tření mezi povrchy. Když tato síla překročí určitou mez, povrchy se uvolní a objekt se posune do nové polohy. To, jak moc se těleso posune záleží na tření, tedy jak moc budou plochy k sobě přitlačeny. Tudiž potřebujeme nějaký pružný element, který bude zajišťovat správný přítlak a bude klíčovou součástí pro mechanismus.

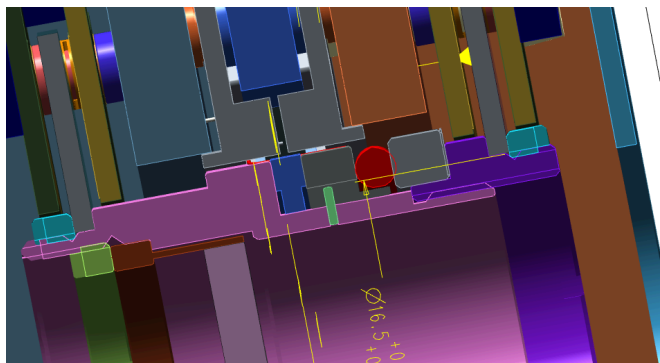


Obr. 10 - Schéma fungování SLIP STICK mechanismu. Převzato z [16].

Za pružný element můžeme použít tyto varianty:

- Gumový kroužek
- 1. verze titanové pružinky vyrobené metodou EDM
- 2. verze titanové pružinky- změněný design kvůli nedostatku místa
- Alternativní design pružinky zvlněného CuBe plechu (měď a berylium)

Jako poslední jsme provedli měření vybraného elementu, když byl již přímo integrován v mechanismu FSU.



Obr.11 - Model mechanismu - červená tečka znázorňuje pružný element v řezu.

## Postup měření

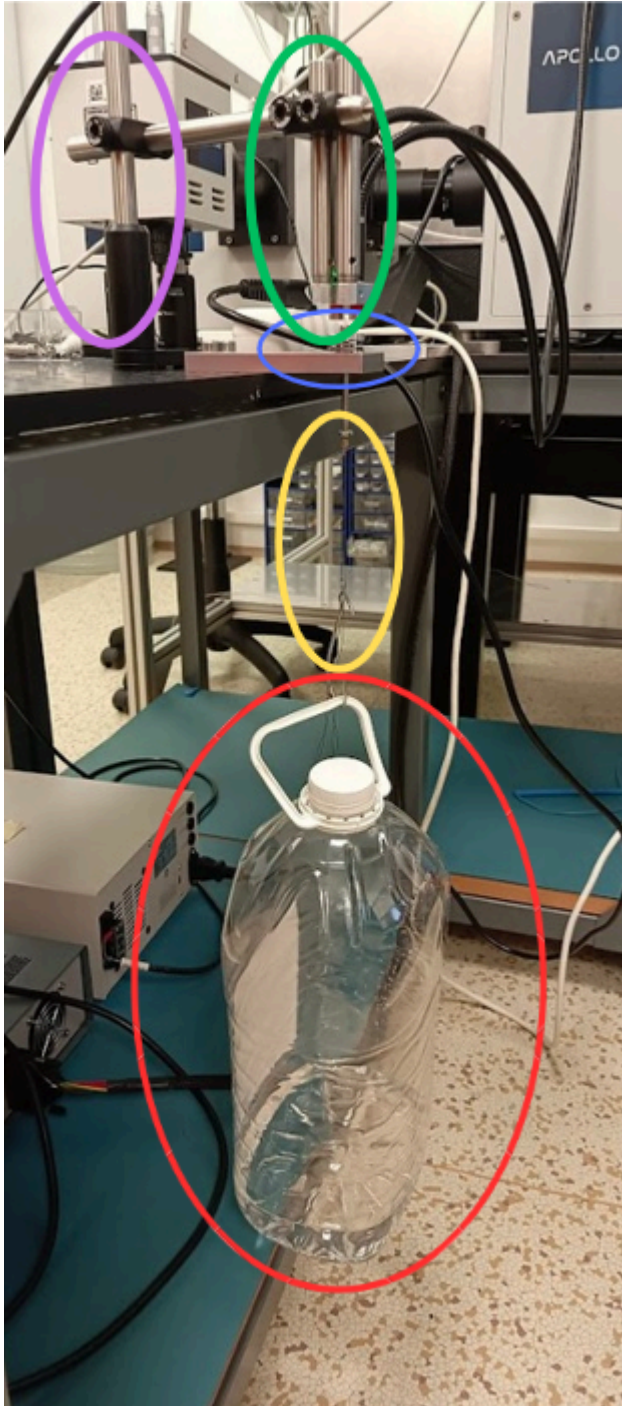
Je potřeba změřit tuhost, tedy míru deformace na jednotku síly, postupně pro různé pružné elementy. To, aby se deformovaly, zařídíme tak, že budeme postupně zvětšovat jejich zatížení.

Deformaci při přítlaču změříme pomocí konfokálních sond. Konfokální sondy jsou typ sensorů pro měření vzdálenosti, které využívají princip chromatické aberace bílého světla. Bílé světlo totiž obsahuje všechny viditelné barvy spektra a jeho jednotlivé barevné složky se v soustavě čoček lámou odlišně v závislosti na vlnové délce světla. Podle barvy na předmětu pak můžeme velmi přesně určit jeho vzdálenost, přičemž použité zařízení od firmy Keyence ma rozlišení 0,25 mikrometrů. Konfokální sondy mají schopnost měřit různé typy povrchů a materiálů (včetně zrcadlových a průhledných cílů, a dokonce i kapalin) [17].



Obr. 12 - Fotografie dvou konfokálních sond v laboratoři na Fyzikálním ústavu AV ČR. Foto vlastní.

Aby se konfokální sondy mohly použít, musela jsem postavit konstrukci, kam byly tyto sondy připevněny. Součástí konstrukce musí být i nějaké závaží, kam jsme v průběhu experimentů postupně přidávali hmotnost, abychom zjistili, jak se daný pružný element stlačuje.



Na obrázku vlevo můžete vidět finální verzi první testované konstrukce. Jsou na ní barevně zakroužkované různé části:

**Fialový kroužek** - Konstrukce začíná pevně připevněným stojanem k optickému stolu, na kterém jsou přidělané spojovací tyčky.

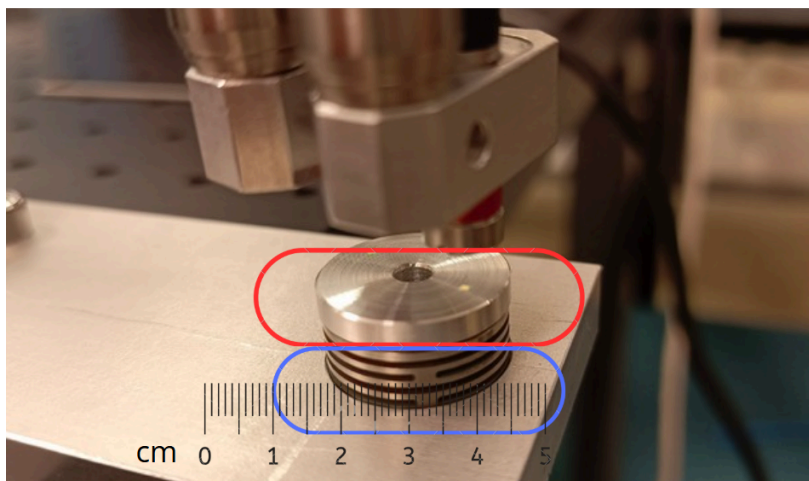
**Zelený kroužek** - Spojovací tyčky na sobě mají násadky (černé součástky), do kterých jsou nasazené tyčky s dvěma konfokálními sondami (můžete ze zadu vidět přicházet dva černé dráty, těmi jsou "světýlka" ze sond přidělané k jejich zdroji), sondy jsou vycentrované stejně daleko od středu.

**Modrý kroužek** - Na destičce položené na stole je výryv pro položení daného elementu, aby tam lépe držel. Přes to se kryje kovová kulatá placička, na kterou svítí se shora konfokální sondy.

**Žlutý kroužek** - Skrz pružný element a horní destičku vede šroub, na kterém je přivázaný rybářský vlasec.

**Červený kroužek** - Na vlasci je na háčku přidělaná PET láhev, do které se postupně (po cca. 100 g) přidává voda jako zátěž. To stlačuje kulatou destičku nad pružným elementem - na tu svítí konfokální sondy a tím o jak moc se stlačí, sondy zaznamenají o kolik se pružný element deformoval!

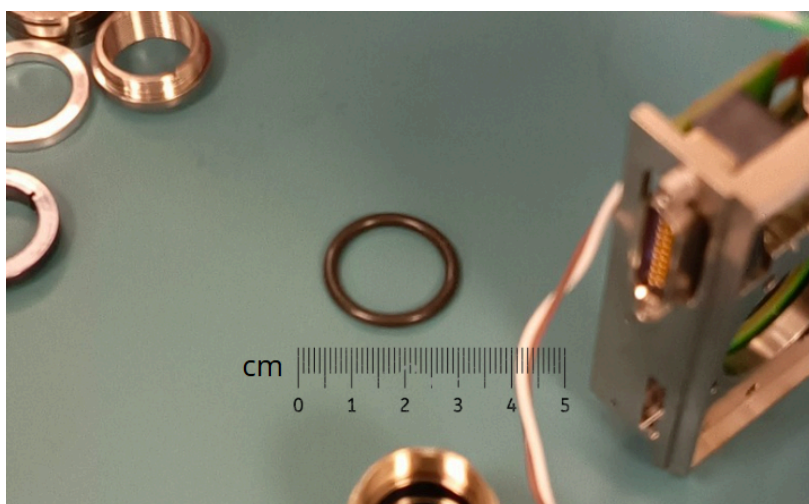
Obr. 13 - Pohled z boku na celkovou konstrukci pro měření deformace. Foto vlastní.



*Obr. 14 - Detailní pohled na měření konfokálními sondami. Na povrchu součástky jsou patrné dva svítící barevné body z konfokálních sond. V modré elipse je pružný element a v červené elipse je krycí destička. Do snímku je též vloženo orientační měřítko. Foto vlastní.*

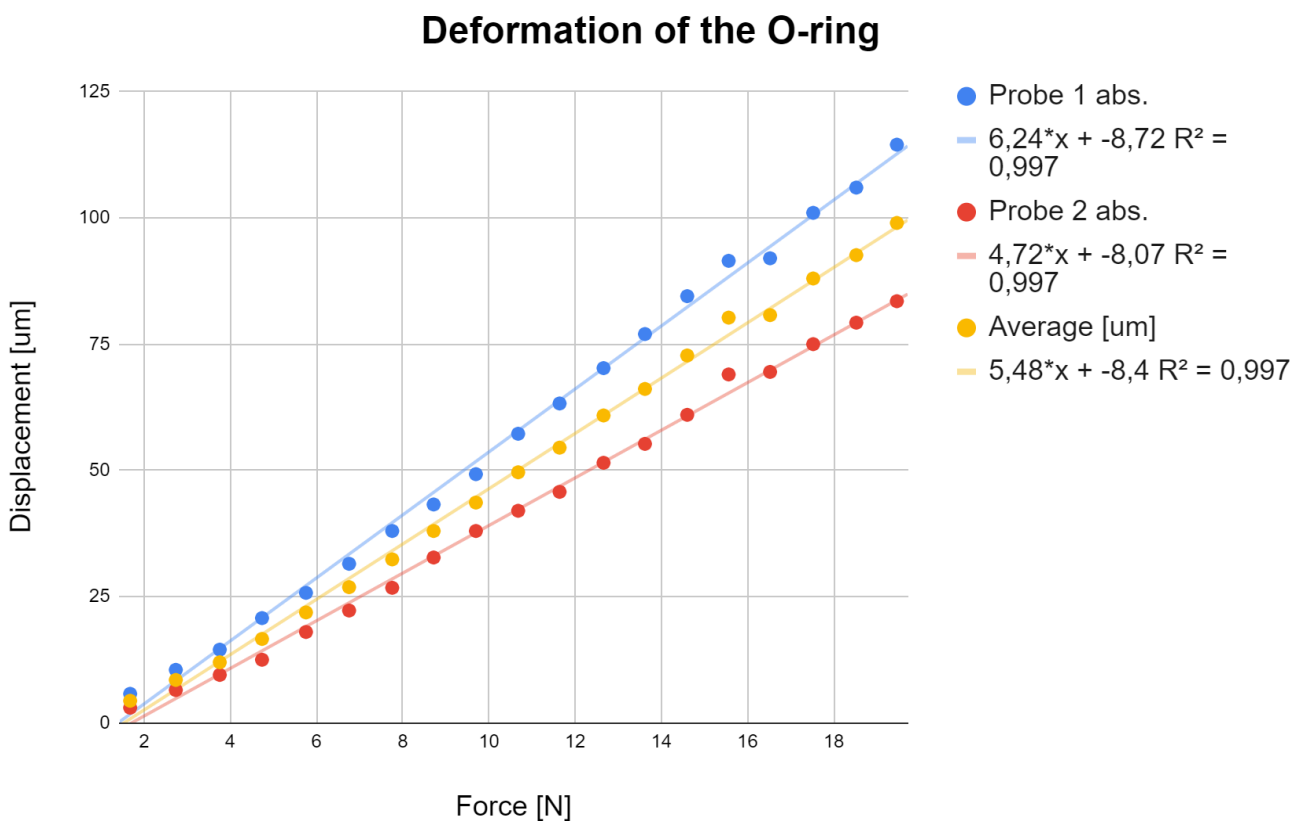
## **Gumový kroužek**

Prvním měřením v sérii měření deformací bylo měření deformace gumového kroužku. Z hlediska zajištění experimentálního vybavení bylo toto měření dosti jednoduché, z hlediska realizace bylo provedení experimentu dosti pracné. Pro zvyšování působící síly bylo nezbytné přidávat do láhve vždy 100 ml vody. Za tímto účelem jsem musela přejít do vedlejší místnosti, kde jsem vodu odměřila a láhev jsem postupně doplňovala. Láhev s navýšenou hmotností jsem zavěsila v konstrukci a hodnoty deformace gumového kroužku měřené konfokálními sondami se mi pouze zobrazily na monitoru počítače. Musela jsem je narozdíl od pozdějších měření ručně zapsat do tabulky.



*Obr. 15 - Gumový kroužek, černý uprostřed fotky. Do snímku je též vloženo orientační měřítko. Foto vlastní.*

Měření jsem prováděla v intervalu od 146 gramů, což byla hmotnost prázdné láhve a jejího závěsu včetně kovového háčku, až do 1960 gramů, kdy láhev byla téměř plná. Po měření jsem si musela hmotnost v gramech převést na sílu v newtonech. Všechny hodnoty jsem přenesla do grafu a pomocí vzorečku jsem dopočítala průměr deformací naměřených oběma sondami. Zde je hotový graf:

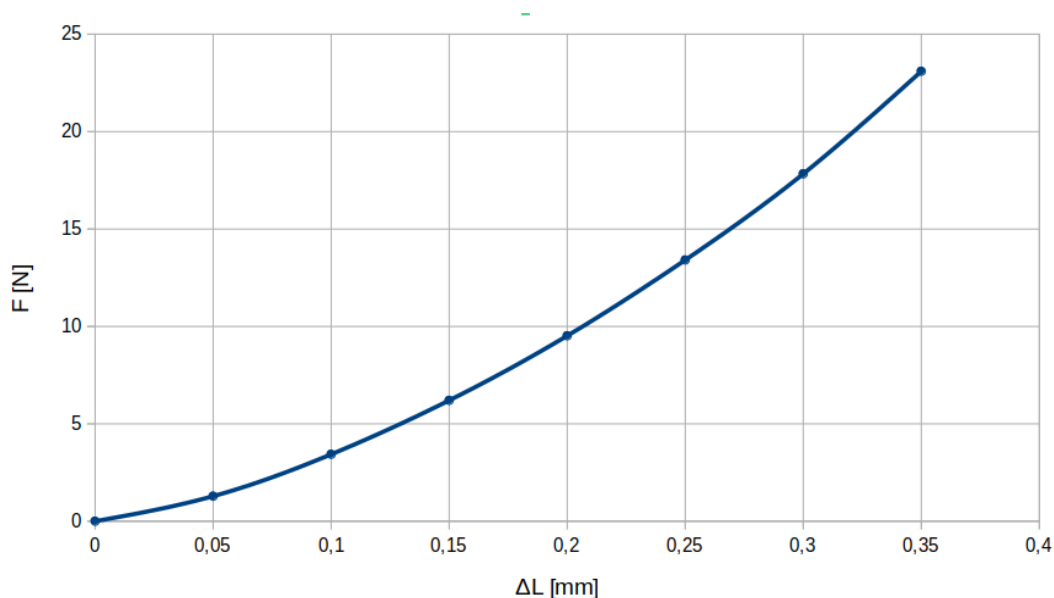


Obr. 16 - Graf zobrazující deformaci gumového kroužku. Graf vlastní.

Na ose Y (svislé) se vynášší deformace v mikrometrech. Na ose X (vodorovné) síla v newtonech. Modré tečky zaměřila jedna sonda. Zobrazují jednotlivé body, pokaždé, když jsem přidala váhu. To stejné jsou červené tečky, pouze z té druhé sondy. Jednotlivé řady jsem proložila lineární funkcí, aby byly lépe vidět rozdíly mezi trendy jednotlivých řad. Uprostřed je ještě žlutá osa, která vynášší průměr obou sond, abychom znali jeden výsledek. V grafu je zobrazena i lineární funkce, kterou jsem jednotlivé body přímo v program MS Excel automaticky proložila a v legendě je uvedena i rovnice této funkce a automaticky vypočtená spolehlivost  $R^2$ , která určuje, nakolik je proložení lineární funkcí přesné. (Pokud by  $R^2$  bylo rovné 1, pak by body zcela přesně odpovídaly lineární funkci, pokud by  $R^2$  bylo blízké nule byl by fit lineární funkci velmi nepřesný. Hodnoty blízké 1 značí, že lineární fit je velmi

přesný.) Naším měřením jsme zjistili, že deformace gumového kroužku roste o 5,48 mikrometrů na každý newton působící síly.

Dále jsme přišli na to že, při stejném zatížení se postupem času kroužek dále deformuje a stlačuje. Dokonce i poté, co síla již nepůsobí, zůstává deformovaný. Gumový kroužek se proto jeví jako nevhodný.



Obr. 17 - Graf z výpočetního programu ANSYS. Převzato od dr. Davida Hlaváčka.

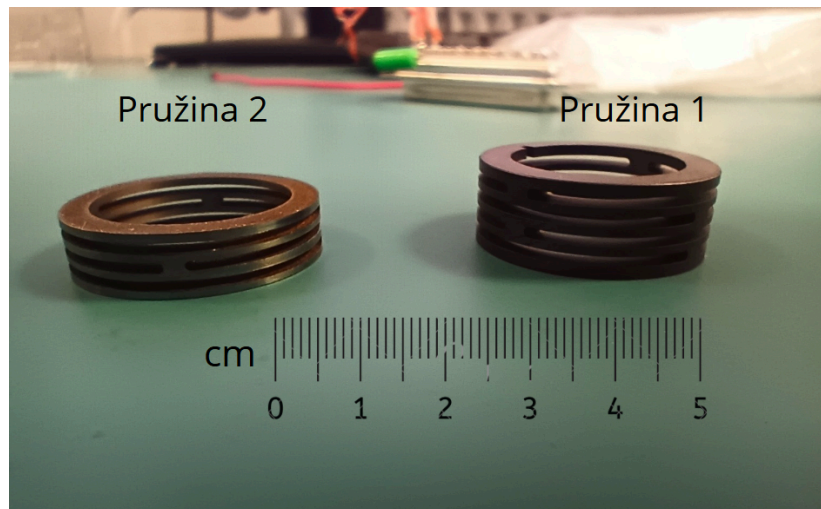
Tento graf nám byl zaslán z výpočetního programu ANSYS. Je výsledkem snahy dalšího z kolegů z FZU (dr. Davida Hlaváčka) pomocí tohoto simulačního softwaru určit velikost deformace gumového kroužku. Porovnali jsme jejich graf a náš graf a jsou úplně jiné. Simulace z programu ANSYS tedy vychází značně nepřesně, protože v programu byla špatně určená deformační charakteristika materiálu.

Závěrem mohu uvést, že gumový kroužek je jako pružný element v mechanismu FSU nevhodný. Jeho deformace totiž záleží na čase a zejména jeho zpětná relaxace se nedá dobře odhadnout. Navíc bylo měření dosti pracné, protože jsme pokaždé museli odměřovat 100 gramů vody a výkyvy láhve s vodou měření ovlivňovaly tím, že láhev nešla ručně zastavit tak, aby se v ní voda vůbec nehýbala.

## První verze titanové pružinky vyrobené metodou EDM

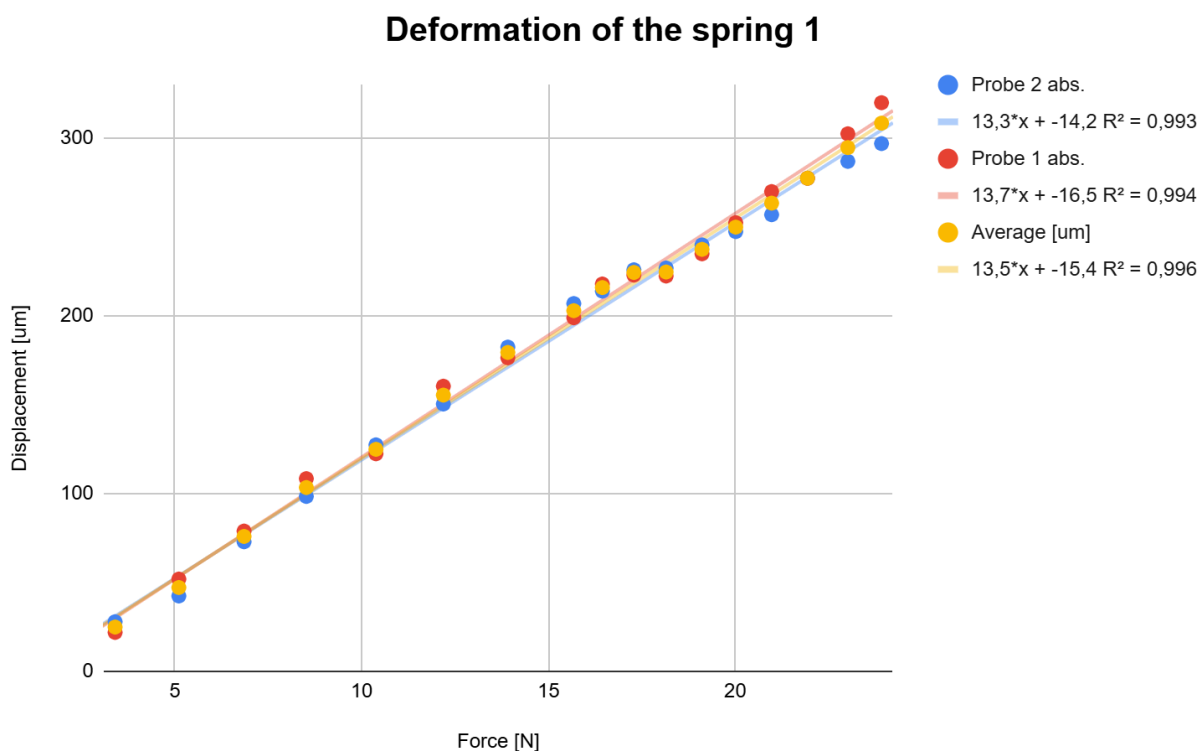
Jako další jsem měřila kovovou pružinku, která byla vyrobená metodou EDM (= electric discharge machining), s výškou 7,3 mm. Pružina byla speciálně vyrobená pro využití v součástce FSU, protože výsledky předchozího měření s gumovým kroužkem, byly neuspokojivé. Jak jsem uvedla výše, gumový kroužek pomalu relaxuje a jeho okamžitá deformace je tak závislá na čase. Proto bylo další variantou využít kovový materiál, protože kovový kroužek by se do původního stavu měl vracet

okamžitě po uvolnění působící síly. Titanovou pružinu vyrobenou metodou EDM jsem měřila úplně stejnou metodou jako v předchozím měření gumového kroužku.



Obr. 18 - Obrázek titanových pružinek z mého měření. Napravo první verze - vyšší pružinka vyrobená metodou EDM. Nalevo druhá verze - novější, nižší pružinka. Foto vlastní.

Vše probíhalo stejně, jako v předchozím měření, a proto nyní již nepopisuji postup. Z měření jsem následně vytvořila graf:



Obr. 19 - Graf ukazující deformaci 1. verze kovové pružinky. Graf vlastní.

Graf zobrazuje stejné parametry, jako ten v předchozím měření, trendy zůstávají stejné, jen hodnoty se mění. Tedy na ose y (svislé) se opět vynáší deformace v mikrometrech a na ose x (vodorovné) síla v newtonech. Červené a modré body jsou pro dvě konfokální sondy, které pokaždé zaznamenaly deformaci při přidání síly s využitím vodní zátěže. Žluté body pak zobrazují průměr hodnot z obou sond. Z grafu je dále patrné, že pro nižší působící síly jsou body dále od sebe a pro vyšší působící síly jsou jednotlivé body blíže vedle sebe. Je to proto, že jsem nejprve přidávala vždy 200 gramů vody a teprve pro vyšší zatížení vždy již jen 100 gramů, abychom mohli mít při větších zatíženích přesnější výsledek.

Na základě rovnice proložené lineární funkce pak můžeme z tohoto měření určit, že deformace kovové pružinky je 13,5 um na 1 N působící síly.

Během tohoto měření se neobjevily žádné komplikace a probíhalo velmi dobře a na rozdíl od gumového kroužku se pružinka bez obtíží vracela do původního stavu. Z toho plyne závěr, že 1. verze kovové pružinky se zdá prozatím vhodná na dosazení za pružný element, ale pořád máme další elementy na měření.

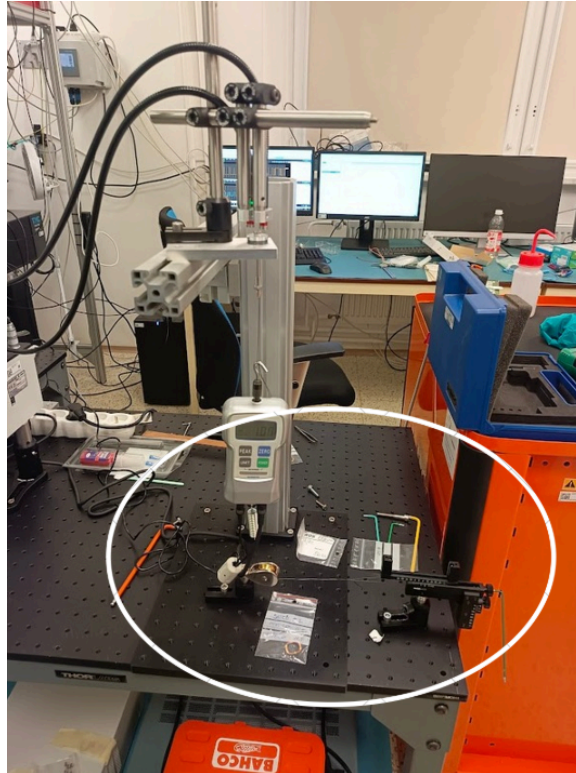
Jak už jsem psala v předchozím závěru, tak i toto bylo pracné a trvalo dlouho, proto jsme původní konstrukci do příštích měření museli upravit.

## **Druhá verze titanové pružinky vyrobené metodou EDM**

Jako třetí jsem měřila podobnou pružinku, jako v předchozím měření (viz. obr.17, výše). Byla vyrobená stejnou metodou a vypadala podobně, jako ta předchozí, jen měla výšku pouze 4,98 mm, z důvodu nedostatku místa v nové konstrukci mechanismu.

Jak už jsem zmínila, v předchozích dvou měřeních - měřit pružné elementy bylo velice pracné, hlavně z důvodu ručního doplňování vody - každých 100 gramů. Trvalo to dlouho a odměřit pokaždé přesných 100 mililitrů vody, aby měření postupovalo o stejné kroky, je těžké. Ještě k tomu vše dále komplikovalo houpání PET lahve, které se nepodařilo vždy úplně zastavit a vždy se v něm stejně trochu pohybovala voda, také částečně ovlivňovalo přesnost měření. Proto jsme se rozhodli pro další měření původní konstrukci upravit.

Funguje v podstatě na stejném principu, jako ta předchozí, jen se liší způsobem přidávání váhy k deformaci pružného elementu.

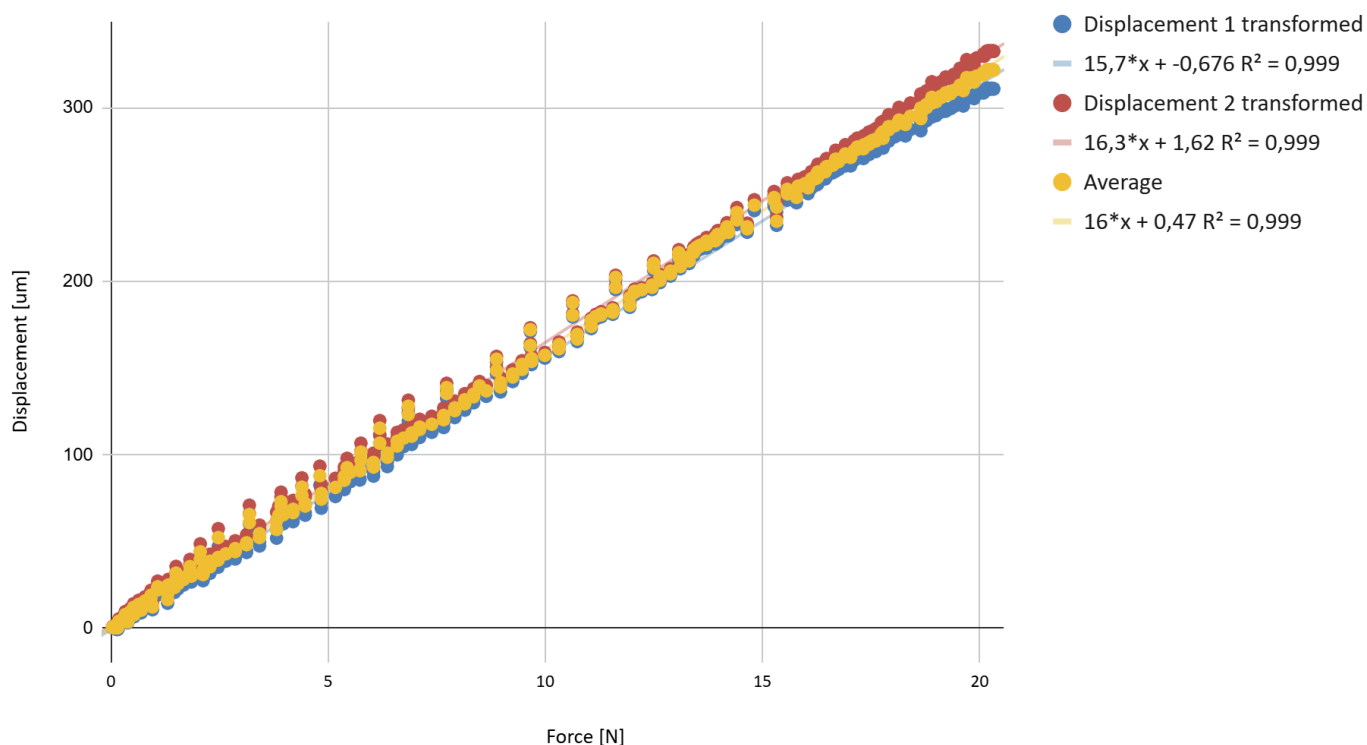


Obr. 20 - Nová verze konstrukce na měření deformace. Zakroužkovaná změněná část. Foto vlastní.

Konstrukce je velmi podobná jako ta původní. To, co je na fotce (obr. 20) zakroužkované bíle, je část, která se změnila. Vlevo nahoře v zakroužkované oblasti je elektrický siloměr, který ukazuje sílu v newtonech, podle toho, jakou silou se za něj tahá. Ze siloměru dolů vede rybářský vlasec, natažený přes kladku a jeho konec zaháknutý na menší pohyblivé části konstrukce. V pravé části dole v zakroužkované části je zelený imbus, kterým při měření pomalu otáčíme. Tím se vlasec napíná a postupně působí větší a větší silou na siloměr, podle toho, jak moc je napnutý. Takto vygenerovaná síla deformuje pružný element, a to zaznamenávají konfokální sondy, přičemž všechna měření se přenáší rovnou do počítače.

Měření druhé verze kovové pružinky už tedy bylo mnohem jednodušší díky nové konstrukci. Výsledky jsou jako obvykle zobrazeny v grafu. Díky automatickému systému měření jsme informace o napínací síle museli transformovat z měřeného napětí. Elektronický siloměr je nastaven tak, že 1 volt výstupního napětí odpovídá 20 newtonům. Na ose x tedy po transformaci jako obvykle vynášíme sílu v newtonech a na ose y deformaci v mikrometrech:

## Deformation of the Spring 2



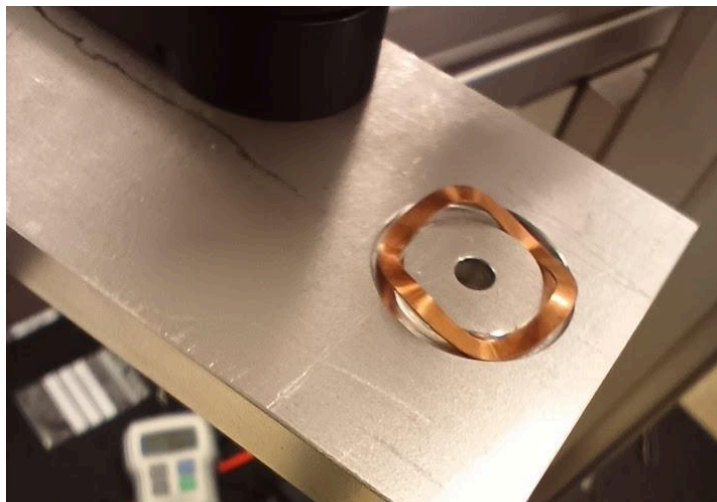
Obr. 21 - Graf ukazující deformaci 1. verze kovové pružinky. Graf vlastní.

Na grafu je proto nyní mnohem více bodů, než na těch předchozích. Imbusem jsme přitom otočili jednu otáčku tam a pak zase zpátky, aby se rybářský vlasec napnul a poté opět uvolnil. Jak už jsem uvedla výše, na nové konstrukci se data uložila automaticky pokaždé, když jsme pohnuli s imbusem. Když jsme s ním pohybovali, museli jsme to dělat velmi pomalu a rovnoměrně, aby také jednotlivé body měření vznikaly v pravidelných odstupech při narůstající, resp. při klesající působící síle. V některých částech grafu jsou ale patrné jisté výchyly, které vznikaly tehdy, když jsme se při otáčení imbusem přece jen nějak pozastavili, nebo jsme jej otáčeli jinou rychlostí, než na zbylých částech.

Jak plyne z analýzy grafu, tak druhá verze pružiny, tedy předpjatá pružina se deformuje dosti podobně jako první verze, konkrétně o 16 um na 1 N působící síly. Její výhodou oproti první variantě ale je, že při snížení napětí okamžitě relaxuje do původního stavu, tedy deformace je shodná při napínání i při povolování, což je v grafu patrné i tím, že obě čáry (napínání a povolování) jsou v grafu zcela překryty přes sebe.

## Alternativní design pružinky zvlněného CuBe plechu

Jako čtvrtou variantu jsem měřila zvlněnou pružinku, vyrobenou ze směsi mědi a berylia. Je to alternativní design, který byl vyroben a dovezen od spolupracujících vědců z Dánska, za účelem vylepšení předchozích pružných elementů.



Obr. 22 - Zvlněná pružinka dosazená ve žlábků v konstrukci. Foto vlastní.

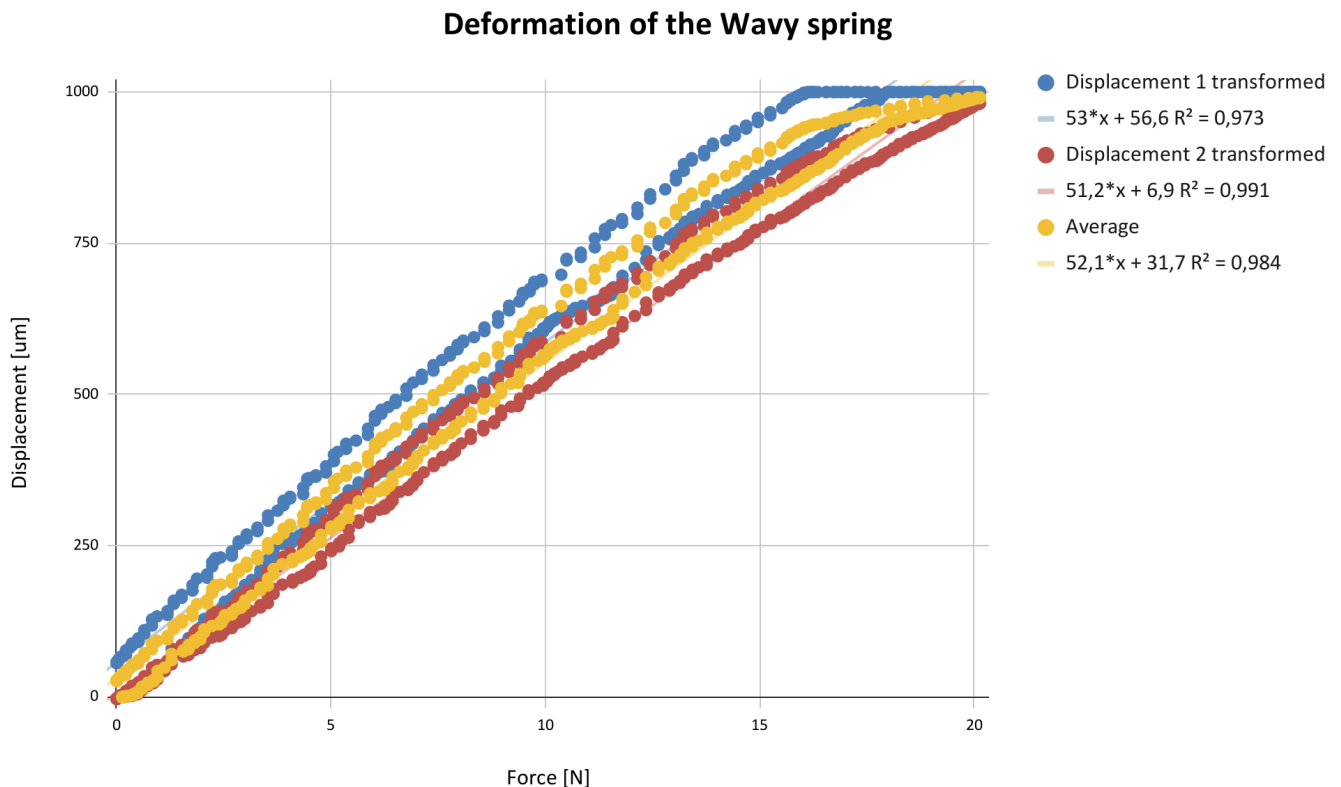
Měřilo se zase na nové konstrukci, takže to bylo jednoduché. Výsledky měření jsem jako vždy přenesla do grafu pro větší přehlednost:

Osa x (vodorovná) je tedy zase síla v newtonech a na ose y je opět deformace v mikrometrech. Sílu jsme opět přepočítala z napětí ve voltech, které je na výstupu z elektronického siloměru. Opět jsem použila stejný převodní koeficient, tedy měřené volty jsem vynásobila 20, protože siloměr je nastavený tak, že 1 volt odpovídá 20 newtonům.

Můžeme znovu vidět, že je bodů v grafu hodně, kvůli stejnému důvodu, jako v předchozím měření - imbusem jsme otočili jednu otáčku tam a pak zase zpátky, aby se rybářský vlasec napnul a poté zpět uvolnil. Ale narozdíl od toho předchozího měření můžeme pozorovat nový jev - je vidět, že se dvě čáry stejné v grafu se nepřekrývají, ale je mezi nimi mezera. Je to proto, že se při povolování se pružina chová jinak, než při přitlačování, a to je bohužel pro naše účely nepraktické. Tomuto jevu se říká hystereze. Hystereze vzniká pravděpodobně také kvůli tomu, že zvlněná pružinka má velice tenké a tím pádem i ostré hrany, které se při přitlačování zařezávají do hliníkové podložky. Když se potom pružina povoluje, tak se už logicky nezařezává.

Na grafu si také můžeme všimnout, že v pravém horním rohu se už data měření zplošťují a deformace (např. pro 1. měření) už dále neroste. Je to proto, že pružinka

je poměrně měkká a dobře deformovatelná, a už při působící síle přibližně 17 newtonů došla do svého maxima a více už nešla stlačit.



Obr. 23 - Graf ukazující deformaci alternativního designu zvlněné pružiny. Graf vlastní.

Z grafu můžeme vyčíst, že deformace zvlněné pružinky je 52 mikrometrů na 1 N, což je oproti předchozím měření asi trojnásobná deformace. Tím se také potvrzuje naše pozorování, že pružinka je poměrně měkká.

Z tohoto měření nám plyne závěr, že tato zvlněná pružinka je pro vsazení do mechanismu nevhodná a nepraktická, ať už kvůli tomu, že se její hrany zařezávají do podložky, nebo kvůli její hysterezi. To, že je měkká, je ale pozitivní v tom, že se její přítlak lépe kontroluje a ovládá.

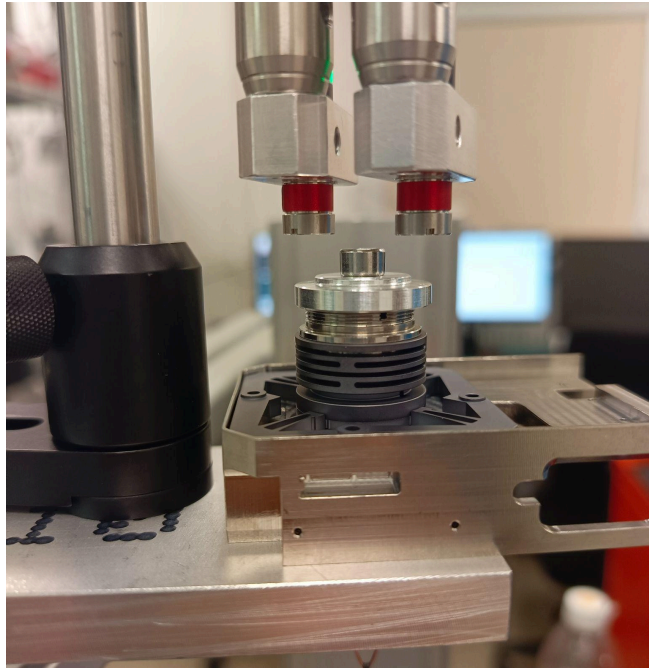
## Měření vybraného elementu v celém mechanismu

Jako poslední měření v této oblasti jsem na závěr měřila celý mechanismus, ve kterém byl vybraný pružný element. Za ten jsme tam dosadili druhou verzi titanové pružinky vyrobené metodou EDM, protože podle výsledků z jednotlivých měření se

zdála být nejvhodnější. Je z vhodného materiálu a při povolení okamžitě zrelaxuje do své původní polohy, což je k měření potřeba.

Toto měření je trochu jiné než ty předchozí. Měříme složitější systém a měření je velmi důležité, protože díky němu můžeme určit skutečný přítlak pružiny v mechanismu FSU.

Celý mechanismus je z hlediska našeho měření složitější soustavou, kdy při měření vlastně kombinujeme dvě různé pružiny o různé tuhosti.

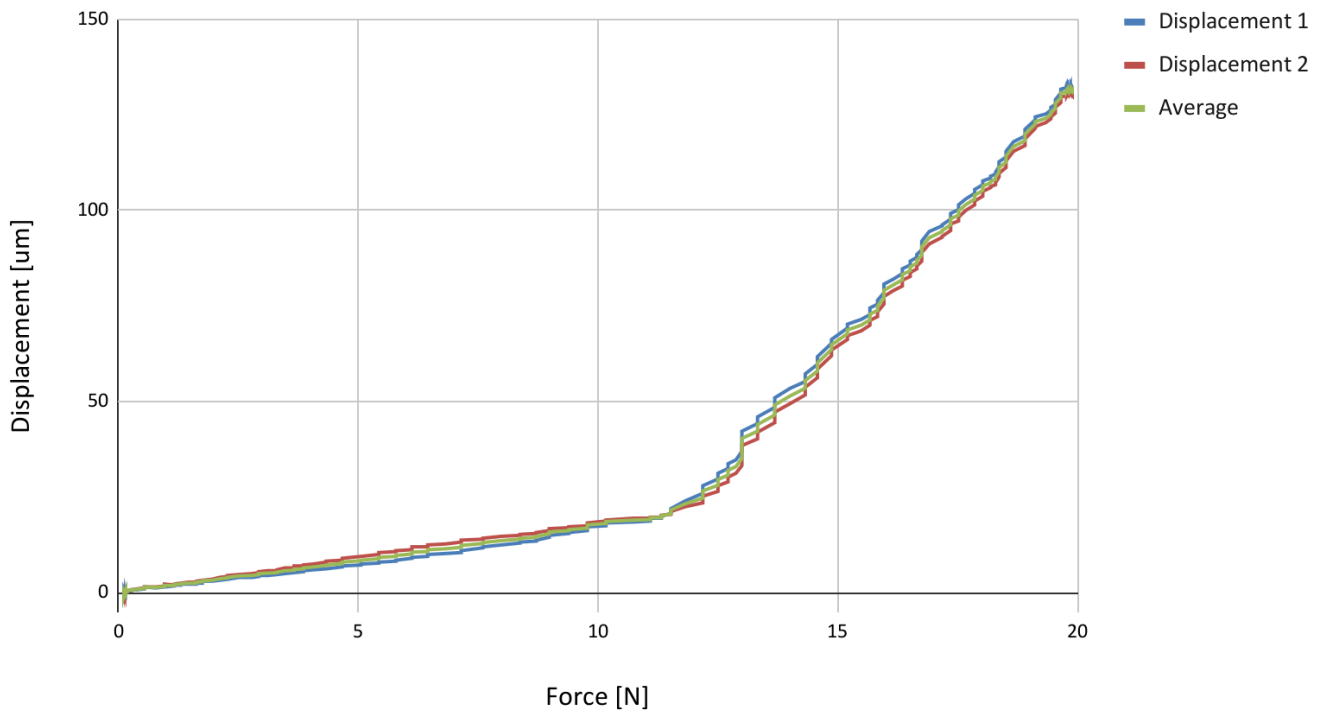


*Obr. 24 - Fotka celého otáčivého mechanismu s kovovou pružinkou dosazený v konstrukci.*

Pružinou s tuhostí S1 je samotná pružina vyrobená z titanu, která je uzavřena uvnitř optomechanického mechanismu FSU. Pružina S1 je předpjatá s využitím matice v horní části mechanismu. Druhá pružina s tuhostí S2 je pak tvořena nožkami rámu mechanismu a teflonem, který je v mechanismu také vložen.

Naším cílem je určit přítlak pružiny uvnitř mechanismu, tedy silou kolika newtonů je pružina předpjatá, který dokážeme rozpoznat jako zlom v grafu. Pokud na celý mechanismus působíme větší silou, pak se deformují obě pružiny s tuhostí S1 i s tuhostí S2. Když sílu postupně snižujeme, tak pružina uvnitř mechanismu s tuhostí S1 postupně vyplní celý volný prostor a v okamžiku, kdy již nemůže dále expandovat, se právě objeví v grafu zlom. Když dále snižujeme sílu, expanduje již pouze pružina s tuhostí S2 a deformace celé soustavy se tak již mění jiným tempem. Klíčové pro nás tedy bylo určení místa zlomu v grafu níže.

## Preloaded Complete Mechanism



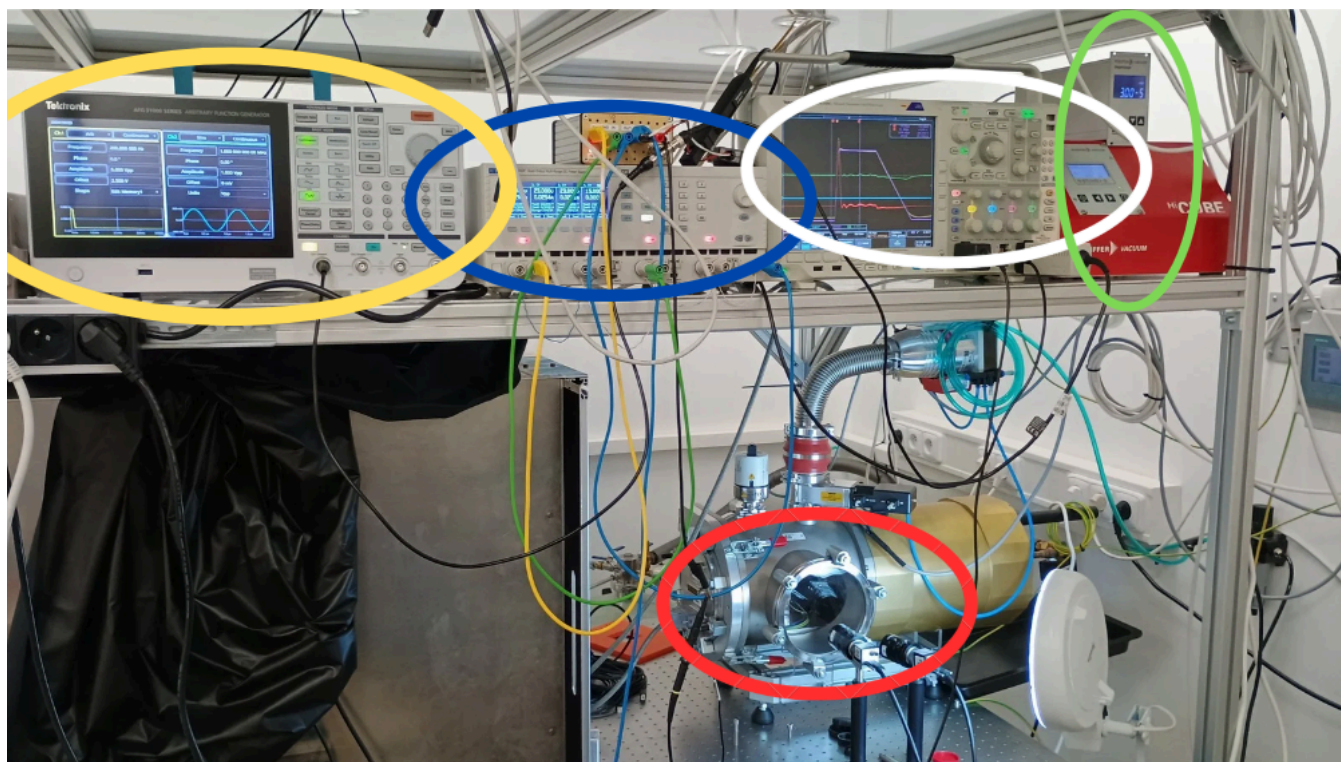
Obr. 24 - Graf celé soustavy mechanismu FSU s předpjatou titanovou pružinou s tuhostí S1 a s tuhostí zbytku mechanismu S2. Graf vlastní.

V grafu je dobře patrný zlom při působící síle asi 12 N. To však ještě není přímo síla, kterou je pružina S1 předpjatá. Před siloměrem bylo umístěno ještě závaží, díky kterému je celková síla vyšší o 4,6 N. Díky tomuto měření jsme tedy určili, že pružina je předjatá silou  $12 + 4,6 = 16,6$  N.

To ještě není úplně optimální síla, na základě požadavků ESA (Evropské kosmické agentury) by pružina měla být předpjatá silou asi 20 N, aby dobře odolávala působícím silám při startu rakety, která družici pak vynese na oběžnou dráhu. Celý mechanismus by tak měl nejlépe odolat jakémukoli poškození při startu. Po našem měření bylo tedy třeba přitlak pomocí matice ještě o něco zvýšit, abychom se lépe přiblížili požadované síle 20 N.

## 4.2 MĚŘENÍ RYCHLOSTI OTÁČENÍ

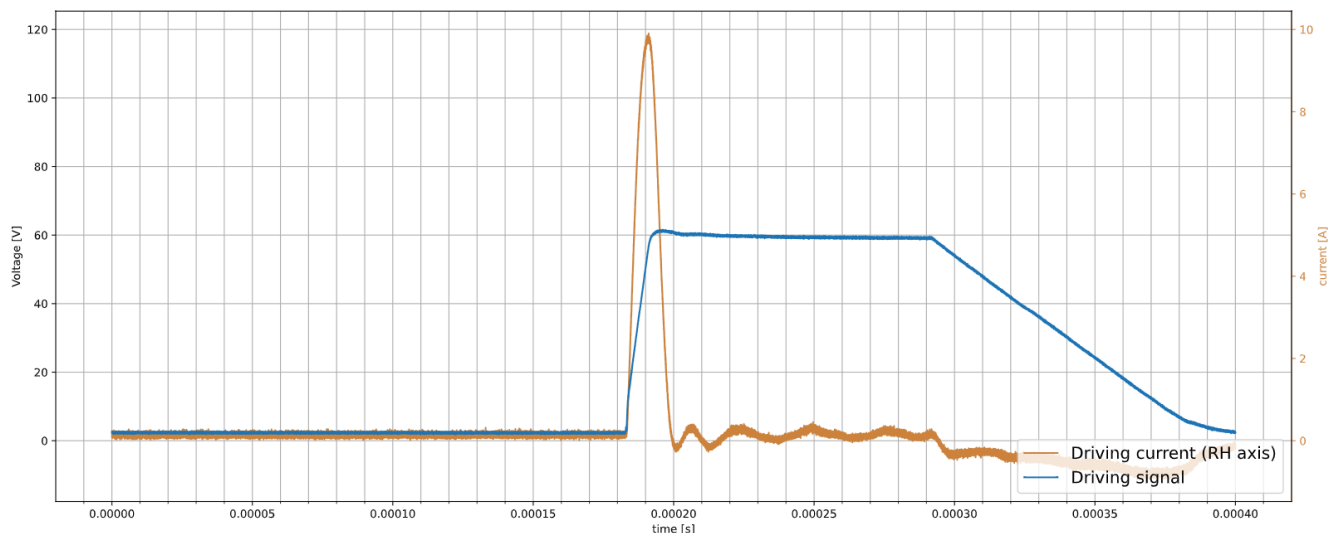
Druhým typem měření, které jsem v rámci svojí profilové práce realizovala, bylo měření rychlosti otáčení prototypu mechanismu FSU. Toto měření využívalo zcela jinou experimentální sestavu, než předchozí měření deformací. Pro mě bylo velmi zajímavé, že celý mechanismus byl vložen do vakuové komory, ze které byl vyčerpán vzduch a následné měření bylo prováděno ve vakuu - tedy aby byly napodobeny podmínky ve vesmíru, kde se budou pohybovat družice LISA. Mechanismus FSU má například jiné tření ve vzduchu za atmosférického tlaku a jiné tření právě při pohybu ve vakuu. Při měření jsme se zabývali tím, jak se mění rychlost otáčení v závislosti na parametrech vstupního signálu a snažili jsme se zjistit, co je příčinou případné změny.



Aparaturu pro měření jsem zachytila na následující fotografii:

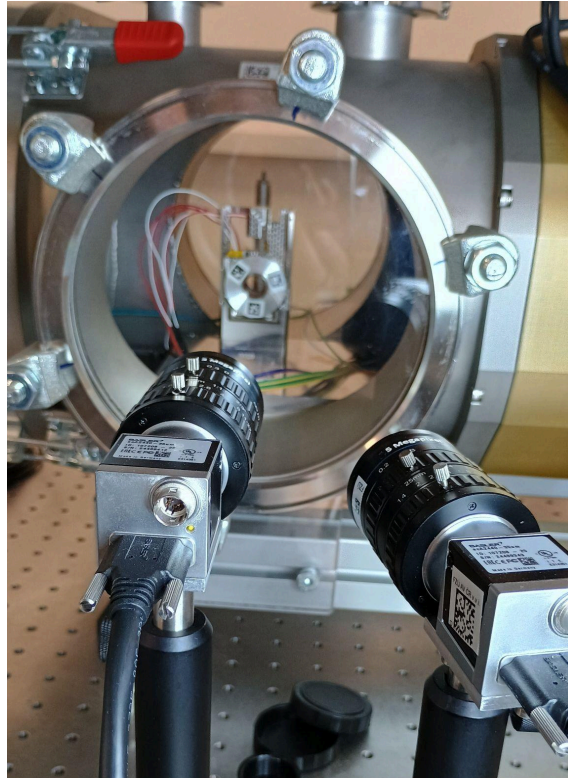
*Obr. 25 - Aparatura pro měření rychlosti otáčení mechanismu FSU ve vakuu. V červeném oválu je vakuová kamera s okénkem, do které je umístěn mechanismus FSU a následně je odčerpán vzduch. V zeleném oválu je pak ovládací panel vývěvy, která ve vakuové komoře udržuje vakuum. Ve žlutém oválu vlevo na snímku je generátor funkcí, který vygeneruje správný tvar signálu, který potřebujeme pro úspěšný pohyb podle popsaného principu slip-stick, v modrém oválu je pak zesilovač, který signál z generátoru zesílí v rozsahu do 60 V a konečně v bílém oválu je digitální osciloskop, kde kontrolujeme tvar signálů, zda jsou v souladu s našimi požadavky.*

Pro úspěšné otáčení součástky FSU potřebujeme zajistit otáčení mechanismu s využitím principu *slip-stick*, kdy výsledkem je trhavý pohyb otáčeného tělesa. S pomocí osciloskopu jsme zkontrolovali, že poháněcí signal vypadá podle našeho očekávání. Průběh signálu (napeti i proud) je zobrazen v grafu níže.



*Obr. 26 - Záznam napětí řídicího signálu (modrá linie) a proudu (oranžová linie) z osciloskopu. Mezi casy priblizne 180 a 200 mikrosekund vidime slip fázi, tedy prudky narust napětí a vysoky proud. Pak po určitý čas signal zůstane na 60V a nakonec nasleduje stick faze, tedy pomaly navrat na 0V (priblizne mezi casy 290 a 400 mikrosekund). Celá slip fáze proběhne za jednu desetitisícinu sekundy.*

Rychlost otáčení součástky jsme pak měřili skrz okénko ve vakuové komoře, jak ukazuje následující fotografie. Na součástce byly nalepeny tři terčíky, jejich pozice byla snímána kamerou a s pomocí automatické analýzy obrazu pak byla vyhodnocována rychlost otáčení součástky.



*Obr. 27 - Část aparatury určená k měření rychlosti otáčení součástky. V okénku na vakuové komoře je viditelná součástka FSU, na ní jsou umístěny tři terčíky (nálepky). Mimo vakuovou komoru jsou pak umístěny dvě kamery, které snímají obraz otáčející se součástky FSU a pomocí automatické analýzy obrazu vyhodnocují rychlost otáčení.*

## **Postup měření**

Spolu s mým odborným konzultantem jsme měřili rychlost otáčení součástky při několika různých nastaveních impulsů. Postupně jsme měnili délku trvání impulsu, který ve fázi slip pohybuje součástkou v jednom směru, a sledovali jsme, jak se kvůli tomu mění rychlost otáčení součástky.

Změnu parametrů jsme prováděli tak, že jsme v generátoru funkcí nastavili novou potřebnou hodnotu trvání maxima signálu (ploché části funkce s maximálním signálem), přičemž hodnotu jsme zkusili nastavit v intervalu od 50 mikrosekund až do 150 mikrosekund. Následně jsme ještě zkontrolovali tvar impulsu s pomocí osciloskopu a na monitoru jsme sledovali rychlost otáčení součástky.

Vždy jsme čekali, až se součástka otočí o 10 celých otáček (tedy o  $360^\circ \times 10$ ), aby se vyrovnaly případné výkyvy rychlosti otáčení. Každé měření trvalo přibližně 15 minut.

## **Otáčení součástky s trváním maxima impulsů 50 us**

Z předchozích měření jsme věděli, že se signálem s délkou maxima 20 us se součástka otáčela rychlostí asi  $1,9^\circ/\text{s}$ . Chtěli jsme nyní dosáhnout rychlejšího otáčení, chtěli jsme tak fázi slip o něco prodloužit, takže jsme jako počáteční hodnotu zvolili délku maxima signálu 50 us.

Na konci měření jsme podle grafu, který se průběžně vykresloval na obrazovce počítače, odhadli, že součástka se skutečně otáčela rychleji a to o asi  $2,5^\circ/\text{s}$ .

Tím se nám potvrdilo, že změna délky maxima signálu má na otáčení předpokládaný vliv.

## **Otáčení součástky s trváním maxima impulsů 100 us**

Zkusili jsme trvání impulsů ještě prodloužit a nastavit jej na dvojnásobek - 100 us. Součástka se opět otáčela o něco rychleji, ale vzrůst rychlosti rozhodně nebyl lineární. Pouze na základě grafu zobrazeného na obrazovce jsme odhadli, že rychlost otáčení je o něco více, než  $3^\circ/\text{s}$ .

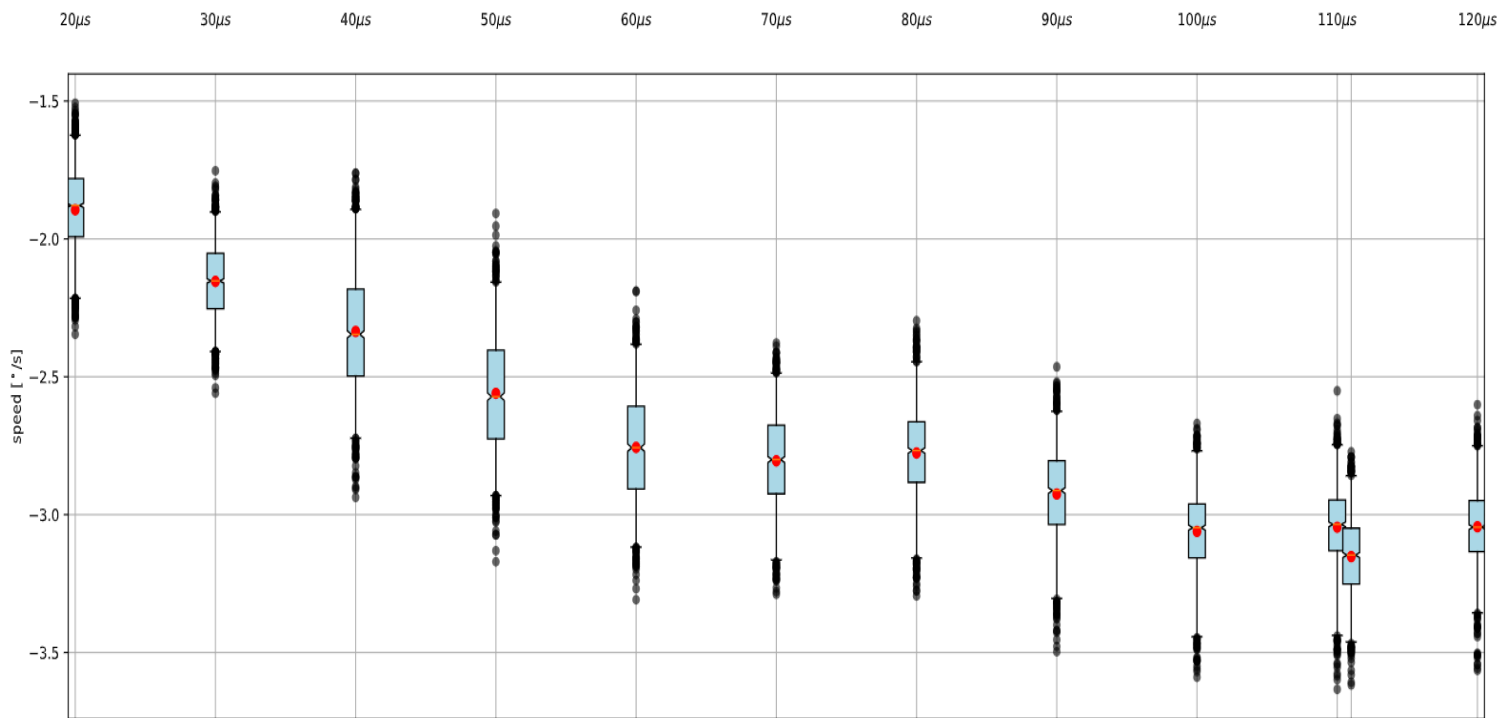
## **Otáčení součástky s trváním maxima impulsů 150 us**

Trvání maxima impulsů jsme se pokusili ještě prodloužit na 150 us. Po měření jsme zjistili, že toto prodloužení už nemá na rychlost otáčení další vliv. Měření vycházelo na základě odhadu s použitím grafu zobrazeného na obrazovce prakticky stejně jako v předchozím měření s trváním impulsu 100 us. Rychlost otáčení tedy opět byla o něco více než  $3^\circ/\text{s}$ .

## **Otáčení součástky s trváním maxima impulsů 75 us**

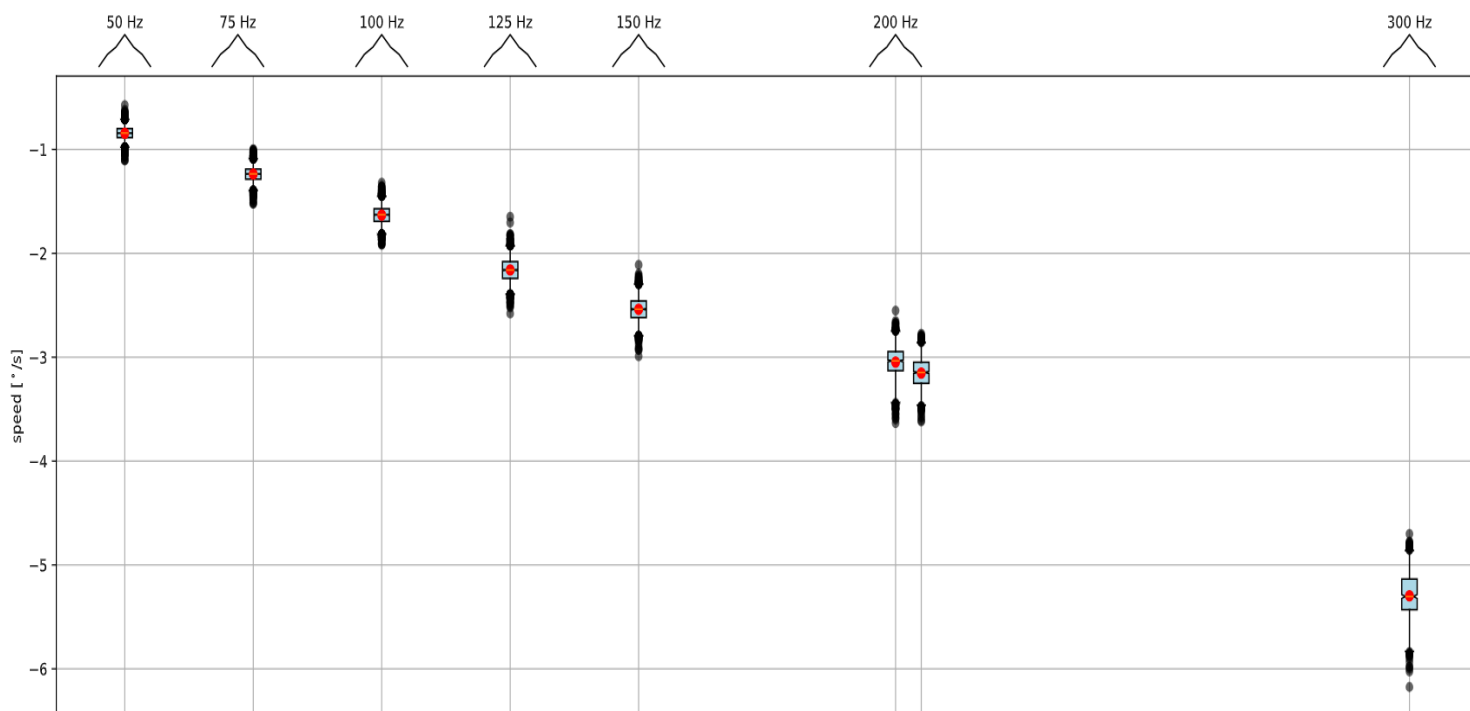
Jako poslední jsme společně s mým konzultantem zkusili variantu, kdy trvání maxima impulsu bylo mezi 50 us a 100 us, zvolili jsme tedy hodnotu 75 us. Odhadované výsledky měření z grafu na obrazovce pak odpovídaly hodnotě těsně nad  $3^\circ/\text{s}$ .

Můj odborný konzultant zkoušel později ještě různé jiné hodnoty trvání maxima pulsu. Celkové výsledky ze všech těchto měření jsou pak zobrazeny v grafu níže, který vznikl přesnou analýzou obrazu zaznamenávaného během měření a který byl vytvořen pomocí programovacího jazyku Python.



Obr. 28 - Na vodorovné ose jsou vyneseny různé délky trvání maxima impulsu od 20 us až do 120 us. Já sama jsem se podílela jen na několika výše popsaných měřeních. Na svislé ose je pak vynesena rychlost otáčení součástky. Červeným bodem uprostřed je vyznačen medián všech hodnot, černou vodorovnou čárkou uprostřed je průměr hodnot, modrý obdélník pak zahrnuje jedno sigma, tedy 68 % všech hodnot měření s daným nastavením trvání maxima impulsu a až po okraj svislých černých čar je zahrnuto 98 % všech měření. černými tečkami jsou pak zobrazeny jednotlivé body s nejextrémnějšími měření - tedy se zaznamenanou nejvyšší a nejnižší rychlostí otáčení v dané sérii měření. I výše uvedená přesná analýza našich měření tedy potvrdila, že s prodlužováním délky maxima impulsu se nejprve rychlost otáčení skutečně zvyšuje až k 3°/s, ale právě od trvání maxima impulsu 100 us už dále prakticky neroste.

Následně ještě můj odborný konzultant provedl druhé měření rychlosti otáčení součástky, kdy měnil jiný parametr, a to frekvenci pulsů, tedy jak často puls výše popsaného tvaru pošleme do mechanismu. Výsledkem tohoto měření je graf na následující obrázku:



Obr. 29 - Graf závislosti rychlosti otáčení na frekvenci vstupních signálů. Na vodorovné ose je vyznačena opakovací frekvence vstupujících signálů - frekvence 50 Hz znamená, že signál byl vygenerován a do mechanismu byl vyslán 50krát za sekundu, a například frekvence 200 Hz znamená, že signál byl generován 200krát za sekundu. Jak je patrné z grafu, tak rychlost otáčení je vlastně přímo úměrná tomu, jak často pulsy vysíláme, čím více pulsů za sekundu, tím větší rychlost otáčení. Například při frekvenci 100 Hz byla rychlost otáčení asi 1,5°/s, při frekvenci 200 Hz něco přes 3°/s a při frekvenci 300 Hz je ještě o trochu vyšší než je naše očekávání, očekávali bychom cca 4,5°/s, změřený výsledek je dokonce o něco více než 5°/s. Význam značek je pak stejný jako u grafu výše - červená tečka je medián, černá vodorovná čárka je průměr, modrý obdélník je jedna sigma (68 % rozložení), černé svislé čáry zahrnují 98 % všech hodnot a nejnižší a nejvyšší hodnoty jsou tvořeny samostatnými body.

## 5.ZÁVĚR

Závěr mé profilové práce reflektuje nejen výsledky mého snažení, ale také množství zkušeností, které jsem během tohoto projektu získala. Věnovala jsem se testování součástky FSU na Fyzikálním ústavu AV ČR, která bude součástí družicového detektoru gravitačních vln LISA. V průběhu práce jsem provedla dvě hlavní měření, jejichž výsledky jsem pečlivě analyzovala a interpretovala.

První část mé experimentální práce se zaměřila na měření deformací a přítlaku čtyř různých pružných elementů. S pomocí sestavené konstrukce jsem dokázala zachytit rozdíly v jejich chování, přičemž jsme s mým odborným konzultantem vyhodnocovali vhodnost jednotlivých materiálů na základě jejich mechanických vlastností. Tento proces zahrnoval nejen identifikaci problémů, jako je relaxace materiálu nebo nežádoucí interakce s podložkou, ale také výběr nejvhodnějšího prvku, který byl následně otestován v celém mechanismu. I na základě mé práce se nyní v prototypu využívá druhá verze titanové pružinky vyrobené metodou EDM. Z naměřených dat jsem vytvořila grafy, které pomohly odhalit reálný přítlak v mechanismu a přispěly k návrhu jeho optimalizace.

Ve druhé části měření jsem se věnovala analýze rychlosti otáčení mechanismu na základě slip-stick principu. Testovala jsem vliv délky pulsu na otáčení součástky a zjistila, že tento parametr hraje klíčovou roli pouze do určité hodnoty (100 us), po jejímž překročení přestává rychlost růst. Tato anomálie představuje zajímavý výsledek, jehož příčina zatím není zcela objasněná a může být předmětem dalšího výzkumu. Na základě mého měření se nyní při dalším testování prototypu mechanismu FSU používají signály s délkou maxima pulsu mezi 50 a 75 us.

Teoretická část mé práce se zaměřila na vysvětlení principu gravitačních vln, jejich vzniku, historie a metod detekce. Dále jsem popsala koncept družic LISA, jejich fungování a klíčovou roli součástky FSU, na jejímž vývoji jsem se podílela.

Tato zkušenost pro mě byla nesmírně cenná. Měla jsem příležitost pracovat na části velkého mezinárodního projektu, na kterém se podílejí vědci z celého světa. Přestože moje měření představují jen drobnou část celého výzkumu, byla pro mě obrovskou příležitostí naučit se mnoho nového. Získala jsem praktické znalosti o měření pomocí specializovaných přístrojů, pochopila, jak komplexní jsou procesy při konstrukci a testování vědeckých zařízení, a osvojila si postupy při zpracování naměřených dat, tvorbě grafů a psaní odborného textu.

Profilová práce mě také naučila, jak je náročné výsledky nejen získat, ale také je správně vyhodnotit, interpretovat a prezentovat. Z této zkušenosti si odnáším nejen hlubší porozumění fyzice a vědecké práci, ale také větší respekt k práci vědců, kteří se podílejí na projektech takového významu.

# SEZNAM ZDROJŮ A LITERATURY

- [1] **Wikipedia Contributors.** "Gravitational Wave." *Wikipedia, The Free Encyclopedia*, Dostupné z: [https://en.wikipedia.org/wiki/Gravitational\\_wave](https://en.wikipedia.org/wiki/Gravitational_wave). Citováno 26. července 2024.
- [2] **Wikipedie přispěvatelé.** „Gravitační vlny.“ *Wikipedie: Otevřená encyklopedie*, Dostupné z: [https://cs.wikipedia.org/wiki/Gravita%C4%8Dn%C3%AD\\_vlny](https://cs.wikipedia.org/wiki/Gravita%C4%8Dn%C3%AD_vlny). Citováno 26. července 2024.
- [3] **PODOLSKÝ, Jiří.** „Gravitační vlny.“ *Katedra teoretické fyziky, MFF UK*, Dostupné z: <https://utf.mff.cuni.cz/~podolsky/GraVlny/GraVlny.htm>. Citováno 30. července 2024.
- [4] **LEVINOVÁ, Jana.** *Vesmírné blues. Černé díry, gravitační vlny a historie epochálního objevu.* Přeložil Karel Výborný. Praha: Paseka, 2016. ISBN 978-80-7432-746-9.
- [5] **Wikipedia Contributors.** "First Observation of Gravitational Waves." *Wikipedia, The Free Encyclopedia*, Dostupné z: [https://en.wikipedia.org/wiki/First\\_observation\\_of\\_gravitational\\_waves](https://en.wikipedia.org/wiki/First_observation_of_gravitational_waves). Citováno 26. července 2024.
- [6] **KUBALA, Petr.** „Objev desetiletí: Potvrdili gravitační vlny a inflaci.“ *Exoplanety.cz*, Dostupné z: <https://www.exoplanety.cz/2014/03/19/objev-desetileti-potvrdili-gravitacni-vlny-a-inflaci/>. Citováno 27. července 2024.
- [7] **ROTHMAN Tony.** „The secret history of gravitational waves.“ *American Scientist*. Citováno 26. července 2024. Dostupné z: <https://www.americanscientist.org/article/the-secret-history-of-gravitational-waves>
- [8] **Kolektiv autorů.** „Nobelova cena za fyziku 2017: Objev gravitačních vln.“ *Bulletin astronomické společnosti Aldebaran*, Dostupné z: [https://www.aldebaran.cz/bulletin/2017\\_34\\_nob.php](https://www.aldebaran.cz/bulletin/2017_34_nob.php). Citováno 28. července 2024.
- [9] **Wikipedie přispěvatelé.** „Gravitační astronomie.“ *Wikipedie: Otevřená encyklopedie*, Dostupné z: [https://cs.wikipedia.org/wiki/Gravita%C4%8Dn%C3%AD\\_astronomie](https://cs.wikipedia.org/wiki/Gravita%C4%8Dn%C3%AD_astronomie). Citováno 29. července 2024.
- [10] **Nature.** „Five new ways to catch gravitational waves - and the secrets they'll reveal.“ *Nature*, <https://www.nature.com/articles/d41586-024-02003-6>. Citováno 1. srpna 2024.
- [11] **NASA.** „LISA: Laser Interferometer Space Antenna.“ *NASA*, Dostupné z: <https://lisa.nasa.gov/>. Citováno 29. července 2024.
- [12] **ESA.** „LISA Mission.“ *European Space Agency (ESA)*, Dostupné z: <https://www.lisamission.org/>. Citováno 2. srpna 2024.
- [13] **MARTINEK, František.** „Družice LISA Pathfinder připravena ke startu.“ *Česka astronomická společnost*, Dostupné z: <https://www.astro.cz/clanky/kosmonautika/druzice-lisa-pathfinder-pripravena-ke-startu.html>. Citováno 30. července 2024.
- [14] **Wikipedia Contributors.** "Laser Interferometer Space Antenna." *Wikipedia, The Free Encyclopedia*, Dostupné z: [https://en.wikipedia.org/wiki/Laser\\_Interferometer\\_Space\\_Antenna](https://en.wikipedia.org/wiki/Laser_Interferometer_Space_Antenna). Citováno 2. srpna 2024.
- [15] **Akademie věd České republiky.** „Evropská kosmická agentura dala zelenou misi LISA. Na stavbě přístrojů a kosmické sondy se podílejí Češi.“ *Akademie věd České republiky*, Dostupné z: [https://www.avcr.cz/content/galerie-souboru/tiskove-zpravy/2024/ASU\\_TZ\\_-LISA.docx](https://www.avcr.cz/content/galerie-souboru/tiskove-zpravy/2024/ASU_TZ_-LISA.docx). Citováno 2. srpna 2024.

[16] **ResearchGate**. „The stick-slip principle of motion of piezoelectric actuators.“

*ResearchGate*, Dostupné z:

[https://www.researchgate.net/figure/The-stick-slip-principle-of-motion-of-piezoelectric-actuators-See-the-color-plate\\_fig8\\_278408157](https://www.researchgate.net/figure/The-stick-slip-principle-of-motion-of-piezoelectric-actuators-See-the-color-plate_fig8_278408157). Citováno 3. srpna 2024.

[17] **Micro-Epsilon UK Ltd**. „Confocal Chromatic Sensor Technology - Basics and applications from Micro-Epsilon.“ *YouTube*, 21. července 2022, Dostupné z:

<https://www.youtube.com/watch?v=QCVgqjpxh-0>. Citováno 5. srpna 2024.