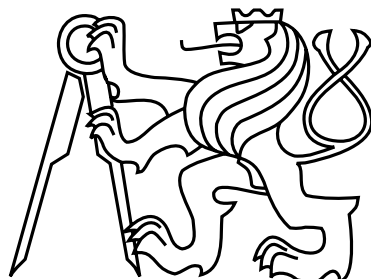


České vysoké učení technické v Praze
Fakulta elektrotechnická



Optimalizace experimentální zátěže plazmatického fokusu PFZ-200

Bakalářská práce

Jan Novotný

Praha, květen 2019

Studijní program: Elektrotechnika, energetika a management

Studijní obor: Aplikovaná elektrotechnika

Vedoucí: Ing. Jakub Cikhardt, Ph.D.

I. OSOBNÍ A STUDIJNÍ ÚDAJE

Příjmení: **Novotný** Jméno: **Jan** Osobní číslo: **459200**
Fakulta/ústav: **Fakulta elektrotechnická**
Zadávající katedra/ústav: **Katedra elektroenergetiky**
Studijní program: **Elektrotechnika, energetika a management**
Studijní obor: **Aplikovaná elektrotechnika**

II. ÚDAJE K BAKALÁŘSKÉ PRÁCI

Název bakalářské práce:

Optimalizace experimentální zátěže plazmatického fokusu PFZ-200

Název bakalářské práce anglicky:

Optimizing of experimental load of PFZ-200 plasma focus

Pokyny pro vypracování:

1. Nastudujte problematiku plazmatických fokusů a D+D jaderné fúzní reakce a popište současný stav.
2. Popište plazmatický fokus PFZ-200 a jeho diagnostiku.
3. Navrhněte možnosti nastavení experimentální zátěže ovlivňující silnoproudý výboj na zařízení PFZ-200
4. Proveďte systematickou sérii experimentů na zařízení PFZ-200 pro různá nastavení experimentální zátěže.
5. Během experimentů zaznamenávejte signály Rogowského cívky, scintilačních detektorů a stříbrového aktivačního čítače.
6. Zpracujte výsledky experimentů a na jejich základě navrhněte optimální nastavení experimentální zátěže plazmatického fokusu PFZ-200 z hlediska neutronového zisku.

Seznam doporučené literatury:

- [1] P. Kubeš: Impulsní silnoproudé výboje a jejich diagnostika
- [2] M. Řípa, J. Mlynář, V. Weinzetl, F. Žáček: Řízená termojaderná fúze pro každého
- [3] M.A. Liberman, J.S.D. Groot, A. Toor, R.B. Spielman: Physics of High-Density Z-Pinch Plasmas
- [4] G.F. Knoll: Radiation Detection and Measurement
- [5] M. Scholz: Plasma-focus and controlled nuclear fusion, 2014.
- [6] F.F. Chen: Úvod do fyziky plazmatu.

Jméno a pracoviště vedoucí(ho) bakalářské práce:

Ing. Jakub Cikhardt, Ph.D., katedra fyziky FEL

Jméno a pracoviště druhé(ho) vedoucí(ho) nebo konzultanta(ky) bakalářské práce:

Datum zadání bakalářské práce: **25.01.2019**

Termín odevzdání bakalářské práce: **24.05.2019**

Platnost zadání bakalářské práce: **20.09.2020**

Ing. Jakub Cikhardt, Ph.D.
podpis vedoucí(ho) práce

podpis vedoucí(ho) ústavu/katedry

prof. Ing. Pavel Ripka, CSc.
podpis děkana(ky)

III. PŘEVZETÍ ZADÁNÍ

Student bere na vědomí, že je povinen vypracovat bakalářskou práci samostatně, bez cizí pomoci, s výjimkou poskytnutých konzultací. Seznam použité literatury, jiných pramenů a jmen konzultantů je třeba uvést v bakalářské práci.

Datum převzetí zadání

Podpis studenta

Poděkování

Autor této práce by rád poděkoval především svému vedoucímu Ing. Jakubu Cikhardtovi, Ph.D. a členům skupiny silnoproudých výbojů za podporu s uskutečněním experimentu, za velkorysost a ochotu při výkladu znalostí ohledně fyziky plazmatu, Z-pinčových výbojů a diagnostiky použité při experimentu na PFZ-200.

Poděkování patří též doc. Ing. Josefu Kravárikovi, CSc. za umožnění experimentu na plazmatickém fokusu PFZ-200 na katedře fyziky FEL ČVUT. Patří se poděkovat také Josefu Hánovi za rozsáhlou technickou podporu v průběhu experimentu a Petru Mihalovovi za výrobu elektrod.

Výzkumné projekty spojené s touto prací byly podporovány z následujících grantů: Ministerstvo školství mládeže, a tělovýchovy České republiky č. LTT17015 a č. CZ.02.1.01/0.0./0.0/16_019/0000778; IAEA CRP RC-19253; GACR19-02545S.

Prohlášení

Pohlašuji, že jsem předloženou práci vypracoval samostatně a že jsem uvedl veškeré použité informační zdroje v souladu s Metodickým pokynem o dodržování etických principů při přípravě vysokoškolských závěrečných prací.

V Praze dne 23. května 2019

.....

Abstrakt

Tato práce je věnovaná experimentálnímu výzkumu deuteriového horkého hustého plazmatu a neutronové produkce na impulzních silnoproudých zařízeních. Hlavním cílem je optimalizace experimentální zátěže plazmatického fokusu PFZ-200. Důraz je kladen na vysoké neutronové zisky způsobené jadernou D-D fúzní reakcí. Optimalizovanými parametry jsou tlak plynného deuteria ve vakuové komoře plazmatického fokusu, který je volen v rozsahu 280 - 360 Pa a tvar centrální elektrody (anody).

Klíčová slova

Plazmatický fokus, silnoproudé výboje, neutronové zdroje, tvary elektrod

Abstract

This paper is focused on the experimental research of hot dense deuterium plasma and pulsed-power devices. The main goal of this thesis is an optimisation of experimental load of the PFZ-200 plasma focus. The emphasis is put on the yield of neutrons produced by the D-D nuclear fusion reaction. The optimized parameters are the central electrode (anode) shape and pressure of the deuterium gas in the plasma focus vacuum chamber in range of 280 - 360 Pa.

Key words

Plasma focus, high-power discharges, neutron source, electrode shapes

Obsah

Úvod	xvii
1 Teorie pinče	1
1.1 Pinčový jev	1
1.2 Nestability	2
1.3 Druhy pinčů	3
1.4 D-D fúzní reakce	4
2 Z-pinčová uspořádání	6
2.1 Jednoduché implozní modely	6
2.1.1 Model sněžného pluhu (Snowplow model)	6
2.1.2 Model rázové vlny (Shock model)	6
2.1.3 Slug model	7
2.2 Kompresní Z-pinč	7
2.3 Drátkový Z-pinč	7
2.4 Gas-puff Z-pinč	8
2.5 Plazmatický fokus	9
2.5.1 Fáze průrazu	10
2.5.2 Fáze urychlení	11
2.5.3 Fáze radiální komprese	11
2.6 Impulzní generátory	12
2.6.1 Marxův generátor	12
3 Plazmatický fokus PFZ-200	15
3.1 Konstrukce	15
3.2 Diagnostika	16

3.2.1	Stříbrový aktivační čítač	16
3.2.2	Scintilační detektor	17
3.2.3	Mikrokanálová zesilovací destička	18
3.2.4	Rogowského cívka	19
4	Experiment na PFZ-200	20
4.1	Tvary elektrod	21
4.2	Naměřená data	22
4.2.1	Výpočet neutronového zisku z detektoru SAC	29
4.2.2	Výpočet neutronového zisku ze scintilačního detektoru	30
4.2.3	Vizualizace plazmatu pomocí MCP	31
5	Závěr	34
	Literatura	36
	Příloha A - Výkresy elektrod	40
	Příloha B - Naměřená data	45

Seznam obrázků

1.1	Pinčový jev.	2
1.2	Nestability a) symetrická, b) nesymetrická.	3
1.3	Znázornění Z-pinče (vlevo) a θ -pinče (vpravo) [11].	4
2.1	Kompresní Z-pinč [12].	7
2.2	Dvouvrstvý gas-puff [16].	8
2.3	Plazmatický fokus Mather (vlevo), Filippov (vpravo) [20].	9
2.4	Podrobné schéma plazmatického fokusu [21].	10
2.5	Kondenzátorová baterie generátoru PF-1000 v Institutu Fyziky Plasmy i Laserowej Mikrosintezy ve Varšavě. Energie baterií je 1 MJ, maximální napětí dosahuje 40 kV [Fotoarchiv autora].	13
2.6	Marxův generátor (vlevo), náhradní obvod iniciovaného Marxova generátoru (vpravo).	13
3.1	Zařízení PFZ - 200	16
3.2	Rozmístění diagnostiky při experimentu na PFZ-200. Scintilační detektory (ToF-B, ToF-C), stříbrový aktivační čítač (SAC), mikrokanálová zesilovací destička (MCP).	16
3.3	Používaný detektor SAC	17
3.4	Micro-channel plate (MCP) [33]	19
4.1	Zobrazené anody před (horní řada) a po experimentu (dolní řada), 1-Plný kužel, 2-Dutý kužel, 3-Zaoblená s otvorem, 4-Zaoblená hladká. Vzorky 1 a 4 před experimentem jsou zobrazeny ve 3D modelu za použití PC softwaru Autodesk Inventor 2019.	21
4.2	Pohled do otevřené vakuové komory plazmatického fokusu PFZ-200 a umístění anody, obklopené polem katod.	22

4.3	Grafická závislost neutronových zisků na jeden výstřel při tlacích 280 - 360 Pa, měřených stříbrem aktivovaným čítačem (SAC).	24
4.4	Časový průběh el. proudu a jeho derivace.	27
4.5	Grafické znázornění naměřených dob imploze při různém tlaku deuteria. V grafu je vyznačena průměrná hodnota doby imploze a její fluktuační.	29
4.6	Signál ze scintilačních detektorů ToF-B a ToF-C výstřelu 18110208. V grafu je vyznačena oblast detekce tvrdého rentgenového záření (HXR) a neutronů.	31
4.7	vizualizace výboje č.18110208 ve fázi maximální komprese.	32
4.8	Vizualizace jako složení dvou výstřelů č.19040304 a 19040306 ve fázi maximální komprese.	33

Seznam tabulek

2.1	Přehled několika zahraničních experimentálních zařízení zabývajících se Z-pinčovými výboji a jejich porovnání s PFZ-200 v základních parametrech [1, 2, 3, 4, 5, 10, 18, 25, 26, 27, 28, 29].	14
4.1	Průměrné hodnoty a fluktuace neutronových zisků měřených stříbrem aktivovaným čítačem (SAC) při tlacích 280 až 360 Pa.	23
4.2	Průměrné hodnoty a fluktuace neutronových zisků měřených scintilačním detektorem ToF-B při tlacích 280 až 360 Pa.	26
4.3	Naměřené průměrné hodnoty doby imploze se svými fluktuacemi při různém tlaku deuteria.	28
5.1	Naměřené hodnoty maximálního proudu, neutronového zisku a doby náběhu do pinče pro výstřely při počátečním tlaku náplně 280 Pa.	45
5.2	Naměřené hodnoty maximálního proudu, neutronového zisku z detektoru SAC a scintilačního detektoru B, doba náběhu do pinče pro výstřely při tlaku deuteria 300 Pa. Pro každý výstřel byla napuštěna nová náplň deuteria.	46
5.3	Naměřené hodnoty maximálního proudu, neutronového zisku z detektoru SAC a scintilačního detektoru B, doba náběhu do pinče pro výstřely při tlaku deuteria 320 Pa. Pro každý výstřel byla napuštěna nová náplň deuteria.	47
5.4	Naměřené hodnoty maximálního proudu, neutronového zisku z detektoru SAC a scintilačního detektoru B, doba náběhu do pinče pro výstřely při tlaku deuteria 340 Pa. Pro každý výstřel byla napuštěna nová náplň deuteria.	48
5.5	Naměřená data s instalovanou anodou plný kužel.	49
5.6	Naměřená data s instalovanou anodou plný kužel.	50

5.7	Naměřená data s instalovanou anodou plný kužel.	51
5.8	Naměřená data s instalovanou anodou plný kužel.	52
5.9	Naměřená data s instalovanou anodou s konvexní kuželovou dutinou.	53
5.10	Naměřená data s instalovanou anodou s konvexní kuželovou dutinou.	54
5.11	Naměřená data s instalovanou anodou s konvexní kuželovou dutinou.	55
5.12	Naměřená data s instalovanou anodou s konvexní kuželovou dutinou.	56
5.13	Naměřená data s instalovanou anodou s konvexní kuželovou dutinou.	57
5.14	Naměřená data s instalovanou anodou zakulacenou s otvorem.	58
5.15	Naměřená data s instalovanou anodou zakulacenou s otvorem.	59
5.16	Naměřená data s instalovanou anodou zakulacenou s otvorem.	60
5.17	Naměřená data s instalovanou anodou zakulacenou s otvorem.	61

Úvod

Impulzní experimentální zařízení typu Z-pinč hrají důležitou roli při výzkumu fyziky plazmatu a laboratorní astrofyziky, vývoji zdrojů rentgenového záření, rychlých iontů a neutronů. Z velkých zahraničních laboratoří jsou Z-pinčová zařízení předmětem výzkumu např. v Sandia National Laboratories v Albuquerque (Z-machine) [1], v Imperial College London (MAGPIE) [2], Trinití v Troitsku (Angara) [3] a mnoho dalších. Zvláštní modifikací Z-pinčového zařízení jsou plazmatické fokusy, které se vyznačují poměrně účinnou produkcí neutronů. Ze současných světově významných plazmatických fokusů uveďme např. zařízení Geminy v National Security Technologies v Las Vegas [4], Hawk v Naval Research Laboratory ve Washingtonu D. C. [5] a PF-1000 v Institutu fyziky plazmatu a laserové mikrosyntézy ve Varšavě [6]. Vzhledem k vysoké účinnosti krátkých neutronových impulzů našly plazmatické fokusy uplatnění v tzv. subkritických experimentech [7], jejichž cílem je zkoumat průběh štěpné reakce s podkritickým množstvím štěpného materiálu¹. Subkritické experimenty s použitím plazmatického fokusu jako zdroje neutronů jsou prováděny například v národních laboratořích Los Alamos [8]. Dalším zajímavým uplatněním plazmatických fokusů je ověření platnosti teoretických modelů v numerických simulacích např. v Large Scale Plasma (LSP) kódu [8]. Tato práce byla inspirována počítačovou simulací v LSP kódu provedenou pro plazmatický fokus Gemini [9]. Na základě výsledků této simulace byly provedeny experimenty na malém plazmatickém fokusu PFZ-200 na ČVUT FEL v Praze.

Na zařízení PFZ-200, podobně jako na jiných experimentálních zařízeních, dochází i při dodržení schodných počátečních experimentálních podmínek k jistému rozptylu výsledků jednotlivých výbojů (výstřelů). To lze považovat za nežádoucí pro budoucí výzkum i praktické využití.

Cílem těchto experimentů bylo získat co největší a nejstabilnější neutronový zdroj.

¹Jako štěpný materiál se často užívá Vysoce obohacený uran (HEU) nebo plutonium [8].

Kapitola 1

Teorie pinče

V této práci se budeme zabývat tzv. Z-pinčovými výboji. Věnujme proto první kapitolu popsání pinčových výbojů, jejich druhů, nestabilit a samotného fyzikálního principu jejich vzniku.

1.1 Pinčový jev

Představme si elektrický výboj v plazmatu jako proudový kanál válcového tvaru. Protékající proud I vytváří podle Ampérova zákona ve svém okolí magnetické pole \mathbf{B} . Aplikujeme-li cylindrické souřadnice, zjistíme, že se uplatňuje pouze toroidální složka magnetického pole $|\mathbf{B}| = B_\theta$, působící kolmo na směr proudu I . Velikost magnetického pole lze pak vyjádřit jako (1.1).

$$B_\theta = \frac{\mu I}{2\pi r}, \quad (1.1)$$

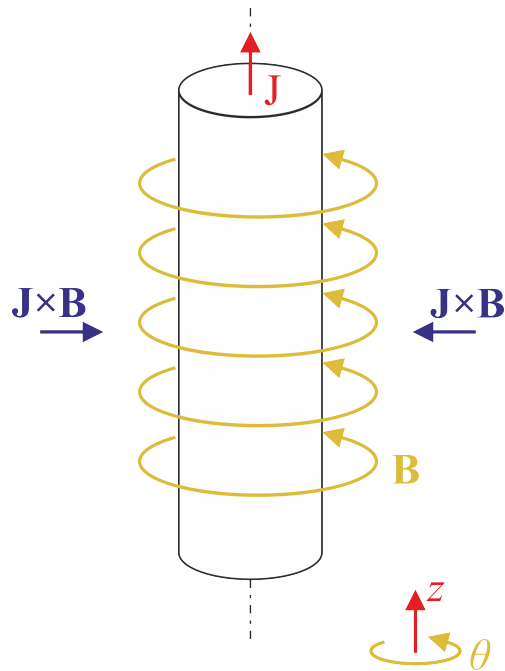
kde r reprezentuje vzdálenost od osy vodiče a μ permeabilitu prostředí. Magnetické pole \mathbf{B} a plošná hustota protékajícího el. proudu¹ $\mathbf{J} = \frac{dI}{dS}\mathbf{n}$ vyvolávají Lorentzovu sílu, jejíž hustotu lze vyjádřit jako (1.2).

$$\mathbf{f} = \mathbf{J} \times \mathbf{B} \quad (1.2)$$

Tato síla působí radiálně na proudový kanál směrem k ose z v podobě magnetického tlaku $B^2/2\mu$. Částice², tekoucí v proudovém kanálu, se začnou pod vlivem rostoucího magnetického tlaku vzájemně přibližovat [11]. V daném prostředí roste

¹ S představuje plochu, kterou protéká proud, \mathbf{n} je normála plochy S .

²Jako částice v plazmatu uvažujeme elektrony a ionty.



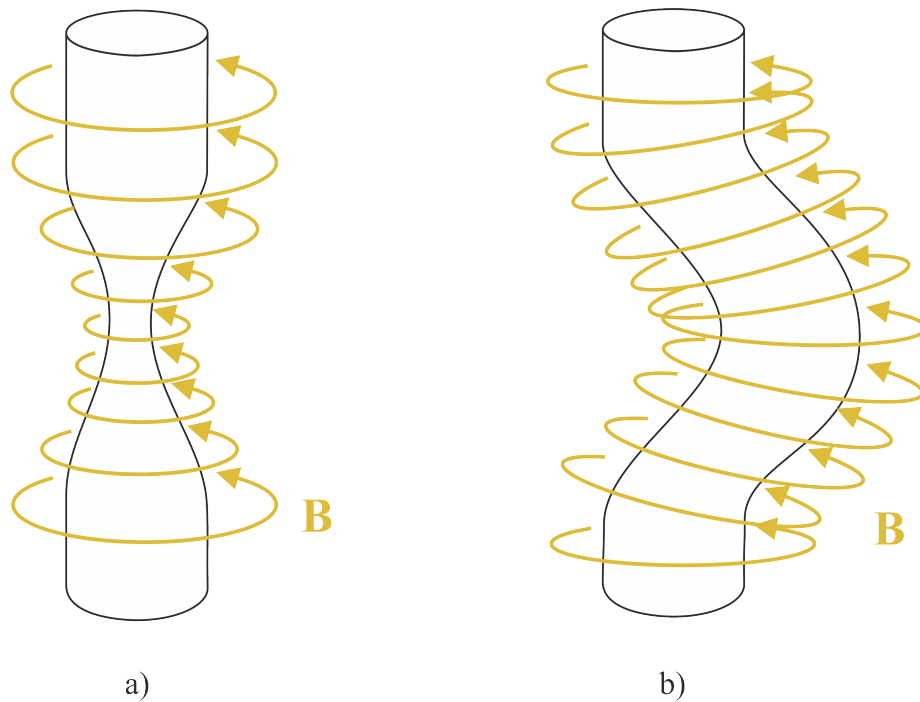
Obrázek 1.1: Pinčový jev.

jejich objemová hustota n , jenž vede k růstu teploty T . Za takové situace dochází k růstu kinetického tlaku $\sum nkT$, směřujícího od osy z [11]. Při dostatečné velikosti protékajícího elektrického proudu dojde k převýšení magnetického tlaku nad tlakem kinetickým, čímž dojde ke smršťování (pinčování) proudového kanálu. V homogenním prostředí by nastala vzájemná rovnováha působících tlaků, vedoucí ke stabilizaci výboje. Nicméně reálné prostředí není homogenní a přispívá tak k rozvoji nestabilit.

1.2 Nestability

Je-li v některé části pinčového výboje porušena tlaková rovnováha $B^2/2\mu = \sum nkT$, dochází k rozvoji nestabilit [11]. Rovnováhu je možné porušit vlivem nehomogenity prostředí, nebo nesymetrií válcové struktury, reprezentující výboj. Vzniklé nestability vedou k přetržení pinčového výboje. Rozpoznáváme dva základní druhy nestabilit.

- Symetrická nestabilita
- Nesymetrická nestabilita



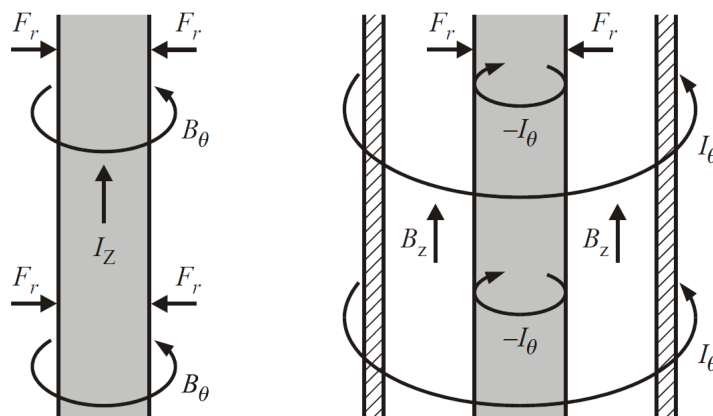
Obrázek 1.2: Nestability a) symetrická, b) nesymetrická.

Na obrázku 1.2a) protéká výbojem veliký elektrický proud. Vlivem nehomogenity v místě s nižší koncentrací elektronů a iontů působí menší kinetický tlak. Růst magnetického tlaku převyšuje růst kinetického tlaku a dochází k postupnému zaškrcování. Se zmenšujícím se poloměrem vodiče roste magnetické pole a pod vlivem silně se zvětšujícího magnetického tlaku dochází až k samotnému přetržení vodiče. Na obrázku 1.2b) pozorujeme vychýlení proudového kanálu. Na vnitřní straně vychýlení roste hustota magnetického pole \mathbf{B} . Magnetický tlak zaznamenává značný nárůst, neboť roste s kvadrátem magnetické indukce \mathbf{B} . Naopak na vnější straně krčku dochází k řídnutí magnetických siločar a značnému poklesu magnetického tlaku. Nesymetrická nestabilita stejně jako symetrická vede k přetržení pinčového výboje.

1.3 Druhy pinčů

Pinčové výboje je možné dělit na základě prostorového rozmístění elektrod nebo podle geometrie tekoucího proudu a vzniklého magnetického pole. Doposud byla řeč o tzv. Z-pinčovém výboji, kdy elektrický proud teče ve směru osy z a vzniklé

magnetické pole B_θ má azimutální směr. Pokud zaměníme směry tekoucího proudu a magnetického pole, tedy proud I_θ bude protékat v azimutálním směru a generované magnetické pole B_z bude působit podél osy z , hovoříme o θ -pinči. Jak ukazuje obr. 1.3, Lorentzova síla působí i v θ -pinči směrem k ose z .



Obrázek 1.3: Znázornění Z-pinče (vlevo) a θ -pinče (vpravo) [11].

Vzhledem k tomu, že tato práce je věnována Z-pinčům, uvedeme několik základních Z-pinčových uspořádání.

- Z-pinč: Prosté postavení elektrod, kdy anoda je umístěna přímo proti katodě (např. drátkový Z-pinč, gass-puff, kompresní Z-pinč [12]).
- X-pinč: Jedná se o kombinaci (zkřížení) dvou Z-pinčových výbojů [12].
- Kapilární Z-pinč: Výboj probíhá uvnitř kapiláry s průměrem v řádu milimetrů [12].
- Plazmatický fokus: Zařízení válcového tvaru s koaxiálním rozmístěním elektrod na začátku oddělených izolátorem. Proudová vrstva je postupně urychlována. V místě zvaném fokus dochází ke kompresi proudové vrstvy a následně k pinčovému jevu [6].

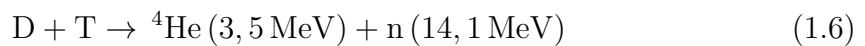
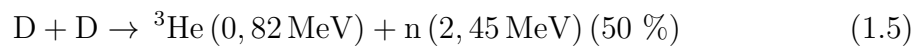
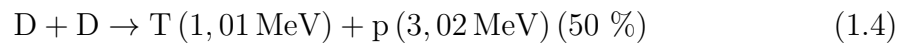
1.4 D-D fúzní reakce

Jedním z cílů této práce je diagnostika emise neutronů na plazmatickém fokusu, které vznikají při jaderné D-D fúzní reakci. V současných jaderných elektrárnách

dochází ke štěpným jaderným reakcím, kdy po nárazu neutronu do těžkého jádra dochází k jeho rozštěpení na dva lehčí prvky a současně uvolnění dvou až tří rychlých neutronů. Jaderná fúze představuje jakýsi opak štěpné reakce. Při fúzi dochází ke slučování lehkých jader za vzniku těžších prvků (exoenergeticky až po železo) [13]. Jednou ze základních fúzních reakcí je slučování nejlehčích jader, a to jader vodíku podle reakce (1.3).



Na pravé straně této rovnice pozorujeme, že jedním z produktů je vodník ${}^2_1\text{H}$, který ve svém jádře obsahuje navíc jeden neutron. Tento izotop vodíku nazýváme deuterium a značíme jej D. Reakce (1.3) je typickou fúzní reakcí, jaká probíhá v širokém vesmíru ve hvězdách včetně Slunce. Nicméně tato reakce má poměrně malý účinný průřez (malou pravděpodobnost vzniku), a proto se raději přikláníme k reakcím s vyšším účinným průřezem, jako je D-D popř. D-T fúzní reakce [14], kde symbolem T označujeme trícium, izotop vodíku ${}^3_1\text{H}$.



D-D reakce (1.4) a (1.5) probíhají se stejnou pravděpodobností, a tak nemůžeme ovlivnit, zda získáme trícium a proton, či helium a neutron. Nicméně z reakce (1.5) vyplývá, že námi detekované neutrony s energií okolo 2,5 MeV, budou pravděpodobně pocházet z D-D fúzní reakce.

Kapitola 2

Z-pinčová uspořádání

V rámci této části se budeme zabývat historií pinčů. Prozkoumáme nejznámější používané konfigurace těchto výbojů. Postupně se z historie prolne až do konfigurací používaných v současném výzkumu. Stručně zmíníme základní analytické modely, kterými lze výboj v experimentálních zařízeních popsat. Ruku v ruce s technikou pinčů jde impulzní elektronika, proto se budeme zabývat i jí, neboť zařízení jako pinč se bez silnoproudého impulsu rozhodně neobejde.

2.1 Jednoduché implozní modely

2.1.1 Model sněžného pluhu (Snowplow model)

Jedná se o model nekonečné vodivosti. Proud teče nekonečně malou povrchovou vrstvou, která působí jako píst, jenž se pod vlivem pinč efektu pohybuje radiálně směrem k ose. Veškeré plazma a plyn se hromadí v povrchové vrstvě jako sněh hrnutý pluhem. Postupně dochází k růstu hmotnosti vrchní vrstvy. Model sněžného pluhu nezachovává energii a je použitelný pouze na pinč, který vyzařuje přebytečnou energii během imploze [12].

2.1.2 Model rázové vlny (Shock model)

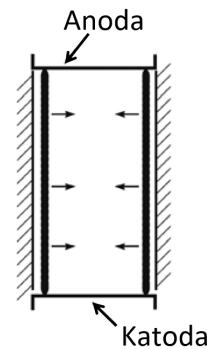
Model rázové vlny je analytický model rychlé komprese. Předpokládá se nekonečná vodivost, okamžitě rostoucí proud ke konečné hodnotě a nekonečně tenká rázová vlna. Proud I klesá s rovnoměrně rostoucí indukčností L . Předpokládá se lineární růst napětí LI [12].

2.1.3 Slug model

Pro tento model není zavedený český překlad. Jedná se o bezrozměrný model. Uvažuje se tenká vrstva tvořená magnetickým pístem a tenkou rázovou vlnou, která ionizuje a ohřívá plyn před sebou. Plyn je mezi pístem a rázovou vlnou adiabaticky stlačován. Konstantní tlak je roven magnetickému tlaku $p_s = B^2/2\mu_0$. Podle základního Slug modelu nedochází k odrazu rázové vlny [12].

2.2 Kompresní Z-pinč

Kompresní Z-pinč dříve představoval nejrozsáhlejší skupinu raných pinčových experimentů [12]. Jedná se o plynem plněný válec s izolací, jenž je axiálně obklopený dvěma elektrodami. Po přivedení napětí dojde k průrazu proudu blízko stěny. Vzniklý proud vytvoří magnetické pole, jehož síla působí radiálně dovnitř válce. Postupem času se zrodily různé modely pro kompresi Z-pinče.



Obrázek 2.1: Kompresní Z-pinč [12].

2.3 Drátkový Z-pinč

Vytvořením pevné zátěže, např. drátku nebo skupiny drátků mezi elektrody, získáme jednoduchý drátkový Z-pinč¹. Drátek je obvykle vyroben z uhlíkového vlákna, hliníku či wolframu [12]. Speciálním typem pevné zátěže může také být kryogenní vodík nebo deuterizovaný polymer. První experimenty byly prováděny v 80. letech minulého století v laboratořích *Naval Research Laboratory* a *Los Alamos National Laboratory*. Představa byla zahřát a ionizovat vlákno zmrzlého vodíku pro získání horkého, hustého sloupce plazmatu s malým poloměrem. Tato metoda přinesla poměrně stabilní výboje s neutronovými zisky řádově 10^{10} [15].

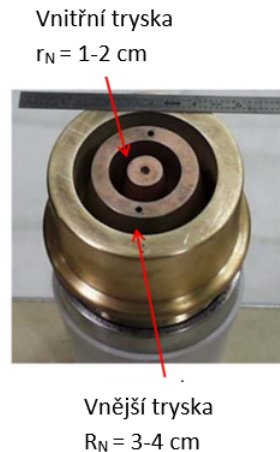
¹Angl. Fibre Z-pinch.

2.4 Gas-puff Z-pinč

Gas-puff je takový druh zátěže, kde pracovní plyn je uložený v zásobníku pod vysokým tlakem (řádu atmosfér) a těsně před výstřelem dochází k jeho řízenému vstříknutí do vakuové komory. K rychlému vstříku se používá rychlého ventilu, kdy vstříknutý plyn protéká tryskou nadzvukovou rychlostí s minimálním příčným pohybem. Jakmile vypuštěný plyn dosáhne druhé elektrody, dojde k aktivaci impulzního generátoru a průchodu rychle narůstajícího elektrického proudu. Druhá elektroda je v podobě např. síťky a umožňuje plynulý průchod plynu. Je možné použít plnou i dutou konfiguraci trysek. V současnosti se používají až tři oddělené soustředné vrstvy trysek k lepší kontrole hustoty plynu a jeho složení. Tyto tři trysky se využívají ke stlačení, stabilizaci a záření [12]. Výsledkem je zmírnění nestabilit a získání optimálního výkonu.

První experimenty využívající technologii gas-puff prováděl již v 70. letech J. H. Shiloh v rámci své disertační práce [17]. Jako náplň využíval deuterium nebo těžší plyny jako argon a krypton. Nejvyšších teplot dosáhl dutými výboji, jejichž imploze měly podobné fáze kolapsu jako u kompresního Z-pinče a plazma fokusu, pojmenované jako „sausage” nestability. Tyto nestability rostly mnohem pomaleji, než udávaly teoretické předpoklady [17]. Naměřený proud dosahoval maxima 300 kA a byl generován při napětí 30 kV z 5,4 kJ kondenzátorů. Novější experimenty z roku

1998 s náplní deuteria byly prováděny na zařízení Saturn v Sandia National Laboratories (SNL). Naměřený proud dosahoval velikosti 10 MA a neutronový zisk činil 3×10^{12} . Plyn byl vstříkován nadzvukovou tryskou rychlostí 6 Machů [18]. V SNL se nachází další gas-puffové zařízení zvané Z-machine s proudy dosahující až 20 MA. Z-machine slouží jako účinný zdroj rentgenového záření a D-D fúzních neutronů.



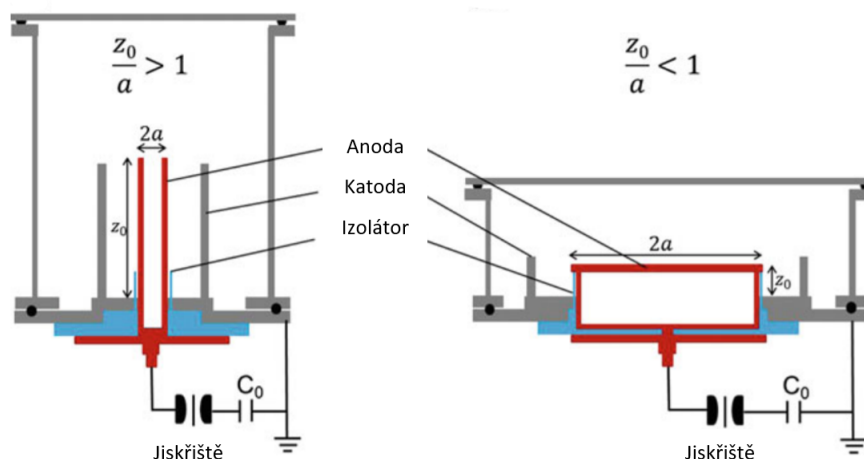
Obrázek 2.2: Dvouvrstvý gas-puff [16].

Při současných experimentech je na Z-machine dosahováno neutronového zisku až 3×10^{13} [1].

2.5 Plazmatický fokus

Plazmatický fokus je zařízení, kterého se v dnešní době často užívá jako zdroje neutronů, měkkého a tvrdého rentgenového záření. Tomuto zařízení se budeme věnovat podrobněji, neboť náš experiment byl prováděn právě na školním plazmatickém fokusu PFZ-200 (FEL ČVUT).

Jedná se o zařízení válcového tvaru s koaxiálním umístěním elektrod. Ve spodní části jsou elektrody odděleny izolátorem. Celé soustrojí je umístěno ve vakuové nádobě, která je po odčerpání vzduchu naplněna plynem (nejčastěji N_2 , D_2 , směs DT, Ar, Ne). Elektrody jsou připojeny přes jiskřiště ke kondenzátorové baterii. Nejčastějším materiálem, pro výrobu elektrod je měď, nerezová ocel, popř. wolfram. Plazmatický fokus je impulzní zařízení, ve kterém dojde ideálně k plnému vybití všech připojených kondenzátorů současně. Cílem je dosáhnout co největší hodnoty proudu v krátkém čase.

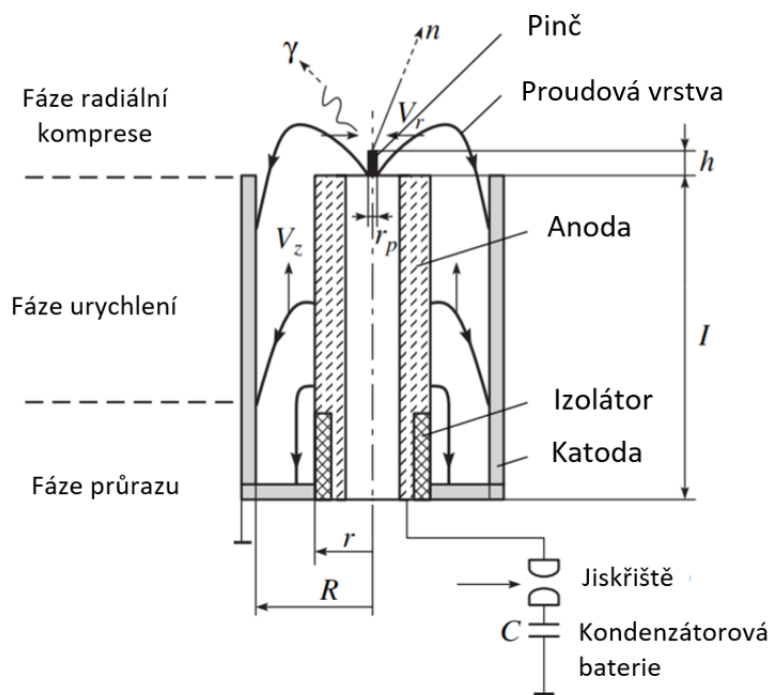


Obrázek 2.3: Plazmatický fokus Mather (vlevo), Filippov (vpravo) [20].

V průběhu 60. let 20. století se objevily dva nejpoužívanější typy plazmatických fokusů, a to typ Mather [19] a Filippov [20]. Obě konfigurace jsou pojmenovány podle

svých vynálezců. Hlavní rozdíl, jak ukazuje obr. 2.3, spočívá v poměru rozměrů $\frac{a}{Z_0}$, kde a reprezentuje poloměr vnitřní elektrody a Z_0 délku stejné elektrody od spodního izolátoru. Na obr. 2.4 můžeme pozorovat, že v plazmatickém fokusu nastávají průběžně tři fáze výboje. Jedná se o:

- fáze průrazu,
- fáze urychlení (pouze u typu Mather),
- fáze radiální komprese.



Obrázek 2.4: Podrobné schéma plazmatického fokusu [21].

Jednotlivé fáze si nyní podrobněji probereme.

2.5.1 Fáze průrazu

Fáze průrazu začíná po vyslání spouštěcího impulzu na jiskříště. Ta jsou nastavena na požadovaný tlak, aby vlivem Paschenova zákona došlo k jejich sepnutí. Sepnutím jiskříšť je na elektrody přivedeno vysoké napětí z kondenzátorů. Na povrchu

izolátoru dochází k elektrickému průrazu. Ionizací plynu vzniká plazma a začíná téct elektrický proud, jenž ve svém okolí vytváří magnetické pole. Formující se proudová vrstva je nadzvedávána Lorentzovou silou od povrchu izolátoru a je urychlována k vnější elektrodě. Působící Lorentzova síla se skládá ze složky radiální F_r a osové F_z . Jakmile proudová vrstva dosáhne vnější elektrody, začne se více uplatňovat složka pohybu ve směru osy.

2.5.2 Fáze urychlení

Vzniklá proudová vrstva spojuje vnější a vnitřní elektrodu. Vrstva se táhne od spodního konce vnější elektrody přes izolátor k vnitřní elektrodě. Ve fázi průrazu byl tvar této vrstvy značně ovlivněn tvarem izolátoru. Nyní je vrstva ovlivněna především Lorentzovou silou $\mathbf{j} \times \mathbf{B}$, která má stále radiální f_r a osovou složku f_z . Radiální složka urychlující síly je tvaru $(j_z \times B_\theta)_r$, kde j_z je proud ve směru osy z a \mathbf{B}_θ je indukované magnetické pole. Tato síla směřuje od osy z a tlačí proud k vnější elektrodě. Podélná složka síly $(j_z \times B_\theta)_z$ klesá se vzdáleností jako $1/r$, což má za následek vyšší rychlosti proudové slupky u vnitřní elektrody. Podrobnějším zkoumáním působení těchto sil lze usoudit, že plyn je hrnut postupující vrstvou plazmatu (připodobněné magnetickému pístu) jako v modelu sněžného pluhu (snowplow) [22], který je blíže popsán v kapitole 2.1.1. Nabírání hmoty magnetickým pístem je určeno nelineární funkcí, závisující na poloměru r . Vzhledem ke skutečnosti, že vnější elektroda je tvořena z více dílů, vzájemně oddělených, stává se pro plyn propustnou. U vnitřní elektrody se tak hromadí více plynu než u vnější.

2.5.3 Fáze radiální komprese

Fáze radiální komprese je nejzajímavější, ale také nejméně pochopenou částí tvorby hustého plazmatu ve fokusu. Pohybující se vrstva plazmatu dosáhne okraje vnitřní elektrody a začne se pohybovat v radiálním směru. Následný pohyb plazmatu lze zjednodušeně připodobnit k zavírajícímu se deštníku, otočenému rukojetí nahoru. Zavíráním pomyslného deštníku dochází k adiabatickému stlačování sloupce plazmatu na minimální poloměr. V okamžiku maximální komprese nastává pinč efekt. Plazma dosahuje maximální hustoty ($10^{19} - 10^{20}$) cm^{-3} a teploty ($T_i \approx 1$ keV, $T_e \approx 200$ eV). Následně dochází k emisi měkkého rentgenového, tvrdého rentgenového a neutronového záření.

2.6 Impulzní generátory

Základním principem impulzních generátorů je konverze dlouhodobého působení malého výkonu na velký výkon krátkého časového impulsu při zachování množství spotřebované energie. Dnešní generátory jsou schopny dodat výkon o velikostech řádově 10^6 až 10^{14} W s dosažením napětí až desítek MV a proudů desítek MA. Doba nárůstu proudu se může pohybovat od zlomků ns až po desítky ms [23]. Impulzní generátor je možné rozdělit do následujících částí:

- Napájení generátoru - nabíjí primární uložisko energie ze sítě,
- Primární uložisko energie - je nejčastěji tvořeno soustavou kondenzátorů, označované jako kondenzátorová baterie. Kondenzátory je možné řadit sériově, paralelně i sério-paralelně,
- Mezilehlé uložisko energie - tvaruje generovaný impuls a přizpůsobuje ho k zátěži,
- vedení - kabely, pásové vedení, magneticky izolované koaxiální vedení,
- zátěž (experimentální),
- řízení - Synchronizátory, generátory spouštěcích impulsů,
- jiné technické prvky - bezpečnostní prvky, zkratovače.

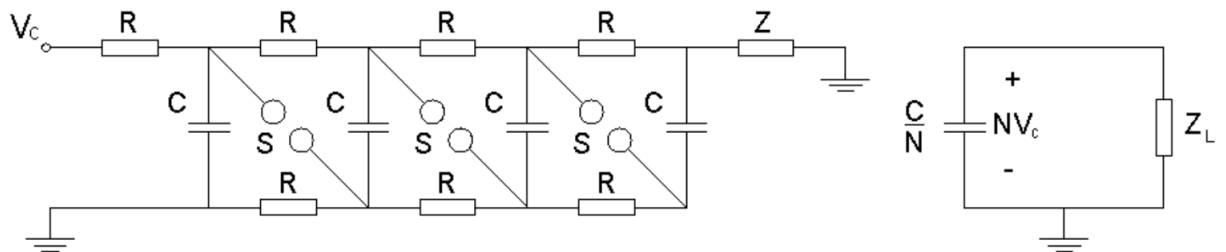
2.6.1 Marxův generátor

Pro získání napětí přesahující 100 kV je konstrukce generátorů založených na prostém sériovém nebo paralelním řazení kondenzátorů technicky velmi náročná. Z toho důvodu byl v roce 1923 vynalezen Marxův generátor pro vysoká napětí [24]. Hlavním principem Marxova generátoru je průběžná změna zapojení kapacitorů. Při nabíjení jsou kondenzátory o kapacitě C v paralelním uspořádání a jsou nabíjeny na hodnotu napětí V_C . Po nabití dojde k sepnutí spínačů S a přepojení všech kondenzátorů z paralelního na sériové uspořádání. Jsou-li všechny spínače obvodu sepnuty, říkáme, že Marxův generátor je iniciován a lze jej nahradit jednoduchým obvodem s jedním



Obrázek 2.5: Kondenzátorová baterie generátoru PF-1000 v Institutu Fyziky Plasmy i Laserowej Mikrosintezy ve Varšavě. Energie baterií je 1 MJ, maximální napětí dosahuje 40 kV [Fotoarchiv autora].

kondenzátorem o kapacitě C/N . Generující napětí dosahuje teoretické hodnoty² $N \cdot V_C$, kde N je počet zapojených kondenzátorů. Jako spínací prvky se při vysokých napětích používají jiskřiště. Pro nižší napětí lze využít tyristorů, či tranzistorů.



Obrázek 2.6: Marxův generátor (vlevo), náhradní obvod iniciovaného Marxova generátoru (vpravo).

²Reálná hodnota je snížena v závislosti na účinnosti generátoru.

Název zařízení	Energie [kJ]	Průd [MA]	Výstupní napětí [kV]	Doba ; implotace [μs]	Neutronový zisk	Typ zařízení	Instituce	Země
Z-machine	22 000	26	5 100	0,1	$3,0 \times 10^{13}$	Z-pinč gas puff	SNL, Albuquerque	USA
GIT-12	3 000	3	600	0,7	$1,0 \times 10^{13}$	Z-pinč gas puff	IHCE, Tomsk	Rusko
PF-3	2 800	11	25	10	$2,5 \times 10^{10}$	PF-Filippov	NRC Kurchatov Institute, Moskva	Rusko
Saturn	1 400	10	1 900	0,04	$3,0 \times 10^{12}$	Z-pinč gas puff	SNL, Albuquerque	USA
PF-1000	1 060	2,5	16-45	5	$2,0 \times 10^{11}$	PF-Mather	IPPLM, Varšava	Polsko
Gemini	1 000	3	70	6	$1,2 \times 10^{12}$	PF-Mather	NSTec, Las Vegas	USA
Mercury	360	0,36	6 000	0,05	-	Z-pinč generátor	NRL, Washington D.C.	USA
MIG	350	2,7	6 000	0,1	-	Z-pinč generátor	IHCE, Tomsk	Rusko
MAGPIE	340	1,8	2 400	0,2	$8,0 \times 10^8$	Drátkový Z-pinč	Imperial College, Londýn	UK
HAWK	220	0,7	640	1,2	$1,0 \times 10^9$	PF-Mather	NRL, Washington D.C.	USA
PFZ-200	4	0,2	18	1,7	$3,0 \times 10^8$	PF-Mather	ČVUT v Praze	ČR

Tabulka 2.1: Přehled několika zahraničních experimentálních zařízení zabývajících se Z-pinčovými výboji a jejich porovnání s PFZ-200 v základních parametrech [1, 2, 3, 4, 5, 10, 18, 25, 26, 27, 28, 29].

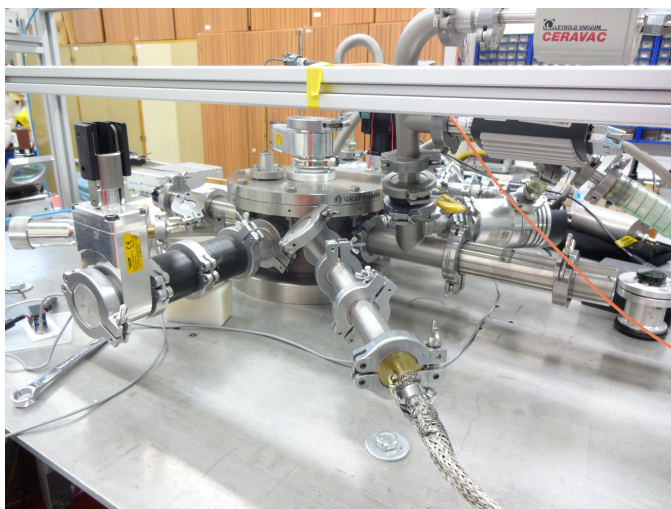
Kapitola 3

Plazmatický fokus PFZ-200

V této kapitole se budeme zabývat konkrétním zařízením, a to plazmatickým fokusem PFZ-200 (ČVUT FEL), na kterém byl prováděn náš experiment. Zaměříme se na popis samotného zařízení a použité diagnostiky.

3.1 Konstrukce

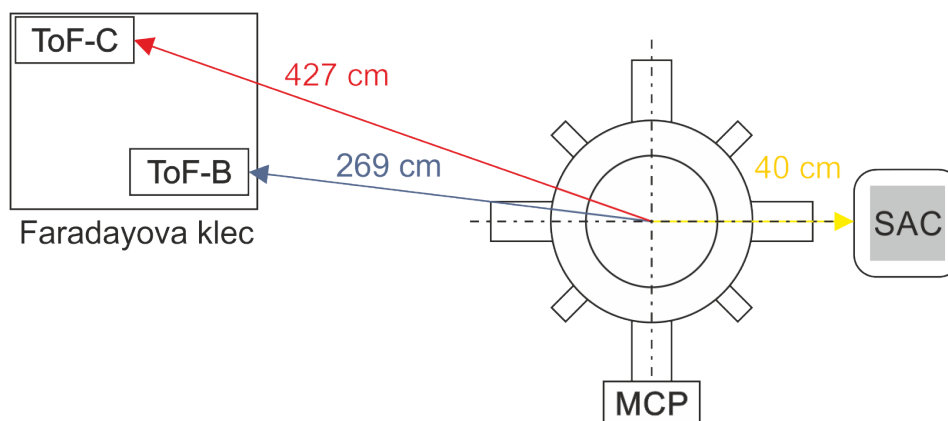
Jedná se o malý školní plazmatický fokus, umístěný na katedře fyziky Elektrotechnické fakulty ČVUT v Praze. Napájení je realizováno zdrojem napětí (max. 30 kV) a čtyřmi paralelně zapojenými kondenzátory o celkové kapacitě 20 μF . Každý kondenzátor je spínán jiskřištěm plněným suchým vzduchem. Ve vakuové komoře je uprostřed umístěna válcová elektroda (anoda) ze slitiny mědi a wolframu o průměru 25 mm. Katoda je složena z dvanácti ocelových tyčí o průměru 8,5 mm, které jsou od anody v osové vzdálenosti 50 mm. Ve spodní části komory je umístěn izolátor z Al_2O_3 . Ve stěnách komory se nachází 8 diagnostických oken, na která je možné připojit měřicí přístroje vyžadující umístění v bezprostřední blízkosti. Odčerpávání vzduchu (příp. náplně) je zajišťováno rotační olejovou vývěvou a následně, pro získání vyššího stupně vakua, turbomolekulární vývěvou. Po dosažení vakua (přibližně $10^{-2} - 10^{-3}$ Pa) je z bomby přes jehlovitý ventil napouštěna plynná náplň deuteria D_2 na tlak 250 - 350 Pa. Vzhledem ke konstrukci aparatury jsou kondenzátory nabíjeny na napětí 18 kV. Měřený proud při výstřelu dosahuje velikosti okolo 210 kA.



Obrázek 3.1: Zařízení PFZ - 200

3.2 Diagnostika

Nyní si popíšeme detektory a senzory, které jsme používali při experimentu. Na obr. 3.2 můžeme vidět rozmístění a vzdálenost jednotlivých přístrojů na PFZ-200.



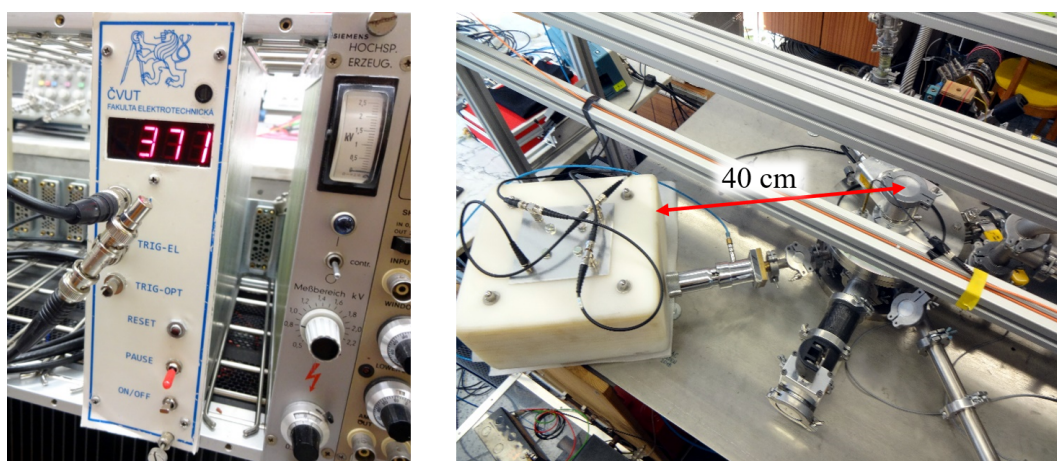
Obrázek 3.2: Rozmístění diagnostiky při experimentu na PFZ-200. Scintilační detektory (ToF-B, ToF-C), stříbrový aktivační čítač (SAC), mikrokanálová zesilovací destička (MCP).

3.2.1 Stříbrový aktivační čítač

Jedná se o přístroj určený pro detekci fúzních neutronů. Jak již název napovídá, detektor funguje na principu uměle vytvářené radioaktivity stříbra. Detektor je ve

světě známý jako SAC (Silver activation counter). Tato metoda využívá přírodních stabilních izotopů stříbra ^{107}Ag a ^{109}Ag , ze kterých se po zachycení neutronu stávají nestabilní izotopy ^{108}Ag a ^{110}Ag podléhající β^- rozpadu s poločasem přeměny 142,9 s, respektive 24,6 s [30]. Předpokládaná energie měřených neutronů z D-D fúzní reakce je přibližně 2,5 MeV [31]. Pro zvýšení pravděpodobnosti zachycení neutronů je nutné jejich zpomalení pomocí moderátoru, který tvoří v našem případě polyethylen. Zpomalené neutrony jsou zachyceny fólií stříbra, obklopující Geiger-Müllerovu trubici detekující β^- záření.

Za zmínku stojí, že námi používaný detektor (viz Obr. 3.3) navrhl a sestrojil student ČVUT FEL Bc. Adam Pavlát v rámci své bakalářské práce v roce 2016.



Obrázek 3.3: Používaný detektor SAC

3.2.2 Scintilační detektor

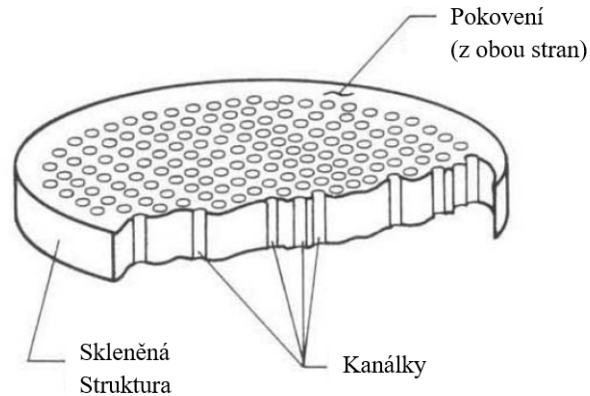
Přístroj je určený pro detekci neutronů a tvrdého rentgenového záření. Detektor se skládá ze scintilátoru a fotonásobiče připojeného k osciloskopu pro zpracování signálu. Scintilátor je látka, která při detekci ionizujícího záření začne svítit ve viditelné oblasti spektra. Jako scintilačního materiálu se využívá plastik (polyvinyl toluen). Scintilátorem emitované světlo je následně detekováno fotonásobičem, který se skládá z fotokatody, jenž na základě fotoelektrického jevu uvolní elektrony. Pro zesílení elektrického signálu jsou fotonásobiče opatřeny soustavou dynod, které vlivem sekundární emise elektronů signál zesilují.

Na rozdíl od stříbrového aktivačního detektoru lze využít metody Time of flight (ToF) neboli „doba letu“, k určení energetického spektra. Při umístění detektoru do známé vzdálenosti od zdroje neutronů je možné ze získaných signálů změřit jejich dobu letu, rychlost nebo energii. Z těchto hodnot je možné určit počet neutronů, nicméně pro určení celkového počtu generovaných neutronů je přesnější použít detektor SAC.

3.2.3 Mikrokanálová zesilovací destička

Mikrokanálová zesilovací destička, resp. microchannel plate (MCP), je přístroj určený pro detekci elektricky nabitých částic (elektronů, kladných iontů), UV záření a měkkého rentgenového záření. Detekovaná částice uvolní z katody elektron, který vstupuje do kanálku, kde dochází k jeho urychlení vlivem připojeného napětí. Elektron posléze naráží do stěny a vlivem sekundární emise uvolňuje další elektrony, čímž dochází k jejich množení. MCP je tvořeno z mnoha vedle sebe umístěných kanálků a díky tomu umožňuje detekci obrazu. Pro představu, jeden detektor o průměru 25 mm obsahuje $5,5 \times 10^5$ kanálků s průměrem 25 mikronů [33]. Hlavním materiálem pro výrobu MCP jsou skleněná vlákna, která jsou tvořena ze dvou koaxiálních komponent, a to rozpustného skleněného jádra obklopeného olovnatým sklem. Vlákna jsou poskládána do hexagonálního pole a následně roztavena pod vysokou teplotou a rozřezána na tenké desky. Následuje leštění a chemické rozpuštění skleněného jádra. Jako finální fáze výroby je ve vakuu na přední a zadní stranu desky nanášena vodivá vrstva kovu plnící funkci elektrod [33].

Námi používaný MCP detektor je rozdělen na čtyři nezávislé segmenty. Díky rozdílné délce kabelů dochází na jednotlivých segmentech ke zpoždění přibližně 10 ns, čímž jsme schopni pozorovat časově prostorový vývoj výboje. Obraz je na MCP zaznamenáván přes čtyři dírkové kamery (pinhole) fungující na principu dírkové kamery. Dostáváme tak převrácený obraz, který vyfotografujeme přiloženým fotoaparátem.



Obrázek 3.4: Micro-channel plate (MCP) [33]

3.2.4 Rogowského cívka

Rogowského cívka je senzor určený pro měření vysokofrekvenčních a velkých impulzních proudů. Rogowského cívka pracuje jako transformátor proudu. Je tvořena neferomagnetickým toroidem se vzduchovým jádrem. Toroidem prochází vodič, jímž protéká měřený proud. Cívka je s vodičem magneticky spojena. Časovou změnou protékajícího proudu dI/dt dochází ke změně intenzity magnetického pole. V cívce je vlivem Faradayova zákona indukováno napětí u_i , které podle Lenzova zákona vytváří proud působící proti vzniklé změně elektromagnetického pole. Podle vztahu (3.1) můžeme pozorovat, že mezi měřeným proudem I a v cívce indukovaným napětím je poměr vyjádřený konstantou, kterou reprezentuje vzájemná indukčnost M .

$$u_i = -M \frac{dI}{dt} \quad (3.1)$$

Vzájemnou indukčnost M určíme jako $M = \mu_0 SN$, kde μ_0 je permeabilita vzduchu, S plocha závitů cívky a N počet závitů.

Výhody Rogowského cívky:

- nedochází k saturaci, jádro cívky je vzduchové,
- dobrá linearita měření, neboť nejsou použity magnetické materiály,
- jednoduchá konstrukce,
- levné.

Kapitola 4

Experiment na PFZ-200

V rámci této práce byly provedeny experimenty pro různé konfigurace aparatury PFZ-200, při kterých byly měřeny potřebné hodnoty pro vyhodnocení kvality výstřelů. Zaznamenáván byl průběh el. proudu, jeho derivace, doba imploze a neutronový zisk pomocí čítače SAC a scintilačního detektoru. Hlavním cílem této práce je dosažení co nejvyšších neutronových zisků s co nejmenší fluktuací pro sérii výstřelů s identickými počátečními podmínkami. Experiment byl proveden pro čtyři různé geometrie anody při různých tlacích plynného deuteria v interakční komoře plazmatického fokusu. Výstřely¹ byly prováděny při tlacích: 280 Pa, 300 Pa, 320 Pa, 340 Pa a 360 Pa. Pro dosažení statistické věrohodnosti bylo pro každou konfiguraci provedeno 15 - 25 výstřelů se stejnými počátečními podmínkami. Před každým výstřelem byla náplň deuteria odčerpána na tlak v komoře okolo 10^{-2} Pa a následně napuštěna nová náplň deuteria. Při výboji dochází k drobnému odpařování materiálu z elektrod a náplň deuteria se zdá být znečištěná. Z těchto důvodů bylo pokaždé deuterium vyměněno, aby bylo dosaženo co nejvíce identických počátečních podmínek výstřelů. Pouze u experimentu se zakulacenou elektrodou bez otvoru při tlaku 280 Pa bylo uskutečněno až 5 výstřelů na jednu náplň. Jednalo se o počáteční fázi experimentu optimalizace. Tato metoda se příliš neosvědčila, a tak od ní bylo v následných měřeních upuštěno.

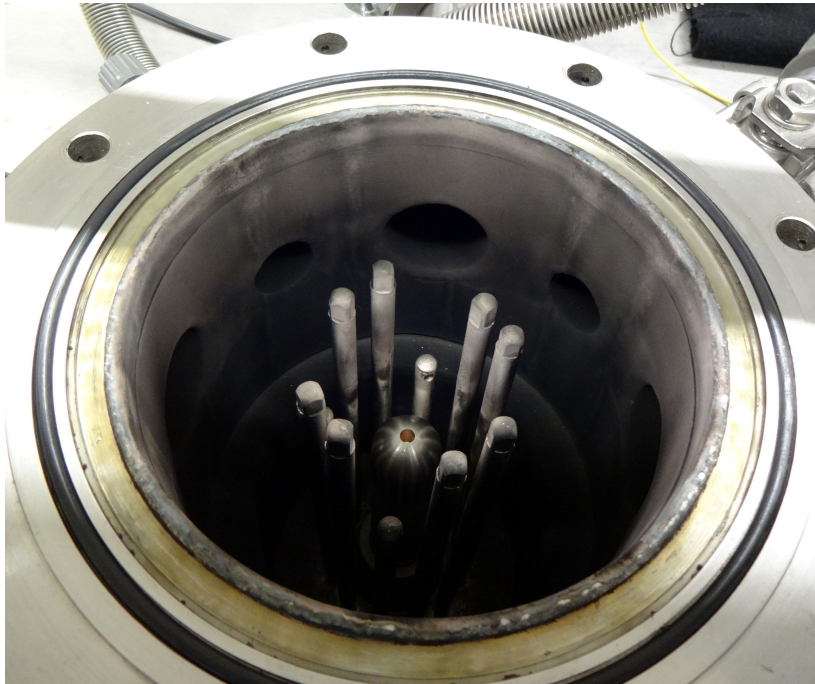


Obrázek 4.1: Zobrazené anody před (horní řada) a po experimentu (dolní řada), 1-Plný kužel, 2-Dutý kužel, 3-Zaoblená s otvorem, 4-Zaoblená hladká. Vzorky 1 a 4 před experimentem jsou zobrazeny ve 3D modelu za použití PC softwaru Autodesk Inventor 2019.

4.1 Tvary elektrod

Na obr. 4.1 vidíme modely použitých elektrod. Geometricky se jedná o dvě dvojice podobných tvarů. První dvojici tvoří klasický kužel se zkosením 45° a válec s vyfrézovaným totožným kuželem (pracovní název - dutý kužel). Druhou dvojici tvoří dvě elektrody s polokulovitým zakončením, jedna s vyvrtanou otvorem, druhá hladká bez otvoru. Zaoblená elektroda bez otvoru byla z technických důvodů použita z dřívějších experimentů, a proto je zaoblena lehce odlišným poloměrem než elektroda s otvorem. Podrobné výkresy elektrod jsou uvedeny v příloze této práce. Jak již bylo zmíněno, měněny byly pouze anody. Katody, resp. pole katod, zůstalo po celou dobu stejné.

¹Jako výstřel označujeme prováděný pinčový výboj.



Obrázek 4.2: Pohled do otevřené vakuové komory plazmatického fokusu PFZ-200 a umístění anody, obklopené polem katod.

4.2 Naměřená data

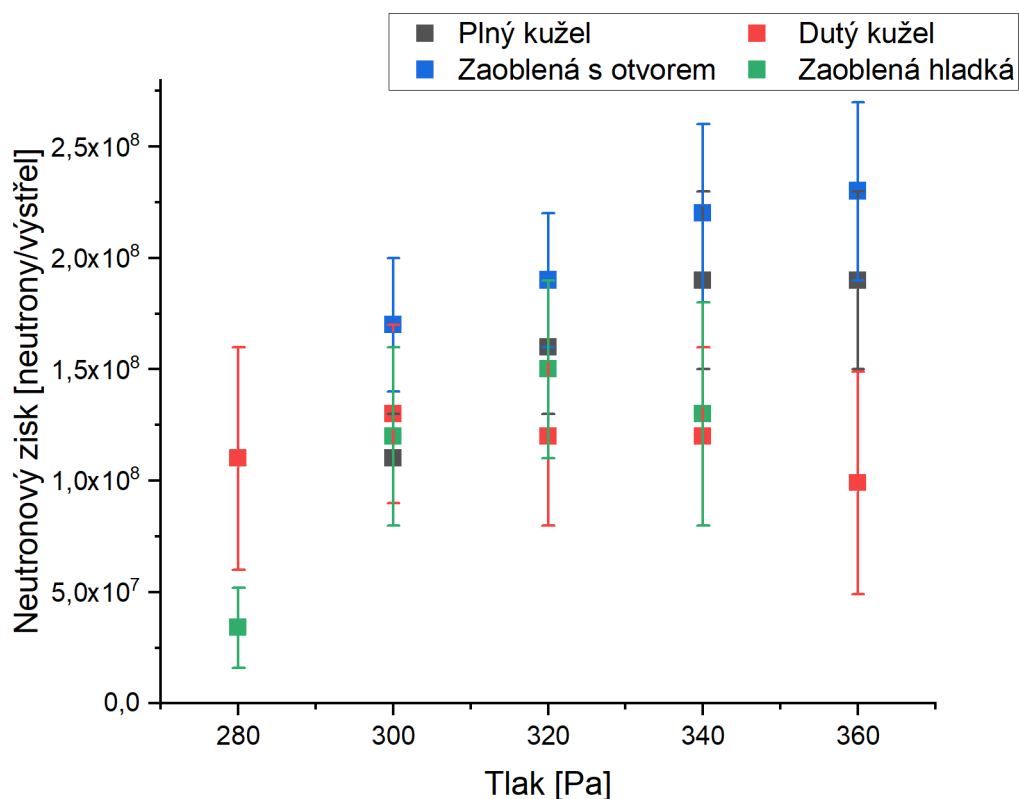
V tabulce 4.1 jsou zobrazeny průměrné naměřené hodnoty neutronového zisku včetně jejich mezivýstřelových středních kvadratických fluktuací. Kompletní naměřená data jsou uvedena v příloze této práce.

Pohlédneme-li na naměřené hodnoty neutronových zisků v grafu (obr. 4.3), vidíme, že obecně nejvyšších zisků bylo dosaženo použitím zaoblené elektrody s otvorem. S rostoucím tlakem plynného deuteria v rozmezí 300 - 360 Pa pozorujeme takřka lineární nárůst neutronů s maximem průměrného zisku okolo $2,3 \times 10^8$ a střední kvadratickou fluktuací 17 %. Takto vysokých zisků s relativně nízkou fluktuací nebylo dříve na zařízení PFZ-200 nikdy dosaženo. 17% fluktuace je důkazem toho, že PFZ-200 může být za uvedených podmínek účinným a stabilním zdrojem neutronů. Při pokračování experimentu za zvýšeného tlaku nad 360 Pa byl neutronový

Anoda	Tlak [Pa]	Průměrný zisk [Neutrony/výstřel]	Fluktuace [Neutrony/výstřel]
Plný kužel	300	$1,1 \times 10^8$	$2,0 \times 10^7$ (18 %)
	320	$1,6 \times 10^8$	$3,0 \times 10^7$ (19 %)
	340	$1,9 \times 10^8$	$4,0 \times 10^7$ (21 %)
	360	$1,9 \times 10^8$	$4,0 \times 10^7$ (21 %)
Dutý kužel	280	$1,1 \times 10^8$	$5,0 \times 10^7$ (45 %)
	300	$1,3 \times 10^8$	$4,0 \times 10^7$ (31 %)
	320	$1,2 \times 10^8$	$4,0 \times 10^7$ (33 %)
	340	$1,2 \times 10^8$	$4,0 \times 10^7$ (33 %)
Zaoblená s otvorem	300	$1,7 \times 10^8$	$3,0 \times 10^7$ (18 %)
	320	$1,9 \times 10^8$	$3,0 \times 10^7$ (16 %)
	340	$2,2 \times 10^8$	$4,0 \times 10^7$ (18 %)
	360	$2,3 \times 10^8$	$4,0 \times 10^7$ (17 %)
Zaoblená hladká	280	$3,4 \times 10^7$	$1,8 \times 10^7$ (53 %)
	300	$1,2 \times 10^8$	$4,0 \times 10^7$ (33 %)
	320	$1,5 \times 10^8$	$4,0 \times 10^7$ (27 %)
	340	$1,3 \times 10^8$	$5,0 \times 10^7$ (38 %)

Tabulka 4.1: Průměrné hodnoty a fluktuace neutronových zisků měřených stříbrem aktivovaným čítačem (SAC) při tlacích 280 až 360 Pa.

zisk výrazně menší, a tak bylo za optimální hodnotu tlaku prohlášeno 360 Pa. Porovnáním výsledků s podobnou elektrodou ovšem bez otvoru, zjišťujeme, že absence vyvrtaného otvoru má za následek snížení neutronového zisku a posunutí bodu optima na nižší hodnotu tlaku o přibližně 40 Pa, a to na 320 Pa. Maximální neutronové zisky s tímto modelem elektrody byly průměrně $1,5 \times 10^8$, což je o 35 % nižší než u elektrody s otvorem. Na obr. 4.1-4 dole vidíme, že v průběhu experimentu došlo ke vzniku drobné dírky na vrcholu anody. Obdobná deformace tvaru byla pozorována i u kuželové anody a je pravděpodobně způsobena vystavením materiálu extrémním podmínkám, kterých je dosaženo ve fázi maximální komprese Z-pinčového výboje. Z tohoto důvodu byly elektrody vyrobeny z odolného wolframu a nikoliv mědi, která se též na výrobu anod často využívá.



Obrázek 4.3: Grafická závislost neutronových zisků na jeden výstřel při tlacích 280 - 360 Pa, měřených stříbrem aktivovaným čítačem (SAC).

Při experimentech na elektrodě s kuželovitým zakončením byl zaznamenán v oblasti tlaků 300 - 340 Pa prudký lineární nárůst neutronových zisků se saturací od 340 Pa, přetrvávající až do 360 Pa s průměrnou hodnotou neutronové emise $1,9 \times 10^8$ a fluktuací 21 %. Opět se jedná o velmi slušné a stabilní výsledky. Dobré opakovatelnosti také přispívá fakt, že jednotlivé výstřely za konkrétního tlaku deuteria byly prováděny ve více dnech a statistika tak mohla být zhoršena opakovaným uváděním zařízení „do režimu“. Napříč jednotlivými dny neodcházelo k výraznému zhoršení statistiky a opakovatelnost tak byla na velmi slušné úrovni. Při pokračování experimentu nad hodnotu tlaku 360 Pa byl opět zaznamenán pokles neutronových zisků. Na obr. 4.1 si můžeme povšimnout změny vrcholu kužele této anody. Před experimentem disponovala elektroda poměrně ostrou špičkou. Ovšem po experimentu (cca 130 výstřelů) po vyjmutí z interakční komory byl na vrcholu kužele otvor rozměrově

srovnatelný s otvorem vzniklým na zaoblené hladké elektrodě. Dodejme poznatek z měření na kuželovité anodě: u této elektrody bylo potřeba uskutečnit nejvíce výstřelů (v porovnání s ostatními třemi modely), aby bylo dosaženo „zastřílení izolátoru”, neboli tzv. režimu² Po provedení několika několika zaváděcích výstřelů bylo dosaženo stálých, ale nízkých výsledků, přesto jsme se domnívali, že jsme našli režim. Nicméně neutronové zisky během přibližně 15ti výstřelů vzrostly takřka na dvojnásobek a nadále se držely na této nové hodnotě. Pro jistotu byl experiment další dny opakován a zisky už neklesly na původní hodnotu, a proto byla původní data z měření označena za data, kdy zařízení nebylo v režimu a do statistického zpracování nebyla zařazena. S největší pravděpodobností se tak stalo vlivem uvedení zařízení do provozu po delší dvou-měsíční nečinnosti, nikoliv díky tvaru elektrody.

Překvapivé výsledky z hlediska neutronové emise přinesla anoda označená jako dutý kužel. Na základě provedení počítačové simulace v LSP kódu [9] byly u této elektrody očekávány nejvyšší neutronové zisky, avšak k tomu nedošlo. Tato elektroda byla jako jediná proměřena v celém rozsahu tlaků od 280 Pa do 360 Pa a naměřené hodnoty byly ve většině případů přibližně stejné, a to $(1 - 1,3) \times 10^8$. Statistická fluktuace se pohybovala kolem 33 %, při hraničních tlacích měřeného intervalu (280 Pa a 360 Pa) dosahovala až 50 %. Musíme konstatovat, že tato elektroda se pro účely neutronového zisku příliš neosvědčila a zůstala za očekáváním v porovnání s ostatními tvary elektrod.

Neutronové zisky byly také přepočítávány ze signálů scintilačních detektorů. Jednalo se o podpurné měření k potvrzení věrohodnosti hodnot získaných detektorem SAC. V tab. 4.2 uvádíme pouze hodnoty ze scintilačního detektoru ToF-B. Pozitivním závěrem těchto měření je, že výsledky obou metod měření se neliší o více jak 10 %. Pouze při použití zakulacené hladké anody a tlaku 280 Pa je odchylka znatelná. Důvodem bylo nevhodné nastavení napětí na fotonásobiči detektoru a nepřesnost neutronového přepočtu ze získaných signálů.

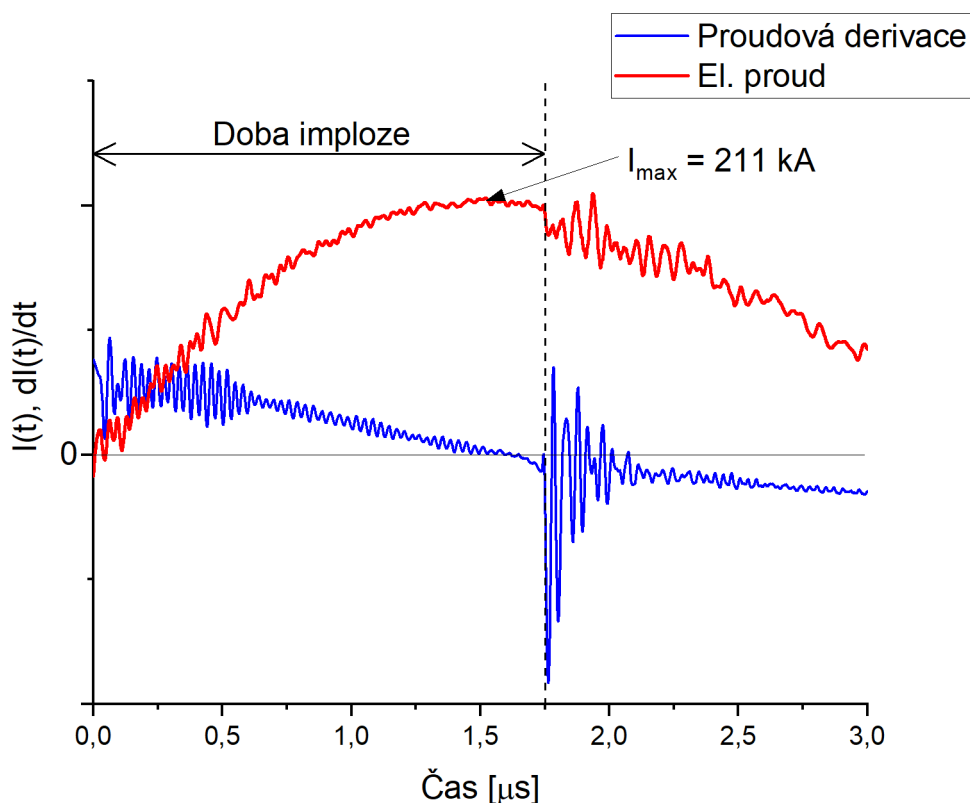
²Zařízení typu plazmatický fokus, jako je PFZ-200, se na počátku každého experimentálního dne musí dostat do tzv. „režimu”, kdy je vytvořena kvalitní proudová vrstva průrazem na izolátu. To je tehdy, když jsou odčerpány nežádoucí molekuly vzduchu ze stěn vakuové komory a elektrodového systému. Toho je docíleno několika (3 - 6) výstřely před začátkem vlastních experimentů. Dostane-li se plazmatický fokus do „režimu”, neutronový zisk vzroste o jeden i více řádů.

Anoda	Tlak [Pa]	Průměrný zisk [Neutrony/výstřel]	Fluktuace [Neutrony/výstřel]
Plný kužel	300	$1,0 \times 10^8$	3×10^7 (30 %)
	320	$1,6 \times 10^8$	3×10^7 (19 %)
	340	$1,9 \times 10^8$	3×10^7 (16 %)
	360	$1,9 \times 10^8$	4×10^7 (21 %)
Dutý kužel	280	$1,1 \times 10^8$	4×10^7 (36 %)
	300	$1,3 \times 10^8$	4×10^7 (31 %)
	320	$1,2 \times 10^8$	4×10^7 (33 %)
	340	$1,2 \times 10^8$	4×10^7 (33 %)
Zaoblená s otvorem	300	$1,7 \times 10^8$	3×10^7 (18 %)
	320	$1,8 \times 10^8$	3×10^7 (17 %)
	340	$2,1 \times 10^8$	3×10^7 (14 %)
	360	$2,2 \times 10^8$	3×10^7 (14 %)
Zaoblená hladká	300	$2,5 \times 10^8$	9×10^7 (36 %)
	320	$1,7 \times 10^8$	4×10^7 (24 %)
	340	$1,3 \times 10^8$	5×10^7 (38 %)

Tabulka 4.2: Průměrné hodnoty a fluktuace neutronových zisků měřených scintilačním detektorem ToF-B při tlacích 280 až 360 Pa.

V průběhu experimentu byl samozřejmě měřen průběh elektrického proudu a zaznamenáváno jeho maximum před fází maximální komprese. Pro drtivou většinu výstřelů el. proud dosahoval svého maxima průměrně na hodnotě okolo 210 kA. Při zjištěné znatelně nižší hodnotě (přibližně o 10 kA) byl již vývoj ovlivněn okolními příčinami a byl ze statistiky vyloučen. Nejčastěji tak docházelo z důvodu opožděného sepnutí jednoho ze čtyř paralelně zapojených jiskřišť, obvykle v časovém horizontu 0,5 - 1 μ s. Nesoudobost sepnutí jiskřišť byla bohužel častým jevem. Po uskutečnění více jak 500ti výstřelů v rámci tohoto projektu se jedná o nejzávažnější technickou nedokonalost aparatury. Nicméně jde o problém technický, nikoliv fyzikální, a proto data tvořící zpracovanou statistiku obsahují pouze technicky dobře provedené výstřely bez újmy na fyzikální podstatě.

V tabulce (4.3) je uveden přehled změřených dob imploze provedených výstřelů při experimentu. Dobou imploze v této práci rozumíme čas růstu elektrického proudu od nuly až do fáze maximální komprese, tedy do okamžiku prudkého snížení derivace proudu, jak je ukázáno na obr. 4.4.



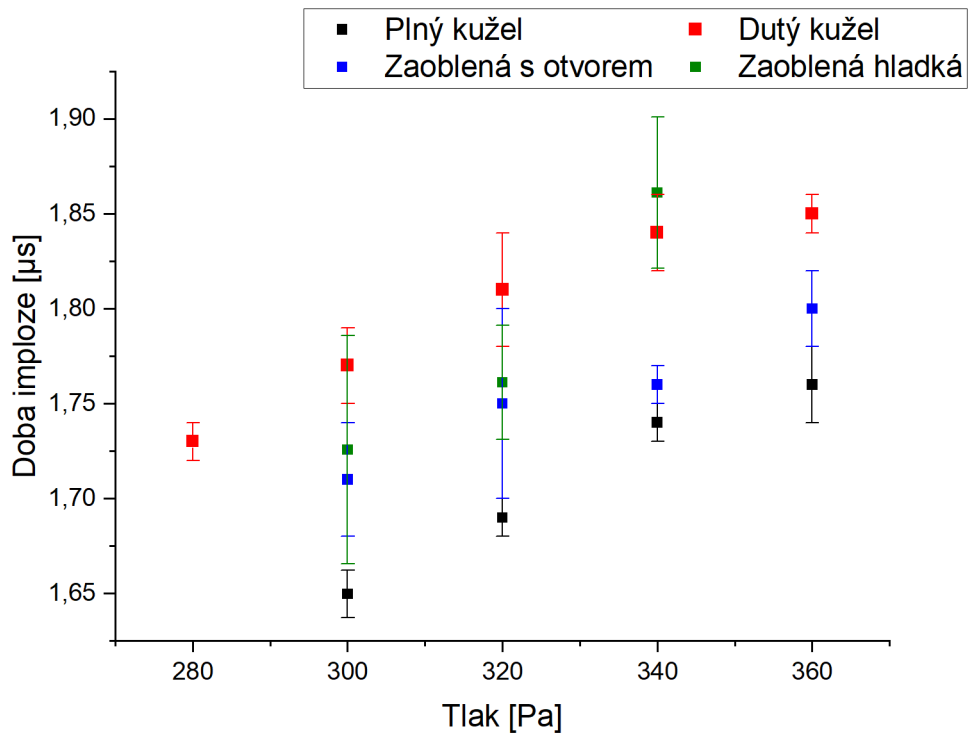
Obrázek 4.4: Časový průběh el. proudu a jeho derivace.

Z naměřených dat (tab. 4.3 a grafu obr. 4.5) je patrné, že nejnižší doby imploze bylo dosaženo u anody ve tvaru kužele. Absolutně nejnižší časy byly naměřeny u této elektrody při tlaku 300 Pa. Následně s rostoucím tlakem docházelo k růstu doby imploze přibližně o 30-40 ns/20 Pa. Podobně nízké, avšak mírně vyšší hodnoty, byly naměřeny u zaoblené anody s otvorem. Obě tyto elektrody s nejnižšími dobami imploze dosahovaly nejvyšších neutronových zisků. Na základě tohoto měření se můžeme domnívat, že nižší časy imploze vedou k dynamičtějším výbojům a vyšším neutronovým ziskům. Na druhou stranu doba imploze nebude jediným faktorem ovlivňujícím neutronové zisky, neboť nejkratší doba imploze byla zaznamenána na

Anoda	Tlak [Pa]	Doba imploze [μs]	Fluktuace [μs]
Plný kužel	300	1,65	0,01 (1 %)
	320	1,69	0,01 (1 %)
	340	1,74	0,01 (1 %)
	360	1,76	0,02 (1 %)
Dutý kužel	280	1,73	0,01 (1 %)
	300	1,77	0,02 (1 %)
	320	1,81	0,03 (2 %)
	340	1,84	0,02 (1 %)
	360	1,85	0,01 (1 %)
Zaoblená s otvorem	300	1,71	0,03 (2 %)
	320	1,75	0,05 (3 %)
	340	1,76	0,01 (1 %)
	360	1,80	0,02 (1 %)
Zaoblená hladká	280	1,81	0,09 (5 %)
	300	1,73	0,06 (3 %)
	320	1,76	0,03 (2 %)
	340	1,86	0,04 (2 %)

Tabulka 4.3: Naměřené průměrné hodnoty doby imploze se svými fluktuacemi při různém tlaku deuteria.

anodě s druhým nejlepším, nikoliv nejlepším neutronovým ziskem. Anoda s dutým kuželem se pohybuje v grafu 4.5 nejvýše (1,73 - 1,86 μs). Tyto hodnoty zřejmě byly ovlivněny inverzním zkosením, tedy skutečností, že okraje byly vyšší než vnitřek anody. Proudová vrstva musela urazit delší dráhu do fáze maximální komprese než u ostatních elektrod, kde byly okraje na obvodu sníženy. Ohledně fluktuací doby imploze si všechny elektrody vedly výborně a fluktuace nejčastěji byla 1 %, maximálně 3 % v ojedinělých případech.



Obrázek 4.5: Grafické znázornění naměřených dob imploze při různém tlaku deuteria. V grafu je vyznačena průměrná hodnota doby imploze a její fluktuační.

4.2.1 Výpočet neutronového zisku z detektoru SAC

Detektor byl umístěn ve vzdálenosti $r = 37$ cm od osy plazmatického fokusu. Zaznamenávaly se načtené impulzy do jedné minuty od výstřelu (pinče). Tato hodnota se následně podle vztahu (4.1) přepočítala na celkový neutronový zisk.

$$Y_n = \Phi \cdot 4\pi r^2 = (C - C_B) \cdot 4,69 \cdot 4\pi r^2, \quad (4.1)$$

kde Φ je neutronový tok [počet neutronů·cm⁻²], C je počet impulzů po jedné minutě, C_B jsou impulzy způsobené radiačním pozadím. Konstanta 4,69 je určena kalibrací detektoru [30].

4.2.2 Výpočet neutronového zisku ze scintilačního detektoru

Náboj Q přenesený fotonásobičem, způsobený neutrony je dán

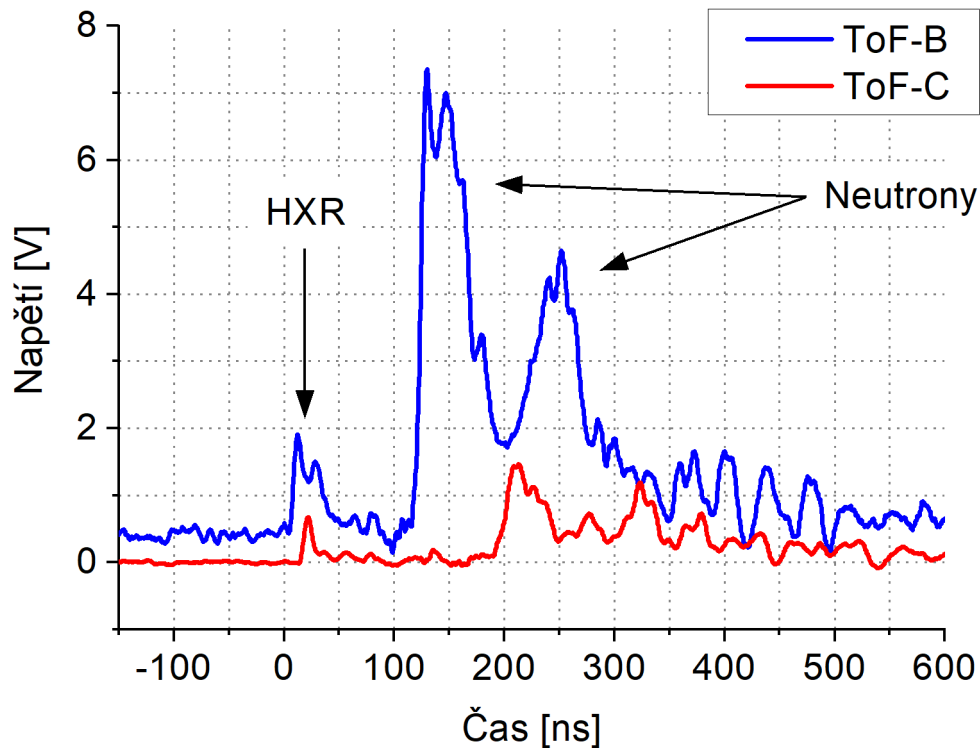
$$dQ = Idt, \quad (4.2)$$

$$Q = \int_{t_1}^{t_2} Idt = \int_{t_1}^{t_2} \frac{u(t)}{R} dt, \quad (4.3)$$

kde $u(t)$ je napětí měřené na osciloskopu, $R = 50 \Omega$ je charakteristická impedance měřicího vedení a vstupu osciloskopu. Dále platí poměr mezi přeneseným nábojem Q a neutronovým ziskem jako $1 \text{ nC} \approx 8 \times 10^6$ neutronů [34]. Uvedený poměr/převod je platný pouze pro napájení detektoru napětím 1,4 kV. Při jiných hodnotách napájení je nutné provést novou kalibraci, což měření značně zkomplikuje. Pro ilustraci je na obr. 4.6 uveden zaznamenaný průběh napětí $u(t)$ ze scintilačních detektorů ToF-B a ToF-C při výstřelu 18110208.

Na obr. 4.6 můžeme zprvu (v čase krátce po 0 ns) pozorovat drobný impulz. V tuto dobu bylo detekováno tvrdé rentgenové záření (HXR). Později (120 ns) přichází první neutronový signál z bližšího detektoru B a trvá přibližně do doby 190 ns. Téměř okamžitě následuje druhý neutronový impulz, trvající až do času 270 ns. Na vzdálenějším detektoru C zaznamenáváme neutronový impulz později (180 ns) a s nižší amplitudou než detektorem B. Druhý neutronový impulz detektor C zaznamenává, avšak s nízkou amplitudou těžko rozpoznatelnou od okolního rušení signálu. Ze signálů na obr. 4.6 jsme schopni pomocí již zmíněné metody „Time-of-light“ určit energii detekovaných neutronů. Scintilační detektor ToF-B je umístěn ve vzdálenosti 2,69 m od osy z plazmatického fokusu PFZ-200. Z grafu obr. 4.6 pozorujeme neutrony v čase 123 ns. Pomocí jednoduchého vztahu pro výpočet velikosti průměrné rychlosti neutronů $v = l/t$, kde l představuje vzdálenost detektoru od zdroje a t dobu letu částic. Dosazením do tohoto vztahu získáváme rychlost $v = 2,2 \times 10^7$ m/s. Tato rychlost je přibližně 7 % rychlosti světla, a proto nemusíme uvažovat relativistické chování částic. energii sledovaných neutronů určíme ze známého vztahu (4.4) pro výpočet kinetické energie E_k , kde za m_n dosadíme hmotnost neutronu jako $m_n = 1,675 \times 10^{-27}$ kg.

$$E_k = \frac{1}{2} m_n v^2, [J] \quad (4.4)$$



Obrázek 4.6: Signál ze scintilačních detektorů ToF-B a ToF-C výstřelu 18110208. V grafu je vyznačena oblast detekce tvrdého rentgenového záření (HXR) a neutronů.

Vypočtenou energii v Joulech převedeme na elektronvolty pomocí (4.5), kde $e = 1,602 \times 10^{-19} \text{ Q}$ je elementární náboj.

$$1[J] = \frac{1}{e}[eV] \quad (4.5)$$

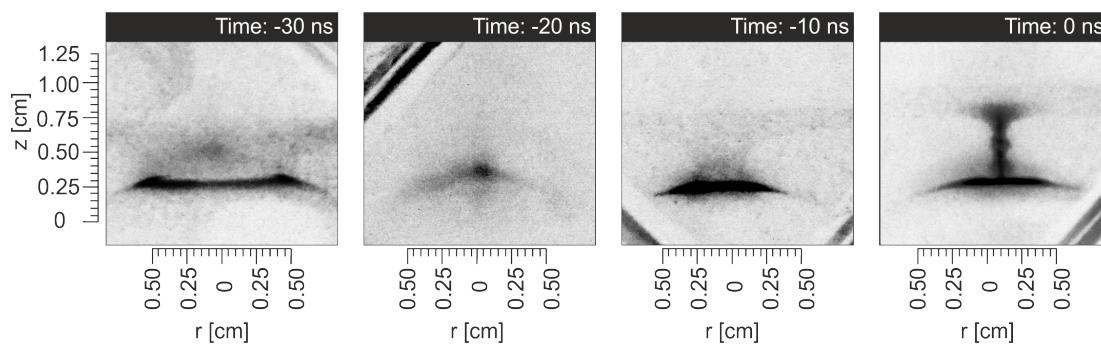
Po převedení na eV získáváme energii detekovaných neutronů $E_k = 2,49 \text{ MeV}$. Predikovaná energie neutronů vzniklých D-D fúzní reakcí (1.5) je 2,45 MeV.

4.2.3 Vizualizace plazmatu pomocí MCP

V průběhu celého experimentu bylo implodující plazma zaznamenáváno dírkovou kamerou s mikrokanálovou destičkou (MCP). Obr. 4.7 zobrazuje výstřel č. 18110208. V tomto obrázku ukazujeme čtyři po sobě následující fáze s 10ns zpožděním. Fáze maximální imploze plazmatu je pozorována ve čtvrtém snímku obr. 4.7, kde můžeme pozorovat dvě výrazné komprese výboje doprovázené dvěma neutronovými impulzy

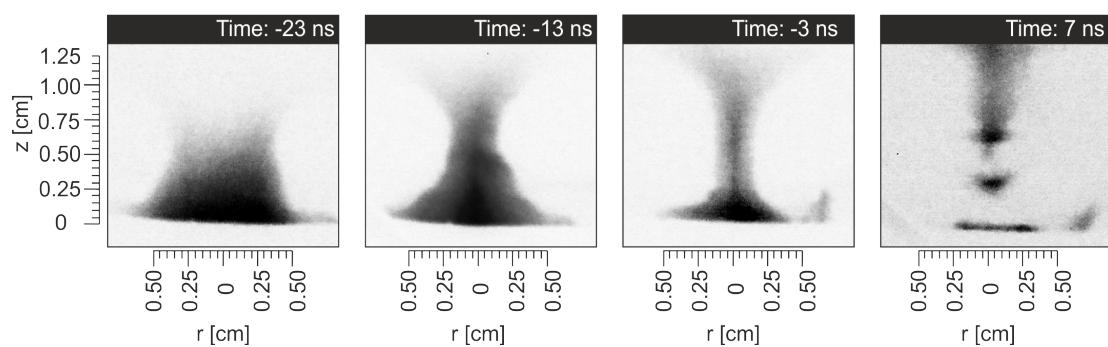
ze signálů scintilačního detektoru ToF-B na obr. 4.6.

Z obr. 4.7 můžeme vypočítat implozní rychlost v_{impl} jako rozdíl poloměrů výboje mezi dvěma snímky. Použijeme první a třetí snímek zleva v časech -30 a -10 ns. Časový rozdíl zde činí $\Delta t = 20$ ns. Rozdíl poloměrů po uvážení měřítka zobrazení a při lepším přiblížení snímků vychází jako $\Delta r = 0,26$ cm. Vypočtená implozní rychlost vychází $v_{impl} = 1,3 \times 10^5$ m/s. Dosazením do (4.4) a převodem na eV pomocí (4.5), získáváme teplotu iontů o velikosti $T_i = 176$ eV.



Obrázek 4.7: vizualizace výboje č.18110208 ve fázi maximální komprese.

Na obr. 4.8 je vyobrazena postupná imploze výboje. Zde se jedná o složení dvou výbojů s velice podobným průběhem proudu a prakticky stejnou dobou imploze. První dva snímky zleva jsou z výboje 19040304 a druhé dva z výstřelu 19040306. V průběhu experimentu jsme se potýkali s technickými potížemi na detektoru MCP a nedařilo se zachytit výboj všemi čtyřmi okny najednou. Z toho důvodu je na obr. 4.8 složení ze dvou výstřelů, kdy dvojice snímků na sebe volně navazují. Pokusme se i zde zjistit implozní rychlost v_{impl} a teplotu iontů T_i alespoň pro výstřel č. 19040304, který je reprezentován dvojicí snímků zleva v časech -23 a -13 ns. Časový rozdíl zde činí $\Delta t = 10$ ns a rozdíl poloměrů $\Delta r = 0,2$ cm. Implozní rychlost pak je $v_{impl} = 2 \times 10^5$ m/s a teplota iontů $T_i = 417$ eV.



Obrázek 4.8: Vizualizace jako složení dvou výstřelů č.19040304 a 19040306 ve fázi maximální komprese.

Kapitola 5

Závěr

V rámci této práce jsme pojednali o teorii Z-pinčových výbojů a jejich konfiguracích. Dále jsme popsali zařízení PFZ-200 FEL ČVUT, na kterém probíhal tento experiment. Dále byly experimentálně posouzeny různé konfigurace zátěže Z-pinčového zařízení PFZ-200 typu plazmatický fokus. Zátěž byla ovlivňována dvěma hlavními aspekty: geometrií anody a počátečním tlakem plynného deuteria v interakční komoře plazmatického fokusu. Ostatní počáteční podmínky výstřelů byly v průběhu experimentu zachovávány a nedocházelo k jejich upravení. Samotný experiment proběhl v časovém horizontu dvaceti experimentálních dní a bylo provedeno přes 500 výstřelů. Takovému zatížení nebyla aparatura PFZ-200 nikdy v minulosti vystavena.

Na základě statistického zpracování experimentálních dat lze učinit níže uvedené závěry. Bylo provedeno experimentální srovnání pro čtyři různé geometrie elektrod při tlacích deuteria v rozmezí 280 Pa až 360 Pa z hlediska neutronového zisku a dynamiky Z-pinčového výboje a nalezeno optimum.

Nejvyššího a nejlépe opakovatelného zisku bylo dosaženo na zaoblené anodě s otvorem při tlaku plynného deuteria 360 Pa. Průměrný neutronový zisk činil $(2,3 \pm 0,4) \times 10^8$ se střední kvadratickou fluktuací 17 %. Maximum měřeného proudu ve výboji při tlaku 360 Pa bylo 211 kA. Fáze pinče bylo dosaženo za dobu $(1,80 \pm 0,02) \mu\text{s}$. Při této konfiguraci bylo dosaženo doposud rekordního neutronového zisku naměřeného na plazmatickém fokusu PFZ-200 o hodnotě 3×10^8 . K velkému úspěchu se při opakování experimentu povedlo tohoto rekordu dosáhnout opakovaně.

Literatura

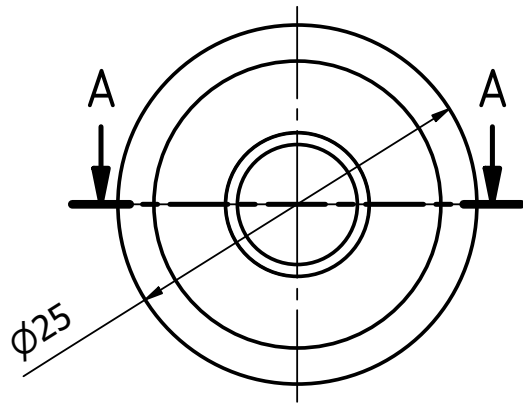
- [1] Jones, B., Jennings, C. A., Lamppa, D. C., Hansen, S. B., Harvey-Thompson, A. J., Ampleford, D. J., ... Apruzese, J. P.: *A Renewed Capability for Gas Puff Science on Sandia's Z Machine*. IEEE Transactions on Plasma Science, ročník 42, č. 5, s 1145–1152, 2014.
- [2] Mitchell, I. H., Bayley, J. M., Chittenden, J. P., Worley, J. F., Dangor, A. E., Haines, M. G., Choi, P.: *A high impedance mega-ampere generator for fiber z-pinch experiments*. Review of Scientific Instruments, ročník 67, č. 4, s 1533–1541. doi:10.1063/1.1146884, 1996.
- [3] Al'bikov, Z. A., Velikhov, E. P., Veretennikov, A. I., Glukhikh, V. A., Grabovskii, E. V., Gryaznov, G. M., ... Yampol'skii, I. R.: *Angara-5-1 experimental complex*. Soviet Atomic Energy, 68(1), 34–45. doi:10.1007/bf02069720, 1990.
- [4] Bender, H. A.: *Site-directed research and development fy 2014 annual report*. duben 2015.
- [5] Beresnyak, A., Giuliani, J. L., Jackson, S. L., Richardson, A. S., Swanekamp, S., Schumer, J., ... Mosher, D.: *Simulations of a Dense Plasma Focus on a High-Impedance Generator*. IEEE Transactions on Plasma Science, 1–5. doi:10.1109/tps.2018.2865188, 2018.
- [6] Scholz M.: *PLASMA-FOCUS AND CONTROLLED NUCLEAR FUSION*. Kraków: Institute of Nuclear Physics PAN, 2014. ISBN 978-83-63542-56-6.
- [7] Huttener, E.: *The bomb without the boom*. Los Alamos Science and Technology Magazine, s 18-25, říjen 2017.

- [8] Gomez, J. A., Koehler, P. E., Cutler, T. E., DeYoung, A., Goorley, J. T., Hutchinson, J. D., McKenzie, G., Morgan, G. L., Mosby, S. M., Myers, W. L., Rundberg, R. S., Yuan V. W. *Results of Three Neutron Diagnosed Subcritical Experiments*, Nuclear Science and Engineering, 2018.
- [9] Link, A., Halvorson, C., Hagen, E. C., Rose, D. V., Welch, D. R., Schmidt, A. (Particle-in-cell *Modeling for MJ scale dense plasma focus with varied anode shape*. 2014 doi:10.1063/1.4904768
- [10] Cikhardt J.: *High Energy Density Plasma Diagnostics Using Neutron and Gamma De-tectors*. Doctoral thesis, ČVUT FEL, Praha, 2017.
- [11] Kubeš P.: *Impulsní silnoproudé výboje a jejich diagnostika*. Skriptum FEL ČVUT, Praha, 2004
- [12] Haines, M. G.: *A review of the dense Z-pinch*. Plasma Physics and Controlled Fusion, Ročník 53, č. 9, 2011
- [13] Robert W. Conn *Nuclear fusion*. <https://www.britannica.com/science/nuclear-fusion>, Duben 2019
- [14] *KIKUCHI M.FUSION PHYSICS*. International Atomic Energy Agency, Vídeň 2012. ISBN 978-92-0-130410-0.
- [15] Klír D.: *The Study of a Fibre Z-Pinch*. Doctoral thesis, ČVUT FEL, Praha, 2005.
- [16] Giuliani, J. L., Commisso R. J.: *A Review of the Gas-Puff Z-Pinch as an X-Ray and Neutron Source*. IEEE Transactions on Plasma Science, Ročník. 43, č.8, s 2385-2453, 2015
- [17] Shiloh J. H.; *Doctoral thesis*, University of California, Irvine, 1978.
- [18] Spielman, R.B., Baldwin, G.T., and Cooper, G.: *D-D fusion experiments using fast Z pinches*. Sandia National Laboratorie, březem 1998 doi:10.2172/661646.
- [19] Mather J. W.: *Formation of a High-Density Deuterium Plasma Focus Physics of Fluids* (1958-1988), ročník 8, č. 2, 1965: s. 366-377.

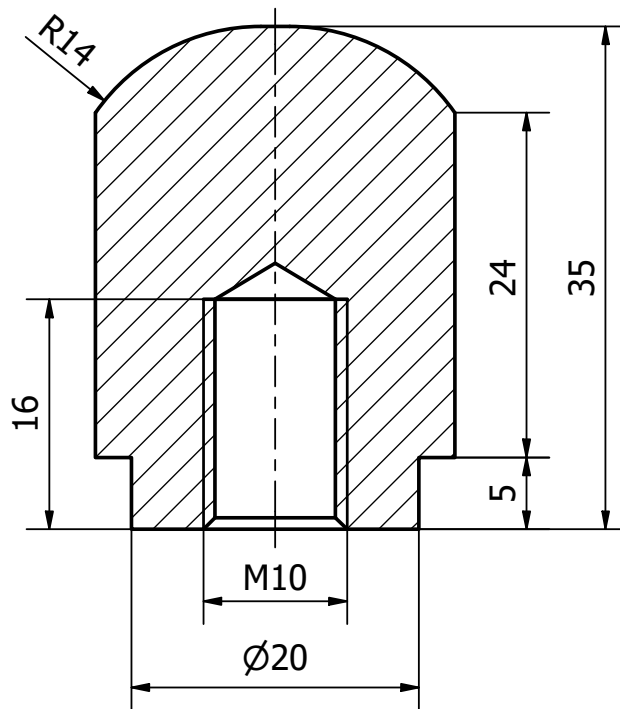
- [20] Filippov, N. V., Filippova, T. I., Karakin, M. A., Krauz, V. I., Tykshaev, V. P., Vinogradov, V. P., Brzosko, J. S.: *Filippov type plasma focus as intense source of hard X-rays ($E/\text{sub } x/50 \text{ keV}$)*. IEEE Transactions on Plasma Science, ročník 24 č. 4, 1215–1223.
- [21] Nikulin, V.; Polukhin, S.: *Saturation of the neutron yield from megajoule plasma focus facilities*. Plasma Physics Reports, ročník 33, č. 4, 2007: s. 271-277
- [22] Hendricks, C. D.; Willenborg, D. L.: *Design and Construction of a Dense Plasma Focus Device*. 1976.
- [23] Mankowski, J., Kristiansen, M.: *A review of short pulse generator technology*. IEEE Transactions on Plasma Science, ročník 28 č. 1, 102–108.
- [24] M. Kristiansen, J. Francis, and A. Guenther, *Some Basic Concepts and Fundamentals of H.V. Generators*. AF Pulsed Power Lecture Series. Lubbock, TX: Texas Tech Univ., 1981.
- [25] Klir, D., Shishlov, A. V., Kokshenev, V. A., Kubes, P., Rezac, K., Buryskova, S., ... Wagner, R.: *Acceleration of protons and deuterons up to 35 MeV and generation of 1013 neutrons in a megaampere deuterium gas-puff z-pinch*. Plasma Physics and Controlled Fusion, ročník 61, č. 1. doi:10.1088/1361-6587/aadc99
- [26] Filippov, N.V., Filippova, T.I., Khutoretskaia, I.V., Mialton, V.V. a Vinogradov, V.P.. *Megajoule scale plasma focus as e-cient x-ray source*. Physics Letters A, ročník 211, č. 3, 1996.
- [27] Krauz, V. I. Mitrofanov, K. N. Scholz, M. Myalton, V. V. Paduch, M. Grabovskii, E. V. Karpinski, L. Koidan, V. S. Vinogradov, V. P. Vinogradova, Y. V. Zielinska, E. Treść / Zawartość *Magnetic field measurements on PF - 1000 and PF - 3 facilities: current sheath structure and neutron scaling* Nukleonika, ročník 57, č. 2. 2011.
- [28] Scholz, M., Miklaszewski, R., Paduch, M., Sadowski, M. J., Szydowski, A., a Tomaszewski, K.: *Preliminary neutron experiments with the PF-1000*

- plasma-focus facility*. IEEE Transactions on Plasma Science, ročník 30, č. 2, s 476–481, 2002.
- [29] Moses, E. I.: *Ignition on the National Ignition Facility: a path towards inertial fusion energy*. Nuclear Fusion, ročník 49, č. 10, doi:10.1088/0029-5515/49/10/104022, 2009. 2014.
- [30] Hladík D.: *Měření neutronových zisků pomocí stříbrového aktivačního čítače*. Bakalářská práce, ČVUT FEL, Praha 2017
- [31] *Plasma science and technology for emerging economies*. New York, NY: Springer Berlin Heidelberg, 2017. ISBN 978-981-10-4216-4.
- [32] Pavlát A.: *Detekce fúzních neutronů*. Bakalářská práce, ČVUT FEL, Praha 2017
- [33] Wiza, J. L.: *Microchannel plate detectors*. Nuclear Instruments and Methods, ročník 162, č. 1, 1979: s. 587-601.
- [34] Klir, D., Kravarik, J., Kubes, P., Rezac, K., Litseva, E., Tomaszewski, K., ... Scholz, M.: *Fusion neutron detector for time-of-flight measurements in z-pinch and plasma focus experiments*. Review of Scientific Instruments, ročník 82 č. 3, 2011

Příloha A - Výkresy elektrod

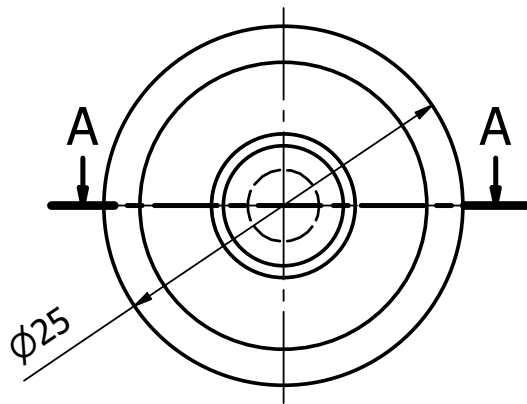


A-A (2 : 1)

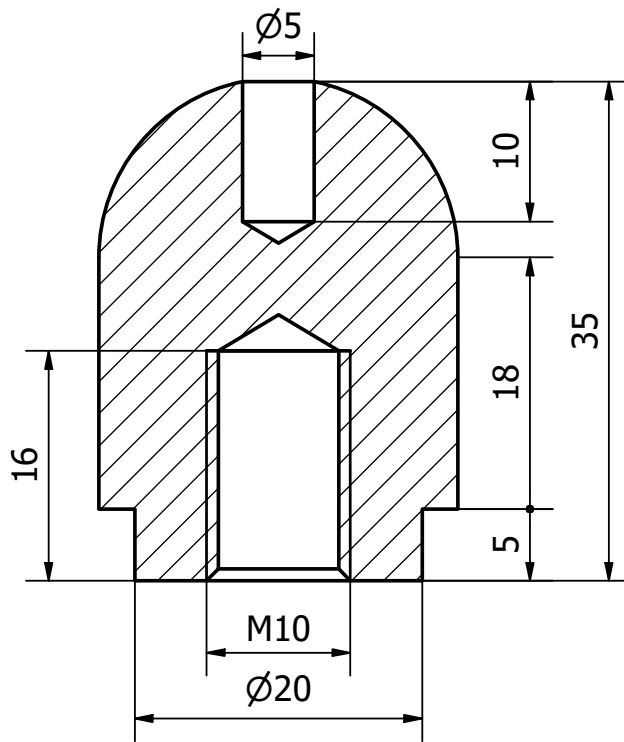


<table border="1"> <tr> <td> <table border="1"> <tr> <td>Vypracoval</td> <td>Jan NOVOTNÝ</td> </tr> <tr> <td>Email</td> <td>jenda.novotny@fel.cvut.cz</td> </tr> <tr> <td>Tel.</td> <td>+420 721 235 623</td> </tr> </table> </td> <td colspan="2" rowspan="2"> <p>Anoda-zaoblená hladká</p> </td> <td rowspan="2"> <p>1</p> </td> </tr> <tr> <td colspan="2"> <p>Měřítko: 2:1</p> </td> <td> <p>A4</p> </td> </tr> </table>	<table border="1"> <tr> <td>Vypracoval</td> <td>Jan NOVOTNÝ</td> </tr> <tr> <td>Email</td> <td>jenda.novotny@fel.cvut.cz</td> </tr> <tr> <td>Tel.</td> <td>+420 721 235 623</td> </tr> </table>	Vypracoval	Jan NOVOTNÝ	Email	jenda.novotny@fel.cvut.cz	Tel.	+420 721 235 623	<p>Anoda-zaoblená hladká</p>		<p>1</p>	<p>Měřítko: 2:1</p>		<p>A4</p>	<p>Materiál: Wolfram</p>	
<table border="1"> <tr> <td>Vypracoval</td> <td>Jan NOVOTNÝ</td> </tr> <tr> <td>Email</td> <td>jenda.novotny@fel.cvut.cz</td> </tr> <tr> <td>Tel.</td> <td>+420 721 235 623</td> </tr> </table>	Vypracoval	Jan NOVOTNÝ	Email	jenda.novotny@fel.cvut.cz	Tel.	+420 721 235 623	<p>Anoda-zaoblená hladká</p>				<p>1</p>				
Vypracoval	Jan NOVOTNÝ														
Email	jenda.novotny@fel.cvut.cz														
Tel.	+420 721 235 623														
<p>Měřítko: 2:1</p>		<p>A4</p>													

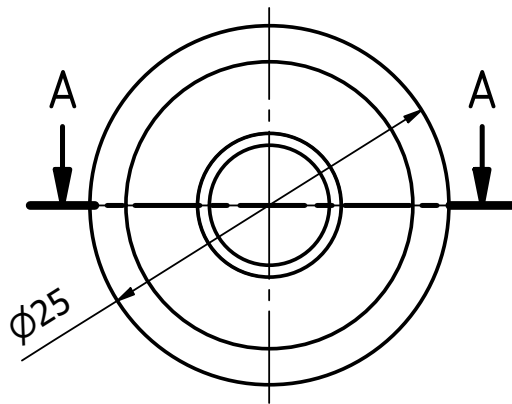




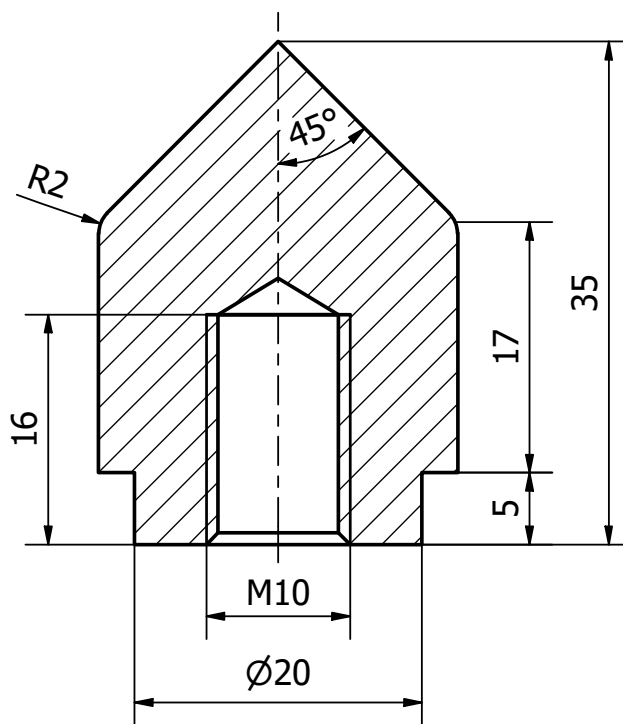
A-A (2 : 1)



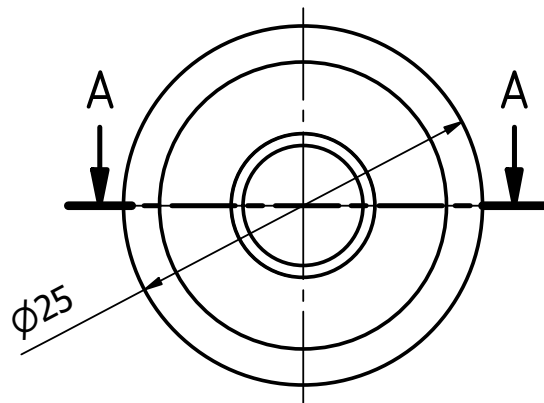
Vypracoval	Jan NOVOTNÝ	Anoda - Zaoblená dutá	
Email	jenda.novotny@fel.cvut.cz		
Tel.	+420 721 235 623		
Měřítko: 2:1		Materiál: Wolfram	1
			A4



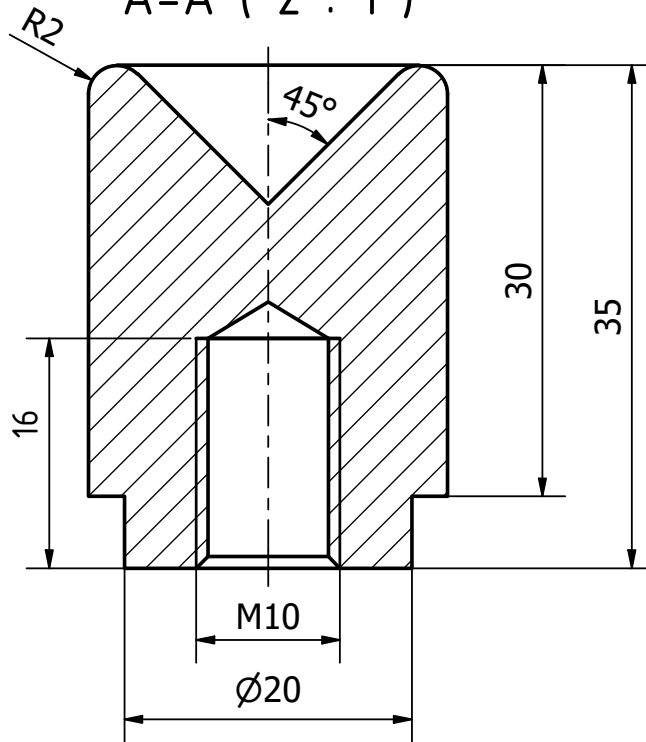
A-A (2 : 1)



Vypracoval	Jan NOVOTNÝ	Anoda - kužel	
Email	jenda.novotny@fel.cvut.cz		
Tel.	+420 721 235 623		
Měřítko: 2:1		Materiál: Wolfram	1
			A4



A-A (2 : 1)



Vypracoval	Jan NOVOTNÝ	Anoda - Dutý kužel	
Email	jenda.novotny@fel.cvut.cz		
Tel.	+420 721 235 623		
Měřítko: 2:1		Materiál: Wolfram	1
			A4

Příloha B - Naměřená data

Výstřel	Čas	Výstřel na náplň	Tlak [Pa]	Imax [kA]	SAC po 1 min [-]	Neutrony SAC	Doba imploze [μ s]
18101205	9:45	1.	280	211	388	2,57E+07	1,86
18101207	9:54	3.	268	211	482	3,32E+07	1,83
18101208	12:01	1.	286	211	215	1,17E+07	1,90
18101209	12:05	2.	265	211	450	3,07E+07	1,82
18101211	12:20	1.	281	211	220	1,21E+07	1,86
18101212	12:25	2.	269	211	464	3,18E+07	1,89
18101213	12:29	3.	275	211	422	2,84E+07	1,84
18101214	12:34	4.	281	211	436	2,95E+07	1,93
18101215	12:38	5.	287	211	320	2,02E+07	1,94
18101217	12:56	1.	281	211	550	3,87E+07	1,85
18101218	13:00	2.	274	211	701	5,09E+07	1,89
18101219	13:04	3.	280	211	404	2,69E+07	1,96
18101221	13:11	5.	293	211	295	1,82E+07	1,69
18101222	13:30	1.	281	211	1222	9,29E+07	1,70
18101223	13:34	2.	298	211	546	3,84E+07	1,72
18101227	14:02	1.	281	211	805	5,93E+07	1,64
18101228	14:06	2.	289	211	418	2,81E+07	1,67
18101229	14:10	3.	291	211	457	3,12E+07	1,70
18101230	14:14	4.	294	211	579	4,11E+07	1,74

Tabulka 5.1: Naměřené hodnoty maximálního proudu, neutronového zisku a doby náběhu do pinče pro výstřely při počátečním tlaku náplně 280 Pa.

Výstřel	Čas	Tlak [Pa]	Imax [kA]	SAC pu 1 min [-]	Neutrony SAC	Neutrony ToF-B	Doba imploze [μs]
18101904	9:47	300	204,7	655	4,72E+07	1,10E+08	1,70
18101905	10:07	300	204,7	949	7,09E+07	0,00E+00	1,68
18101906	10:09	300	198,3	1710	1,32E+08	2,85E+08	1,70
18101907	10:23	300	206,8	1205	9,16E+07	2,08E+08	1,67
18101908	10:32	300	206,8	1968	1,53E+08	3,31E+08	1,69
18101909	10:42	300	206,8	1334	1,02E+08	2,83E+08	1,71
18101911	12:23	300	206,8	1405	1,08E+08	2,44E+08	1,71
18101912	12:32	300	204,7	1830	1,42E+08	3,30E+08	1,72
18101913	12:44	300	208,9	1600	1,23E+08	2,53E+08	1,70
18101914	12:54	300	206,8	1575	1,21E+08	2,83E+08	1,71
18101915	13:02	300	204,7	2300	1,80E+08	3,55E+08	1,71
18101916	13:10	300	208,9	1358	1,04E+08	2,41E+08	1,71
18101917	13:24	300	206,8	1830	1,42E+08	2,97E+08	1,72
18101918	13:34	300	208,9	1840	1,43E+08	-	1,71
18101919	13:43	300	208,9	1306	9,97E+07	2,13E+08	1,73
18101920	13:56	300	206,8	2305	1,80E+08	3,33E+08	1,73
18101921	14:05	300	204,7	1276	9,73E+07	2,39E+08	1,70

Tabulka 5.2: Naměřené hodnoty maximálního proudu, neutronového zisku z detektoru SAC a scintilačního detektoru B, doba náběhu do pinče pro výstřely při tlaku deuteria 300 Pa. Pro každý výstřel byla napuštěna nová náplň deuteria.

Výstřel	Čas	Tlak [Pa]	Imax [kA]	SAC pu 1 min [-]	Neutrony SAC	Neutrony ToF-B	Doba imploze [μs]
118102608	10:28	320	211	2060	1,61E+08	1,88E+08	1,74
18102609	10:38	320	211	1534	1,19E+08	1,59E+08	1,72
18102610	10:45	320	209	1350	1,04E+08	1,30E+08	1,76
18102611	10:51	320	207	1599	1,24E+08	1,45E+08	1,71
18102612	10:57	320	209	2084	1,63E+08	1,88E+08	1,74
18102615	12:21	320	213	1999	1,57E+08	1,86E+08	1,76
18102616	12:27	320	211	2053	1,61E+08	1,91E+08	1,75
18102617	12:33	320	211	2319	1,82E+08	1,98E+08	1,78
18102618	12:39	320	211	1725	1,34E+08	1,52E+08	1,75
18102621	12:54	320	211	1999	1,57E+08	1,59E+08	1,75
18102622	12:59	320	211	1216	9,34E+07	9,37E+07	1,75
18102623	13:05	320	211	2457	1,93E+08	1,90E+08	1,77
18102624	13:10	320	209	1599	1,24E+08	1,42E+08	1,82
18102625	13:16	320	211	2422	1,91E+08	1,94E+08	1,73
18102626	13:21	320	213	1946	1,52E+08	1,56E+08	1,78
18102627	13:26	320	211	2498	1,97E+08	1,96E+08	1,76
18102628	12:32	320	211	1105	8,44E+07	9,31E+07	1,77
18102629	13:36	320	209	1900	1,49E+08	1,53E+08	1,75
18102630	13:40	320	211	2544	2,00E+08	2,02E+08	1,77
18102631	13:44	320	211	1521	1,18E+08	1,47E+08	1,79
18102633	13:52	320	211	2787	2,20E+08	2,31E+08	1,83
18102635	14:01	320	211	2331	1,83E+08	2,23E+08	1,83

Tabulka 5.3: Naměřené hodnoty maximálního proudu, neutronového zisku z detektoru SAC a scintilačního detektoru B, doba náběhu do pinče pro výstřely při tlaku deuteria 320 Pa. Pro každý výstřel byla napuštěna nová náplň deuteria.

Výstřel	Čas	Tlak [Pa]	Imax [kA]	SAC pu 1 min [-]	Neutrony SAC	Neutrony ToF-B	Doba imploze [μs]
18110203	8:58	340	211	1150	8,75E+07	9,13E+07	1,83
18110204	9:04	340	211	954	7,17E+07	7,89E+07	1,85
18110205	9:09	340	209	1133	8,62E+07	9,89E+07	1,88
18110208	9:27	340	211	1194	9,11E+07	1,02E+08	1,83
18110209	9:32	340	211	1781	1,38E+08	1,50E+08	1,87
18110211	9:44	340	211	1880	1,46E+08	1,48E+08	1,87
18110212	9:49	340	211	0	-	1,21E+08	1,87
18110216	10:06	340	211	2546	2,00E+08	2,20E+08	1,91
18110218	10:16	340	211	2202	1,72E+08	1,75E+08	1,84
18110219	10:21	340	213	1411	1,09E+08	1,23E+08	1,86
18110221	10:28	340	211	1849	1,44E+08	1,39E+08	1,85
18110226	10:48	340	211	2146	1,68E+08	1,58E+08	1,86
18110227	10:52	340	211	627	4,53E+07	0,00E+00	1,78
18110228	12:33	340	209	1137	8,65E+07	8,78E+07	1,79
18110231	12:54	340	211	2666	2,10E+08	2,20E+08	1,86
18110234	13:15	340	209	2124	1,66E+08	1,63E+08	1,95
18110236	13:23	340	213	1410	1,09E+08	1,26E+08	1,90
18110238	13:33	340	213	2010	1,57E+08	1,85E+08	1,90

Tabulka 5.4: Naměřené hodnoty maximálního proudu, neutronového zisku z detektoru SAC a scintilačního detektoru B, doba náběhu do pinče pro výstřely při tlaku deuteria 340 Pa. Pro každý výstřel byla napuštěna nová náplň deuteria.

Výstřel	Čas	Tlak [Pa]	Imax [kA]	SAC pu 1 min [-]	Neutrony SAC	Neutrony ToF-B	Doba imploze [μs]
19032915	10:30	360	209	1876	1,70E+08	1,74E+08	1,762
19032916	10:34	360	205	1460	1,31E+08	1,43E+08	1,714
19032917	10:38	360	200	2381	2,17E+08	2,29E+08	1,766
19032918	10:42	360	211	2898	2,66E+08	2,35E+08	1,782
19032919	10:46	360	207	1656	1,49E+08	1,65E+08	1,742
19032920	10:51	360	213	2482	2,27E+08	2,36E+08	1,758
19032921	10:56	360	207	2273	2,07E+08	2,09E+08	1,767
19032923	13:08	360	205	1740	1,57E+08	1,68E+08	1,771
19032924	13:16	360	209	2327	2,12E+08	2,06E+08	1,748
19032925	13:22	360	205	1529	1,37E+08	1,35E+08	1,774
19032926	13:26	360	209	1928	1,75E+08	1,80E+08	1,761
19032928	13:35	360	209	2648	2,43E+08	2,36E+08	1,737
19032929	13:41	360	205	1701	1,53E+08	1,52E+08	1,739
19032930	13:46	360	211	2439	2,23E+08	2,17E+08	1,752
19032931	13:51	360	209	2585	2,37E+08	2,13E+08	1,774
19032932	13:57	360	203	2352	2,15E+08	2,18E+08	1,788
19032933	14:04	360	209	1289	1,14E+08	1,18E+08	1,777
19032934	14:11	360	209	2156	1,96E+08	2,16E+08	1,784
19032935	14:14	360	203	2334	2,13E+08	2,15E+08	1,782
19032936	14:19	360	205	1292	1,15E+08	1,25E+08	1,771
19032937	14:23	360	205	1704	1,54E+08	1,78E+08	1,746

Tabulka 5.5: Naměřená data s instalovanou anodou plný kužel.

Výstřel	Čas	Tlak [Pa]	Imax [kA]	SAC pu 1 min [-]	Neutrony SAC	Neutrony ToF-B	Doba imploze [μs]
19032019	14:01	300	205	941	8,26E+07	8,05E+07	1,635
19032020	14:10	300	205	1008	8,89E+07	8,99E+07	1,648
19032021	14:18	300	203	1057	9,35E+07	1,02E+08	1,660
19032022	14:27	300	203	948	8,33E+07	9,02E+07	1,640
19032023	14:40	300	205	1634	1,48E+08	1,47E+08	1,664
19032024	14:45	300	203	1019	9,00E+07	1,04E+08	1,632
19032205	12:35	300	203	1353	1,21E+08	5,95E+07	1,665
19032206	12:41	300	207	1038	9,16E+07	4,73E+07	1,638
19032207	12:47	300	200	1267	1,13E+08	8,05E+07	1,632
19032208	12:54	300	205	1339	1,20E+08	8,99E+07	1,655
19032209	12:59	300	198	1515	1,37E+08	1,02E+08	1,644
19032210	15:03	300	200	1271	1,14E+08	9,02E+07	1,668
19032211	13:09	300	203	1200	1,07E+08	1,47E+08	1,662
19032212	13:14	300	200	1628	1,47E+08	1,04E+08	1,656
19032213	13:18	300	203	1457	1,31E+08		1,648

Tabulka 5.6: Naměřená data s instalovanou anodou plný kužel.

Výstřel	Čas	Tlak [Pa]	Imax [kA]	SAC pu 1 min [-]	Neutrony SAC	Neutrony ToF-B	Doba imploze [μ s]
19032705	9:38	320	205	1324	1,18E+08	1,47E+08	1,657
19032706	9:44	320	203	1583	1,42E+08	1,46E+08	1,706
19032707	9:50	320	203	1359	1,21E+08	1,31E+08	1,675
19032708	9:56	320	200	1436	1,28E+08	1,31E+08	1,710
19032709	10:02	320	205	1759	1,59E+08	1,62E+08	1,681
19032710	10:09	320	205	1296	1,15E+08	1,22E+08	1,702
19032711	10:15	320	205	1647	1,48E+08	1,56E+08	1,705
19032712	10:20	320	207	2350	2,15E+08	2,09E+08	1,702
19032713	10:25	320	207	1571	1,41E+08	1,42E+08	1,705
19032714	10:29	320	200	2134	1,94E+08	1,86E+08	1,688
19032715	10:33	320	203	1714	1,55E+08	1,64E+08	1,690
19032717	10:44	320	205	1727	1,56E+08	1,70E+08	1,684
19032718	10:48	320	203	1963	1,78E+08	1,83E+08	1,697
19032216	13:33	320	203	2357	2,16E+08	2,16E+08	1,696
19032217	13:38	320	200	1835	1,67E+08	1,67E+08	1,678
19032218	13:42	320	203	1775	1,61E+08	1,61E+08	1,690
19032220	13:50	320	205	1250	1,12E+08	1,12E+08	1,689
19032222	13:57	320	203	1784	1,62E+08	1,62E+08	1,698
19032223	14:01	320	205	1878	1,71E+08	1,71E+08	
19032225	14:08	320	205	2203	2,01E+08	2,01E+08	1,710

Tabulka 5.7: Naměřená data s instalovanou anodou plný kužel.

Výstřel	Čas	Tlak [Pa]	Imax [kA]	SAC pu 1 min [-]	Neutrony SAC	Neutrony ToF-B	Doba imploze [μs]
19032721	12:41	340	203	1871	1,69E+08	1,71E+08	1,748
19032722	12:47	340	205	2090	1,90E+08	1,84E+08	1,752
19032723	12:54	340	205	1671	1,50E+08	1,59E+08	1,713
19032725	13:06	340	205	2153	1,96E+08	1,83E+08	1,740
19032726	13:13	340	205	2235	2,04E+08	1,93E+08	1,717
19032727	13:18	340	203	2262	2,06E+08	2,16E+08	1,738
19032728	13:23	340	203	2185	1,99E+08	1,77E+08	1,758
19032729	13:28	340	205	2796	2,57E+08	2,42E+08	1,736
19032731	13:39	340	207	1763	1,59E+08	1,56E+08	1,757
19032732	13:43	340	205	2330	2,13E+08	1,98E+08	1,745
19032733	13:48	340	205	1910	1,73E+08	1,82E+08	1,726
19032734	13:53	340	207	2443	2,23E+08	2,14E+08	1,748
19032738	14:33	340	203	2671	2,45E+08	2,26E+08	1,733
19032739	14:42	340	205	1822	1,65E+08	1,68E+08	1,738
19032740	14:48	340	205	1761	1,59E+08	1,73E+08	1,719
19032906	9:43	340	203	2295	2,09E+08	2,11E+08	1,730
19032907	9:49	340	205	1266	1,12E+08	1,4E+08	1,735
19032908	9:55	340	203	2290	2,09E+08	2,01E+08	1,722
19032909	10:02	340	203	1739	1,57E+08	1,69E+08	1,742
19032910	10:07	340	203	2545	2,33E+08	2,25E+08	1,737
19032911	10:12	340	205	1612	1,45E+08	1,5E+08	1,711
19032914	10:27	340	205	2322	2,12E+08	2,13E+08	1,730

Tabulka 5.8: Naměřená data s instalovanou anodou plný kužel.

Výstřel	Čas	Tlak [Pa]	Imax [kA]	SAC pu 1 min [-]	Neutrony SAC	Neutrony ToF-B	Doba imploze [μs]
9040909	14:00	280	205	1329	1,18E+08	1,38E+08	1,740
19040910	14:04	280	205	999	8,71E+07	8,68E+07	1,742
19040911	14:10	280	205	1828	1,65E+08	1,68E+08	1,758
19040913	14:20	280	205	2333	2,13E+08	2,00E+08	1,742
19040917	14:49	280	205	1789	1,62E+08		
19040918	14:55	280	207	729	6,17E+07	5,82E+07	1,706
19040919	14:59	280	205	1235	1,09E+08	1,10E+08	1,726
19040920	15:04	280	209	998	8,70E+07	7,91E+07	1,742
19040921	15:10	280	209	727	6,15E+07	6,56E+07	1,734
19040922	15:17	280	205	1257	1,11E+08	1,08E+08	1,728
19040924	0:00	280	205	890	7,69E+07	8,38E+07	1,744
19040925	15:45	280	209	1500	1,34E+08	1,34E+08	1,731
19040926	15:49	280	205	902	7,80E+07	8,08E+07	1,710

Tabulka 5.9: Naměřená data s instalovanou anodou s konvexní kuželovou dutinou.

Výstřel	Čas	Tlak [Pa]	Imax [kA]	SAC pu 1 min [-]	Neutrony SAC	Neutrony ToF-B	Doba imploze [μs]
19040301	9:41	300	205	1800	1,63E+08	1,72E+08	1,754
19040303	9:55	300	209	1890	1,71E+08	1,65E+08	1,771
19040304	10:00	300	205	1592	1,43E+08	1,46E+08	1,758
19040305	10:05	300	207	2160	1,97E+08	1,91E+08	1,791
19040306	10:12	300	205	1147	1,01E+08	1,14E+08	1,773
19040307	10:16	300	205	1329	1,18E+08	1,25E+08	1,794
19040308	10:20	300	205	836	7,18E+07	7,68E+07	1,782
19040309	10:28	300	205	910	7,87E+07	7,91E+07	1,750
19040311	10:40	300	203	1307	1,16E+08	1,21E+08	1,741
19040312	10:45	300	207	1176	1,04E+08	1,06E+08	1,778
19040313	10:51	300	205	1786	1,61E+08	1,70E+08	1,749
19040314	10:54	300	205	841	7,22E+07	6,82E+07	1,778
19040315	12:18	300	205	2136	1,94E+08	1,75E+08	1,787
19040202	13:08	300	209	1270	1,13E+08	1,23E+08	1,753
19040204	13:20	300	207	1139	1,00E+08	1,01E+08	1,794
19040206	13:33	300	205	1033	9,03E+07	93875520	1,754
19040207	13:44	300	203	1507	1,35E+08	1,42E+08	1,742
19040208	13:49	300	203	1594	1,43E+08	1,57E+08	1,775
19040209	13:55	300	207	1283	1,14E+08	1,28E+08	1,763
19040210	14:00	300	205	2248	2,05E+08	1,84E+08	1,844
19040212	14:11	300	205	1774	1,60E+08	1,57E+08	1,780

Tabulka 5.10: Naměřená data s instalovanou anodou s konvexní kuželovou dutinou.

Výstřel	Čas	Tlak [Pa]	Imax [kA]	SAC pu 1 min [-]	Neutrony SAC	Neutrony ToF-B	Doba imploze [μs]
19040316	12:24	320	209	1452	1,30E+08	1,25E+08	1,810
19040317	12:28	320	205	1531	1,37E+08	1,34E+08	1,808
19040318	12:34	320	207	1316	1,17E+08	1,22E+08	1,806
19040319	12:41	320	205	1056	9,25E+07	9,92E+07	1,811
19040320	12:47	320	203	2338	2,13E+08	2,13E+08	1,800
19040322	13:07	320	207	1847	1,67E+08	1,58E+08	1,815
19040323	13:29	320	198	1640	1,48E+08	1,31E+08	1,896
19040324	13:34	320	207	1780	1,61E+08	1,64E+08	1,809
19040325	13:41	320	207	986	8,59E+07	8,16E+07	1,803
19040326	13:46	320	207	1040	9,10E+07	9,67E+07	1,811
19040402	13:39	320	205	1661	1,50E+08	1,49E+08	1,782
19040404	13:52	320	203	1222	1,08E+08	1,13E+08	1,830
19040406	14:01	320	207	1491	1,34E+08	1,32E+08	1,821
19040408	14:11	320	205	1132	9,97E+07	1,12E+08	1,829
19040409	14:16	320	205	1914	1,73E+08	1,70E+08	1,798
19040410	14:28	320	205	833	7,15E+07	7,59E+07	1,726
19040411	14:32	320	205	1289	1,14E+08	1,14E+08	1,819
19040413	14:49	320	205	708	5,97E+07	5,57E+07	1,802
19040414	14:53	320	207	1188	1,05E+08	1,13E+08	1,854

Tabulka 5.11: Naměřená data s instalovanou anodou s konvexní kuželovou dutinou.

Výstřel	Čas	Tlak [Pa]	Imax [kA]	SAC pu 1 min [-]	Neutrony SAC	Neutrony ToF-B	Doba imploze [μs]
19040415	15:00	340	207	1092	9,59E+07	1,00E+08	1,852
19040416	15:24	340	207	1618	1,46E+08	1,44E+08	1,819
19040417	15:29	340	207	1133	9,98E+07	1,05E+08	1,828
19040418	15:32	340	205	1300	1,16E+08	1,18E+08	1,833
19040419	15:36	340	209	1125	9,90E+07	1,14E+08	1,838
19040420	15:40	340	207	1463	1,31E+08	1,46E+08	1,846
19040421	15:44	340	207	2089	1,90E+08	1,74E+08	1,827
19040422	15:49	340	205	1327	1,18E+08	1,15E+08	1,835
19040501	9:55	340	207	1792	1,62E+08	1,63E+08	1,836
19040503	10:03	340	205	1006	8,78E+07	8,67E+07	1,848
19040504	10:12	340	209	2195	2,00E+08	2,04E+08	1,832
19040505	10:18	340	205	1846	1,67E+08	1,66E+08	1,830
19040506	10:27	340	207	1124	9,89E+07	1,04E+08	1,835
19040507	10:35	340	205	726	6,14E+07	6,40E+07	1,830
19040509	10:50	340	209	667	5,58E+07	6,21E+07	1,844
19040510	10:55	340	209	1581	1,42E+08	1,41E+08	1,823
19040512	12:16	340	205	608	5,03E+07	4,63E+07	1,867
19040514	12:31	340	209	1361	1,21E+08	1,16E+08	1,797
19040515	12:36	340	211	1030	9,01E+07	9,78E+07	1,862

Tabulka 5.12: Naměřená data s instalovanou anodou s konvexní kuželovou dutinou.

Výstřel	Čas	Tlak [Pa]	Imax [kA]	SAC pu 1 min [-]	Neutrony SAC	Neutrony ToF-B	Doba imploze [μs]
19040516	12:41	360	209	1376	1,23E+08	1,25E+08	1,865
19040517	12:47	360	209	1036	9,06E+07	9,15E+07	1,848
19040518	12:55	360	213	603	4,98E+07	5,99E+07	1,852
19040519	13:01	360	209	1928	1,75E+08	1,64E+08	1,851
19040520	13:07	360	213	1152	1,02E+08	9,68E+07	1,863
19040521	13:13	360	209	451	3,55E+07	3,85E+07	1,840
19040522	13:18	360	211	823	7,05E+07	7,73E+07	1,856
19040523	13:23	360	209	1157	1,02E+08	1,13E+08	1,865
19040524	13:28	360	209	915	7,92E+07	8,28E+07	1,847
19040901	12:53	360	213	1746	1,58E+08	1,64E+08	1,829
19040903	13:11	360	209	895	7,73E+07	8,14E+07	1,847
19040904	13:18	360	211	896	7,74E+07	8,37E+07	1,848
19040905	13:31	360	205	600	4,95E+07	5,23E+07	1,855
19040906	13:39	360	211	2237	2,04E+08	2,08E+08	1,871
19040907	13:48	360	207	1020	8,91E+07	9,23E+07	1,880

Tabulka 5.13: Naměřená data s instalovanou anodou s konvexní kuželovou dutinou.

Výstřel	Čas	Tlak [Pa]	Imax [kA]	SAC pu 1 min [-]	Neutrony SAC	Neutrony ToF-B	Doba imploze [μs]
19041106	12:53	300	213	2193	2,00E+08	1,92E+08	1,684
19041107	12:59	300	213	2078	1,89E+08	1,72E+08	1,690
19041108	13:04	300	211	1511	1,35E+08	1,36E+08	1,686
19041109	13:16	300	205	1435	1,28E+08	1,30E+08	1,683
19041110	13:24	300	211	1795	1,62E+08	1,71E+08	1,690
19041115	14:03	300	213	2012	1,83E+08	1,83E+08	1,720
19041116	14:08	300	207	1802	1,63E+08	1,66E+08	1,729
19041117	14:14	300	213	2123	1,93E+08	1,83E+08	1,676
19041118	14:21	300	213	2120	1,93E+08	1,91E+08	1,682
19041119	14:26	300	213	1628	1,46E+08	1,57E+08	1,698
19041120	14:32	300	211	2263	2,06E+08	1,95E+08	1,719
19041121	14:38	300	207	1709	1,54E+08	1,56E+08	1,734
19041123	14:48	300	207	1541	1,38E+08	1,38E+08	1,714
19041125	15:02	300	211	1718	1,55E+08	1,57E+08	1,724
19041128	15:21	300	213	2413	2,20E+08	2,11E+08	1,704
19041129	15:26	300	213	2535	2,32E+08	2,17E+08	1,708
19041130	15:30	300	194	2113	1,92E+08	1,82E+08	1,779

Tabulka 5.14: Naměřená data s instalovanou anodou zakulacenou s otvorem.

Výstřel	Čas	Tlak [Pa]	Imax [kA]	SAC pu 1 min [-]	Neutrony SAC	Neutrony ToF-B	Doba imploze [μs]
19041204	10:15	320	213	2385	2,18E+08	2,09E+08	1,736
19041207	10:35	320	211	2152	1,96E+08	2,06E+08	1,725
19041210	10:50	320	213	2193	2,00E+08	2,09E+08	1,729
19041211	10:55	320	213	1536	1,38E+08	1,40E+08	1,723
19041212	11:55	320	213	2088	1,90E+08	1,84E+08	1,722
19041213	12:01	320	213	1932	1,75E+08	1,67E+08	1,741
19041215	12:13	320	190	1592	1,43E+08	1,51E+08	1,838
19041216	12:17	320	192	2265	2,07E+08	1,84E+08	1,877
19041217	12:22	320	190	1945	1,76E+08	1,75E+08	1,876
19041219	12:27	320	211	1457	1,30E+08	1,33E+08	1,720
19041220	12:35	320	213	1615	1,45E+08	1,50E+08	1,727
19041221	12:40	320	211	2731	2,50E+08	2,22E+08	1,745
19041222	12:44	320	213	2026	1,84E+08	1,80E+08	1,726
19041223	12:49	320	213	2324	2,12E+08	2,24E+08	1,734
19041224	12:54	320	211	1928	1,75E+08	1,79E+08	1,721
19041225	13:01	320	207	1980	1,80E+08	1,88E+08	1,741
19041226	13:05	320	213	1862	1,69E+08	1,78E+08	1,734
19041227	13:10	320	209	2199	2,00E+08	1,88E+08	1,765
19041228	13:16	320	213	1795	1,62E+08	1,58E+08	1,722
19041230	13:26	320	213	2553	2,34E+08	2,18E+08	1,725
19041231	13:30	320	211	2423	2,21E+08	2,12E+08	1,736

Tabulka 5.15: Naměřená data s instalovanou anodou zakulacenou s otvorem.

Výstřel	Čas	Tlak [Pa]	Imax [kA]	SAC pu 1 min [-]	Neutrony SAC	Neutrony ToF-B	Doba imploze [μs]
19041605	12:04	340	211	2807	2,58E+08	2,21E+08	1,757
19041606	12:09	340	213	2563	2,35E+08	2,12E+08	1,744
19041607	12:20	340	211	2610	2,39E+08	2,28E+08	1,783
19041608	12:26	340	211	1843	1,67E+08	1,67E+08	1,751
19041609	12:32	340	211	1976	1,79E+08	1,79E+08	1,755
19041610	12:38	340	213	2261	2,06E+08	2,04E+08	1,772
19041611	12:44	340	211	2760	2,53E+08	2,08E+08	1,743
19041613	13:03	340	211	2620	2,40E+08	2,45E+08	1,792
19041615	13:12	340	211	2184	1,99E+08	1,96E+08	1,773
19041616	13:18	340	209	2348	2,14E+08	2,23E+08	1,762
19041617	13:27	340	213	2566	2,35E+08	2,45E+08	1,763
19041620	13:54	340	213	1430	1,28E+08	1,24E+08	1,774
19041621	13:58	340	213	1501	1,34E+08	1,44E+08	1,761
19041622	14:06	340	211	2099	1,91E+08	2,05E+08	1,760
19041623	14:12	340	207	2274	2,07E+08	2,14E+08	1,758
19041624	14:17	340	215	2350	2,15E+08	2,08E+08	1,766
19041625	14:24	340	207	2604	2,38E+08	2,24E+08	1,786
19041702	9:55	340	211	2890	2,65E+08	2,48E+08	1,761
19041703	10:02	340	213	2836	2,60E+08	2,46E+08	1,762
19041707	12:16	340	213	2896	2,66E+08		1,759
19041709	12:29	340	207	2866	2,63E+08	2,37E+08	1,769
19041710	12:37	340	213	2950	2,71E+08	2,5E+08	1,754

Tabulka 5.16: Naměřená data s instalovanou anodou zakulacenou s otvorem.

Výstřel	Čas	Tlak [Pa]	Imax [kA]	SAC pu 1 min [-]	Neutrony SAC	Neutrony ToF-B	Doba imploze [μs]
19041711	12:43	360	215	3050	2,81E+08	2,52E+08	1,798
19041712	12:50	360	213	2464	2,25E+08	2,15E+08	1,799
19041713	12:56	360	213	2950	2,71E+08	2,58E+08	1,783
19041714	13:03	360	213	2639	2,42E+08	2,19E+08	1,783
19041719	13:35	360	211	2180	1,98E+08	1,99E+08	1,791
19041720	13:41	360	211	2599	2,38E+08	2,26E+08	1,802
19041721	13:47	360	209	2496	2,28E+08	2,32E+08	1,792
19041722	13:54	360	213	3260	3,00E+08	2,48E+08	1,798
19041723	14:01	360	215	2306	2,10E+08	2,04E+08	1,814
19041725	14:12	360	213	2668	2,45E+08	2,21E+08	1,820
19041726	14:18	360	211	2030	1,84E+08	1,95E+08	1,776
19041727	14:23	360	209	1500	1,34E+08	1,56E+08	1,793
19041731	14:59	360	205	2630	2,41E+08	2,23E+08	1,798
19041732	15:05	360	211	2463	2,25E+08	2,31E+08	1,839
19041803	10:18	360	211	2280	2,08E+08	2,15E+08	1,860
19041804	10:26	360	209	2478	2,27E+08	2,30E+08	1,813
19041805	10:32	360	207	1889	1,71E+08	1,69E+08	1,789
19041806	10:38	360	207	2522	2,31E+08	2,23E+08	1,789
19041807	10:44	360	207	2053	1,87E+08	1,84E+08	1,795
19041810	12:01	360	213	2614	2,39E+08	2,61E+08	1,797
19041811	12:11	360	205	2622	2,40E+08	2,14E+08	1,800
19041812	12:17	360	209	2336	2,13E+08	2,12E+08	1,798
19041813	12:25	360	211	1953	1,77E+08	1,89E+08	1,812
19041814	12:35	360	209	2485	2,27E+08	2,18E+08	1,799
19041815	12:41	360	209	3260	3,00E+08	2,98E+08	1,782

Tabulka 5.17: Naměřená data s instalovanou anodou zakulacenou s otvorem.