

Výsledky evropského projektu Metrologie pro dozimetrii ve FLASH radioterapii

Jana Šmoldasová, Jaroslav Šolc

Český metrologický institut



Program: EMPIR – European Metrology Programme for Innovation and Research

Název: Metrology for advanced radiotherapy using particle beams with ultra-high pulse dose rates

Doba trvání: 9/2019-2/2023

Koordinátor: Andreas Schüller (PTB)

Téma: Dozimetrie pro FLASH radioterapii, protonovou terapii, VHEE a laserem generované svazky

Web: <http://uhdpulse-empir.eu>



Schüller et al., Physica Medica 80 (2020), 134–150
<https://doi.org/10.1016/j.ejmp.2020.09.020>

Partneři a spolupracující instituce

Metrologické instituty



Poskytovatelé svazků



Výrobci detektorů



7 metrologických institutů

6 nemocnic

9 univerzit

7 výzkumných organizací

12 firem

+ síť protonových center Inspire

Struktura work package

WP1: Primární etalony

- Definování referenčních podmínek
- Referenční svazky
- Primární etalony (vodní kalorimetr, Frickeho dozimetr, grafitový kalorimetr)

WP2: Sekundární etalony a relativní dozimetrie

- Transfer z primárních etalonů
- Charakterizace stávajících detektorů
- Formalismus pro referenční dozimetrii

WP5: Impakt, WP6: Koordinace

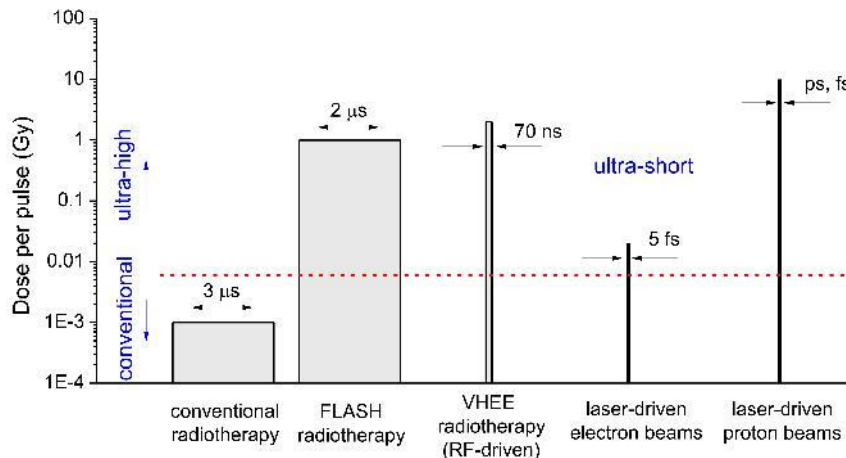
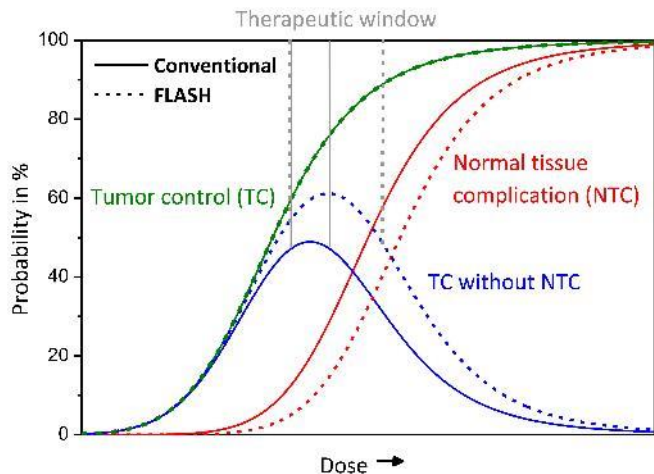
WP4: Detektory a metody měření mimo svazek

- Aktivní detektory pro pulzní směsná pole včetně neutronů
- Pasivní dozimetrie

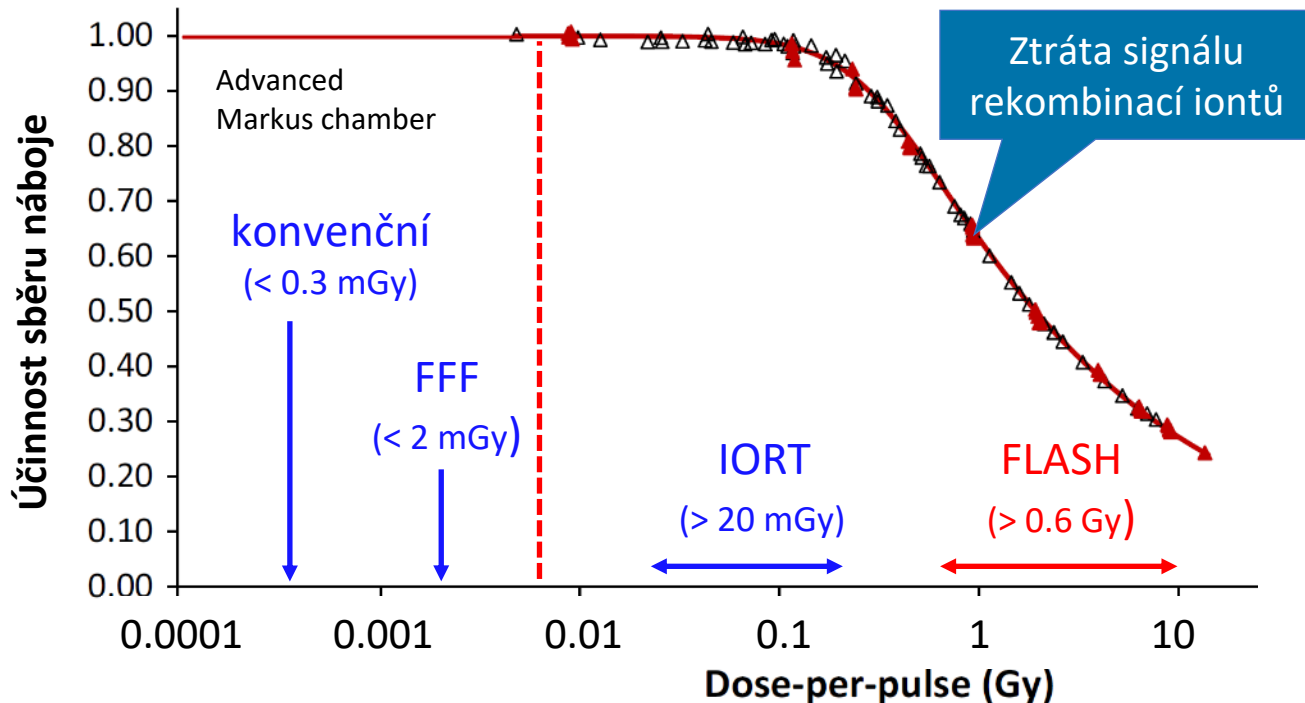
WP3: Detektory a metody měření ve svazku

- Nové dozimetrické systémy
- Monitorování svazku

- Nedávné studie naznačují, že aplikace velmi vysokých terapeutických dávek ve velmi krátkých intervalech (milisekundy a méně) snižuje riziko poškození zdravé tkáně, zatímco efektivita radiačního poškození nádoru je zachována.
- Využití „FLASH efektu“ v radioterapii umožní nová generace urychlovačů (upravené konvenční elektronové a protonové urychlovače, nové laserové urychlovače), které jsou schopny generovat pulzní svazky částic s velmi vysokými dávkami v pulzu (ultra-high-dose-per-pulse; UHD svazky).
- Obecným cílem projektu je vytvoření prostředků potřebných k zajištění metrologické návaznosti při měření absorbovaných dávek UHD svazků.

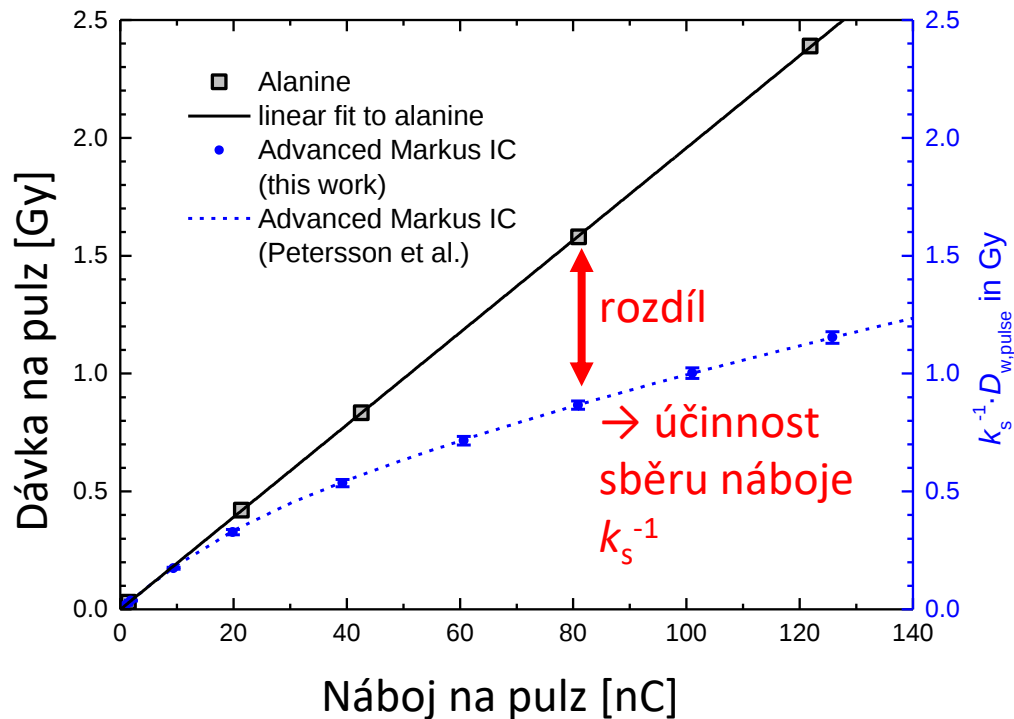


- Rekombinace a ztráta signálu v UHD svazcích.



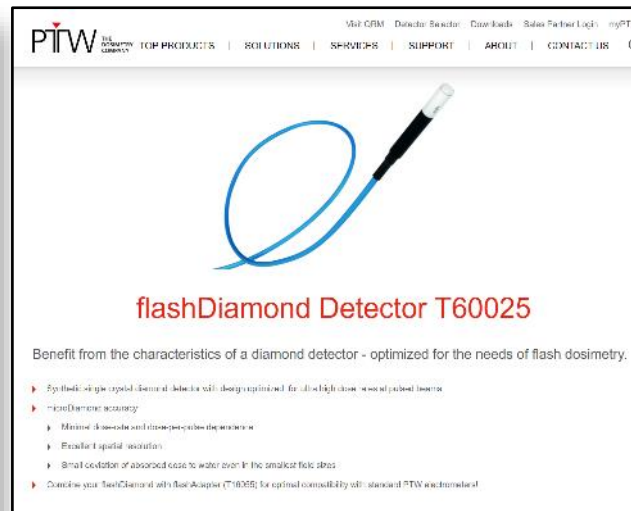
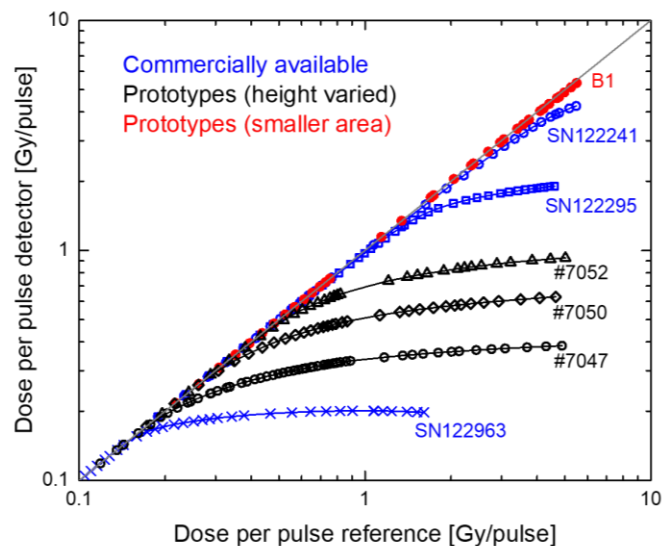
- Nejsou aktivní detektory pro měření v reálném čase
- Nejsou primární etalony
- Není formalismus pro referenční dozimetrii

Rekombinace náboje – původní stav



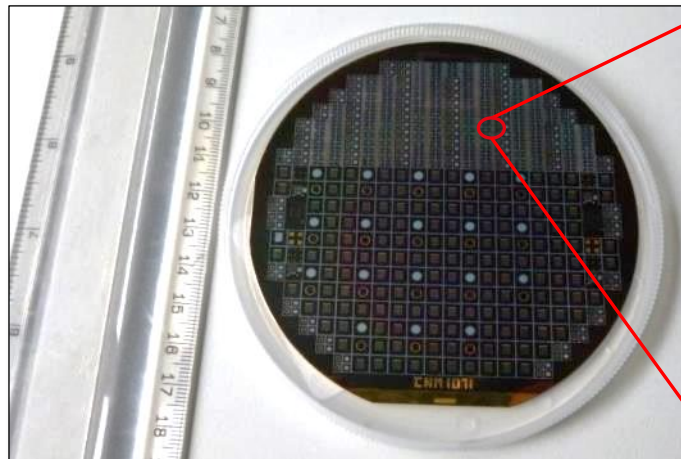
A. Bourgouin *et al.*, “Calorimeter for Real-Time Dosimetry ...” Front. Phys. **8** (2020) 567340.
<https://doi.org/10.3389/fphy.2020.567340>

microDiamond → flashDiamond



<https://www.ptwdosimetry.com/en/products/flashdiamond-detector/>

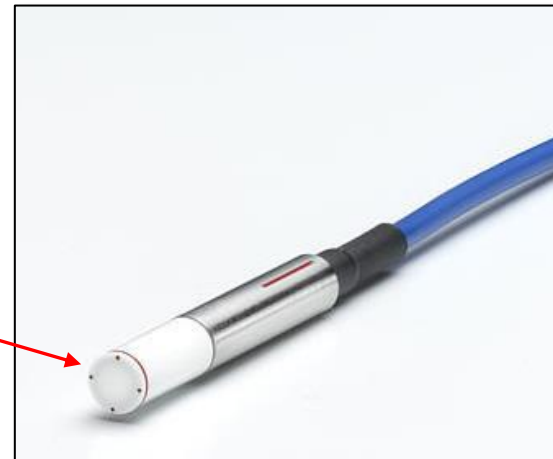
Diody z karbidu křemíku



4" SiC wafer



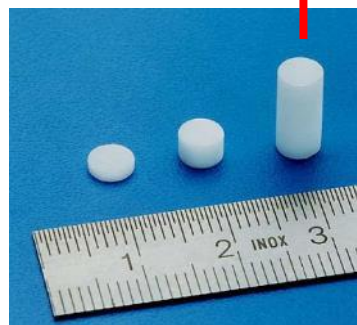
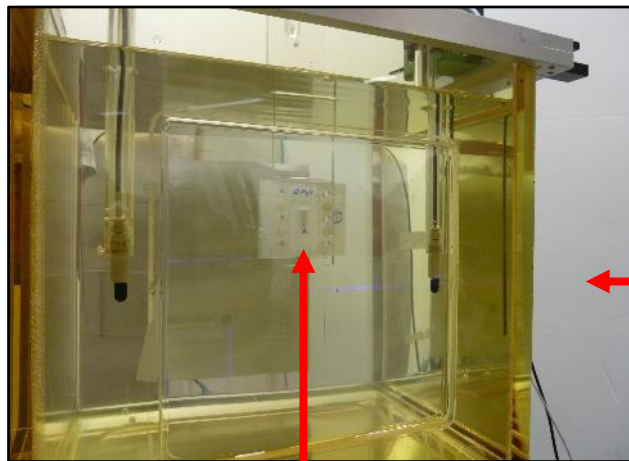
1 mm diode



*Encapsulation by PTW
(microSilicon housing)*

Referenční elektronový svazek

Výzkumný urychlovač v PTB, Německo



Návaznost dávky ve vodě
od primárního etalonu PTB

Alaninové pelety



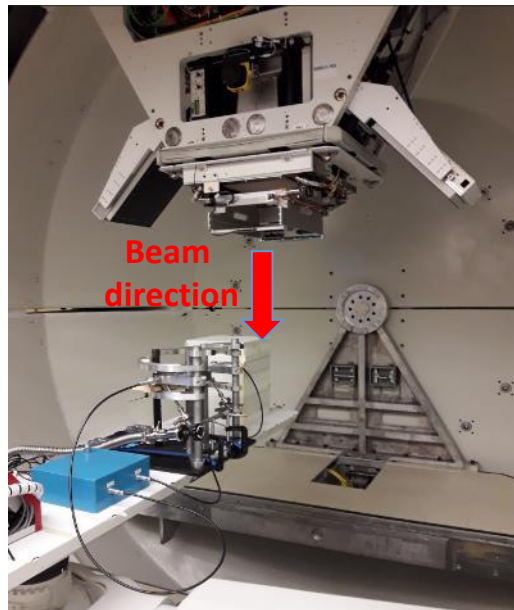
$E = 0.5 - 50 \text{ MeV}$, $t_{\text{pulse}} = 0.1 - 3 \text{ us}$
až **12 Gy/pulse** (SSD 0.7 m, 20 MeV)

A. Bourgouin *et al.* "Characterization of the PTB ultra-high ..." *Phys. Med. Biol.* **67** (2022) 085013.

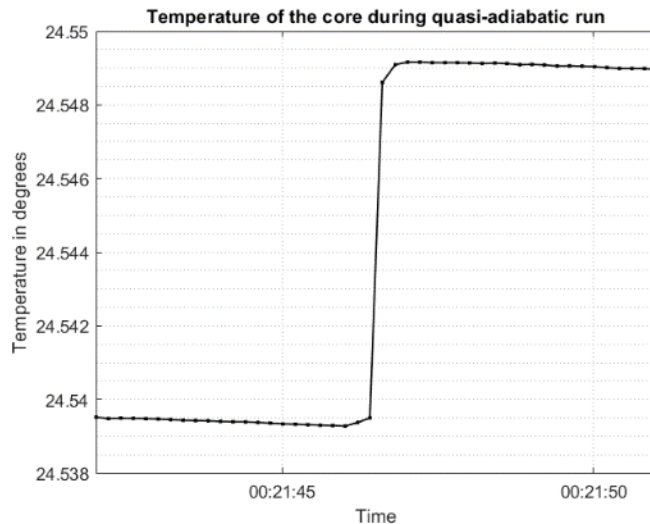
<https://doi.org/10.1088/1361-6560/ac5de8>

A. Bourgouin *et al.*, "Absorbed-dose-to-water..." *Phys. Med. Biol.* **67** (2022) 205011.

<https://doi.org/10.1088/1361-6560/ac950b>



Grafitový kalorimetr NPL ve FLASH protonovém svazku (Cincinnati Proton Centre)

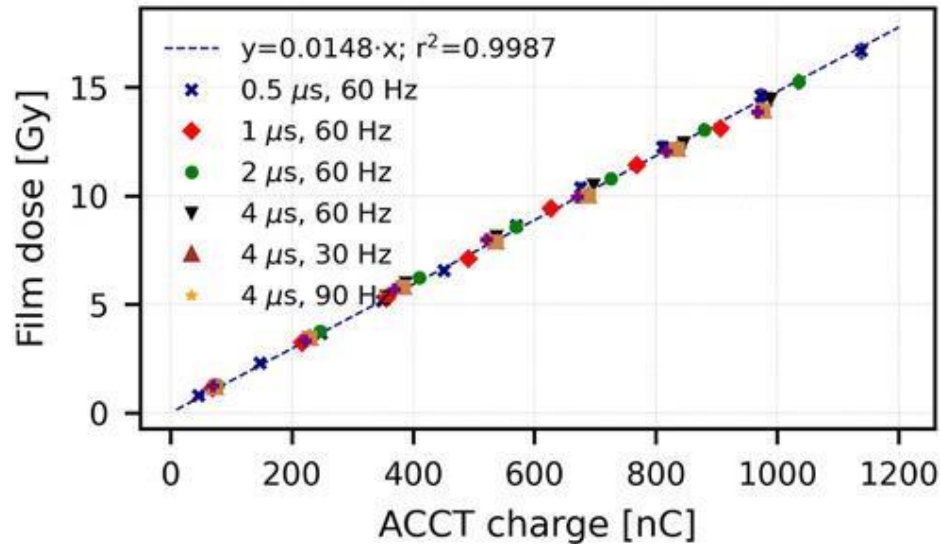
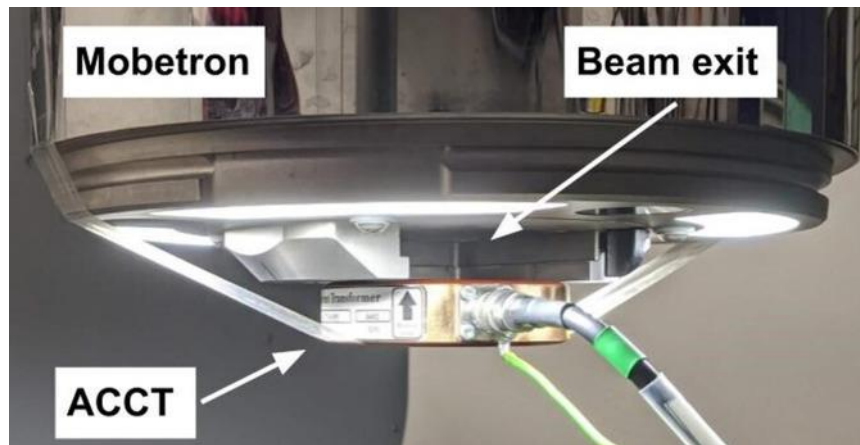


První měření kalorimetrem v UHDR protonovém svazku

- Stanovení opravných faktorů pro absolutní dozimetrii
- Nejistota měření 0.9% ($k=1$)

A. Lourenco et al. "Absolute dosimetry for FLASH proton ..." Scientific Reports **13** (2023) 2054.
<https://doi.org/10.1038/s41598-023-28192-0>

E. Lee et al. "Ultrahigh dose rate pencil beam ..." Med. Phys. **49** (2022) 6171.
<https://doi.org/10.1002/mp.15844>

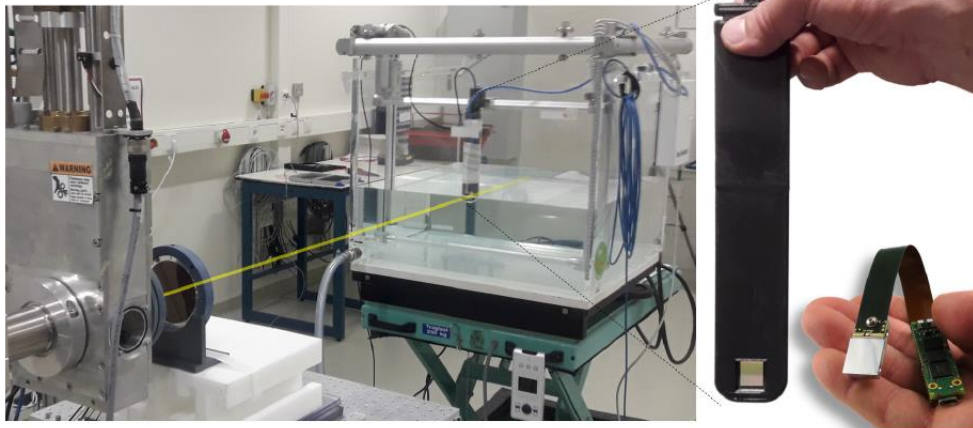


Převzetí výsledků do praxe:

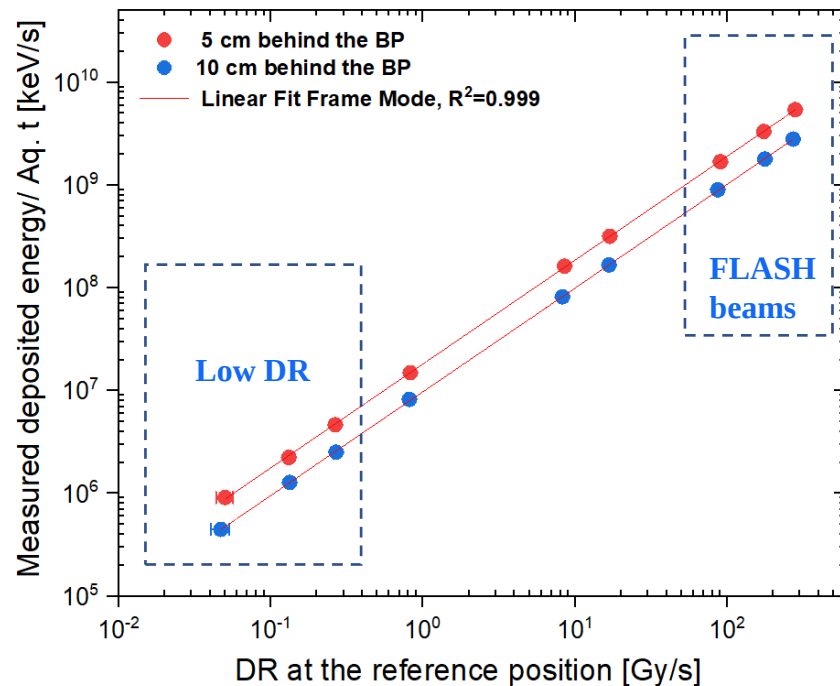
Firmy IntraOp a SIT nyní instalují proudové transformátory firmy Bergoz na všechny nově vyrobené FLASH Linac urychlovače.

Měření sekundárního záření mimo svazek

- Pixelový polovodičový detektor Timepix3;
- Měření uvnitř fantomu;
- Protonové i elektronové pulzní svazky.

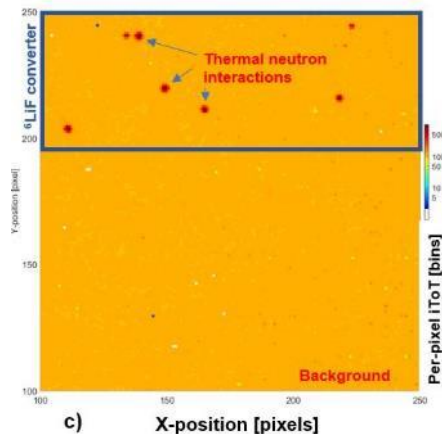


MiniPIX TPX3 Flex ve vodním fantomu.

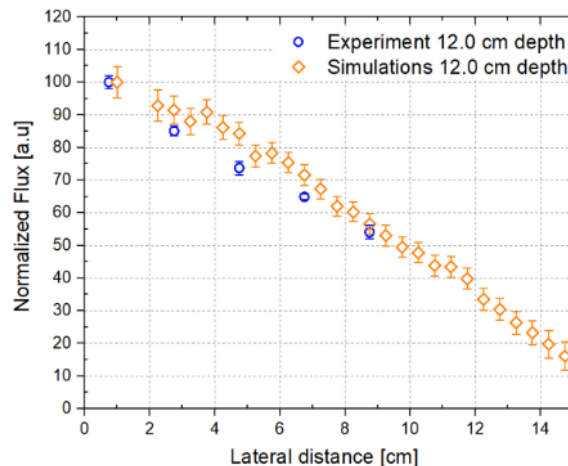


Měření tepelných neutronů

- Pixelový polovodičový detektor Timepix3 s konvertorem ${}^6\text{Li}$ $\Rightarrow$ detekce ${}^4\text{He}$ a ${}^3\text{H}$;
- Měření uvnitř fantomu;
- Protonové i elektronové pulzní svazky.

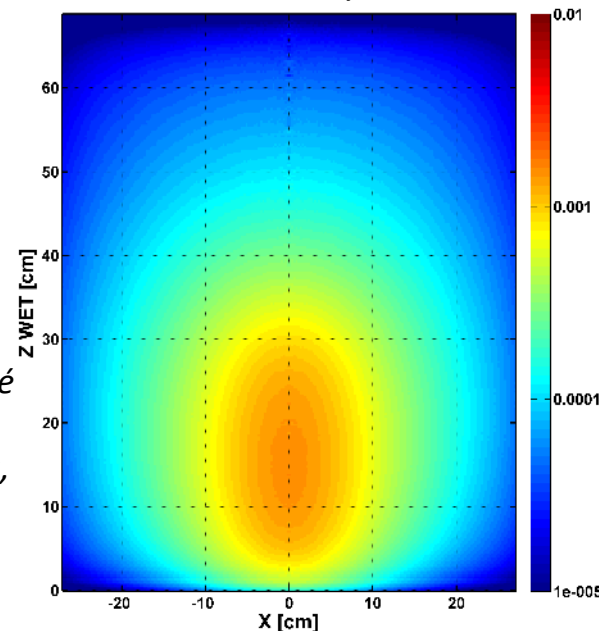


Měřený signál s rozlišením signálu od tepelných neutronů.



Relativní porovnání naměřené a vypočítané fluence tepelných neutronů ve vodním fantomu od 20 MeV elektronového svazku, profil v hloubce 12 cm.

Rozložení fluence tepelných neutronů ve vodním fantomu. MC simulace, 20 MeV elektronový svazek.



C. Oancea et al., "Thermal neutron detection and track recognition..." submitted to PMB.



- V roce 2021 organizace ve spolupráci s projektem UHDpulse;
- Pro velký úspěch se od té doby koná každoročně.
 - V roce 2021 více než 700 online účastníků;
 - V roce 2022 400 účastníků osobně a 250 online.

No.	Report	No. of items reported
1	STANDARDS & REGULATORY ACTIVITIES (STAN)	33
2	PEER REVIEWED OPEN ACCESS SCIENTIFIC PUBLICATIONS (PUB)	39
3	CONFERENCE PRESENTATIONS & POSTERS (CONF)	119
4	TRAINING (TR)	2
5	OTHER DISSEMINATION (OTH)	49
6	FOLLOW-ON COLLABORATIONS (FOLL)	2
7	END USER UPTAKE & EXPLOITATION (UP)	9
8	COLLABORATORS & STAKEHOLDERS (COLL)	44
9	APPLICATIONS FOR PATENTS, TRADEMARKS, REGISTERED DESIGNS, ETC (IP)	1
10	EXPLOITABLE RESULTS, ETC (RES)	3
11	FUTURE EVENTS (FUT)	
12	OPEN RESEARCH DATA (DATA)	13

(in alphabetical order):

I. Ambrozova, U. Ankerhold, L. Archambault, R. Ashraf, C. Bailat, M. Borghesi, A. Boso, A. Bourgouin, P. Bruza, S. Busold, M. Caresana, A. Cimmino, L. De Marzi, V. Djonov, A. Douralis, M. Durante, M. Dutreix, F. Fausti, F. Keszti, G. Felici, C. Fleta, J.-M. Fontbonne, C. Fouillade, F. Frei, A. Gasparini, U. Giesen, L. Giuliano, F. Gomez, L. Grasso, T. Hackel, S. Heinrich, J. Jakubek, R.-P. Kapsch, K. Kirkby, A. Knyziak, R. Kranzer, C. Lahaye, M. Lavagno, A. Leite, V. Linhart, B. Lessard, H. K. Looe, C. Makowski, M. Marinelli, S. McCallum, M. McEwen, M. McManus, T. Michel, G. Milluzzo, S. Motta, C. Oancea, V. Olsovcova, H. Palmans, K. Parodi, J. Pawelke, J. Paz-Martin, P. Peier, K. Petersson, J. Pivec, B. Poppe, D. Poppinga, M. Pullia, J. Renaud, N. Roberts, F. Romano, S. Rossomme, K. Roškar, S. Safai, S. Salvador, C. S. Schmitzer, A. Schönfeld, B. Simon, J. Solc, F. Stephan, A. Subiel, F. Therriault-Proulx, R. A. Thomas, M. Togno, E. Touzain, M. Trachsel, F. Vanhavere, V. Vanreusel, D. Verellen, G. Verona Rinati, J. Seuntjens, R. Versaci, P. von Voigts-Rhetz, M. Zboril



The EMPIR initiative is co-funded by the European Union's Horizon 2020 research and innovation programme and the EMPIR Participating States

This project (18HLT04) has received funding from the EMPIR programme co-financed by the Participating States and from the European Union's Horizon 2020 research and innovation programme.