

ZÁPADOČESKÁ UNIVERZITA V PLZNI  
FAKULTA ELEKTROTECHNICKÁ  
KATEDRA APLIKOVANÉ ELEKTRONIKY A TELEKOMUNIKACÍ

## **DISERTAČNÍ PRÁCE**

**Datové rozhraní pro řízení  
experimentu a čtení dat z  
pixelových detektorů**

2015

Ing. Václav Kraus

západočeská univerzita v Plzni

Fakulta elektrotechnická

# DISERTAČNÍ PRÁCE

k získání akademického titulu doktor  
v oboru

Elektronika

Ing. Václav Kraus

**Datové rozhraní pro řízení experimentu a  
čtení dat z pixelových detektorů**

Školitel: Doc. Dr. Ing. Vjačeslav Georgiev

Datum státní doktorské zkoušky: 31. 10. 2012

Datum odevzdání práce: Prosinec 2015

V Plzni, 2015

## Prohlášení

Předkládám tímto k posouzení a obhajobě disertační práci zpracovanou v rámci doktorského studia na Katedře aplikované elektroniky a telekomunikací Fakulty elektrotechnické Západočeské univerzity v Plzni.

Prohlašuji, že jsem tuto práci vytvořil samostatně, s použitím literatury a zdrojů uvedených v seznamu, který je její neoddělitelnou součástí a za pomoci legálních kopií řádně registrovaného, nebo volně šiřitelného softwarového vybavení.

V práci nejsou uvedeny žádné citlivé, či utajované skutečnosti podléhající obchodnímu tajemství, nebo vyžadující speciální režim přístupu. Jakékoli využití a uplatnění uvedených postupů a metod je nicméně možné pouze na základě autorské smlouvy a souhlasu Fakulty elektrotechnické Západočeské univerzity v Plzni.

V Plzni dne 20. 12. 2015

Ing. Václav Kraus

.....

## Poděkování

Je mojí milou povinností na tomto místě poděkovat svému školiteli Doc. Dr. Ing. Vjačeslavu Georgievovi za vedení mé odborné činnosti po dobu trvání mého doktorského studia. Děkuji za předání mnoha znalostí, energii, důvěru a čas, které mi byly věnovány.

Dále bych rád poděkoval řediteli Ústavu technické a experimentální fyziky profesoru Ing. Stanislavu Pospíšilovi, DrSc., který mi umožnil v ústavu vykonávat odbornou stáž, kde jsem nabyl potřebné znalosti pro práci s pixelovými detektory a mohl se zapojit do špičkových výzkumných grantů. Děkuji také kolegovi Doc. Ing. Carlos Granja, Ph.D. z ÚTEF ČVUT za náměty a spolupráci během společných měření a za cenné rady při zpracování této dizertační práce.

Poslední díky patří mé rodině a přátelům, které jsem po dlouhá léta zanedbával v důsledku vysokého časového vytížení.

Děkuji!

V Plzni dne 20. 12. 2015

Ing. Václav Kraus

.....

## Název

### **Datové rozhraní pro řízení experimentu a čtení dat z pixelových detektorů**

## Anotace

Tato dizertační práce se zabývá vývojem elektronického systému pro polohově citlivé detektory z rodiny Medipix, které byly vyvinuty v CERN. V práci je detailně popsán návrh datového rozhraní pro řízení experimentů a čtení dat z pixelových detektorů Medipix2MXR, Timepix a Medipix3, které bylo realizováno a vešlo do povědomí vědecké komunity jako zařízení FITPix. Dále je uveden seznam realizací a speciálních aplikací tohoto zařízení, které byly vyvinuty. V práci jsou též popsány dva experimenty, na kterých jsem pracoval, a kde byly použity zařízení FITPix.

## Klíčová slova

Medipix2MXR, Timepix, Medipix 3, hybridní pixelový detektor, CERN, FPGA, ionizující záření, koincidenční měření, SEE, štěpení jader, FITPix, RISESAT, MX-10, SATRAM, polohově citlivé detektory částic, datové rozhraní.

## Title

### **Readout Interface for Control and Data acquisition of Pixel Detectors**

## Abstract

This Ph.D. thesis devotes to the development of readout electronics for pixel detectors of the Medipix family. The Medipix detectors were developed in frame of the Medipix collaboration at CERN. The data acquisition and control readout interface for pixel particle detector and experiment control is described in a detail. The device called FITPix can operate all the main detectors of the Medipix family such as the Medipix2MXR, Timepix and Medipix3 devices. This thesis contains also the list of special modifications of the FITPix which were developed during my study. Two types of experiments are described which were performed using the FITPix readout interface and which I took part assembling the system and performing the measurement.

## Keywords

Medipix2MXR, Timepix, Medipix 3, Hybrid pixel detector, CERN, FPGA, Ionizing radiation, Coincidence measurement, SEE, Fission, FITPix, RISESAT, MX-10, SATRAM, Position Sensitive Detectors, Readout Interface, Control and Data Acquisition.

## Obsah

|       |  |    |
|-------|--|----|
| 1     | Úvod .....                                     | 11 |
| 2     | Cíle dizertační práce .....                    | 11 |
| 3     | Ionizující záření.....                         | 12 |
| 3.1   | Přímo ionizující záření .....                  | 12 |
| 3.2   | Nepřímo ionizující záření.....                 | 12 |
| 3.3   | Záření $\alpha$ .....                          | 12 |
| 3.4   | Záření $\beta$ .....                           | 14 |
| 3.5   | Záření $\gamma$ .....                          | 15 |
| 3.6   | Ostatní zdroje záření .....                    | 16 |
| 4     | Detektory ionizujícího záření .....            | 17 |
| 4.1   | Detekční účinnost detektoru.....               | 17 |
| 4.2   | Mrtvá doba detektoru.....                      | 17 |
| 4.3   | Neparalyzující mrtvá doba .....                | 17 |
| 4.4   | Paralyzující mrtvá doba .....                  | 18 |
| 4.5   | Energetické rozlišení detektoru .....          | 18 |
| 4.6   | Geiger-Müllerův (GM) počítač .....             | 19 |
| 4.7   | Scintilační detektory.....                     | 20 |
| 4.8   | Polovodičový detektor .....                    | 20 |
| 5     | Polovodičové pixelové detektory.....           | 22 |
| 5.1   | Medipix2MXR.....                               | 22 |
| 5.1.1 | Schéma pixelu - Medipix2MXR.....               | 24 |
| 5.1.2 | Komunikační periferie .....                    | 26 |
| 5.2   | Módy detektoru .....                           | 26 |
| 5.3   | Timepix.....                                   | 27 |
| 5.4   | Medipix3 .....                                 | 28 |
| 5.4.1 | Komunikační periferie detektoru Medipix3 ..... | 29 |

|        |   |    |
|--------|---|----|
| 6      | Stávající řešení elektronických systémů pro detektory z rodiny Medipix..... | 30 |
| 6.1    | USB 1.22 Interface.....   | 30 |
| 6.2    | USB Lite Interface.....   | 31 |
| 6.3    | Muros2.....   | 32 |
| 6.4    | Relaxd.....   | 33 |
| 7      | Pixelman.....   | 35 |
| 8      | Aplikace pixelových detektorů.....  | 36 |
| 8.1    | Zobrazování.....  | 36 |
| 8.2    | Detekce a vizualizace stop sub-atomových částic.....                        | 37 |
| 9      | FITPix – Fast Interface for Timepix Pixel detector.....                     | 38 |
| 9.1    | Hardware - Blokové schéma .....   | 39 |
| 9.1.1  | Napájecí zdroje.....  | 39 |
| 9.1.2  | Komunikační rozhraní .....  | 39 |
| 9.1.3  | A/D a D/A převodníky .....  | 40 |
| 9.1.4  | FPGA.....   | 40 |
| 9.1.5  | Konektor pro detektor .....   | 40 |
| 9.1.6  | Externí konektor.....   | 40 |
| 9.2    | Blokové schéma FW .....   | 40 |
| 10     | Firmware FITPix - řadič fyzické vrstvy .....                                | 42 |
| 10.1   | Bus Interface .....   | 42 |
| 10.2   | Control Unit.....   | 42 |
| 10.3   | Detector Interface.....   | 43 |
| 10.4   | Detector Interface - Timepix/Medipix 2 MXR.....                             | 43 |
| 10.4.1 | Rozhraní detektoru .....  | 44 |
| 10.4.2 | Datové rozhraní modulu Detector Interface.....                              | 45 |
| 10.4.3 | Rozhraní parametrů .....  | 46 |
| 10.4.4 | Synchronizační rozhraní .....   | 47 |
| 10.4.5 | FSM - Stavový automat modulu Detector Interface .....                       | 49 |



|        |  |    |
|--------|--|----|
| 10.4.6 | Předzpracování dat .....                                 | 51 |
| 10.5   | Detector Interface - Medipix3.....                       | 55 |
| 11     | Realizace a modifikace zařízení FITPix .....             | 56 |
| 11.1   | FITPix 1.0 – 2.3 .....                                   | 56 |
| 11.2   | FITPix 3.0 .....   | 58 |
| 11.2.1 | Interface Board Timepix, sériový režim .....             | 60 |
| 11.2.2 | Interface Board Timepix, paralelní režim.....            | 60 |
| 11.2.3 | Interface Board 4ch/5ch Timepix, sériový režim .....     | 60 |
| 11.2.4 | Interface Board Medipix3 .....                           | 60 |
| 11.3   | SATPix.....  | 61 |
| 11.4   | Satram .....   | 62 |
| 11.5   | MX-10.....   | 64 |
| 11.6   | LAD - Large Area Detector.....                           | 65 |
| 11.7   | RISESAT.....   | 66 |
| 12     | Experimenty .....  | 69 |
| 12.1   | Spektroskopie exotických štěpných fragmentů.....         | 69 |
| 12.1.1 | Exotické štěpné fragmenty od <sup>252</sup> Cf .....     | 69 |
| 12.1.2 | Polohově citlivá detekce vzácných fragmentů štěpení..... | 70 |
| 12.2   | Detekce SEE v integrovaných obvodech .....               | 73 |
| 12.2.1 | Měřicí stanice SEE .....                                 | 74 |
| 12.2.2 | Měření SEE pomocí neutronů .....                         | 75 |
| 12.2.3 | Měření SEE pomocí iontů.....                             | 77 |
| 12.2.4 | Měřicí stanice pro testování odolnosti SEE.....          | 78 |
| 13     | Závěr.....   | 81 |
| 14     | Seznam zkratk .....                                      | 83 |
| 15     | Seznam Obrázků.....                                      | 86 |
| 16     | Seznam tabulek.....                                      | 91 |
| 17     | Seznam použité literatury a zdroje informací.....        | 92 |

|      |  |     |
|------|--|-----|
| 18   | Seznam autorových publikovaných prací..... | 94  |
| 18.1 | Impaktované články .....                   | 94  |
| 18.2 | Články ve sborníku .....                   | 94  |
| 19   | Příloha B – Seznam funkčních vzorků.....   | 98  |
| 20   | Příloha A – Obsah CD .....                 | 100 |

## 1 Úvod

Ionizující záření je neoddělitelná součást přírody, která je spjatá s vesmírem od jeho vzniku a studium těchto vlastností a struktur mikrosvěta nám umožňuje pochopit podstatu hmoty, její vlastnosti a interakce s prostředím. V průběhu minulého století začalo být ionizující záření využíváno v mnoha oborech jak v aplikovaném výzkumu, tak i v základním výzkumu jako např. ve zdravotnictví a materiálovém průmyslu. Výsledkem byly nejen znalosti o vlastnostech mikrosvěta, ale také metody a technika pro detekci ionizujícího záření, která je nepostradatelným prvkem pro jeho studium a použití v navazujících oborech. Se studiem mikrosvěta a ionizujícího záření byla velmi těsně vyvíjena i detekční technika, která prodělala během jednoho století obrovský skok dopředu od prvních ionizačních komor až po nejmodernější detekční systémy, které v současnosti známe. S rozvojem elektroniky a technologií výroby a návrhu polovodičových součástek za posledních několik desítek let bylo umožněno vytvářet pokročilé polovodičové detektory ionizujícího záření. Cílem této práce je posunutí možností takových detektorů, aby bylo možné studovat další vlastnosti ionizujícího záření, strukturu nejen jader atomů, ale i oblasti v jiných oborech jako aplikace sub-atomové fyziky. Ve spolupráci s Ústavem technické a experimentální fyziky v Praze, jenž je členem vědecké spolupráce v programu Medipix z CERN, jsem pracoval na vývoji elektronických systémů pro řízení a čtení dat polovodičových pixelových detektorů Timepix a Medipix3. Tyto polohově citlivé detektory jsou založeny na principu detekce jednotlivých kvant ionizujícího umožňující jejich jednoznačnou detekci včetně registrace a vizualizace jejich stop v polovodiči. Díky pokroku v mikroelektronice a špičkovým technologiím je možné na velmi malou plochu umístit tisíce nezávislých detektorů s velmi malými rozměry jednoho aktivního prvku.

## 2 Cíle dizertační práce

Cílem mé dizertační práce bylo vyvinout elektronický systém, který bude plně ovládat pixelové detektory Medipix2MXR, Timepix a Medipix3 vyvíjené v rámci programu Medipix. Tento systém by měl umožňovat ovládání více detektorů najednou, významně zvýšit přenosové rychlosti dat, umožnit precizní synchronizaci mezi více detektory. Výsledné zařízení by mělo být malých rozměrů a vhodné pro provoz ve vakuu a v radiačně náročných prostředích. Dříve vyvinuté elektronické systémy pro detektory z rodiny Medipix nepokrývaly výše zmíněné parametry. Nové zařízení by splňovalo výše uvedené požadavky a umožnilo pokrýt větší škálu fyzikálních experimentů, které doposud nebylo možné provést kvůli limitům předchozích systémů. Takové zařízení, které splňuje výše zmíněné požadavky, by umožňovalo provést různé typy fyzikálních experimentů.

### 3 Ionizující záření

Ionizujícím zářením označujeme záření, které je schopno svojí energií ionizovat prostředí. Rozlišujeme čtyři druhy ionizujícího záření: záření  $\alpha$ ,  $\beta$ ,  $\gamma$  a neutronové záření. Ionizující záření se běžně vyskytuje v životním prostředí z přírodních radioizotopů a z kosmického záření. Lze jej také vytvořit uměle v urychlovačích nebo jaderných reaktorech. Zdroj ionizující záření je charakterizován energií a intenzitou, ale i pomocí směru nebo úhlového rozdělení a korelace s doprovodným zářením. Ionizace materiálu může probíhat přímo nebo nepřímo. Přímou ionizující záření nese elektrický náboj a elektromagnetickou interakcí přímo ovlivňuje elektrony v atomovém obalu. Nepřímou ionizující záření je elektricky neutrální. Kinetickou energii těchto částic lze předat pouze srážkami s nabitými částicemi a nepřímo detektovat tento typ záření.

#### 3.1 Přímou ionizující záření

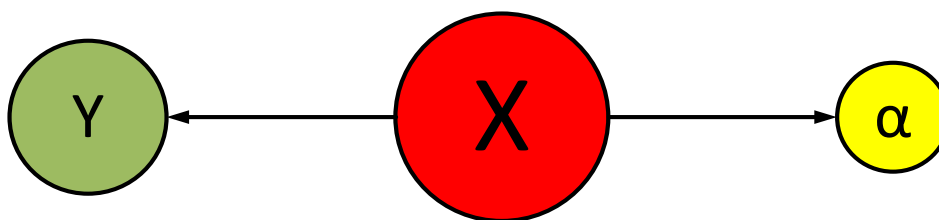
Přímou ionizující záření je tvořeno částicemi, které nesou nějaký elektrický náboj ( $\alpha$ ,  $\beta^-$ ,  $\beta^+$ ,  $p$  atd.). Tyto částice ovlivňují své okolí zejména Coulombovými silami a ionizují okolní látku. Takovéto částice postupně ztrácejí svoji kinetickou energii.

#### 3.2 Nepřímou ionizující záření

Nepřímou ionizující záření je tvořeno částicemi, které nenesou elektrický náboj ( $n$ ,  $\gamma$ , záření X,  $\nu$ ). Takovéto částice se detekují nepřímo pomocí interakce s nabitými částicemi.

#### 3.3 Záření $\alpha$

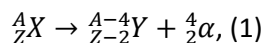
Zdroje  $\alpha$  záření jsou nestabilní těžká jádra atomů. Základní schéma rozpadu  $\alpha$  je znázorněno na obrázku č. 1. Při tomto rozpadu se z mateřského jádra vyzáří jádro Hélium, které obsahuje 2 protony a dva neutrony.



**Obrázek 1.:** Schéma rozpadu  $\alpha$ . Dceřiné jádro a  $\alpha$  částice mají opačný směr.

Jelikož jsou z mateřského jádra s  $N$  nukleony a  $Z$  protony odebrány 2 protony a 2 neutrony, tak dceřiné jádro bude mít o 4 nukleony méně. V Mendělejevově periodické tabulce prvků bude jádro posunuto o 2 místa doleva směrem k jednodušším prvkům. Děj je popsán rovnicemi (1) a

(2), kde X je mateřské jádro, které obsahuje konkrétní počet nukleonů a protonů. Nukleonové číslo nebo též hmotnostní číslo je ukryto pod symbolem A protonové číslo pod symbolem Z.



$$ZZE : Q = E_Y + E_\alpha, (2)$$

## Spektrum záření $\alpha$

Částice  $\alpha$  odnáší rozdíl energií mezi mateřským a dceřiným jádrem, který je dán rovnicí (3).

$$DE = (m(Z, N) - (Z - 2, N - 4)) \cdot c^2, (3)$$

Tento energetický rozdíl je konstantní, což znamená, že všechny částice daného jádra mají stejné kinetické energie dle rovnice 4. Částice  $\alpha$  mají diskrétní energetické spektrum.

$$E_\alpha = (m(Z, N) - m(Z - 2, Z - 4) - m(\alpha)) \cdot c^2, (4)$$

Spektrometrickým měřením zdrojů  $\alpha$  záření bylo zjištěno, že prvky s kratším poločasem rozpadu mají vyšší energie emitovaného záření  $\alpha$ . Tuto závislost mezi poločasem rozpadu a energií záření udává *Geiger-Nutallův vztah* (5).

$$\ln(I) = A \cdot \ln E_\alpha + B, (5)$$

kde A a B jsou konstanty. Částice  $\alpha$  je těžkou nabitou částicí, která při průchodu látkou ztrácí energii pomocí čtyř mechanismů:

1. Excitace a ionizace látky (tzv. elektronové brzdění)
2. Polarizace atomů látky
3. Záchytem elektronů a jaderné brzdění
4. Pružný rozptyl a jaderná reakce

Hlavní vliv má první mechanismus. Ztráty pomocí pružného rozptylu a jaderné reakce jsou zanedbatelné. Polarizace atomů látky je významná v případě relativistických částic a záchytem elektronů a jaderné brzdění se uplatňuje pro částice s energií menší než 1 MeV. Tyto čtyři mechanismy způsobují zastavení nabitě částice v látce. Veličiny, které popisují průchod těžké nabitě částice látkou, jsou:

1. Lineární brzdná schopnost -  $S_e = -\frac{dT}{dx}$
2. Lineární dosah - R

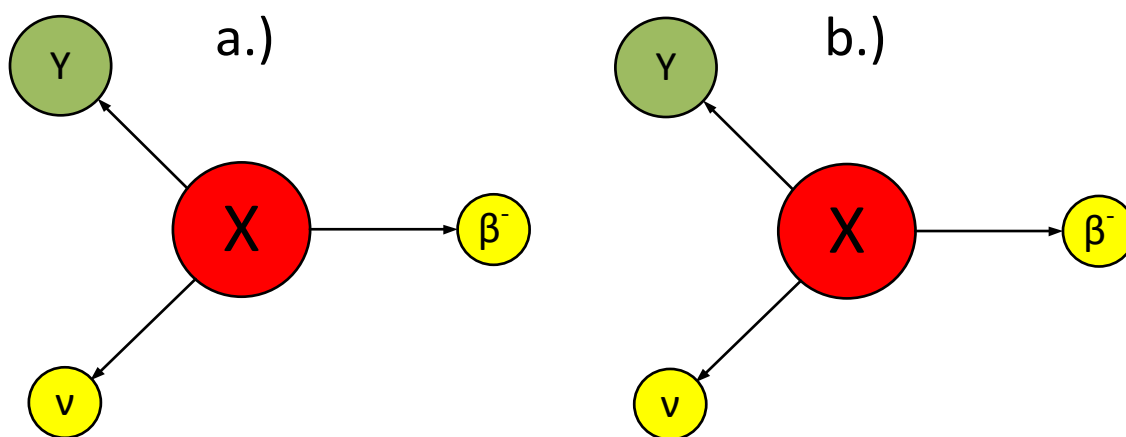
Lineární dosah pro částice  $\alpha$  ve vzduchu je vyjádřen empirickou rovnicí (6) a v prostředí s hmotnostním číslem  $A$  rovnicí (7).

$$R_{\alpha v} = 0,31 \cdot E_{\alpha}^{\frac{3}{2}}; [\text{cm}, \text{MeV}]; 4 \text{ MeV} < E < 7 \text{ MeV}, (6)$$

$$R_{\alpha} = 0,56 \cdot R_{\alpha v} \cdot A^{\frac{1}{3}}; [\text{mg}/\text{cm}^2, \text{cm}], (7)$$

### 3.4 Záření $\beta$

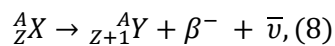
$\beta$  záření je původem z atomového jádra. Z jádra je emitována částice  $\beta$  a elektronové anti-neutrino, pokud dochází k přeměně neutronu na proton. Tento jev nazýváme rozpadem  $\beta^-$ . Při rozpadu  $\beta^+$  dochází v jádře k přeměně protonu na neutron a je emitován pozitron ( $\beta^+$ ) a elektronové neutrino. Základní schéma rozpadu  $\beta$  je znázorněno na obrázku 2.



Obrázek 2.: a.) rozpad  $\beta^-$ , b.) rozpad  $\beta^+$ .

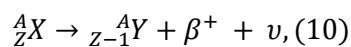
Záření beta je popsáno následujícími rovnicemi:

**$\beta^-$  rozpad:**



$$ZZE : Q = E_Y + E_{\beta^-} + E_{\bar{\nu}}, (9)$$

**$\beta^+$  rozpad:**



$$ZZE : Q = E_Y + E_{\beta^+} + E_{\nu}, (11)$$

Spektrum  $\beta$  záření je spojité díky rozpadu na tři částice.  $\beta$  částice reagují s látkou pomocí dvou mechanismů. První způsob je ionizace a excitace atomů látky a druhým způsobem je buzení brzdného záření. Stopy částic  $\beta$  jsou křivočaré celková, délka trajektorie částice je delší než její dosah. U elektronů je definována maximální hloubka proniknutí elektronu  $R_e$ . Tato hodnota je určována experimentálně a lze ji spočítat následujícími empirickými vztahy pro hliník (12,13) a ostatní prvky (14):

$$R_e = 0,407 \cdot E^{1,38}; [\text{g/cm}^2, \text{MeV}]; 0.45 \text{ MeV} < E < 0.8 \text{ MeV}; (12)$$

$$R_e = 0,542 \cdot E - 0,133; [\text{g/cm}^2, \text{MeV}]; 0.45 \text{ MeV} < E < 0.8 \text{ MeV}; (13)$$

$$R_x = R_{Al} \cdot \frac{\left(\frac{Z}{A}\right)_{Al}}{\left(\frac{Z}{A}\right)_x}, (14)$$

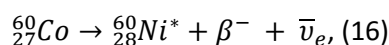
Absorpční křivka pro záření  $\beta$  má v široké oblasti tlouštěk absorbujícího materiálu přibližně exponenciální tvar dle rovnice (15).

$$N(x) = N(0) \cdot e^{-\mu x}, (15)$$

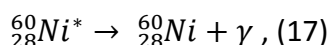
$N(0)$  je počet elektronů, který vstupuje do absorbátoru a  $N(x)$  je počet elektronů, jež prošly materiálem o tloušťce  $x$  s lineárním součinitelem zeslabení  $\mu$ .

### 3.5 Záření $\gamma$

Záření gama je elektromagnetické záření o vysoké energii, které vzniká při de-excitaci jádra, jež se nachází ve vybuzeném stavu po radioaktivní přeměně. K vytvoření záření gama často dochází po rozpadu jádra  $\alpha$  nebo  $\beta$  rozpadem. Při přechodu do nižšího energetického stavu dochází k vyzáření elektromagnetické vlny o energii, která je rozdílem energie jádra v excitovaném a de-excitovaném stavu. Jako typický příklad je uveden zdroj gama záření  $^{60}\text{Co}$ . Nejprve dochází k rozpadu  $\beta$  dle rovnice (16).



Po  $\beta$  rozpadu se jádro Ni nachází ve vybuzeném stavu a emituje záření gama o energii 1,17 MeV nebo 1,33 MeV dle rovnice (17).



Pro záření  $\gamma$  známe tři různé způsoby interakce s látkou:

1. **Fotoelektrický jev** - při absorpci elektromagnetické záření látkou je energie fotonu předána elektronu v atomovém obalu, dochází k emisi elektronů (rentgenové záření nebo světelné záření).
2. **Comptonův rozptyl** - při srážce fotonů s atomy dojde ke změně energie (vlnové délky) fotonu a část energie fotonu je předána atomu.
3. **Vznik páru elektron-pozitron** - pokud energie gama záření je vyšší než dvojnásobek klidové hmotnosti elektronu ( $> 1,02$  MeV), tak je možný vznik páru elektron-pozitron.

Záření  $\gamma$  je vysoce pronikavé a ke stínění je zapotřebí silnější vrstva materiálu než u  $\alpha$  a  $\beta$  záření. Materiály s vyšší hustotou jsou vhodnější pro stínění záření  $\gamma$ . Schopnost látky stínit záření  $\gamma$  se vyjadřuje tzv. polo-tloušťkou materiálu (průchodem dojde ke snížení intenzity záření  $\gamma$  na polovinu).

### 3.6 Ostatní zdroje záření

Předchozí kapitoly zevrubně popisují rozpady  $\alpha$  a  $\beta$  a záření  $\gamma$ . Nicméně v přírodě se vyskytuje mnoho dalších jevů, které způsobují ionizující záření. Záření  $\beta^+$  a  $\beta^-$  není jediným zdrojem rychlých elektronů. Vnitřní konverze a Augerův jev je též zdrojem rychlých elektronů. Kromě rozpadu  $\alpha$  je zdrojem těžkých nabitých částic také spontánní štěpení. Gama záření, které bylo popsáno, je zářením gama, které doprovází rozpad  $\beta$ . Dalšími procesy jsou anihilační záření, záření gama buzené v jaderných reakcích, brzdné záření, záření X a synchrotronové záření, které je buzeno elektromagnetickým zářením. Dalším významným typem záření je neutronové záření, které vzniká pomocí spontánního štěpení, radioizotopových zdrojů ( $\alpha, n$ ), foto-neutronových zdrojů ( $\gamma, n$ ) anebo pomocí reakcí s nabitými částicemi v urychlovačích.



## 4 Detektory ionizujícího záření

Jelikož ionizující záření je lidskými smysly "nedetekovatelné", tak je nutné pomocí speciální detekční techniky, fyzikálních jevů a metod záření měřit. Pro detekci ionizujícího záření bylo vyvinuto velké množství metod a detekčních technik. Pomocí detekčních technik lze měřit intenzitu záření, energii záření, prostorovou distribuci a mnoho dalších informací, které jsou spjaty s ionizujícím zářením. V této kapitole je uveden přehled nejčastějších detektorů a jejich vlastností a parametrů.

### 4.1 Detekční účinnost detektoru

V případě reálného měření vlastností ionizujícího záření částice dopadají do detektoru náhodně rozprostřené v čase dle Poissonova rozdělení. Mnoho zdrojů záření má nízkou aktivitu a zároveň detektor neměří v celém objemu okolo zdroje záření. Velmi také záleží na typu ionizujícího záření a typu interakce s okolní látkou, na rozměrech detektoru, mrtvé době detektoru a na zpracování signálu z detektoru. Díky těmto vlastnostem je žádoucí co největší detekční účinnost detektoru. Byly definovány dvě třídy detekční účinnosti:

- **Absolutní detekční účinnost** - je poměrem detekovaných částic vůči počtu částic emitovaných zdrojem.
- **Vnitřní detekční účinnost** - je poměrem detekovaných částic vůči počtu částic, které vstoupily do prostoru detektoru.

### 4.2 Mrtvá doba detektoru

Mrtvá doba detektoru je parametr, který udává, po jak dlouhou dobu od začátku detekce částice nelze správně detekovat další částici. Po tuto dobu je detektor necitlivý k částicím vstupujících do aktivní oblasti detektoru, nebo dochází k složení dvou a více signálů od částic (známé jako pile-up efekt). Charakter mrtvé doby detektoru lze rozdělit na dva druhy.

### 4.3 Neparalyzující mrtvá doba

Tento typ mrtvé doby je charakteristický tím, že částice dopadající do aktivního objemu detektoru nejsou registrovány, ale zároveň nemají negativní vliv na činnost detektoru. Po uplynutí mrtvé doby detektor může okamžitě registrovat další událost. Závislost mezi registrovanou  $n$  a skutečnou (teoretickou) četností impulsů  $N$  je dána vztahem (18) kde  $\tau$  definuje mrtvou dobu detektoru.

$$n = \frac{N}{1+N\cdot\tau}, [\text{imp/s}], (18)$$

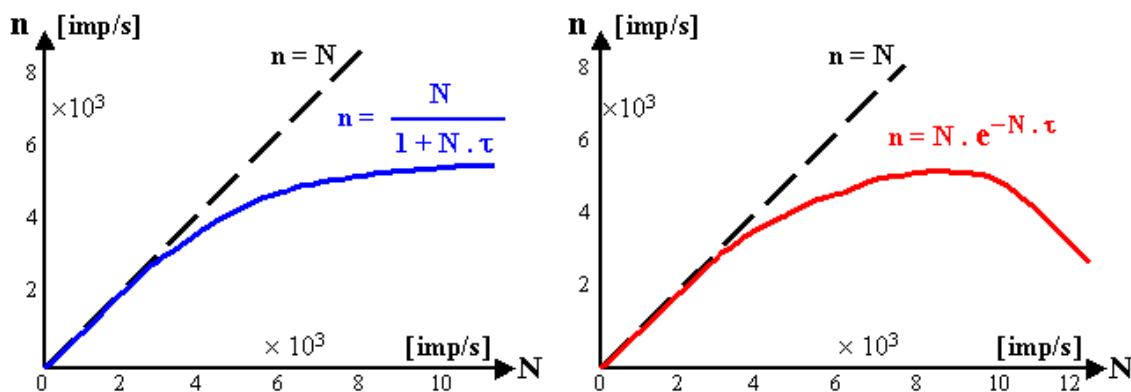
Registrovaný počet událostí  $n$  roste lineárně s lineárním nárůstem intenzity záření  $N$ . Při četnostech  $N \gg 1/\tau$  se počet událostí  $n$  nasycuje.

#### 4.4 Paralyzující mrtvá doba

Tento typ mrtvé doby je charakteristický tím, že při pile-up efektu dojde k prodloužení mrtvé doby. Závislost mezi registrovanou  $n$  a skutečnou (teoretickou) četností impulsů  $N$  je dána vztahem (19).

$$n = N \cdot e^{-N \cdot \tau}, \text{ [imp/s]}, \text{ (19)}$$

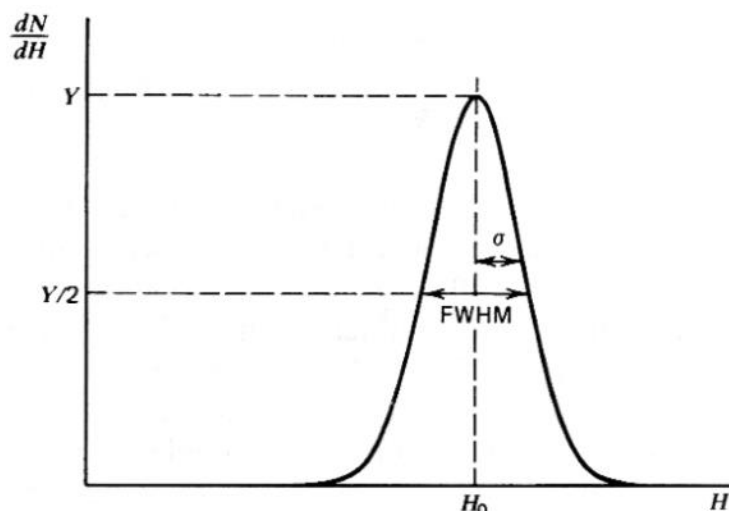
Závislosti dle typů mrtvé doby jsou zobrazeny na obrázku 3. U paralyzující mrtvé doby dochází ke snížení četnosti detekovaných událostí.



**Obrázek 3.:** Vliv mrtvé doby detektoru na odezvousou funkci detektoru. Vlevo: Neparalyzující mrtvá doba, Vpravo: Paralyzující mrtvá doba. Převzato z [3].

#### 4.5 Energetické rozlišení detektoru

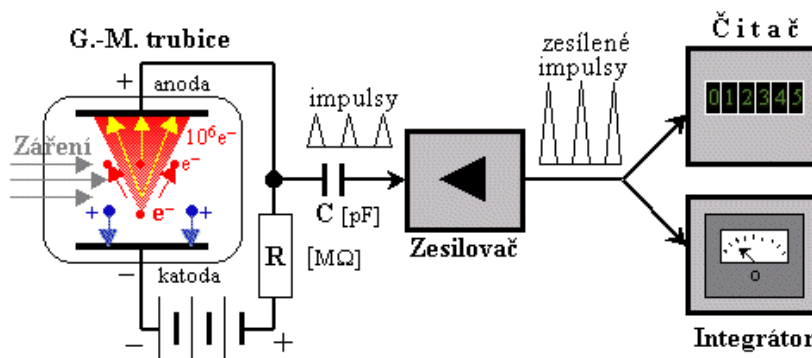
Energetické rozlišení vyjadřuje míru přesnosti při měření deponované energie. Pokud je energetické rozlišení menší než rozdíl dvou sousedních energií, pak dvě různé částice mohou být reprezentovány jako stejná částice. V případě ideálního detektoru by monochromatický zdroj ionizujícího záření měl ve spektru pouze jednu čáru dle energie. Reálný detektor vlivem nedokonalostí monochromatické spektrum zkreslí (ale i díky dalším vlivům v elektronické části detekčního systému a samotným vlastnostem interakce s látkou). Výsledné spektrum místo čárového spektra obsahuje gausián o střední hodnotě  $H_0$  a směrodatné odchylce  $\sigma$ . Parametr FWHM vyjadřuje přesnost rozlišení. Na obrázku číslo 4 je znázorněno zkreslení čárového spektra.



**Obrázek 4.:** Ilustrační obrázek energie částice. Energie, byť monochromatická je rozmazána v gaussián. Pokud je rozlišení detektoru vyšší FWHM je menší. Převzato z [2].

#### 4.6 Geiger-Müllerův (GM) počítač

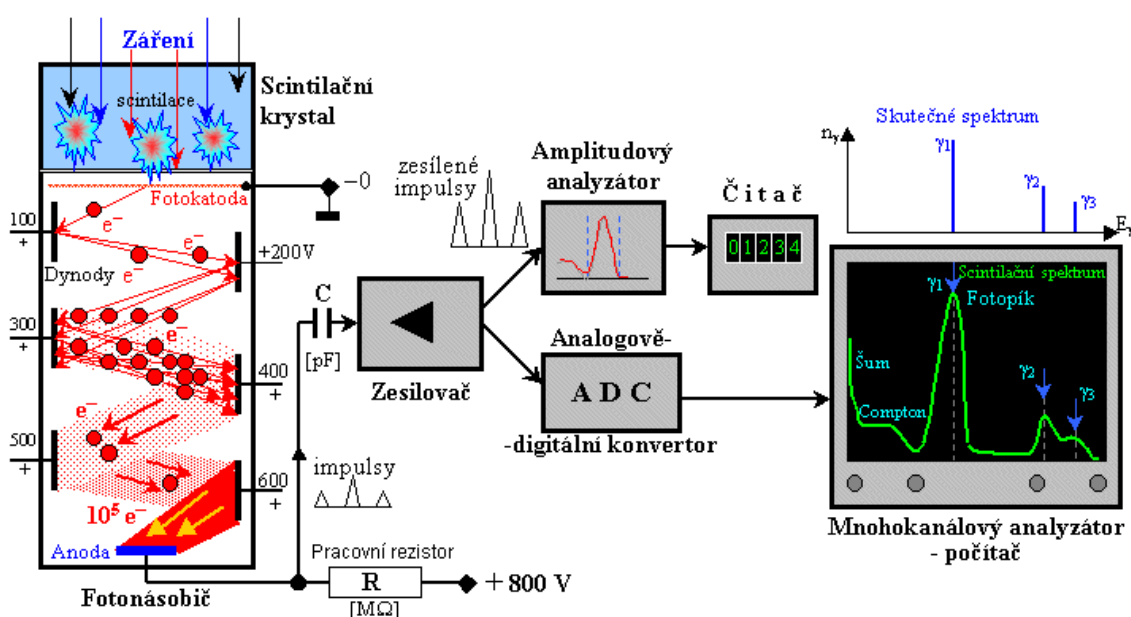
GM je zařízení složené z ionizační komory (Geiger-Müllerova trubice) a čítače pulsů. Trubice je naplněna inertním plynem a na její elektrody je přivedeno vysoké napětí (500 až 1000V). Bez přítomnosti ionizujícího záření je GM trubice nevodivá, ale při interakci ionizujícího záření s plynem dojde k ionizaci inertního plynu a následnému lavinovému efektu. Ten způsobí krátký, ale intenzivní nárůst proudu mezi elektrodami a detekci tohoto proudu na snímacím odporu je pak zaznamenán jeden puls. Geiger-Müllerův počítač umožňuje měřit intenzitu ionizujícího záření. Tímto detektorem nelze měřit energii ionizujícího záření. Lavinový efekt neumožňuje měřit původní energii ionizujícího záření. V současnosti je GM počítač používán pro nenáročná měření, kde vynikne jeho jednoduchost. Pro velmi přesné a náročné měření se dnes používají detektory scintilační a polovodičové.



**Obrázek 5.:** Principiální blokové schéma GM detektoru. Převzato z [1].

#### 4.7 Scintilační detektory

Scintilační detektor je založen na principu konverze energie částic na velké množství nízkenergetických fotonů (desítky tisíc) pomocí scintilačního krystalu. Nízkenergetické fotony jsou ve spektru viditelného světla. Část těchto fotonů (cca 10%) je pak detekována fotonásobičem. Fotonásobičem je světlo převedeno na elektrický signál. Na pracovním odporu o vysoké hodnotě je snímán proudový impuls a přes vazební kondenzátor je impuls přiveden na vstup zesilovače. Dalším zpracováním je možné zjistit velikost energie původního fotonu, jelikož intenzita scintilace je přímo úměrná energii fotonu a intenzita scintilace je přímo úměrná počtu fotoelektronů.



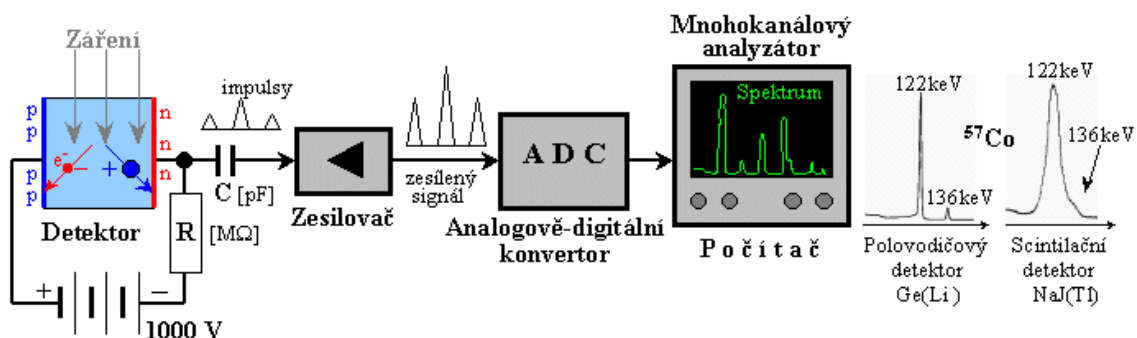
**Obrázek 6.:** Principiální blokové schéma scintilačního detektoru. V pravé části na obrazovce je typický tvar scintilačního spektra záření gama - ve srovnání se skutečným čárovým spektrem nahoře. Převzato z [1].

Scintilační detektory vynikají vysokou detekční účinností díky vysoké hustotě scintilačního krystalu. Scintilační krystal má velice krátkou mrtvou dobu cca.  $10^{-9}$  s. Fotonásobič a zesilovač mrtvou dobu zvýší až na cca.  $10^{-6}$  s.

#### 4.8 Polovodičový detektor

Polovodičový detektor se principem detekce ionizujícího záření podobá ionizační komoře. Aktivním prvkem je však polovodič. Z pohledu elektroniky se jedná o diodu zapojenou v závěrném směru. Skrze diodu zapojenou v závěrném směru prakticky neprotéká žádný proud. Pokud ionizující záření vnikne do oblasti bez volných nosičů náboje, tak dojde ke vzniku elektron-děrových párů a diodou proteče proudový puls, který je převeden na napětí pomocí

snímacího odporu. Signál je přes vazební kondenzátor přiveden na vstup zesilovače, který je připojen k A/D převodníku. Polovodičové detektory mají až 30x větší rozlišení ve spektru oproti scintilačním detektorům díky dokonalému sběru náboje z citlivého objemu detektoru. Rozlišovací schopnost je nižší než 1 keV (v případě HPGe ještě lepší).

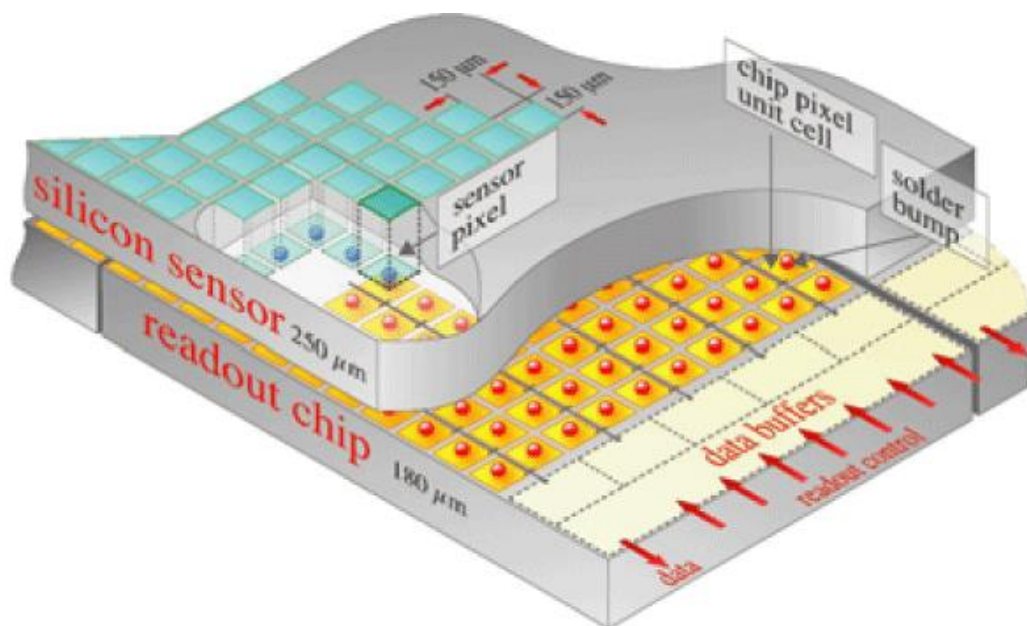


**Obrázek 7.:** Blokové schéma polovodičového detektoru. Vpravo je ukázka srovnání polovodičového spektra záření gama se spektrem scintilačním. Převzato z [1].

V současnosti je již výroba polovodičových součástek natolik vyvinuta, že lze vytvářet integrované obvody s tranzistory, které jsou menší než 20 nm. Tyto metody byly s velkým úspěchem použity pro vytvoření složitějších multi-detektorových systémů založených na detekci v PN přechodu. Jedná se zejména o stripové a pixelové detektory. Ačkoliv rastry takových detektorů jsou zatím v řádu desítek  $\mu\text{m}$ , tak je patrný trend zmenšování aktivních prvků k dosažení velké hustoty detektorů na jednotku plochy.

## 5 Polovodičové pixelové detektory

Moderní technologie pro výrobu polovodičových integrovaných obvodů lze s velkou výhodou využít i v oboru detekce ionizujícího záření. Jak bylo uvedeno výše, polovodičové detektory jsou založeny na PN přechodu. Tuto strukturu je velmi snadné vytvořit pomocí moderních metod výroby polovodičových součástek (difuzní technika, tranzistory mesa, planární technika, atd.). Citlivá plocha je rozdělena na jednotlivé PN přechody. Každý takový PN přechod představuje jeden detektor. Tímto přístupem je možné vytvořit citlivou plochu, která obsahuje velké množství detektorů (stovky až desetitisíce). Takový senzor je možné pomocí technologie bump-bonding spojit s ASIC integrovaným obvodem, který zajišťuje základní zpracování signálů ze senzorů. Další část práce je zaměřena zejména detektory z rodiny Medipix, jenž jsou vyvíjeny v rámci konsorcia Medipix v CERNu, které sdružuje mnoho univerzit a výzkumných institucí po celém světě (existuje samozřejmě více pixelových detektorů podobné struktury – Pilatus, CMS pixel detector a další, všechny jsou ale založeny na stejném principu). Cílem této práce je vytvoření pokročilého datového rozhraní pro detektory Medipix2MXR, Timepix a Medipix3.

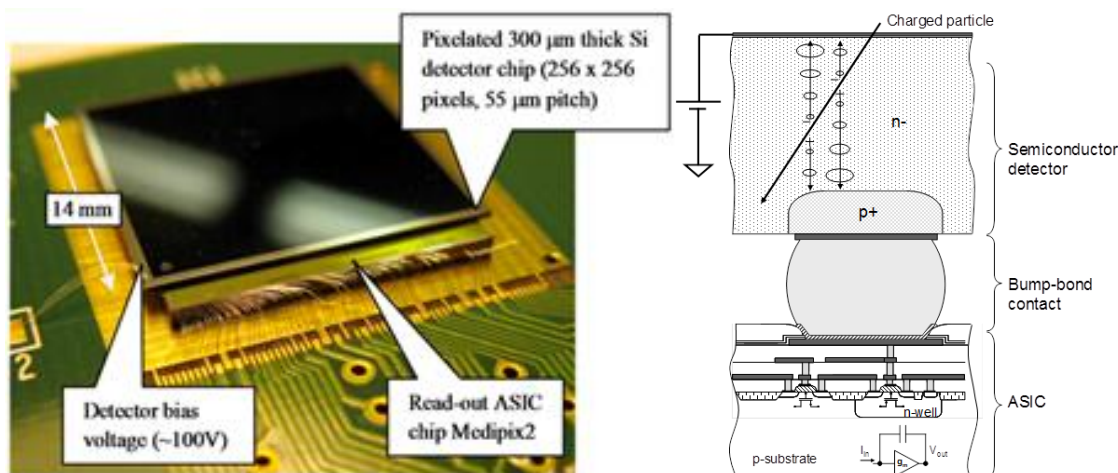


**Obrázek 8.:** Principiální zapojení hybridního polovodičového pixelového detektoru. Detektor je rozdělen na ASIC čip a samotný senzor. Jsou spojeny technologií bump-bonding. Převzato z [6].

### 5.1 Medipix2MXR

Rodina detektorů Medipix se skládá z hybridních detektorů Medipix1 [6], Medipix2 [3, 6], Medipix2MXR [3, 6], Timepix [4, 6] a Medipix3 [5]. Hybridním detektorem rozumíme, že je

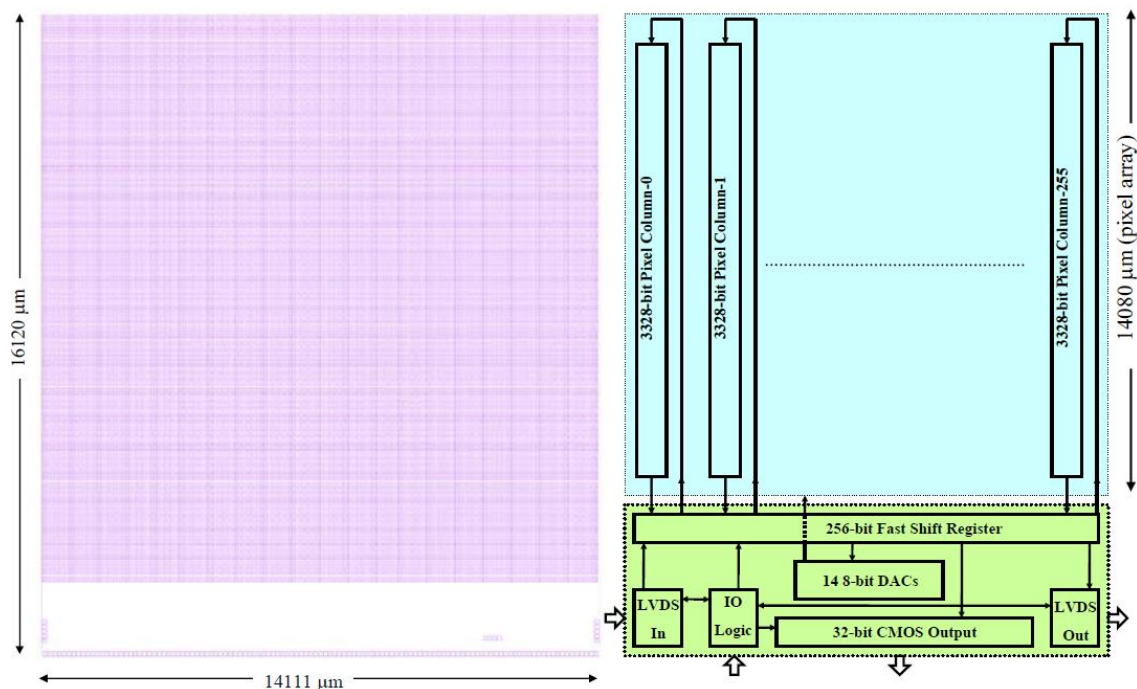
složen ze dvou částí. První část je senzor (radiálně citlivý objem – PN přechodů) a druhá část je ASIC integrovaný obvod. Senzor se používá obvykle polovodičový materiál jako např. křemík, ale díky hybridní technologii je možné použít senzory z jiných materiálů (GaAs nebo CdTe). Výhodou této hybridní struktury je možnost oddělení návrhu a výroby senzoru a ASIC integrovaného obvodu. Ačkoliv detektor Medipix2MXR není prvním detektorem z rodiny Medipix, který byl vyvinut a dnes je to již starší model, jenž byl nahrazen novějším modelem Timepix, na něm bude vysvětlen princip funkce detektoru.



**Obrázek 9.:** Vlevo: fotografie detektoru Medipix2MXR, vpravo: Schéma a princip detekce a řez detektorem. Převzato z [6].

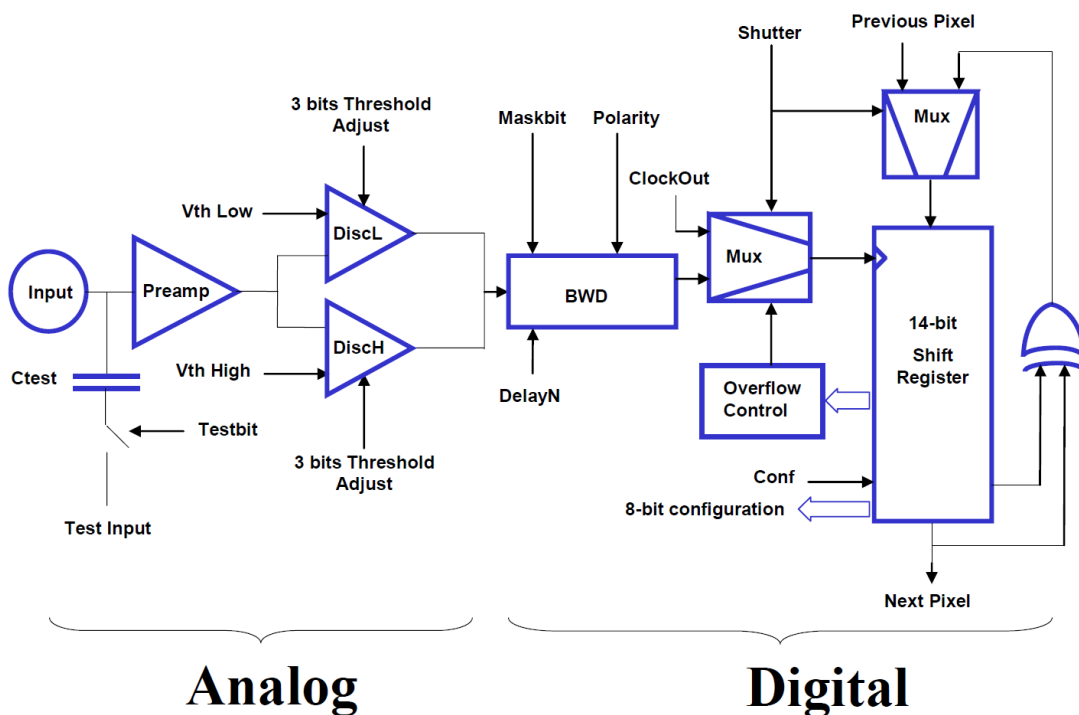
Prvním detektorem byl Medipix1 s 4096 čtvercovými pixely o hraně 170 μm a s aktivní plochou 1,2cm<sup>2</sup>. Každý pixel obsahoval 15b čítač pro registrování událostí detektoru. Medipix2 je následujícím detektorem, který již obsahoval 65536 pixelů o velikosti 55 μm × 55 μm. Každý pixel obsahoval 13 bitový „pseudo-random“ čítač. Z tohoto detektoru vychází detektor Medipix2MXR. Detektor má rozměry 16,12 mm × 14,111 mm. Aktivní plocha je rozdělena na 65536 pixelů o velikosti 55 μm × 55 μm (aktivní plocha je 1,982 cm<sup>2</sup>, což je 87,35 % celkové plochy). Detektor je složen z jednotlivých buněk pro každý PN přechod a z datového rozhraní umístěného ve spodní části detektoru. Statická spotřeba detektoru je přibližně 550 mW. Detektor je vyroben 250 nm CMOS technologií (umožňuje použít přibližně 500 tranzistorů na pixel).





Obrázek 10.: Blokové schéma detektoru Medipix2MXR. Převzato z [6].

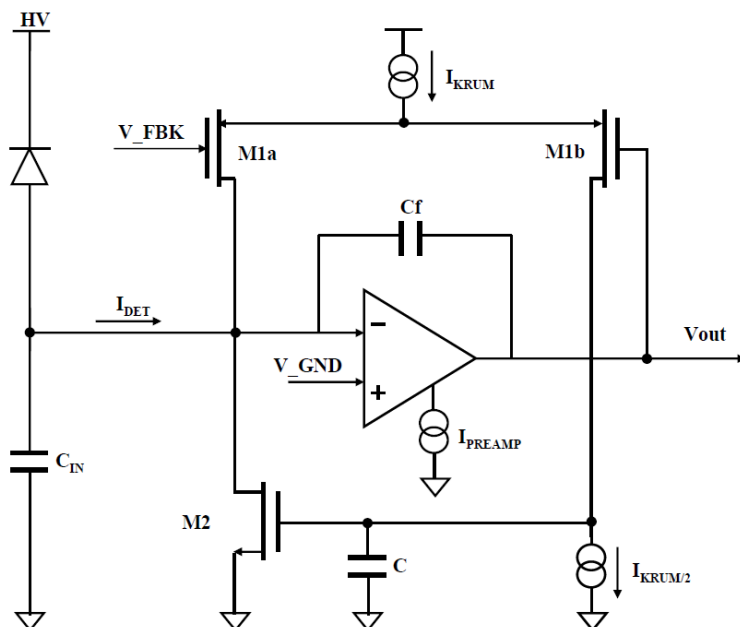
### 5.1.1 Schéma pixelu - Medipix2MXR



Obrázek 11.: Schéma zapojení jednoho pixelu v ASIC čipu detektoru. Pixel je rozdělen na analogovou (vlevo) a digitální část (vpravo). Převzato z [6].



Elektronika pro každý pixel je složena ze dvou částí. První částí je analogový obvod, který slouží k předzpracování pulsů ze senzoru. K předzpracování slouží nábojový zesilovač, který je zobrazen na obrázku 12. O nábojovém zesilovači se lze dozvědět více v [7]. Zesilovač tvaruje vstupní signál, umožňuje kompenzaci klidového proudu vstupní části tranzistoru a umožňuje nastavitelnou rychlost odezvy.

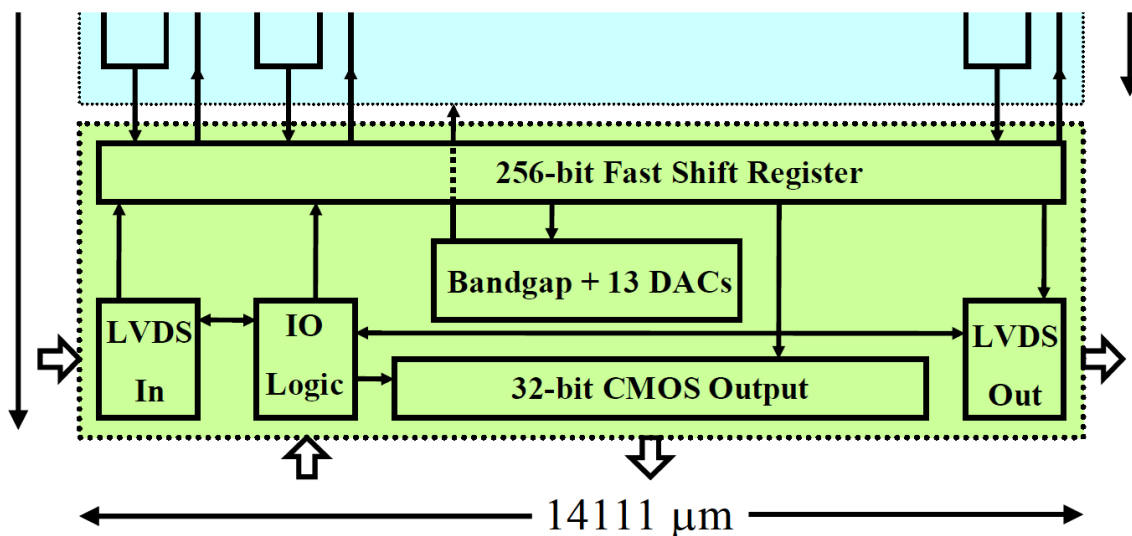


**Obrázek 12.:** Zapojení předzesilovače v každém pixelu v ASIC čipu. Převzato z [6].

Další částí analogového obvodu jsou dva komparátory. Výstupy komparátorů jsou přivedeny na vstup digitální části elektronického obvodu pixelu. Každý pixel je vybaven testovacím signálem, který lze připojit na vstup nábojového zesilovače. Tento signál slouží ke kalibraci detektoru bez přítomnosti ionizujícího záření. První stupeň digitální části (BWD) generuje hodinový puls pro čítač. Hodnotu čítače lze pomocí posuvného registru vyčíst do komunikační periferie detektoru. Posuvné registry jsou zřetězeny a tvoří jeden 3584 bitů dlouhý posuvný registr. Každý pixel ještě obsahuje konfigurační registr, který umožňuje nastavit každý registr nezávisle na ostatních. Registr obsahuje 6 bitů pro jemné doladění komparační úrovně komparátorů (3 bity pro každý komparátor). Mask bit slouží k blokování činnosti pixelu. Test bit připojuje testovací signál na vstup nábojového zesilovače. Tato architektura umožňuje měřit četnost dopadajících částic předem zvolených energií v každém pixelu detektoru.

### 5.1.2 Komunikační periferie

Detektor Medipix2MXR je vybaven dvěma datovými rozhraními.



Obrázek 13.: Blokové schéma komunikační periferie detektoru Medipix2MXR. Převzato z [6].

LVDS sériové rozhraní je určeno pro nastavování parametrů detektoru a čtení dat z pixelů. Paralelní 32 bitová CMOS sběrnice je určena pro vysokorychlostní čtení dat. Komunikační rozhraní obsahuje 256 bitový registr FSR (Fast Shift Register), který je připojen na sériové a paralelní komunikační rozhraní a odpovídá 256 sloupcům matice detektoru. Po načtení 256 bitů do tohoto registru jsou data paralelně přepočtena do posuvných registrů od pixelů. Tuto činnost lze opakovat, až je matice konfigurována nebo dokud není přečten obsah jednotlivých pixelů. Komunikační periferie je schopna komunikovat na frekvenci až 100 MHz.

Přenosové rychlosti pro  $f = 100$  MHz:

- Sériové rozhraní – 100 Mb/s
- Paralelní rozhraní – 3,2 Gb/s

### 5.2 Módy detektoru

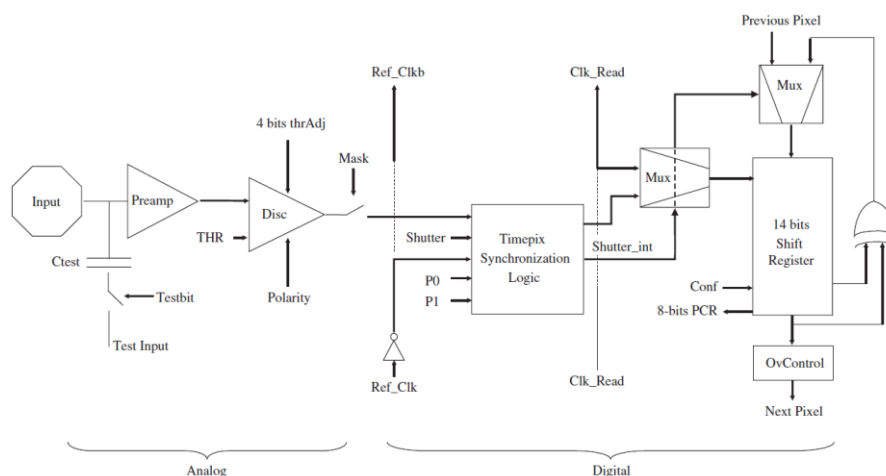
Módy detektoru se ovládají signály M0, M1, PS, Shutter a Reset. Jsou to vstupní CMOS signály, které musí být po celou dobu operace stabilní.

- **Reset detektoru** – všechny bity ve FSR jsou nastaveny do log. 1. Všechny D/A převodníky uvnitř integrovaného obvodu jsou nastaveny do prostřed rozsahu.
- **Měření** – pomocí signálu Shutter je detektor uveden do stavu měření a čítače jsou inkrementovány v závislosti na dopadajícím záření na citlivou plochu detektoru.

- **Čtení dat detektoru** – obsah matice detektoru je pomocí FSR předán komunikačnímu rozhraní. Konec operace je signalizován signálem EnableOut.
- **Načtení konfiguračních dat** – data jsou pomocí FSR předána do konfiguračního registru PCR, který obsahuje každý pixel.
- **Nastavení interních D/A převodníků** – pomocí FSR jsou do D/A převodníků zapsány hodnoty. D/A převodníky slouží k nastavení parametrů analogové části každého pixelu. Toto nastavení je pro všechny pixely společné.
- **Kalibrace pomocí testovacích pulsů** – na vyhrazený pin je přiveden signál, který je připojen na vstup nábojových zesilovačů v každém pixelu. Pomocí tohoto signálu lze kalibrovat detektor bez přítomnosti ionizujícího záření.

### 5.3 Timepix

Detektor Timepix je evolucí detektoru Medipix2MXR a přímo z něj vychází, což je patrné na jeho struktuře. Významně však byla přepracována digitální část každého pixelu (Timepix Synchronization Logic - TSL), čímž je detektor Timepix schopen měřit tři různé druhy informací o dopadajícím ionizujícím záření. Stejně jako předchozí generace umožňuje měřit počet částic dopadlých na aktivní plochu detektoru. Dalším módem lze měřit energii detekované částice (mód Time over Threshold). Posledním módem lze měřit čas detekce ionizující sub-atomové částice vůči ukončení expoziční doby detektoru (Timepix mód). Pro měření lze zvolit pouze jednu z uvedených možností pixelu přitom jednotlivé pixely mohou být nakonfigurovány nezávisle na ostatních pixelech. Tyto informace lze měřit díky výraznému vylepšení digitální části pixelu. Pro měření energie nebo času není generován pouze jeden hodinový puls pro čítač, ale jsou generovány hodinové pulsy, dokud je analogový signál vyšší než referenční hodnota komparátoru.

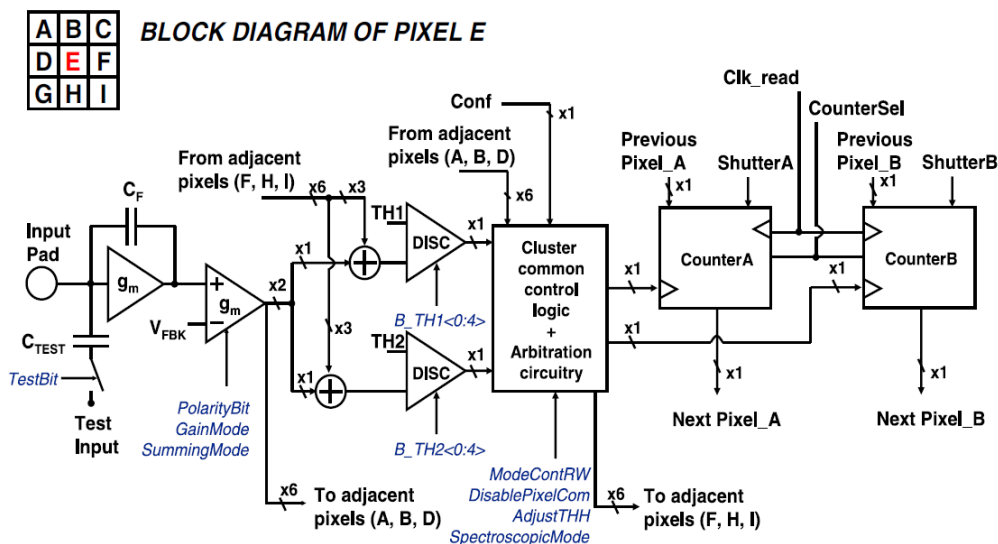


**Obrázek 14.:** Blokové schéma analogové a digitální části v pixelu detektoru Timepix. Převzato z [6].

V komunikační periférii detektoru Timepix nedošlo ke změnám a je naprosto identická s komunikační periférií v detektoru Medipix 2 MXR. Na obrázku č. 14 je znázorněna struktura pixelu v detektoru Timepix.

#### 5.4 Medipix3

Detektor Medipix3 [7] je nejnovějším modelem z rodiny Medipix. Detektor je vyroben 130 nm CMOS technologií. Citlivá plocha senzoru obsahuje  $256 \times 256$  pixelů s rozměry  $55 \mu\text{m} \times 55 \mu\text{m}$ . Elektronika zpracovávající signál z PN přechodu senzoru byla výrazně přepracována pro snížení zkreslení, ke kterému dochází vlivem sdílení náboje mezi pixely (Charge Summing Mode - CSM, více o sdílení náboje mezi pixely zde [16]). Nová struktura pixelu detektoru Medipix3 je znázorněna na obrázku č. 15. Do pixelů byly přidány vazby se sousedních pixelů pro měření v módu CSM. Díky této vlastnosti se energie sečte do pixelu, kde byla deponována největší část energie částice. Digitální část obsahuje dva 12 bitové čítače s nastavitelnou délkou. Lze nastavit délku čítačů (1 b, 4 b, 12 b) anebo spojit je do jednoho 24 bitového čítače. Každý čítač má pro čítání zaveden vlastní signál z komparátorů. Zároveň je dostupná možnost nepřetržitého měření s nulovou mrtvou dobou (jeden čítač je čten, zatímco druhý měří). Struktura pixelu detektoru Medipix3 je znázorněna na obrázku č. 15.



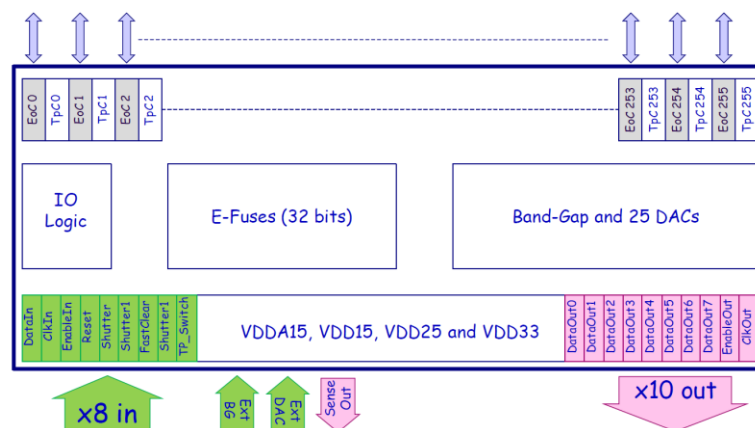
Obrázek 15.: Blokové schéma analogové a digitální části pixelu pro Medipix3. Převzato z [5].

### Módy měření detektoru Medipix3:

- **CSM (Charge Summing Mode)** - Díky sdílení náboje mezi pixely, které byly zasaženy jednou částicí a dochází ke zkreslení. V tomto módu je pomocí vazeb ze sousedních pixelů možno sečíst veškerou deponovanou energii do pixelu, kde byla deponována největší část energie.
- **SPM (Single Pixel Mode)** - Každý pixel pracuje zcela samostatně.
- **CM (Color Mode)** - Pokud je osazen sensor, kde jsou 4 pixely sloučeny do jednoho, tak lze využít až osm komparačních úrovní pro tento pixel  $110 \mu\text{m} \times 110 \mu\text{m}$ .

#### 5.4.1 Komunikační periferie detektoru Medipix3

Oproti předchozím detektorům došlo k výraznému přepracování komunikačního rozhraní a způsobu ovládání detektoru. Všechny signály jsou nyní LVDS a maximální použitelná frekvence je až 500 MHz. Datový výstup detektoru může nabývat šířky 1 až 8 bitů (obr. 16). Díky nastavitelným délkám čítače pixelu je proměnná i velikost snímku.



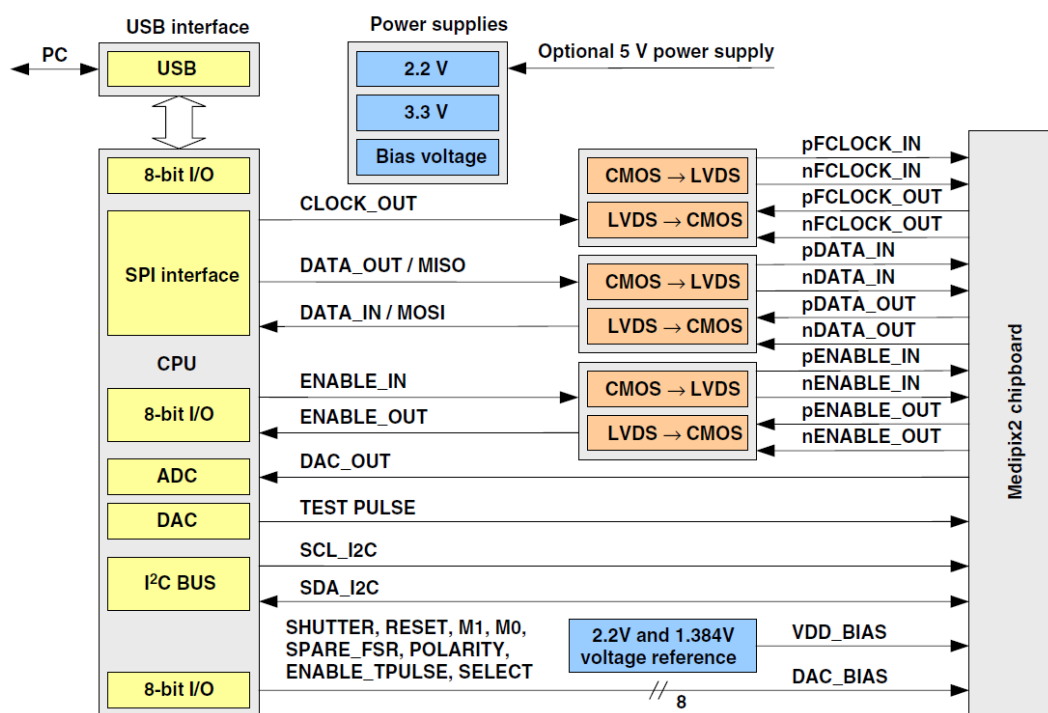
**Obrázek 16.:** Blokové schéma komunikační periferie detektoru Medipix3. Všechny signály jsou LVDS standardu a výstupní šířka sběrnice může být 1 b, 2b, 4b nebo 8b. Převzato z [5].

## 6 Stávající řešení elektronických systémů pro detektory z rodiny Medipix

V této kapitole je uveden přehled stávajících řešení elektronických systémů pro řízení experimentů a akvizici dat. Během let mnoho členů konsorcia Medipix vyvíjelo mnoho druhů elektronických systémů. V této kapitole jsou uvedeny pouze ty verze, které se více rozšířily po laboratořích uživatelů detektorů z rodiny Medipix a nebo jejich řešení považují za přínosné. Určitě je možno nalézt mnoho dalších systémů, které skončily již ve fázi vývoje nebo jako prototyp, ale těm nebude věnována pozornost, jelikož neurčovaly směr vývoje elektroniky pro tento typ detektorů.

### 6.1 USB 1.22 Interface

První komplexní a přenosné rozhraní je USB 1.22 Interface [8], který byl vyvinut v roce 2006 v Ústavu technické a experimentální fyziky na ČVUT v Praze. Tento elektronický systém je založen na mikroprocesoru s jádrem 8051. Tento systém obsahoval veškeré nezbytné podsystémy nutné k provozu detektoru. Pro komunikaci byl zvolen USB budič FT245BM, který komunikuje po 8 bitové sběrnici. Jelikož mikropočítač má k dispozici jen CMOS IO brány, tak bylo nutné použít převodníky z CMOS na LVDS a zpět. Dále je integrován zdroj vysokého napětí pro předpětí senzoru s rozsahem 5 V až 100 V a i ostatní napájecí zdroje pro všechny komponenty systému. Blokové schéma USB 1.22 Interface je zobrazeno na obrázku č. 17.



**Obrázek 17.:** Blokové schéma systému USB 1.22 Interface. Převzato z [8].

Celý systém je integrován na desku plošného spoje o rozměrech 75 mm × 46 mm [Obr. 18]. Takto malé rozměry umožnily provádět experimenty, které předtím nebylo možné uskutečnit z důvodu velkých rozměrů aparatury. USB 1.22 Interface nově umožnil měřit mimo laboratoře, integrovat tento systém do větších a složitějších celků. Celý systém disponuje malou spotřebou a lze bez potíží provozovat ve vakuu, což je významný přínos pro experimenty v oboru jaderné fyziky. S použitými komponenty a malými rozměry, ale nebylo možno dosáhnout velkého počtu obrázků za vteřinu. Tento systém používá pouze sériové rozhraní, s kterým je možno teoreticky dosáhnout až 100 snímků za vteřinu na straně detektoru. Nicméně toto rozhraní umožňuje dosáhnout pouze 5 snímků za vteřinu. Omezení je dáno rychlostí mikropočítače s USB řadičem. Další významnou vlastností je možnost spouštět měření za pomoci externího signálu. Tato nezbytná funkce je určena pro experimenty kde se měří koincidenční jevy. Ačkoliv je tato funkce implementována, tak díky mikropočítači je reakce na externí signál v řádu jednotek  $\mu\text{s}$ . Pro mnoho experimentů je to dostatečné, ale zároveň pro velmi širokou škálu experimentů je to zcela nevyhovující. Tento systém umožňuje použití detektoru Medipix2MXR a Timepix. Detektor Medipix3 je podporován pouze částečně a pro jeho další vývoj (je třeba přeprogramovat MCU jiným firmwarem).

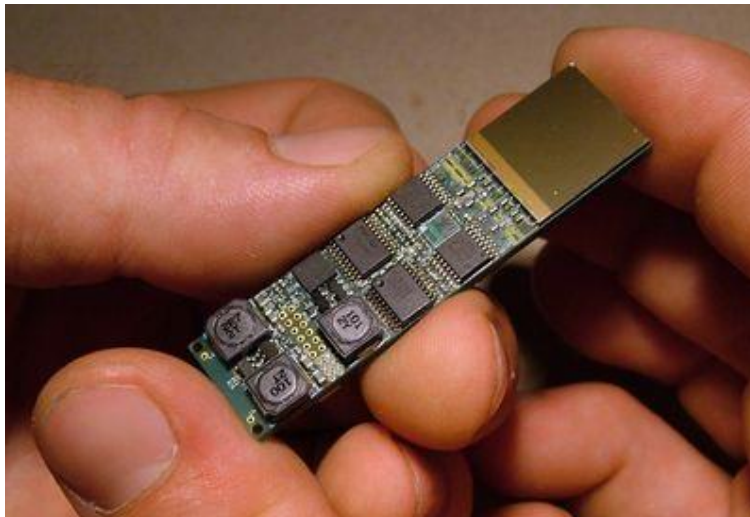


**Obrázek 18.:** Deska plošného spoje systému USB 1.22 Interface (vpravo) s připojeným detektorem Medipix2MXR (vlevo).

## 6.2 USB Lite Interface

USB Lite Interface [9] byl také vyvinut v Ústavu technické a experimentální fyziky na ČVUT v Praze. Tato verze sice přináší funkčnost totožnou s USB 1.22 Interface, ovšem HW je velmi miniaturizován. Rozměry byly redukovány na 15 mm × 60 mm. Detektor byl osazen na plošný

spoj rozhraní, což významně omezuje snadnou výměnu detektoru, ale zařízení se stává mobilnější. Tento druh rozhraní díky svým malým rozměrům je vhodný pro přenosné aplikace. Toto zařízení je s úspěchem používáno na ISS jako monitor radiace [10].

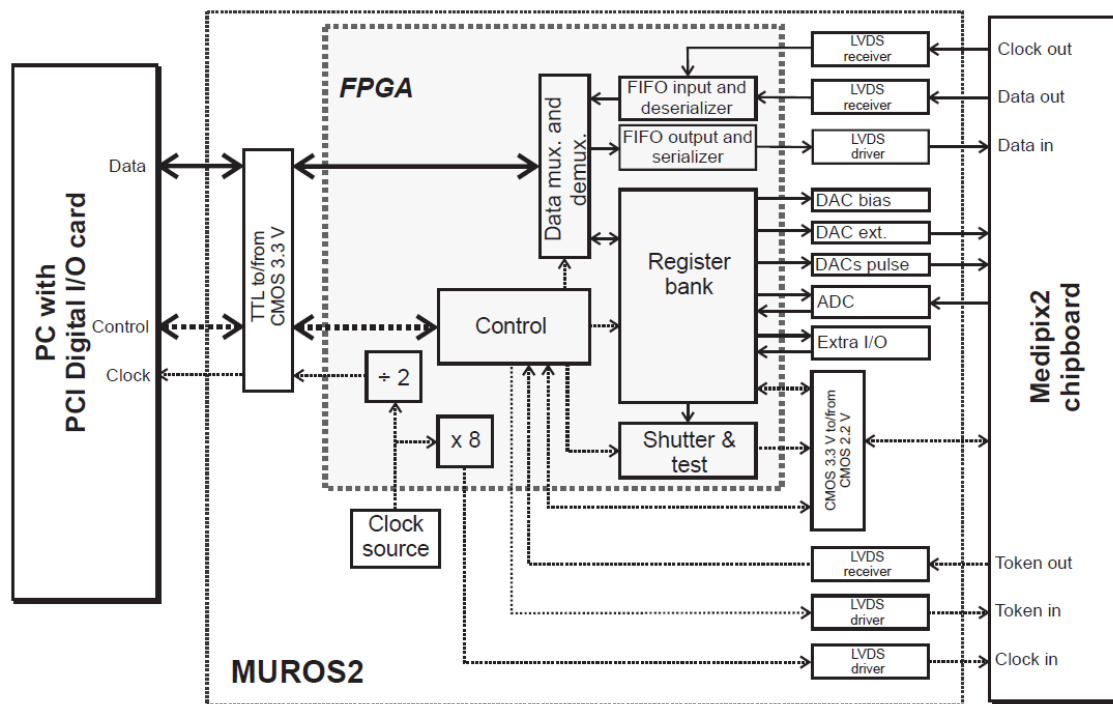


**Obrázek 19.:** USB Lite Interface slučující detektor Timepix a elektronický systém, který vychází z návrhu USB 1.22 Interface.

### 6.3 Muros2

Jedním z prvních a více rozšířených systémů pro detektory z rodiny Medipix je Muros2 [11], který byl vyvinut ve výzkumném ústavu NIKHEF (National Institute for Subatomic Physics) v Amsterdamu. Tento systém má implementovanou podporu pro detektory Medipix2MXR a Timepix. Muros2 svými rozměry 180 mm × 170 mm je určen do laboratoře a nelze integrovat do dalších systémů. Muros2 je propojen s PC pomocí speciální karty do PCI slotu a není integrován zdroj pro předpětí senzoru. Tyto faktory jsou dosti omezující pro mobilitu systému a nelze jej provozovat pomocí přenosného počítače. Nelze ani integrovat do větších celků. Elektronický systém je založen na FPGA obvodu (Field Programmable Gate Array). To umožňuje čtení až 40 snímků za sekundu přes sériové rozhraní detektoru. Paralelní rozhraní není implementováno. Jelikož zdroj systémové frekvence je založen na laditelném RC oscilátoru s rozsahem 7 MHz až 40 MHz, tak tento systém není vhodný pro detektor Timepix. Detektor Timepix pro správnou funkci potřebuje přesně definovaný zdroj systémové frekvence (zejména pro Time over Threshold mód a Timepix mód) s vysokou stabilitou v čase. Na obrázku 20 je znázorněno blokové schéma systému Muros2. Toto zařízení je možné provozovat se software Pixelman, který byl vyvinut na půdě Ústavu technické a experimentální fyziky na ČVUT.

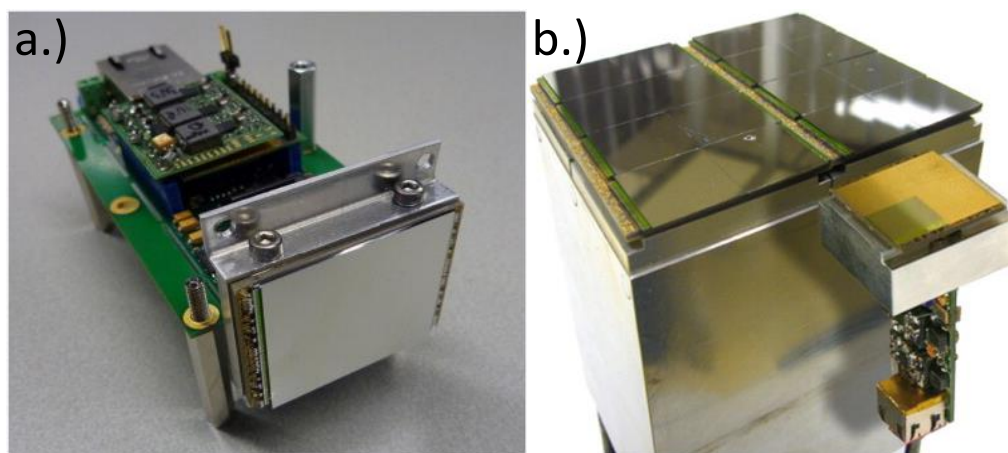




**Obrázek 20.:** Blokové schéma systému Muros2 postaveného na FPGA integrovaném obvodu. Převzato z [11].

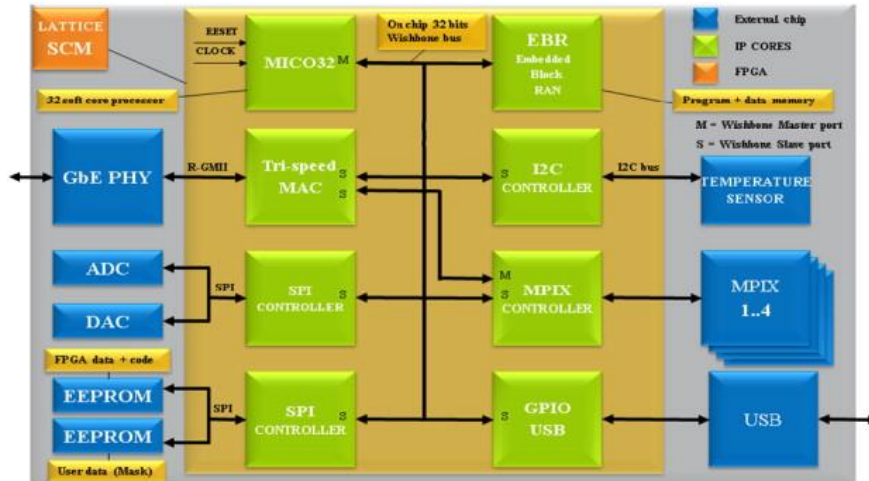
#### 6.4 Relaxd

Relaxd [12] byl také vyvinut ve výzkumném ústavu NIKHEF [13]. Ačkoliv není příliš rozšířen, přináší několik zajímavých řešení. Tento systém je vytvořen pro takzvané Quad Medipix moduly, které jsou tvořeny čtyřmi ASIC čipy a jedním společným senzorem. Celý elektronický systém je schován za modulem detektorů pro snazší sestavení velké aktivní plochy. Elektronický systém je také založen na FPGA obvodu a komunikace je provedena přes Ethernet. Na obrázku č. 21 je zobrazen jeden modul a plocha složená z více modulů.



**Obrázek 21.:** a.) Jeden modul systému Relaxd, b.) plocha sestavená z několika modulů v chladičím boxu. Převzato z [12].

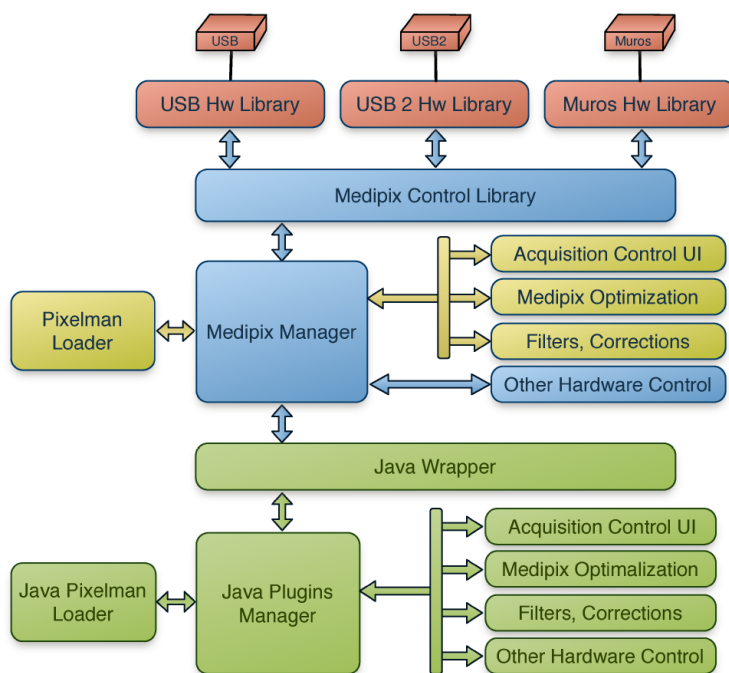
Elektronický systém je znázorněn na obrázku 22. V FPGA obvodu je implementován 32 bitový softwarový procesor a ethernet s přenosovou rychlostí 1Gbit/s. MPIX controller je zodpovědný za řízení detektoru. Ostatní bloky slouží k diagnostice systému a detektoru. Veškeré bloky uvnitř FPGA jsou propojeny pomocí sběrnice WishBone.



Obrázek 22.: Blokové schéma systému Relaxd. Převzato z [12].

## 7 Pixelman

V předchozích kapitolách byly popsány historicky detektory a elektronické systémy pro jejich ovládání. Poslední článkem v řetězci zbývá vizualizace a zpracování dat. V Ústavu technické a experimentální fyziky je kromě HW vyvíjen i SW, který naplňuje poslední článek tohoto řetězce. Tímto článkem je software Pixelman, který slouží pro řízení experimentů, akvizici dat, analýzu dat a vizualizaci. Na obrázku 23 je znázorněna architektura softwaru Pixelman [14].



**Obrázek 23.:** Architektura softwarového balíčku Pixelman. Převzato z [14].

Všechny elektronické systémy vyvinuté v ÚTEF jsou Pixelmanem podporovány tj. USB 1.22 Interface, USB Lite Interface, FITPix. SW Pixelman je možno použít na operačních systémech Windows, Linux a Mac OS X. Podporuje všechny detektory z rodiny Medipix (Medipix2, Medipix2MXR, Timepix, Medipix3). V současnosti Pixelman obdrží surová data a provádí předzpracování dat do vhodné formy a jejich analýzu.

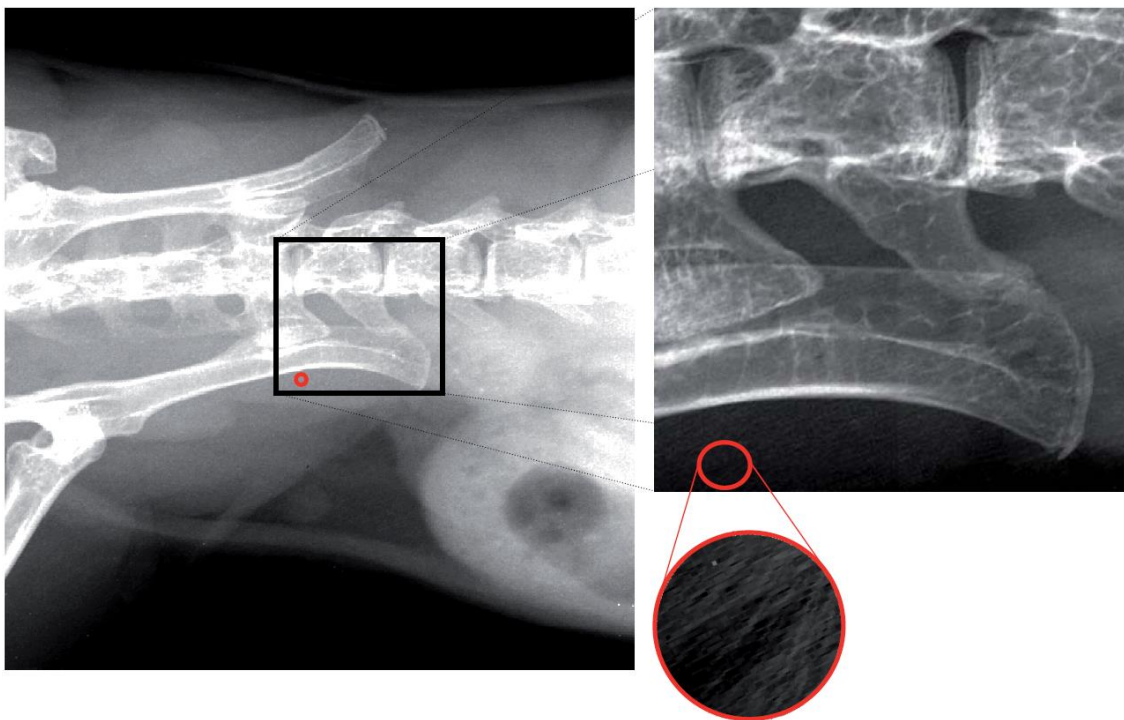
## 8 Aplikace pixelových detektorů

Částicové pixelové detektory z rodiny Medipix lze použít v široké škále aplikací a vědeckých experimentech. Můžeme je rozdělit na dvě velké skupiny zobrazování (radiografie a tomografie) a detekci stop od jednotlivých částic zanechaných v detekčním objemu senzoru. Na obrázku č. 24 a č. 25 jsou uvedeny ilustrační obrázky.

### 8.1 Zobrazování

- Radiografie a tomografie [15]
- Zobrazování pomocí nabitých částic a neutronů [17]
- Biomedicínské zobrazování
- Defektoskopie

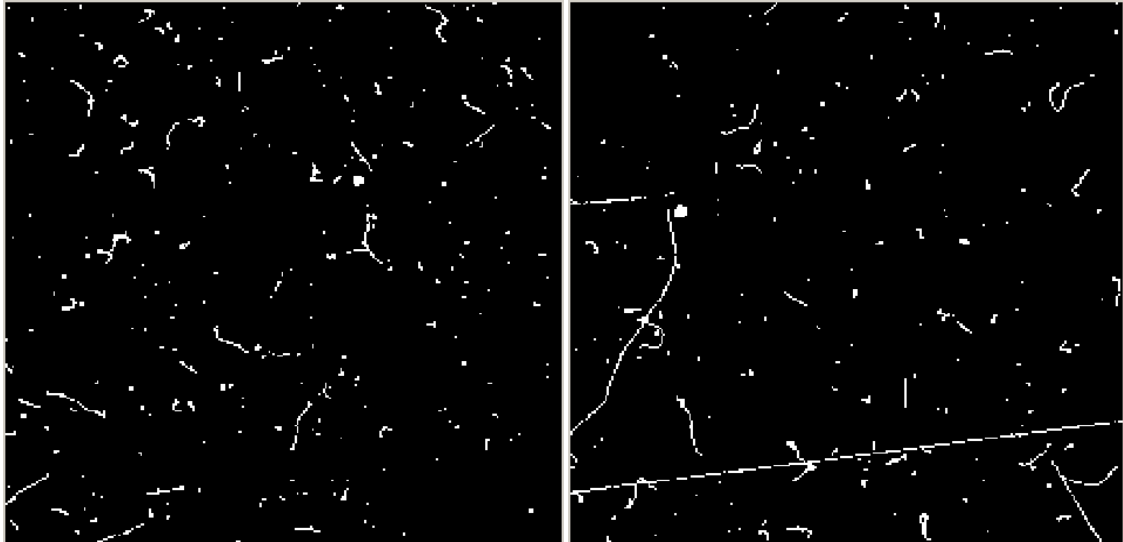
V aplikacích zobrazování je expoziční doba většinou v řádu s až desítek s. V případě použití sériového rozhraní detektorů je datový tok velmi nízký.



**Obrázek 24.:** Rentgenový radiografický snímek břicha živé myši. Snímky jsou korigovány na nehomogenitu odezvy jednotlivých pixelů. Jsou dobře zachyceny jak detaily stavby kostí, tak struktury měkkých tkání. Extrémní odstup signálu od šumu je demonstrován obrázkem v malém kruhovém výřezu. Je v něm zachycena oblast v blízkosti pánevní kosti. Přesto je ve výřezu vidět orientovaná struktura. Je to projekce srsti na povrchu myši! Dynamický rozsah umožňuje dosažení takového kontrastu, který umožňuje uvidět chlup o průměru cca 20  $\mu\text{m}$  skrz tělo myši. Tyto výsledky jsou naprosto unikátní. Převzato z [15].

## 8.2 Detekce a vizualizace stop sub-atomových částic

V tomto režimu jsou detekovány trajektorie částic. Aby nedocházelo k pile-up efektům, tak je expoziční doba nastavena na nutné minimum. Pro tento typ měření je významná doba přenesení snímků z detektoru do PC. Je nutné dosáhnout co největší rychlosti a nejmenší mrtvé doby.



**Obrázek 25.:** Na obrázku jsou zobrazeny dva snímky z detektoru Medipix2MXR. Oba snímky obsahují trajektorie sub-atomových částic. Tečky jsou detekované fotony  $\gamma$  záření. Zakřivené trajektorie jsou výsledkem detekce rychlých elektronů. Dlouhá rovná čára je muon z kosmického záření a velké kruhy jsou částice  $\alpha$  (pravý snímek).

Pro tento typ měření je výhodné zejména paralelní čtení dat z detektorů, jelikož data jsou z detektoru vyčtena 32× rychleji než pomocí sériového čtení. Jelikož většina plochy snímku nenese žádnou informaci, tak lze s výhodou využít kompresních algoritmů. To sníží nároky na přenosovou kapacitu do nadřazeného systému.

## 9 FITPix – Fast Interface for Timepix Pixel detector

Pod názvem FITPix – Fast Interface for Timepix Pixel Detector se ukrývá nová platforma, která umožňuje ovládání detektorů Timepix a Medipix3, akvizici dat z těchto detektorů a řízení experimentů, která je mým přímým inovativním přínosem k problematice detekce ionizujícího záření. Platforma FITPix [IF1] je založena na obvodech FPGA, jenž umožňují precizní časování signálů pro pixelové detektory. Zároveň je možné díky obvodům FPGA dosáhnout mnohem vyšších datových přenosů, které by byly velmi těžko dosažitelné pomocí běžných mikroprocesorů a tím též zvýšit časovou rozlišovací schopnost detektoru. Nespornou výhodou FPGA obvodů je snížení počtu komponent na desce plošného spoje. Toto snížení komponent je možné díky tomu, že veškeré digitální funkce je možné implementovat v FPGA a není nutné použití specializovaných elektronických součástek. Tato skutečnost umožňuje vytvořit výsledný elektronický systém pro polovodičové pixelové detektory malých rozměrů a snížení počtu aktivních prvků se projeví i na menších tepelných ztrátách systému. To je velmi důležité pro nasazení FITPixu ve vakuu, což je nezbytné pro mnoho experimentů v oboru částicové fyziky.

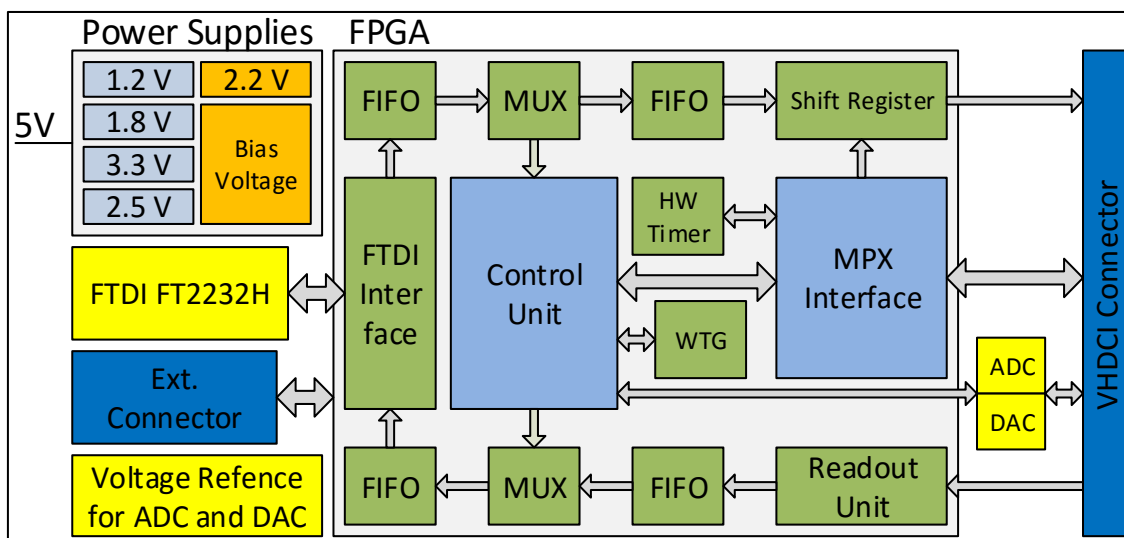
Další nezpochybnitelnou výhodou FPGA je snadné přizpůsobení firmware pro jednotlivé experimenty. Ačkoliv jsem vyvinul standardní firmware, který je schopen pokrýt mnoho tříd aplikací a experimentů, vždy budu existovat speciální nároky na funkci firmware. Ty je možno flexibilně a elegantně řešit právě pomocí FPGA obvodů a modifikací firmware.

Platforma FITPix vznikla v roce 2010. V tomto roce byla též veřejně představena na pravidelném setkání členů konsorcia Medipix v CERN. Během doby života této platformy bylo vyvinuto několik nových generací zařízení FITPix. V následujících kapitolách budou uvedeny poslední generace platformy a generace, které byly významně rozšířeny mezi uživateli pixelových detektorů.

V následujících kapitolách bude detailně uvedena implementace platformy FITPix. Platformu FITPix můžeme rozdělit na dva základní bloky hardware a firmware. Nejprve bude uvedena implementace standardního řešení, které zajišťuje plnou funkcionalitu a výkon detektorů Timepix a Medipix3. Speciální aplikace platformy FITPix budou uvedeny v následujících kapitolách.

## 9.1 Hardware - Blokové schéma

Obrázek č. 26 znázorňuje blokové schéma elektronického systému zařízení FITPix.



**Obrázek 26.:** Elektronický systém obsahuje několik základních bloků, které se můžou lišit dle konkrétního experimentu a verze hardware.

### 9.1.1 Napájecí zdroje

FITPix je vždy vybaven samostatnými napájecími zdroji pro pixelový detektor. Tyto zdroje jsou určeny pouze pro napájení detektoru z důvodu snížení rušení od zbytku systému. Detektory Timepix a Medipix3 vždy vyžadují oddělené napájení z LDO zdrojů pro digitální a analogovou část detektoru. Ostatní zdroje v elektronickém systému zajišťují napájení FPGA obvodu, komunikačních periférií a napájení A/D a D/A převodníků. Počet zdrojů se vždy liší dle použitého FPGA obvodu dle verze hardware. Systém je navržen tak, aby vždy bylo možno použití napájení z USB sběrnice, která může poskytnout až 2,5 W. To platí při použití s jedním detektorem. V případě nasazení více detektorů je nutno použít externí napájecí zdroj.

### 9.1.2 Komunikační rozhraní

Jako základní komunikační rozhraní byla zvolena sběrnice USB 2.0. Tato sběrnice umožňuje datový tok až 480 Mbit/s a zároveň poskytuje zdroj napětí 5 V, z kterého je zařízení FITPix napájeno. Jelikož USB sběrnice je vhodná pro snadné připojení k PC, tak je vždy osazena na všech standardních verzích zařízení FITPix. Ovšem v konkrétních aplikacích a experimentech není USB 2.0 vhodnou volbou, jelikož délka kabelu je omezena na 5 m. Dále USB sběrnice nejde využít, pokud je cílem integrovat zařízení FITPix do nějakého většího celku jako jeden z několika subsystémů. Proto v případech kde není možno využít sběrnici USB 2.0, byly nasazeny sběrnice UART, SPI, SpaceWire a jiné.



### 9.1.3 A/D a D/A převodníky

FITPix je vybaven vždy jedním A/D a D/A převodníkem. A/D převodník slouží k diagnostice detektoru a FITPixu. Diagnostika detektoru spočívá hlavně v ověření interních D/A převodníků detektoru, které lze vyvést na jeden ze čtyř pinů, které jsou připojeny na A/D převodník. Ostatní kanály A/D převodníků slouží k měření stability napájecích zdrojů. Jeden kanál D/A převodníku je přiveden na detektor. Lze použít jako náhrada jednoho z interních D/A převodníků detektoru. Této funkce je využito, pokud je z výroby jeden z D/A převodníků defektní. Ostatní kanály D/A převodníku mohou být použity pro generování testovacích pulsů pro detektor Timepix nebo Medipix2MXR. Při této funkci jsou dva kanály D/A převodníku přivedeny na přepínač signálu, který je přepínán digitálním signálem z FPGA. Přepínáním těchto dvou vstupů dojde ke generování pulsního signálu, který je přiveden v test módu do každého pixelu detektoru pomocí kapacitní vazby a umožňuje ověřit řádnou funkci detektoru bez ionizujícího záření.

### 9.1.4 FPGA

FPGA obvod je srdcem FITPixu kde je realizována veškerá funkce zařízení. Pro verzi zařízení FITPix 1.0 až 2.4 byl zvolen FPGA obvod od firmy Lattice Semiconductor. Od verze 3.0 byl použit FPGA obvod od firmy Altera, jelikož bylo zapotřebí větších hradlových polí s větším množstvím paměti. Mimo těchto dvou výrobců byly použity FPGA obvody od firmy Actel (nyní Microsemi), které směřovaly do zařízení, která byla nasazena ve vesmíru. FPGA od firmy Actel byly vybrány pro tyto účely z důvodu velmi nízké spotřeby a vysoké radiační odolnosti.

### 9.1.5 Konektor pro detektor

Ve standardním řešení hardware je použit konektor tvořený pouze na desce plošného spoje, který je kompatibilní s VHDCI konektorem, který je osazován na standardní moduly s detektorem.

### 9.1.6 Externí konektor

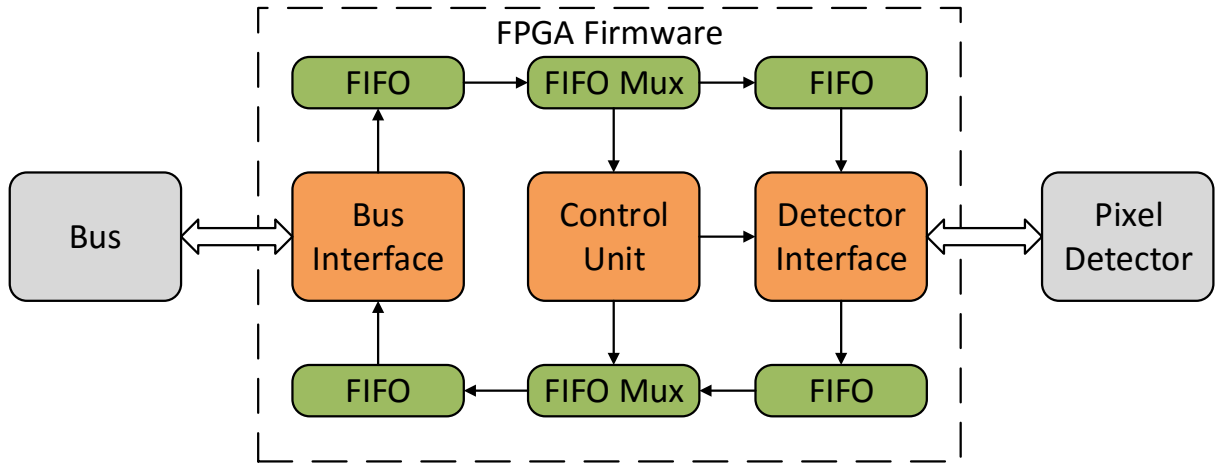
Externí konektor zařízení FITPix slouží zejména k synchronizaci více zařízení FITPix a nebo k synchronizaci s jiným měřícím systémem. Tato funkce je vždy přítomna ve standardní verzi zařízení FITPix. Konektor obsahuje napájecí piny a osm digitálních vstupů nebo výstupů.

## 9.2 Blokové schéma FW

Na obrázku č. 27 je znázorněno blokové schéma firmware, který je nasazen v FPGA obvodu v zařízení FITPix. Firmware můžeme rozdělit na tři základní části. První částí je komunikační rozhraní, které obsluhuje sběrnici a je zodpovědné příjem a odesílání dat. Druhou částí je řídicí



jednotka. Tato jednotka je zodpovědná za vykonávání povelů obdržných z nadřazeného systému. Třetí částí je řadič detektoru, který je zodpovědný za konfiguraci detektoru, ovládání, generování časově kritických signálů a akvizici dat.



**Obrázek 27.:** Bloková struktura firmware v FPGA obvodu v zařízení FITPix.

## 10 Firmware FITPix - řadič fyzické vrstvy

V předchozí kapitole byla popsána struktura zařízení FITPix z hlediska hardware. Tato kapitola bude věnována firmware pro FPGA rozhraní FITPix. Zejména fyzické vrstvě, která je tvořena modulem Detector Interface. Firmware rozhraní FITPix je členěn do základních tří bloků (jak bylo znázorněno na obrázku č. 27), které byly modifikovány dle požadavků. Tato struktura umožňuje snadnou aktualizaci dílčích funkcí firmware.

### 10.1 Bus Interface

Tento blok je vždy zodpovědný za komunikaci s nadřazeným systémem a je v něm vždy implementována pouze logika pro příslušný typ sběrnice. Nejvíce využívanou sběrnicí je USB 2.0 pomocí integrovaného obvodu FT2232H od firmy FTDI. Toto řešení je přítomno v drtivé většině vyrobených zařízení. Dále byly implementovány také verze pro UART, SPI, SpaceWire a Ethernet. Cílem tohoto bloku je přijímat a odesílat data, tak aby byly vždy spolehlivě splněny požadavky jednotlivých typů sběrnic a dále do systému byly předány data bez redundantních dat, která jsou přidávána do protokolů sběrnic.

### 10.2 Control Unit

Tento modul zajišťuje komunikaci s nadřazeným systémem na vyšší vrstvě. Pomocí tohoto bloku jsou nastavovány a čteny parametry zařízení, řízení toku dat a spouštění operací v modulem Detector Interface. Jelikož tento modul byl implementován a udržován kolegou z výzkumného týmu, kterého jsem byl součástí, tak jej nebudu detailněji popisovat. Uvedu pouze informace, které jsou nutné pro pochopení funkce tohoto bloku.

Veškerá komunikace s rozhraním FITPix je založena na příkazech o délce 6 B. Význam jednotlivých bajtů:

- 1.B – Start, začátek příkazu je značen hodnotou 0x55
- 2.B – Příkaz, viz následující tabulka
- 3.B – Data0
- 4.B – Data1
- 5.B – Data2
- 6.B – Kontrolní součet (Příkaz **XOR** Data[0] **XOR** Data[1] **XOR** Data[2])

Následující tabulka obsahuje seznam příkazů rozhraní FITPix.

**Tabulka 1.:** Tabulka příkazů zařízení FITPix.

| Příkaz               | Kód příkazu | Příkaz                | Kód příkazu |
|----------------------|-------------|-----------------------|-------------|
| Test                 | 0x00        | Measurement start     | 0x22        |
| Medipix status       | 0x02        | Measurement break     | 0x23        |
| Timer H preload      | 0x03        | Write FSR             | 0x24        |
| Timer L preload      | 0x04        | Reset Medipix         | 0x26        |
| Set DA               | 0x05        | Test pulse period     | 0x31        |
| Measurement status   | 0x06        | Test pulse start      | 0x28        |
| Set Bias             | 0x07        | Test pulse break      | 0x29        |
| Timer Pre-Divider    | 0x08        | Test pulse status     | 0x32        |
| Signal Delay         | 0x09        | Erase matrix          | 0x27        |
| Detector type        | 0x13        | Test pulse            | 0x28        |
| Measurement settings | 0x14        | System frequency      | 0x35        |
| Counter H            | 0x16        | Measurement frequency | 0x36        |
| Counter L            | 0x17        | Power                 | 0x41        |
| Trigger delay        | 0x1A        | Read Write IO         | 0x42        |
| Read matrix          | 0x20        | Read AD               | 0x40        |
| Write matrix         | 0x21        | Number of Test pulses | 0x51        |

### 10.3 Detector Interface

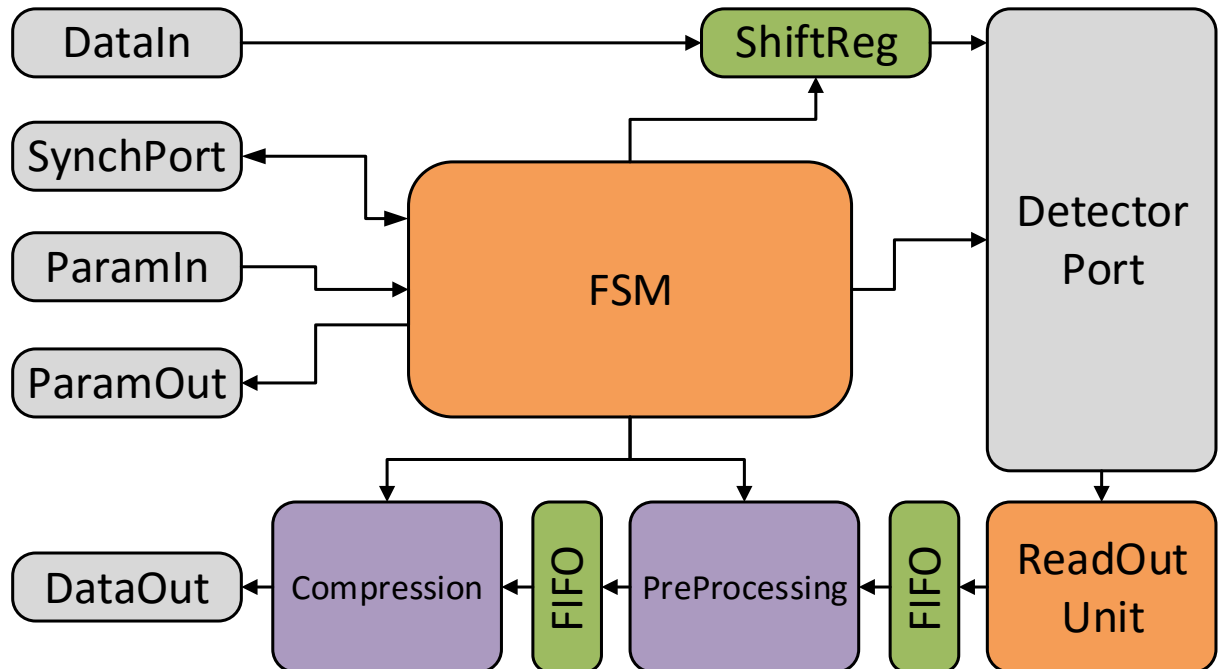
Tento modul je zodpovědný za ovládání detektoru, čtení dat, konfiguraci dat a spouštění měření. Tomuto bloku budu věnovat více prostoru v následujících kapitolách. Základním požadavkem byla podpora detektorů Medipix2MXR, Timepix a Medipix3RX. Pro detektor Medipix2MXR a Timepix je možné použití stejné verze bloku Detector Interface, jelikož vnější rozhraní těchto pixelových detektorů je stejné (rozdíly těchto detektorů vyplývají z kapitoly 5.1 a 5.3). Nicméně pro detektor Medipix3RX jsem implementoval speciální verzi tohoto bloku, jelikož rozhraní tohoto detektoru se velmi liší od předchozích dvou detektorů.

Detector Interface tvoří rozhraní mezi ovládáním detektoru na fyzické vrstvě a vyšší úrovni, kterou očekává modul Control Unit.

### 10.4 Detector Interface - Timepix/Medipix 2 MXR

Na obrázku č. 28 je znázorněno blokové schéma modulu Detector Interface. Tento blok obsahuje čtyři základní rozhraní. První rozhraní je určeno pro detektor Timepix a Medipix2MXR a slouží k ovládání a akvizici dat z detektorů. Druhým rozhraním jsou datová rozhraní. Třetím

rozhraním jsou vstupy a výstupy parametrů. Čtvrtým a posledním rozhraním je synchronizační port, který slouží pro synchronizaci detektoru s externím zdrojem událostí. Celý blok je řízen pomocí složitého stavového automatu.



**Obrázek 28.:** Blokové schéma modulu Detector Interface.

#### 10.4.1 Rozhraní detektoru

Rozhraní obsahuje následující signály:

- **ENABLE\_IN** – Sestupná hrana povoluje činnost detektoru.
- **ENABLE\_OUT** – Vzestupná hrana indikuje, že detektor dokončil operaci.
- **FCLOCK\_IN** – Taktovací signál detektoru. Veškeré operace jsou taktovány na frekvenci 50 MHz. Pouze pro operaci čtení je použita frekvence 100 MHz a pro operaci měření lze pomocí děličky frekvence nastavit frekvenci od 100 kHz až do 100 MHz.
- **FCLOCK\_OUT** – Výstupní taktovací signál z detektoru. Od toho signálu jsou taktovány datové výstupy detektorů. Tento signál je přiveden do bloku ReadOut Unit pro čtení dat z detektoru.
- **DATA\_IN** – Tento signál je určen pro konfiguraci detektoru. Veškerá data jsou pomocí posuvného registru serializována a zapsána do detektoru.
- **DATA\_OUT** – Tento signál je sériovým datovým výstupem z detektoru.

- **DATA\_OUT\_P** - Tento signál je paralelním datovým výstupem z detektoru. Tento signál je široký 32 b.
- **RESET** – Tento signál slouží k resetu detektoru. Nicméně tento signál resetuje pouze komunikační periférii detektoru a globální nastavení detektoru včetně interních D/A převodníků. Registry jednotlivých pixelů resetovány nejsou. Proto je nutné po resetu jednou vyčíst data z pixelů, aby byly pixely vynulovány.
- **SHUTTER** – Tento signál slouží k měření. Tento signál je aktivní v logické hodnotě 0.
- **MODE\_0** – Tento signál nastavuje mód detektoru (konfigurace dat, čtení dat, konfigurace globálních parametrů).
- **MODE\_1** - Tento signál nastavuje mód detektoru (konfigurace dat, čtení dat, konfigurace globálních parametrů).
- **P\_S** – Tento signál přepíná režim vydávání dat z detektoru. Logická hodnota 1 povoluje režim paralelních dat. Logická hodnota 0 nastavuje režim pro sériová data.
- **POLARITY** – Tento signál přepíná sběr elektronů a děr. Toto nastavení slouží pro analogový zesilovač v každém pixelu.
- **PBUS\_ACCES** – V případě čtení dat pomocí paralelního portu tento signál indikuje, že jsou čtena data.
- **ENABLE\_TPULSE** – Tento signál povoluje režim testování. Pomocí tohoto signálu je přepnut vstup nábojového zesilovače v každém pixelu na signál **TEST\_PULSE**.
- **TEST\_PULSE** – V případě testovacího módu lze tento signál budit alternujícím signálem mezi dvěma přednastavenými hodnotami napětí. Jelikož tento signál je kapacitně navázán do nábojového zesilovače, tak lze řídit velikost náboje při testování. Tímto způsobem lze testovat funkci detektoru bez použití ionizujícího záření.

Tyto signály jsou nezbytné pro plnohodnotné ovládání detektoru. V základní verzi FITPix 1.0 – 2.3 není k dispozici signál **DATA\_OUT\_P** pro čtení dat pomocí paralelního datového rozhraní detektoru.

#### 10.4.2 Datové rozhraní modulu Detector Interface

Datová rozhraní modulu Detector Interface jsou rozhraními pro čtení dat do paměti FIFO a čtení dat z paměti FIFO. Jelikož paměti FIFO jsou použity ve firmware jako vyrovnávací paměti. Rozhraní FIFO pro vstupní data, která slouží ke konfiguraci detektoru, jsou vždy osmi bitová. Pomocí posuvného registru jsou tyto osmi bitová data převedena na jednobitová a zapisována do detektoru. Rozhraní pro výstupní data obsahují dvě rozhraní pro paměti FIFO. Jedno

rozhraní je osmibitové, které je používáno pro čtení dat v sériovém módu. Druhé rozhraní je dvaatřiceti bitové pro čtení dat v paralelním módu.

### 10.4.3 Rozhraní parametrů

To rozhraní obsahuje následující signály:

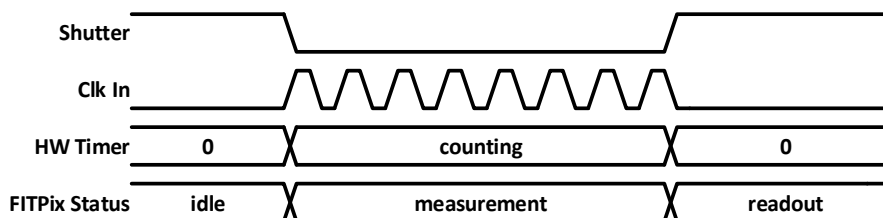
- **TIME\_PRELOAD** – Nastavení doby měření.
- **TIMER\_DIVIDER** – Nastavení děličky frekvence pro měření.
- **EXT\_CLK\_SEL** – Výběr interní měřící frekvence nebo externí měřící frekvence.
- **OPERATION\_DONE** – Tento signál indikuje ukončení operace stavového automatu do modulu Control Unit.
- **STATUS\_REGISTER** – Tento signál obsahuje aktuální stav důležitých signálů v modulu Detector Interface. Slouží především k diagnostickým účelům.
- **TEST\_PULSE\_PERIOD** – Nastavení periody testovacích pulsů.
- **MEASUREMENT\_TIME** – Tento signál obsahuje skutečnou dobu měření. Pokud je měřeno pomocí synchronizačního portu, tak se hodnota v tomto signálu nemusí rovnat hodnotě v signálu **TIME\_PRELOAD**.
- **POWER\_ONOFF** – Umožňuje vypnout a zapnout zdroje pro detektor.
- **CLK\_EN** – Pomocí tohoto signálu lze povolovat zdroj taktovacího signálu pro detektor. Tato funkce je vhodná pro speciální třídy experimentů, kdy pomocí tohoto signálu lze po dobu měření zastavit činnost detektoru, ale zároveň měření nepřerušit.
- **TRG\_SRC\_SEL** – Nastavuje způsob synchronizace FITPixu. Nastavení zdali je měření spuštěno z externího signálu pomocí náběžné hrany, sestupné hrany, signálu v logické hodnotě 0 a 1.
- **DELAY\_FOR\_TIMING** - Tento signál slouží k nastavení zpoždění mezi sestupnou hranou signálu **ENABLE\_IN** a generováním taktovacího signálu pro detektor.
- **TRIGGER\_DELAY** – Tento signál slouží k nastavení zpoždění mezi synchronizačním signálem a signálem **SHUTTER**, který ovládá režim měření detektoru.
- **NUMBER\_OF\_TESTPULSES** – Nastavení počtu test pulsů v testovacím režimu.
- **NUM\_OF\_DETECTOR** – Signál obsahuje počet detektorů zapojených za sebou. Po resetu je vždy zjišťován počet detektorů v sérii, jelikož dle toho se nastavují délky dat, která budou čtena z detektorů a zapisována do detektorů.

#### 10.4.4 Synchronizační rozhraní

Synchronizační rozhraní slouží k synchronizaci měření pomocí více FITPixů a nebo k synchronizaci FITPixů k externímu zdroji události. K tomuto účelu slouží následující signály:

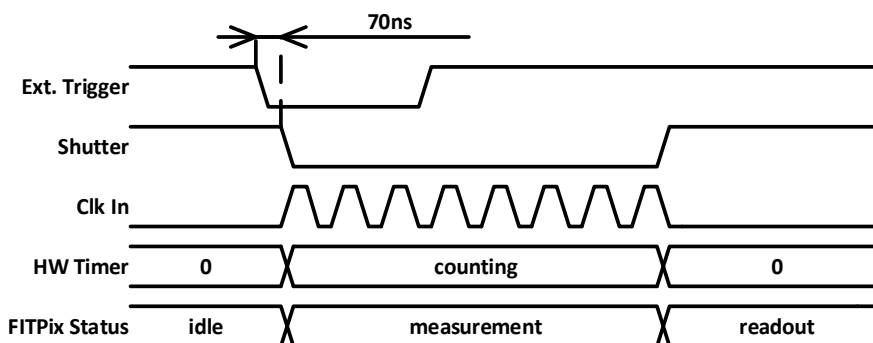
- **EXT\_TRIGGER** – Externí signál, který spouští měření.
- **EXT\_VETO** – Jeli v průběhu měření přítomna sestupná hrana v tomto signálu, tak měření je označeno za neplatné. Data v detektoru jsou smazána a neposílají se do nadřazeného systému. Toto umožňuje snížit mrtvou dobu měření, pokud nedošlo k požadované události. Zdrojem tohoto signálu je externí zařízení.
- **TRIGGER\_BUSY** – Tento signál hodnotou logická 1 indikuje to, že FITPix není připraven ke zpracování externí synchronizace.
- **TRIGGER\_OUT** – Tento signál je kopií signálu **SHUTTER**. Slouží jako zdroj synchronizačního signálu pro jiná zařízení.

Zařízení FITPix je schopno měřit ve čtyřech módech. Prvním módem je měření bez synchronizace. Doba měření je přednastavena z nadřazeného systému. Průběh signálů tohoto módu měření je znázorněn na obrázku č. 29.



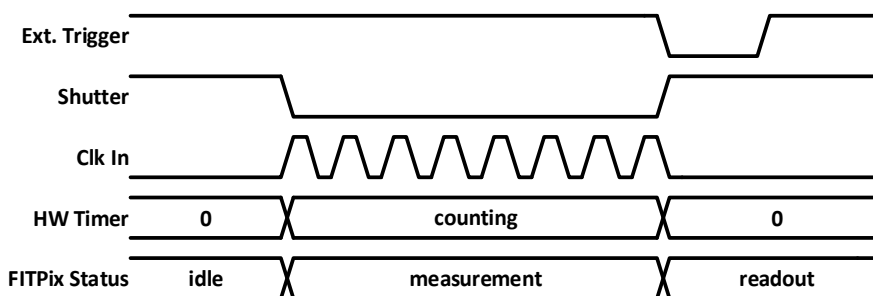
**Obrázek 29.:** Průběh signálů pro měření bez synchronizace. Měření je spuštěno příkazem z nadřazeného systému.

Druhý mód měření poskytuje možnost startu měření pomocí synchronizačního signálu. Externí událost spustí měření detektoru a doba měření je nastavena pomocí parametru **TIME\_PRELOAD**. Průběh signálů druhého módu je znázorněn na obrázku č. 30. Doba zpoždění mezi externí událostí a signálem **SHUTTER** je 70 ns.



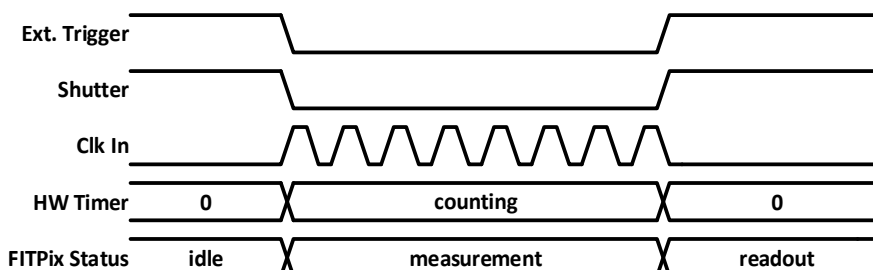
**Obrázek 30.:** Průběh signálů pro měření se synchronizací. Měření je spuštěno externí událostí.

Třetí mód měření umožňuje ukončení měření pomocí externí události. Zařízení FITPix spustí měření a čeká na externí událost. Pokud nastane, tak je měření ukončeno a data jsou odeslána do nadřazeného systému, nejčastěji PC. Pokud externí událost nenastane, tak nadřazený systém ukončí měření. Průběh signálů třetího módu je znázorněn na obrázku č. 31.



**Obrázek 31.:** Průběh signálů pro měření se synchronizací. Měření je ukončeno externí událostí.

Posledním módem měření je režim, ve kterém je měření spuštěno a ukončeno pomocí externího signálu. Externí událost spustí měření. Nastane-li druhá externí událost, tak jsou data odeslána do nadřazeného systému. Pokud nedojde ke dvěma externím událostem, tak nadřazený systém ukončuje měření stejně jako v předchozím módu měření. Průběh signálů čtvrtého módu je znázorněn na obrázku č. 32.

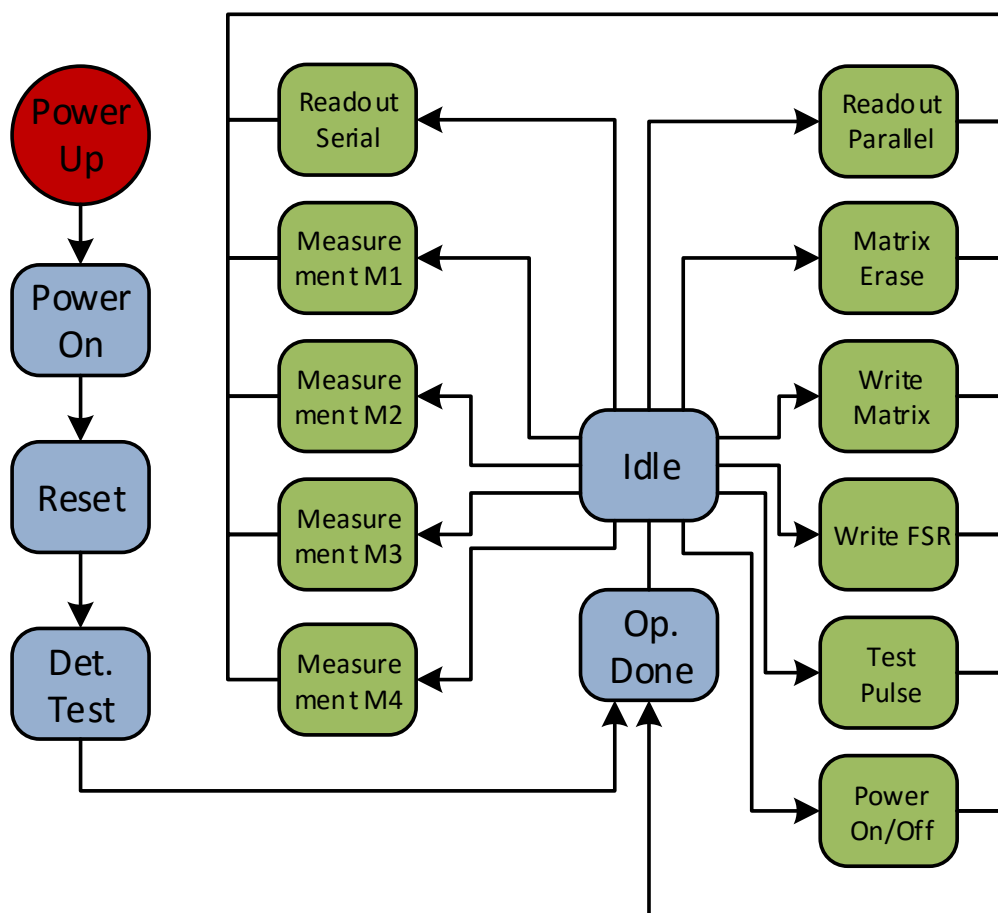


**Obrázek 32.:** Průběh signálů pro měření se synchronizací. Měření je spuštěno příkazem a ukončeno externí událostí.



#### 10.4.5 FSM - Stavový automat modulu Detector Interface

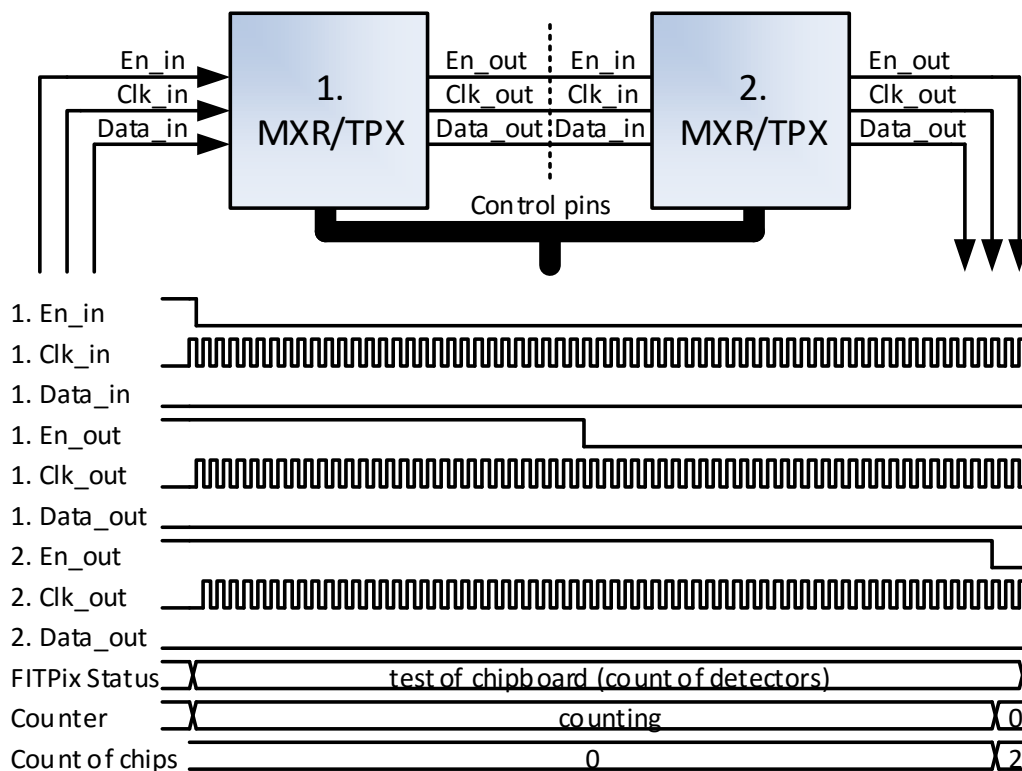
Stavový automat řídí veškeré operace v modulu Detector Interface. Základní schéma činnosti je znázorněno na obrázku č. 33.



**Obrázek 33.:** Diagram stavového automatu, který je realizován v modulu Detector Interface.

Po zapnutí napájení stavový automat (dále jen FSM) modul Detector Interface přejde do stavu Power On. V tomto stavu vyčká do doby, než dojde k ustálení napájecích zdrojů pro detektor (tato doba je nastavena pomocí konstanty před syntézou, jelikož každý hardware má tuto dobu jinou, vzhledem k použitým zdrojům pro napájení detektoru). Po uplynutí této doby dojde k přechodu do stavu Reset, kdy jsou inicializována všechna rozhraní a hodnoty v modulu. Následujícím stavem je stav Detector Test. V tomto stavu je proveden test připojených detektorů. Teoreticky je možné propojit libovolný počet detektorů. Nicméně tento počet je ve firmware omezen na 16 detektorů v sérii (kvůli velikostem vyrovnávacích pamětí FIFO). Princip detekce je znázorněn na obrázku č. 34. Na základě této detekce se nastavují interní proměnné v modulu, které slouží k řízení toku dat (zejména délky dat pro zápis a čtení). Pokud není

nalezen žádný detektor nebo je nalezeno více než 16 detektorů v sérii, tak jsou nastaveny tyto proměnné na hodnoty odpovídající jednomu detektoru. Nadřazený systém je informován o počtu detektorů pomocí signálu **NUM\_OF\_DETECTOR**. Jeli hodnota mimo rozsah 1 až 16, tak je zřejmé, že došlo k poruše na detektoru nebo na spojení s detektorem. Tato funkce je také velmi důležitou diagnostickou funkcí.



**Obrázek 34.:** Princip detekce počtu detektorů zapojených v sérii, která probíhá po startu zařízení FITPix.

Nejprve je vygenerována sestupná hrana na signálu Enable In prvního detektoru. Poté následuje generování taktovacího signálu a po dokončení maticové operace je detektorem vygenerována sestupná hrana na signálu Enable Out, která spustí stejnou činnost v druhém detektoru. Po dokončení operace i v druhém detektoru dojde k vygenerování sestupné hrany na signálu Enable Out v druhém detektoru, která je detektována pomocí zařízení FITPix, které po celou dobu testu čítalo počet taktů taktovacího signálu pro detektory. Na základě počtu taktů dojde k rozhodnutí kolik je vloženo detektorů v sérii.

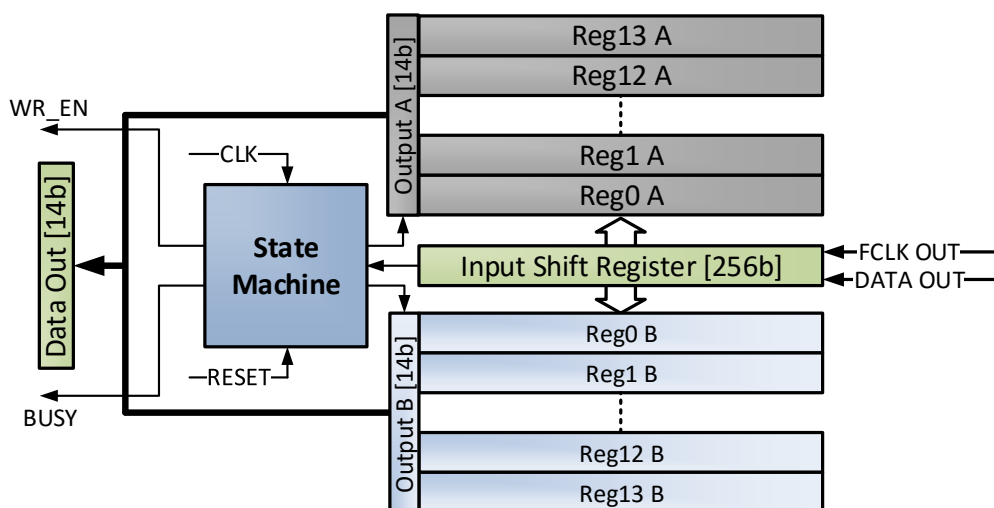
Po dokončení testu detektorů je FSM uveden do stavu Op Done. Tento stav indikuje pro modul Control Unit, že došlo k inicializaci zařízení. Modul Control Unit je poté připraven na zpracování pokynů od nadřazeného systému. Ve stavu Op Done končí každá operace modulu Detector Interface. V tomto stavu čeká na potvrzení od modulu Control Unit. Po potvrzení modul přechází do stavu Idle, kde je připraven na další operaci. Ve stavu Idle je možné provádět na základě příkazu z nadřazeného systému následující operace: Measurement1-4, Readout Serial, Readout Paralle, Matrix Erase, Write Matrix, WriteFSR, Test Pulse, Power On/Off.

#### 10.4.6 Předzpracování dat

Modul Detector Interface obsahuje též bloky pro předzpracování dat z detektorů. Jelikož jsou data po vyčtení nepoužitelná pro zpracování, tak je nutné jim vrátit strukturu, tak aby je bylo možné použít. Jednotlivé bity jsou přeházeny v datech vzhledem k funkci výstupní datové periferie detektoru. Standardně tuto operaci dělá PC a program Pixelman. Jelikož PC poskytuje velmi vysoký výpočetní výkon, tak bloky pro předzpracování nejsou větší výhodou, protože PC dokáže data předzpracovat při zachování maximálního datového toku. Nicméně pro případná embedded zařízení, kde se mají data také zpracovávat, je tato operace velmi náročná na výpočetní výkon. Tím pádem se zvyšuje mrtvá doba detektoru a zároveň zvyšuje spotřeba zařízení. Z tohoto důvodu vznikly bloky pro předzpracování dat v FPGA obvodu, který je pro tyto operace vhodnější.

##### 10.4.6.1 Předzpracování dat ve vysokorychlostním kontinuálním režimu

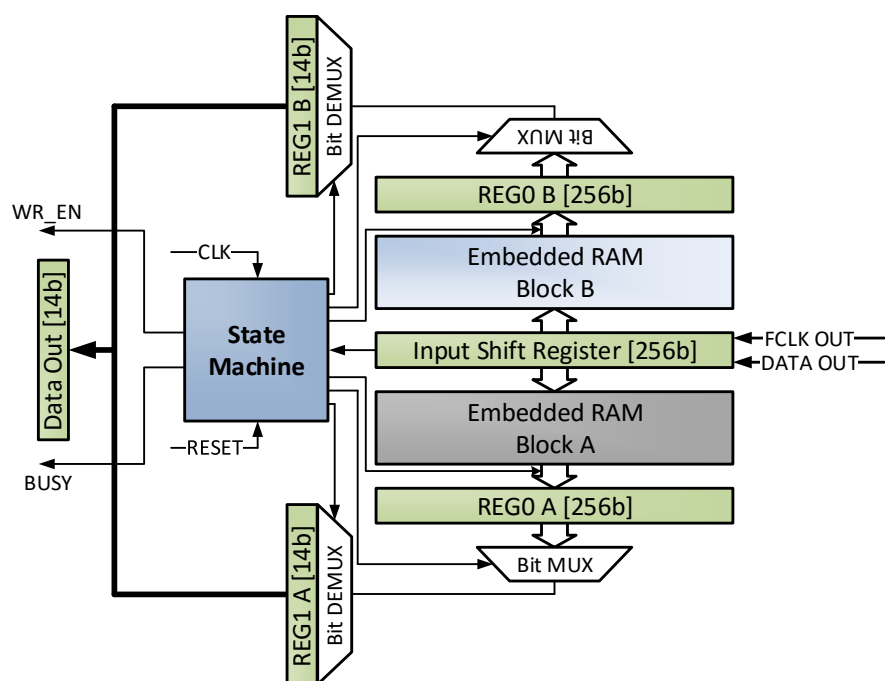
Předzpracování dat ve vysokorychlostním režimu je určeno do zařízení, které musí poskytovat dostatečný počet obrázků za sekundu a zároveň je k dispozici velký obvod FPGA. Princip činnosti je založen na inverzní funkci výstupního datového rozhraní detektoru. Modul obsahuje dvě registrové banky. Sériová data jsou postupně načítána do čtrnácti 256 bitových registrů první registrové banky. Po načtení dat do první registrové banky je vstup přepnut na druhou registrovou banku, která ukládá data, zatímco z první registrové banky jsou data ve správném formátu odesílána do dalších stupňů. Princip je znázorněn na obrázku č. 35.



**Obrázek 35.:** Blokové schéma předzpracování dat ve vysokorychlostním režimu.

#### 10.4.6.2 Předzpracování dat v sekvenčním režimu

Druhý způsob je velmi podobný, ale místo registrových bank, které zabírají velkou část FPGA obvodu jsou použity zabudované paměťové bloky FPGA obvodu. Opět po zaplnění jedné paměti dojde k přepnutí a vstupní posuvný registr zapisuje data do druhé paměti. Nicméně vyčtení první paměti již není provedeno dříve, než dojde k zaplnění druhé paměti, a proto čtení dat je přerušováno postupným předzpracováním dat. U prvního způsobu se registrová banka změnila v posuvný paralelní registr a vyčtení bylo provedeno za 256 taktů. Tento přístup již nelze s pamětí využít. Pro jedno zrekonstruování 14 bitové hodnoty čítače je nutné dočasně uložit jeden 256 bitový registr ze 14 do REG0. Z registru REG0 je vybrán bit, který odpovídá pozici čítače, jenž je rekonstruován. Tento bit je poté nutné uložit na správnou pozici v 14 bitovém registru REG1. Pozice bitu v REG1 odpovídá hodnotě adresy paměti. Jelikož rekonstrukce jednoho bitu vyžaduje několik taktů, tak předzpracování je výrazně pomalejší oproti předchozímu řešení. Nicméně použitím zabudovaných pamětí FPGA obvodu se výrazně sníží velikost obvodu po syntéze, což je též významný faktor. Princip je znázorněn na obrázku č. 36.



Obrázek 36.: Blokové schéma předzpracování dat v sekvenčním režimu.

Uvedené řešení předzpracování dat je důležitým krokem pro zpracování dat z detektoru Timepix. V současnosti dostupné elektronické systémy pro ovládání detektoru a provádění experimentů pouze data čtou. V žádném dostupném rozhraní nedochází k analýze dat ani rekonstrukci nekonzistentních dat čtených z detektoru. Nekonzistentní data jsou

rekonstruována až v nadřazeném systému. První uvedené řešení lze použít tam, kde je třeba vysoká rychlost čtení, ale je nezbytné použít větších hradlových polí, jelikož předzpracování je pouze částí většího celku, který je též umístěn v hradlovém poli. Druhý způsob řešení je výrazně pomalejší, ale výrazně je též menší velikost výsledného obvodu pro hradlové pole. Toto řešení je určeno pro měření, kde je dlouhá expoziční doba, nebo jednotlivá měření jsou pořizována s velkou periodou a je nutné data zpracovávat již v samotném zařízení. Jelikož výsledná velikost je téměř osmkrát menší, tak není třeba velkého hradlového pole. Použitím menšího hradlového pole lze snížit rozměry zařízení a spotřebu. Parametry uvedených řešení jsou obsaženy v tabulce 2. V tabulce jsou uvedeny maximální frekvence pro hodinové signály, velikost po syntéze, doba předzpracování a maximální počet snímků za sekundu.

**Tabulka 2.:** Srovnání syntéz jednotlivých bloků pro předzpracování dat.

| Typ předzpracování | f [MHz] | Velikost v FPGA      | Doba předzpracování při f=100MHz [ms] | FPS |
|--------------------|---------|----------------------|---------------------------------------|-----|
| Vysokorychlostní   | 128     | 11100 LE             | 9,2                                   | 108 |
| Sekvenční          | 108     | 1400 LE + 7168 b RAM | 40                                    | 25  |

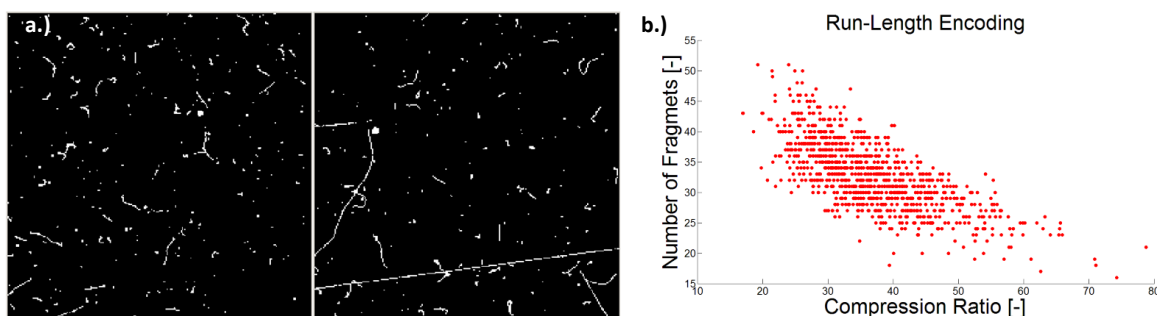
Byť jsou tyto moduly velmi užitečné, tak vzhledem k jejich velikosti byly nasazeny pouze pro vývojové účely. Ve finálním zařízení vždy převládla potřeba zařízení s malými rozměry a s malým FPGA obvodem, které je zároveň finančně výhodnější, což významně omezuje použití těchto bloků.

V případě použití jednoho z těchto bloků je třeba jako druhý stupeň začlenit blok, který převádí byt konzistentní hodnoty na hodnoty, které lze použít jako číslo. Jelikož čítače v detektorech používají pseudo-náhodné čítače (které jsou méně náročné na velikost plochy ve výsledném čipu detektoru), tak je nutno je převést do přímé formy. Převod je proveden pomocí LUT tabulky. Jako adresy jsou použity hodnoty, kterých nabývá pseudo-náhodný čítač. Na těchto adresách jsou uloženy odpovídající hodnoty.

#### 10.4.6.3 Komprese

Posledním volitelným stupněm je kompresní modul, který je možné použít jako pro nekonzistentní data nebo pro data předzpracovaná. Jelikož detektor se používá ve dvou základních režimech. V režimu snímkovacím a v režimu částicovém. Snímkovacím režimem jsou

myšlena měření, při kterých se pořizují radiografické snímky. Tyto snímky se vyznačují tím, že každý pixel detektoru nese hodnotu nenabývající stejných hodnot se sousedními pixely. Druhým režimem jsou uvažována měření, při kterých se sledující stopy jednotlivých částic. Tyto snímky se vyznačují tím, že většina plochy detektoru je bez signálu. Pro první režim se komprese neuvažuje, jelikož by byla velmi náročná na implementaci a velikost výsledného systému v FPGA obvodu. Zároveň většina těchto měření se provádí v laboratoři a je k dispozici výkonná PC, takže komprese by pouze zvětšovala složitost celého systému. Nicméně v druhém režimu již je výhodné data umět zkomprimovat, jelikož tato měření jsou typická pro nasazení detektoru ve vesmíru, ale i jiných aplikacích, kdy je detektor zabudován v nějakém jednoúčelovém zařízení, které poskytuje komunikační rozhraní s malou rychlostí přenosu dat. V případě vesmírných aplikací jsou komunikační kanály velmi pomalé a zároveň je nutno data po nějakou dobu ukládat v paměti zařízení. Nejvhodnějším typem komprese pro tyto účely a případnou strukturu vstupních dat se jeví RLE (Run Length Encoding). Vstupní data jsou kódována do dvou slov, kde první nese počet opakující se hodnoty, které nese druhé již hodnotu. RLE je svou jednoduchostí velmi vhodná pro implementaci v FPGA obvodu, kde zabírá velmi malé prostředky (velikost po syntéze je < 100 LE v EP4CE22). Na obrázku číslo č. 37 vidíme typické snímky z detektoru Timepix, které obsahují stopy částic pocházející z kosmického záření. Z obrázku je patrné, že většina pixelů detektoru nenese žádnou informaci. Na obrázku číslo č. 37 je také znázorněn graf, jenž vyjadřuje kompresní poměr RLE v závislosti na počtu částic ve snímku. Na ose Y je vyneseno počet částic, které byly obsaženy v jednom snímku. Na ose X je vyneseno kompresní poměr. Z grafu je patrné, že pro tento typ snímku je kompresní faktor 20 až 60. Takovéto snížení datového toku nebo nároků na velikost paměti pro ukládání snímků je velmi zásadní pro zmíněné aplikace detektoru ve vesmíru.



**Obrázek 37.:** a.) Typické snímky pořízení detektorem Timepix, které zobrazují kosmické záření b.) graf zobrazuje závislost kompresního poměru v závislosti na počtu částic, které byly detekované v celé ploše matice.

Ve standardních verzích zařízení FITPix nejsou používány bloky pro předzpracování dat ani blok komprese, jelikož se vždy očekává, že je zařízení pomocí USB sběrnice spojeno s PC, kde odpadá potřeba těchto úkonů. Nicméně verze FITPix 3.0 s detektorem, který má zapojen paralelní datové rozhraní je komprese použita.

### 10.5 Detector Interface - Medipix3

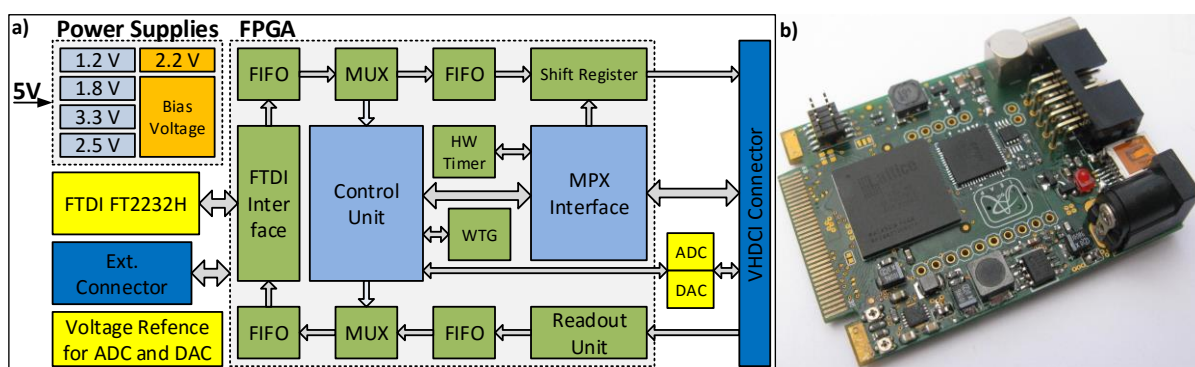
Fyzická vrstva pro detektor Medipix3 vychází z verze pro detektor Timepix. Detektor Medipix3 se již neovládá externími signály, jako v případě detektoru Timepix. Každá operace, která je s detektorem vykonávána musí být předem nakonfigurována v registru OMR (Operation Mode Register – 48 bitů široký). Proto Detector Interface obsahuje registr, který jsou zrcadlen do registru OMR v detektoru a je vždy zkopírován do detektoru před započítáním vlastní operace. Detektor umožňuje číst data nejen z celé matice pixelů, ale z různých sektorů matice. Dále detektor umožňuje nastavit šířku čítače událostí ( $2 \times 1$  b,  $2 \times 4$  b,  $12 \times 1$  b nebo  $1 \times 24$  b), což také ovlivňuje délku dat při čtení matice. Z tohoto důvodu modul Detector Interface neprovádí detekci počtu detektorů, ale obsahuje registr, který definuje délku očekávaných dat z detektoru. Tento registr musí být vždy správně nakonfigurován, aby byla poslána správná délka dat. Dalším rozdílem v implementaci tohoto modulu je podpora kontinuálního režimu měření. Jelikož detektor obsahuje dva čítače na jeden pixel, tak je možné měřit a zároveň číst data z právě nepoužívaného čítače. Tím se lze dosáhnout nulové mrtvé doby detektoru. Posledním rozdílem je možno rychlého smazání čítačů v každém pixelu, která je implementována pomocí signálu MatrixFastClear. V předchozí verzi byla k mazání použita operace paralelní čtení dat. Nyní stačí vybudit tento signál po dobu 140 taktů na signálu ClkIn a matice je smazána. Doba trvání operace je nyní  $2.8 \mu\text{s}$  místo  $300 \mu\text{s}$ , kterých lze dosáhnout v případě detektoru Timepix. Jelikož tento detektor nemá k dispozici módy měření Timepix a TOT, tak nebyl v mé další činnosti používán. Nicméně jako detektor primárně určený k radiografii byl používán výzkumnými týmy z ÚTEF ČVUT, ale i z jiných institucí, které jsou členy konsorcia Medipix.

## 11 Realizace a modifikace zařízení FITPix

Tato kapitola je věnována realizacím založených na platformě FITPix. Nejdůležitějšími realizacemi jsou standardní verze FITPixu, které byly v rámci činnosti ÚTEF ČVUT využívány pro vlastní vědecké potřeby, ale zároveň byly poskytovány vědeckým týmům v rámci konsorcia Medipix. Na základě zařízení FITPix bylo provedeno mnoho vědeckých experimentů, které nebylo do té doby možno provést, jelikož předchozí verze byly limitovány rychlostí, rozměry, přenositelností nebo možnostmi propojení do větších celků.

### 11.1 FITPix 1.0 – 2.3

Prvním realizovaným hardwarem je FITPix verze 1.0 až 2.3, který byl navržen pro detektor Timepix a Medipix2MXR. Tato verze FITPixu je založena na FPGA obvodech od firmy Lattice (LFXP2-8E). Komunikace s nadřazeným systémem (nejčastěji PC), je implementována pomocí sběrnice USB 2.0. Hardware dále obsahuje A/D převodník pro diagnostiku detektoru, D/A převodník pro testovací pulsy a zdroj předpětí pro polovodičový sensor. Zdroj předpětí sensoru je regulovatelný v rozsahu 5 V až 100 V. V případě připojení většího množství detektorů je k dispozici napájecí konektor, ale s jedním detektorem je zařízení primárně napájeno z USB konektoru. Pro synchronizaci měření je přítomen konektor, který obsahuje synchronizační signály TrgIn, TrgOut, Busy a Veto. Rozhraní pro detektor je tvořeno pomocí VHDCI konektoru, který umožňuje připojení standardních modulů s pixelovými detektory, které byly navrženy v CERNu a jsou používány širokou vědeckou komunitou. Blokový diagram FITPixu 1.0 – 2.3 spolu s fotografií hardware je na obrázku č. 38.



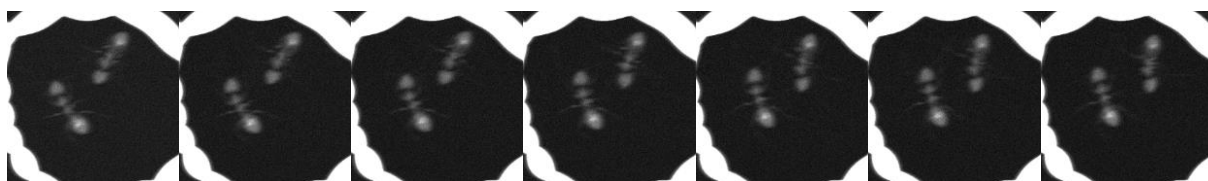
**Obrázek 38.:** a) blokové schéma zařízení FITPix 1.0 – 2.3, b) fotografie výsledného hardware.

Rozměry této verze zařízení FITPix jsou 45 mm × 60 mm × 20 mm. Zařízení je plně podporováno v softwaru Pixelman. Výsledná rychlost zařízení je 90 snímků za sekundu. Tato rychlost je 18 × vyšší než v případě předchozího zařízení IEAP - USB 1.22 Interface, které bylo

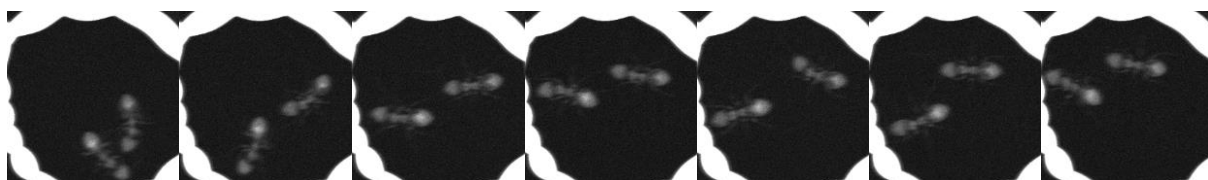


v ÚTEF ČVUT vyvinuto v minulosti a 2 × vyšší než konkurenční zařízení MUROS (Nikhef), které dosahuje až 45 snímků za sekundu. Nicméně zařízení MUROS je navrženo zejména pro detektor Medipix2MXR. Detektor Timepix je též zařízením MUROS podporován, ale díky nízké stabilitě taktovacího signálu pro měření není pro detektor Timepix příliš vhodný. Díky významnému zvýšení rychlosti čtení dat z pixelových detektorů je možné provádět experimenty, které doposud mohly být provedeny pouze s obtížemi a zároveň byly velmi náročné na čas, což v případě provádění experimentů na urychlovačích nebo reaktorech je velmi nákladné. Spotřeba samotného zařízení FITPix bez detektoru je 775 mW. Díky malé spotřebě je zařízení vhodné pro provoz ve vakuu i pro dlouhodobá měření. To je opět velmi významná kvalitativní výhoda oproti zařízení MUROS.

Rychlost zařízení lze demonstrovat na následujících obrázcích č. 39 a č. 40.



**Obrázek 39.:** Radiografie dvou mravenců se zařízením FITPix při rychlosti 50 snímků za sekundu.



**Obrázek 40.:** Radiografie dvou mravenců se zařízením IEAP - USB 1.22 Interface při rychlosti 5 snímků za sekundu.

Obrázek č. 39 zachycuje snímkování po dobu 140 ms a z obrázku je patrné, že poloha mravenců se téměř neliší, což je dáno krátkým časem, který je zachycen pomocí rychlého zařízení FITPix. Obrázek č. 40 zachycuje dobu 1400 ms a poloha mravenců se velmi liší díky nízké snímkové rychlosti zařízení IEAP – USB 1.22 Interface.

Detektor Medipix3 lze použít v případě výměny firmware a speciálního adaptéru, který se vkládá mezi zařízení FITPix a moduly s detektorem Medipix3. S detektory Medipix3 v této sestavě lze docílit 50 snímků za sekundu. Stojí za zmínku, že FITPix byl ve své době dlouhé roky jediným zařízením, který byl schopen ovládat detektor Medipix3.

**Tabulka 3.:** Výsledky syntéz pro FITPix 1.0 - 2.3 v FPGA od Lattice.

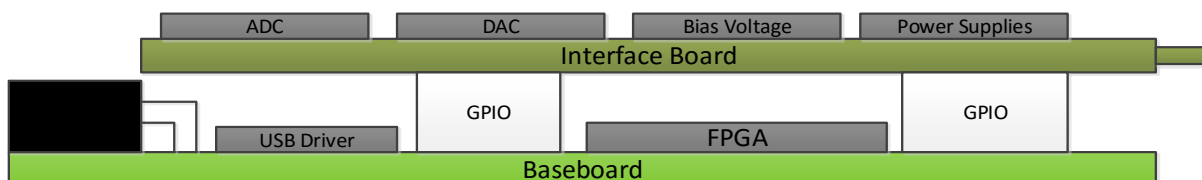
| FITPix 1.0 - 2.3 | Register bits      | I/O cells | Block RAMs      |
|------------------|--------------------|-----------|-----------------|
| FW - Timepix     | 1880 of 8352 (23%) | 61        | 12 of 12 (100%) |
| FW - Medipix3    | 1543 of 8352 (18%) | 57        | 7 of 12 (58%)   |

## 11.2 FITPix 3.0

Ačkoliv FITPix 1.0 – 2.3 významně zvýšil možnosti využití pixelových detektorů z rodiny Medipix, tak stále nebyl schopen dosahovat rychlostí v řádu stovek snímků za sekundu, ačkoliv detektor tyto rychlosti umožňuje. Další omezujícím faktorem je malá univerzalita. V průběhu používání zařízení FITPix bylo požadováno mnoho speciálních funkcí, ale stávající řešení neposkytovalo příliš možností, jak tyto úpravy podchytit pomocí jednoho hardware. Zejména jde o tyto požadavky, které by mělo splnit jedno zařízení:

1. Podpora detektoru Timepix v sériovém a paralelním režimu
2. Podpora detektoru Medipix3 v sériovém a paralelním režimu
3. Možnost použití více detektorů, ale ne v sériovém uspořádání, nýbrž v paralelním uspořádání
4. Odstranit omezení spočívající ve VHDCi konektoru

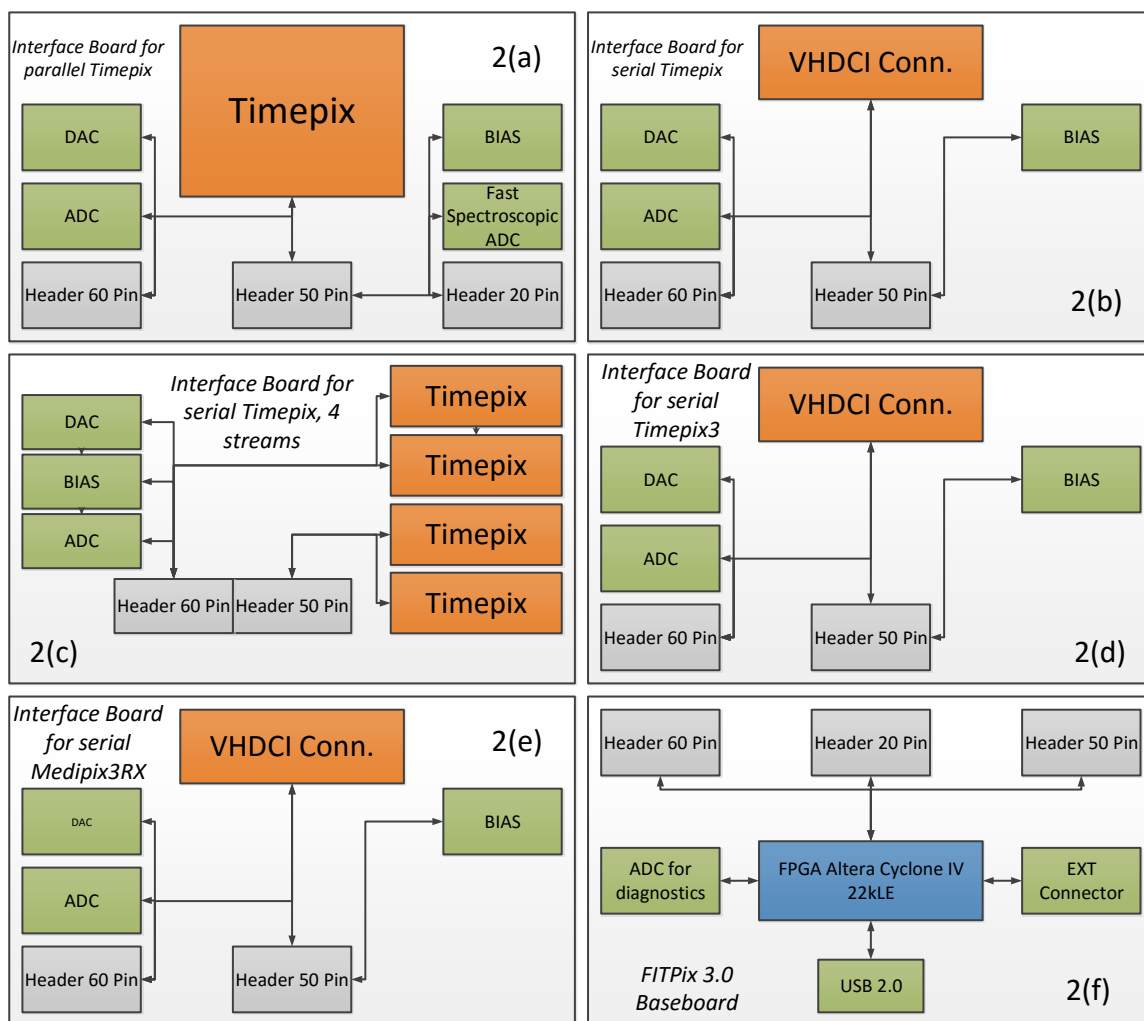
Na základě těchto požadavků byla navržena nová verze zařízení FITPix s označením 3.0. Hardware byl rozdělen na dvě desky plošných spojů. První deska obsahuje pouze obvod FPGA, komunikační rozhraní, napájecí obvody, diagnostiku a konektory. Tím vznikla jakási základní deska - Baseboard, který sdružuje prvky systému, které jsou vždy společné. Druhá deska je vždy upravena přímo pro danou aplikaci a propojena pomocí konektorů, které jsou schopny propojit 24 LVDS a 50 CMOS signálů. Tato deska obsahuje pouze napájecí obvody, A/D a D/A převodníky a případně zesilovače jsou-li požadovány. Tato deska tvoří pouze jakési rozhraní, neboli Interface Board, mezi základní deskou a detektory. Struktura takového systému je znázorněna na obrázku č. 41.



**Obrázek 41.:** Znázornění hardwarového řešení zařízení FITPix 3.0, které je rozděleno na dvě části – Baseboard a Interface Board.

Další změnou je FPGA od firmy Altera. Bylo zvoleno FPGA ve větším pouzdře, aby bylo k dispozici dostatečné množství signálů. Zároveň byla požadována externí paměť pro konfiguraci FPGA obvodu, s možností programovat ji přímo přes USB. Integrovaný obvod pro USB má dva nezávislé datové porty. Jeden port je použit pro komunikaci mezi FPGA a PC. Druhý port je připojen k paměti, která obsahuje konfiguraci FPGA a je možno ji kdykoliv přeprogramovat z vlastní aplikace.

Následující obrázek č. 42 znázorňuje bloková schémata Baseboardu a pěti verzí Interface Boardu, které byly realizovány.



**Obrázek 42.:** a) Interface Board pro detektor Timepix v paralelním režimu, b) Interface Board pro detektor Timepix v sériovém režimu, c) Interface Board pro čtyři detektory Timepix, d) Interface Board pro detektor Timepix3, e) Interface Board pro detektor Medipix3, f) Blokové schéma Baseboard.

### 11.2.1 Interface Board Timepix, sériový režim

Tento Interface Board zachovává původní filozofii FITPix 1.0 – 2.3 a zachovává VHDCi konektor. Firmware je použit ve standardní verzi, což umožňuje rychlost čtení až 90 snímků za sekundu.

### 11.2.2 Interface Board Timepix, paralelní režim

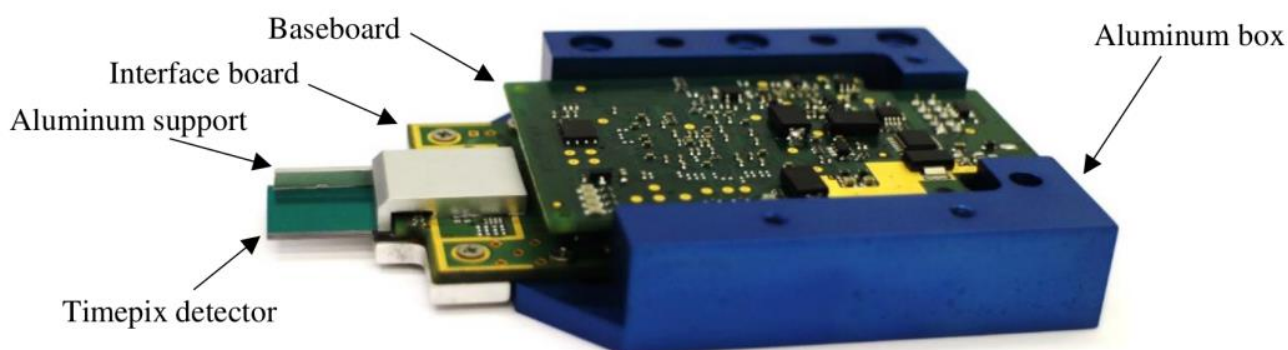
Interface Board má umístěn detektor Timepix přímo na desce plošného spoje, kvůli značnému množství signálů, které je třeba propojit. Firmware obsahuje kompresi dat a umožňuje až 850 snímků za sekundu, což je 9,5 × více než FITPix 1.0 – 2.3 a 170 × než původní IEAP – USB 1.22 Interface.

### 11.2.3 Interface Board 4ch/5ch Timepix, sériový režim

Tato verze umožňuje propojit až pět kanálů pro pixelové detektory. Tato verze vznikla pro potřeby velkoplošných detektorů, které byly v rámci ÚTEF ČVUT vyvíjeny. Cílem bylo snížit množství FITPixů pro obsluhu takového detektoru. Jelikož vznikla plocha detektorů 10 × 10 vždy s pěti detektory v sérii, tak v případě předchozí verze FITPixu by bylo potřeba 20 zařízení FITPix pro obsluhu detektorů. Nicméně s touto modifikací jsou pro obsluhu potřeba pouze čtyři zařízení FITPix 3.0.

### 11.2.4 Interface Board Medipix3

Poslední verze je určena pro detektory Medipix3. Interface Board obsahuje VHDCi konektor, ale není již třeba speciálního adaptéru a detektor lze připojit přímo k zařízení FITPix. V této konfiguraci je rychlost stále původních 50 snímků za sekundu. Na následujícím obrázku je zobrazen FITPix 3.0 ve verzi s Interface Board, který umožňuje paralelní čtení dat z detektoru. FITPix verze 3.0 postupně nahradila předchozí verzi a byla licencována firmě Advacam s.r.o., která jej prodává pro různé průmyslové aplikace.



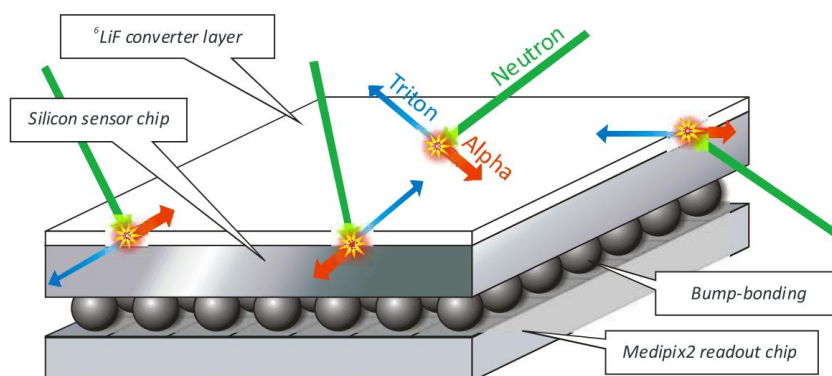
**Obrázek 43.:** FITPix 3.0 ve verzi s Interface Board, který umožňuje paralelní čtení dat z detektoru.

**Tabulka 4.:** Výsledky syntéz pro FITPix 3.0 v FPGA od Altera.

| FITPix 3.0                  | LE                    | Pins             | Memory                   |
|-----------------------------|-----------------------|------------------|--------------------------|
| FW - Timepix Serial         | 5,826 / 28,848 (20 %) | 112 / 329 (34 %) | 33,280 / 608,256 (5 %)   |
| FW - Timepix Parallel       | 3,415 / 28,848 (12 %) | 80 / 329 (24 %)  | 360,448 / 608,256 (59 %) |
| FW - Timepix Seriál 4ch/5ch | 5,826 / 28,848 (20 %) | 112 / 329 34 %)  | 33,280 / 608,256 (5 %)   |
| FW - Medipix3               | 2,781 / 28,848 (10 %) | 71 / 329 (22 %)  | 32,768 / 608,256 (5 %)   |

### 11.3 SATPix

SATPix je první speciální aplikací rozhraní FITPix pro použití této technologie ve vesmíru. Tento speciální měřicí přístroj vznikl v rámci grantu ESA - C22907/09/NL/CBi. Cílem bylo vyvinout prototyp detektoru termálních neutronů (což je volný neutron s energiemi okolo 0,025 eV). Jelikož rozhraní FITPix se osvědčilo v mnoha aplikacích použitých jak na půdě ÚTEF ČVUT tak i na pracovištích zahraničních partnerů, proto jsme jej zvolili jako výchozí platformu pro tuto aplikaci.



**Obrázek 44.:** Princip konverze neutronového záření s použitím pixelového detektoru.

Na obrázku č. 44 je znázorněn princip detekce neutronů pomocí pixelového detektoru. Jelikož neutrony a obzvláště tepelné neutrony interagují v polovodičovém senzoru s velmi nízkou pravděpodobností, tak samotný polovodičový sensor nelze téměř smysluplně použít. Abychom mohli pomocí pixelového detektoru měřit neutronové záření, proto musí být sensor opatřen speciální konverzní vrstvou. V této konverzní vrstvě dojde reakci a pomocí polovodičového senzoru detekujeme částice, které byly touto reakcí vytvořeny. Jedním z možných neutronových konvertorů je například LiF obohacený na 89 % isotopem <sup>6</sup>Li. Isotop <sup>6</sup>Li konvertuje neutronové záření pomocí reakce  ${}^6\text{Li}(n, \alpha){}^3\text{H}$ . Produktem reakce je  $\alpha$  částice a triton, které jsou detekovány polovodičovým senzorem se 100 % účinností.

Pro potřeby tohoto projektu byla vytvořena speciální verze hardware a firmware. Místo standardní sběrnice FITPixu USB 2.0 byla použita sběrnice SpaceWire (sběrnice je založena na

standardu IEEE1355). SpaceWire je vysoce spolehlivá komunikační sběrnice, jenž byla vytvořena pro použití v kosmických lodích, satelitech a vesmírných sondách. Na vývoji této sběrnice se podílí ESA, NASA, JAXA a RKA. SpaceWire používá diferenciální signály a dosahuje přenosových rychlostí 2 – 400 Mbit/s (díky vysoké datové rychlosti není omezujícím faktorem pro FITPix a detektor Timepix s použitím sériového rozhraní). FPGA od Lattice bylo nahrazeno FPGA obvodem od firmy Altera. Náhradu umožnila skutečnost detekce porušení konfigurace FPGA obvodu vlivem Single Event Effect (SEE). Dojde-li k takovéto poruše, tak je nadřazenému systému indikována chyba.



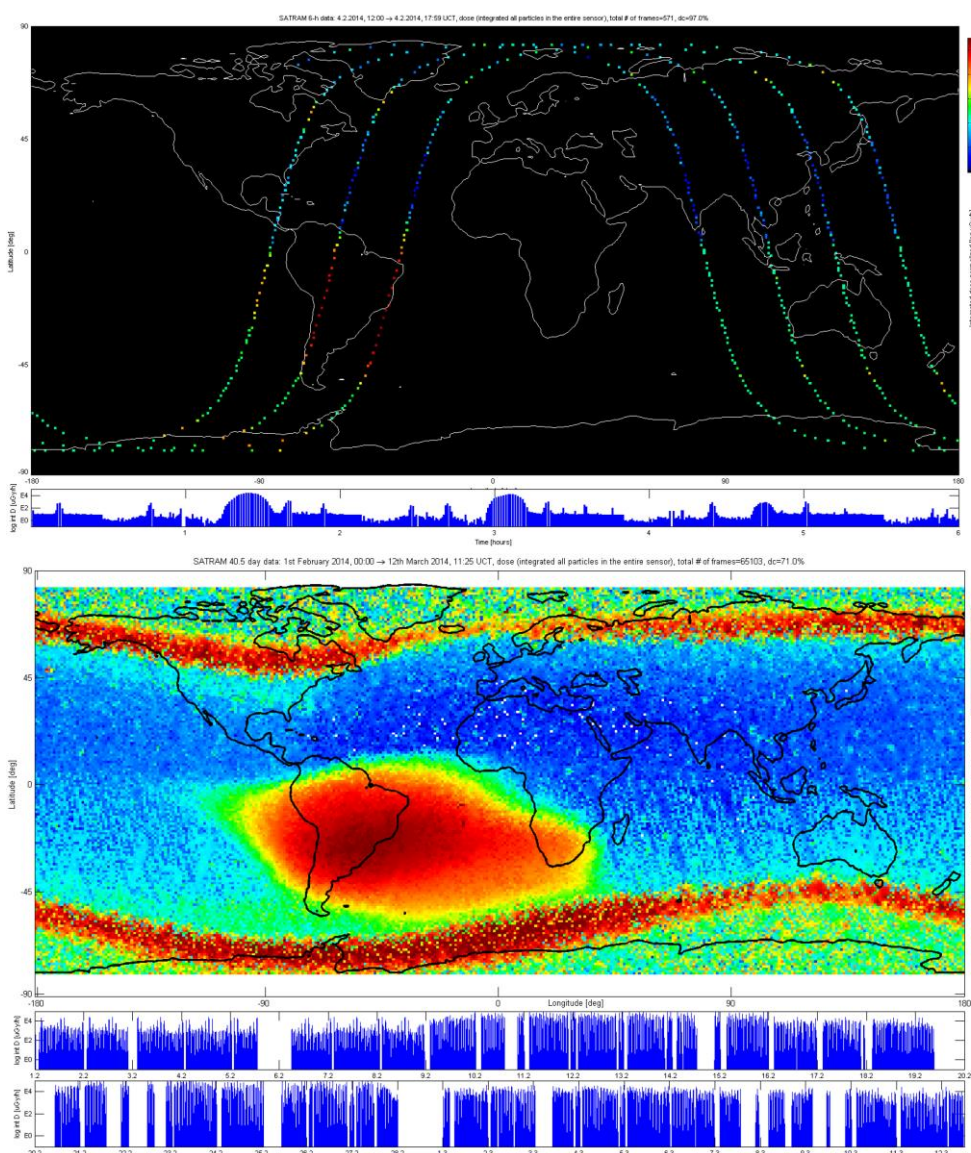
**Obrázek 45.:** SATPix prototyp s detektorem Timepix a SpaceWire převodníkem na USB.

#### 11.4 Satram

SATRAM je zkratkou názvu Space Application of Timepix Radiation Monitor. Jde o první nasazení detektoru Timepix ve vesmíru, kdy je detektor umístěn vně kosmické lodi a také je to první aplikace zařízení FITPix, která byla nasazena ve vesmíru. Zařízení SATRAM je součástí satelitu ESA Proba-V, který byla vynesena na nízkou oběžnou dráhu (LEO - 820 km) 7. května 2013. Cílem tohoto zařízení je zmapovat radiační pole, kterému je satelit vystaven. Finální zařízení SATRAM bylo vyrobeno firmou CSRC (Czech Space Research Center) z Brna, která se zabývá vývojem a výrobou zařízení pro nasazení ve vesmíru. Firmě CSRC byly předány podklady k zařízení FITPix pro výrobu zařízení, které bude splňovat přísné nároky na elektroniku, která je součástí satelitu ESA. Koncepte zařízení zůstává stále stejná, ale součástková základna byla nahrazena za součástky, které jsou certifikovány pro nasazení ve vesmíru. Firmware byl firmou CSRC mírně upraven. Respektive došlo k nahrazení komunikačního modulu, ale ostatní moduly pro ovládání detektoru a řízení experimentů zůstaly zachovány. FPGA obvod byl použit od firmy Microsemi, který je radiačně odolný. Pro snížení vyzařovaného elektromagnetického



rušení byly z návrhu vyňaty fázové závěsy. Firmware byl použit ve verzi s kompresí. Rozměry výsledného zařízení jsou 108 mm × 63 mm × 56 mm. Kryt zařízení je zhotoven z hliníku a místě detektoru došlo k zúžení krytu na 0,5 mm. Celý modul dosahuje spotřeby nižší než 3 W a váhy 172 g. Na obrázku č. 46 je znázorněna prostorové a časové rozdělení celkové absorbované dávky v  $\mu\text{G/h}$ , která byla změřena na oběžné dráze satelitu. První část obrázku znázorňuje data z 6 h doby měření a druhá část obrázku znázorňuje naměřená data ze 40 denního měření, které proběhlo od 4. února 2014 do 13. března 2014. První část obrázku je tvořena 571 snímků. Druhá část obrázku je tvořena 65103 snímků. Z obrázků je patrné, že celková absorbovaná dávka se významně geograficky mění. Rozdíl mezi nejnižší a největší hodnotou je větší než  $10^6$ .



**Obrázek 46.:** a) Mapy radiace (prostorové mapy a časové histogramy) měřené po dobu 6 h (nahore) a 40 dní (dole) pomocí zařízení SATRAM operujícího na palubě satelitu Proba-V. b) Průběh dávkového příkonu v čase. Tyto obrázky byly zpracovány kolegy z ÚTEF ČVUT z nasbíraných pomocí zařízení SATRAM. Převzato z [18].

SATRAM je mimořádně úspěšnou aplikací, která ukázala výhody použití pixelových detektorů Timepix v kombinaci s elektronickým zařízením typu FITPix. Jde o velmi kompaktní zařízení s nízkou váhou a nízkou spotřebou. Výsledky a datové produkty mají formu toků částic, dávky záření, směrového rozdělení energetických nabitých částic smíšeného radiačního pole a spektrálního rozdělení energetických ztrát částic podle jejich typů, od lehkých a těžkých nabitých částic (elektrony, protony, ionty) a rentgenového záření.

### 11.5 MX-10

V roce 2011 firma Jablotron a.s. začala spolupracovat s ÚTEF ČVUT a CERN. Cílem spolupráce bylo uvedení částicové kamery pro vzdělávací účely na trh. V následujícím roce byl firmou Jablotron a.s. představen produkt MX-10, který je založen na platformě FITPix. Hardware byl firmou Jablotron a.s. upraven, pro potřeby výroby. Firmware je zcela totožný s FITPix 3.0, tím pádem je zařízení svou funkcí s FITPixem 3.0 zcela shodné.

Zařízení MX-10 slouží jako vzdělávací pomůcka pro demonstraci ionizujícího záření a analýzu radioaktivních zdrojů. Je k dispozici ve dvou variantách. První varianta nazvaná Basic obsahuje zařízení MX-10 a software. Druhá varianta Edukit je významně bohatší a umožňuje i na základních nebo středních školách provádět vysoce odborná laboratorní cvičení. Kromě zařízení MX-10 a software jsou také k dispozici zdroje záření a soubor laboratorních úloh.

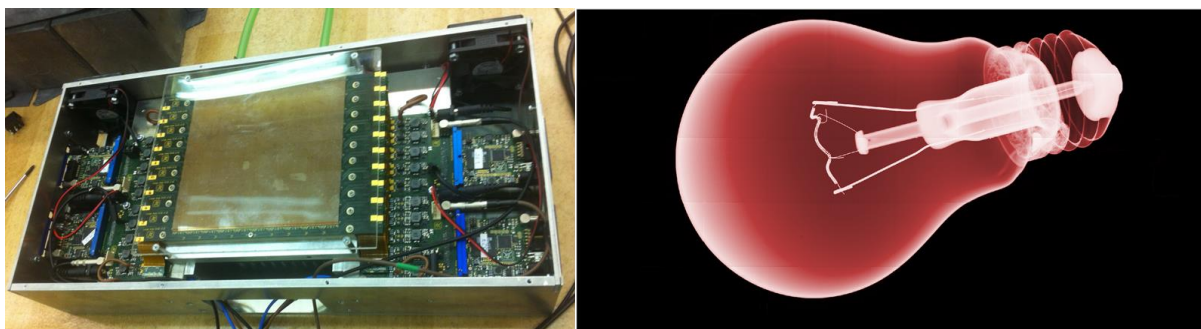


**Obrázek 47.:** Částicová kamera MX-10 od firmy Jablotron a.s., která je založena na zařízení FITPix 3.0.



## 11.6 LAD - Large Area Detector

Detektor Timepix prokázal skvělý potenciál pro radiografické aplikace. Nicméně aktivní plocha jednoho detektoru je pouze 2 cm<sup>2</sup>, což je velmi limitující. Z tohoto důvodu specialisté na detektory v ÚTEF ČVUT pracovali na vývoji velkoplošného detektoru, který by umožnil radiografii větších objektů. Podařilo se vyvinout velkoplošný detektor skládající se až ze sta detektorů Timepix a to bez mezery díky použití technologie Timepix Edgeless od firmy Advacam Oy. Díky jednotlivým modulům, které nesou pět detektorů, vznikne proužek detektorů. Z těchto proužků lze pak sestavit větší plochy. Pokud by každý tento modul, byl opatřen vlastním FITPixem, tak by jich bylo třeba dvacet pro obsluhu jednoho velkoplošného detektoru. Nicméně pro tuto aplikaci je použit FITPix 3.0 s Interface Board, který umožňuje připojení až pěti kanálů pro pixelové detektory. Pak stačí pro celou sestavu pouze čtyři zařízení FITPix. Nevýhodou je samozřejmě nižší rychlost čtení celé matice, která je složena ze sta detektorů. Na obrázku č. 48 je velkoplošný detektor bez vrchního krytu a radiografický obrázek žárovky.



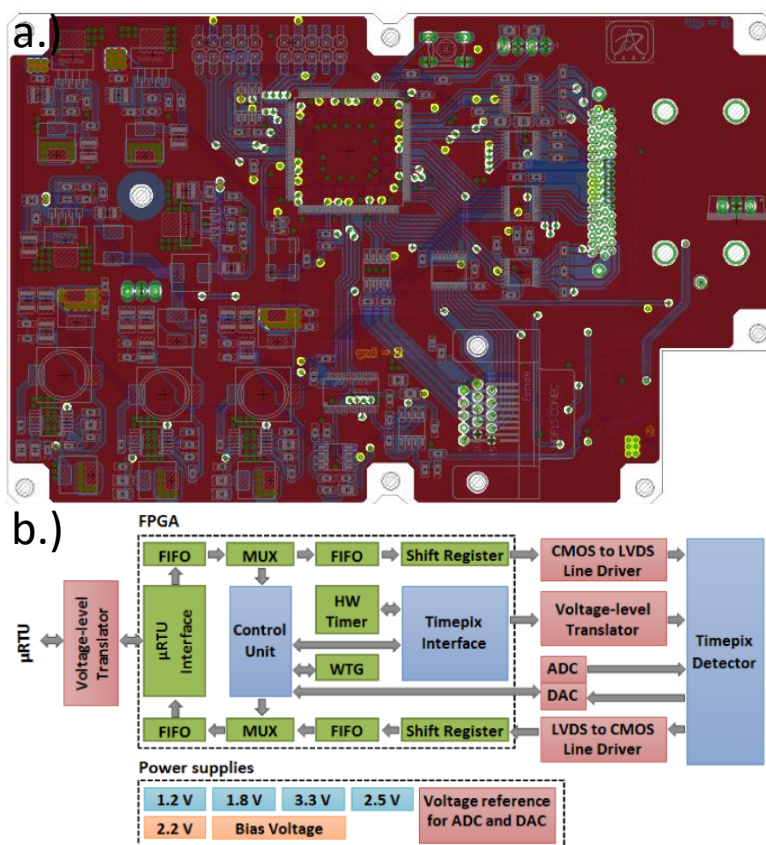
**Obrázek 48.:** Fotografie velkoplošného detektoru a radiografický obrázek žárovky pořízený tímto zařízením.

Detekční plocha je rozdělena na čtyři kvadranty. Každý kvadrant jak bylo zmíněno je ovládán jedním zařízením FITPix 3.0. Díky pěti detektorům v sérii je možno použít vyšší frekvence pro čtení dat (u jiných zařízeních, kde bývá zapojeno větší množství detektorů v sérii, je frekvence snížena z důvodu stability systému na 1 MHz až 10 MHz). V základním nastavení je tato frekvence nastavena na 50 MHz, ale může být uživatelem zvýšena až na 100 MHz. S těmito frekvencemi je možné dosáhnout 5 snímků za sekundu, nebo 10 snímků za sekundu pro frekvenci 100 MHz. Aktivní plocha detektoru je 200 cm<sup>2</sup> a rozlišením 6.5 Mpixelu. Jde o první zařízení tohoto typu s pixelovými detektory Timepix, které dosáhlo zmíněných parametrů. Jde o mimořádný úspěch, který nešel snahám o komercializaci. V současné době je celé řešení

licencováno firmě Advacam s.r.o., která jej nabízí pod názvem Widepix. Díky modularitě je tento výrobek nabízen ve variantách  $10 \times 10$ ,  $5 \times 5$ ,  $4 \times 5$  a  $1 \times 5$  detektorů.

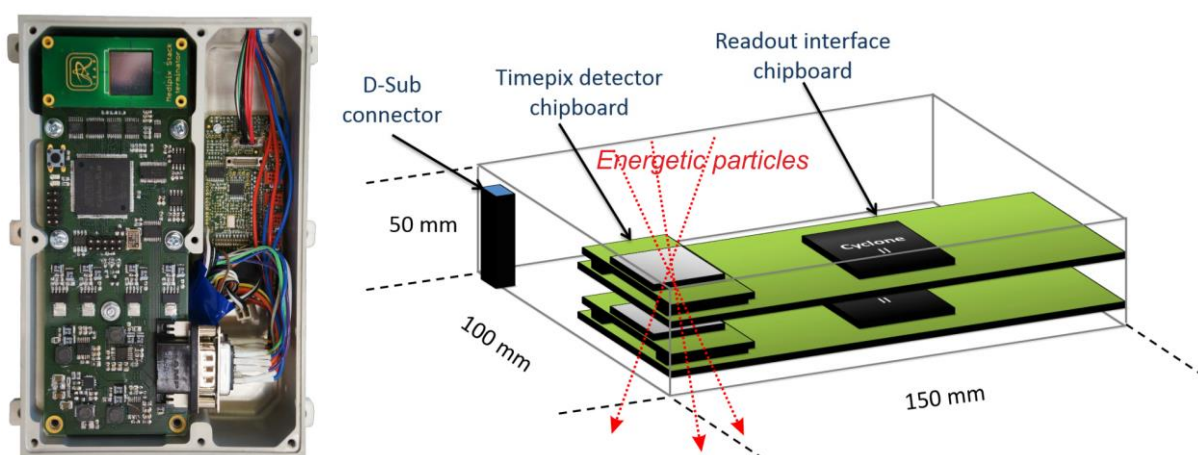
### 11.7 RISESAT

Další aplikací použití rozhraní FITPix a částicového pixelového detektoru Timepix je družicový přístroj RISESAT (Rapid International Scientific Experiment Satellite), který navazuje na projekt SATPIX. RISESAT je 50 kg vědecký mikro satelit, který je vyvinut na Tohoku University v Japonsku v rámci programu Japanese FIRST (Funding Program for World-Leading Innovative R&D on Science and Technology). Plánovaná oběžná dráha je ve výšce 700 km a inklinací  $98^\circ$ . Životnost mikro satelitu je plánována minimálně na dva roky. Pro výzkumný mikro satelit RISESAT byla vyvinuta speciální verze rozhraní FITPix, která ovládá dva detektory Timepix. Dva detektory byly zvoleny, aby poskytl precizní teleskop energetických částic a také z důvodu zálohy, aby v případě poškození jednoho detektoru nedošlo k zamezení používání i druhého detektoru. Oba detektory mají vlastní i FPGA modul.

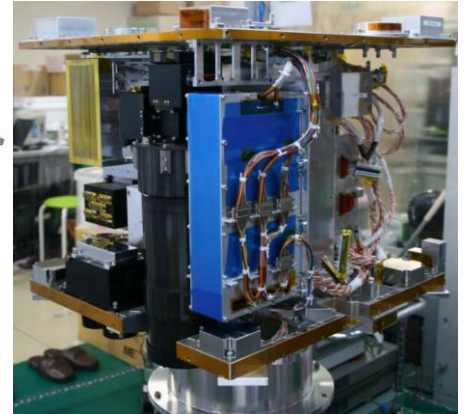
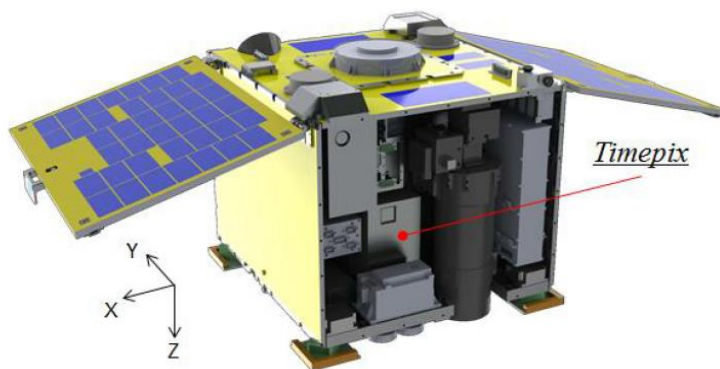


**Obrázek 49.:** Plošný spoj je realizován na čtyřech vrstvách. Všechny součástky jsou použity ve vývodových pouzdech, které umožňují optickou kontrolu kvality zapájení součástek. Blokové schéma znázorňuje strukturu částicového pixelové detektoru pro satelit RISESAT.

Byť základní myšlenkou pro dva detektory je záloha, ale pokud nedojde k poruše na jednom detektoru, tak lze oba detektory využívat současně. Tím je možné měřit s vysokou přesností směr letu energetických nabitých částic ve vesmíru, jako jsou elektrony, miony, piony, protony, lehké ionty a těžké ionty. Na následujícím obrázku číslo č. 49 je znázorněn návrh plošného spoje a blokový diagram celého detektorového modulu. Ačkoliv RISESAT, jak bylo zmíněno, založen na rozhraní FITPix, tak došlo k několika úpravám pro použití v mikro satelitu RISESAT. Modul RISESAT obsahuje procesorovou jednotku  $\mu$ RTU, které přijímá povely z řídicího počítače satelitu. Obsahuje též 32 MB Flash paměť, která obsahuje konfigurace pro detektory. Tato paměť je zároveň používána jako dočasné uložení dat z detektorů (data jsou již v FPGA komprimována pomocí RLE). Mezi  $\mu$ RTU a FPGA obvodem je datová komunikace, synchronizační signály pro měření a speciální signál, který indikuje narušení činnosti FPGA obvodu od SEE (Single Event Effect). Pokud by tento signál indikoval poškození configuračních bitů FPGA obvodu, je vynucen nový start FPGA obvodu, kdy dojde znovu k načtení firmware z externí paměti do FPGA obvodu. Pomocí synchronizačních signálů je možné realizovat současné spuštění měření, které je velmi důležité pro měření směru letu sub-atomárních částic. Další výhodou použití dvou detektorů ve zmíněném zapojení je možnost měření s nulovou mrtvou dobou. V momentě kdy jeden detektor měří, tak je druhý detektor vyčten a naopak. Na obrázku číslo č. 50 je fotografie detektorového modulu a vizualizace umístění detektorů v modulu. Na obrázku číslo č. 51 je vizualizace celého mikro satelitu RISESAT včetně umístění detektorového modulu s detektory Timepix a fotografií realizovaného mikro satelitu, který je určen pro předletovou verifikaci.



**Obrázek 50.:** a.) Fotografie výsledného detektorového modulu pro mikro satelit RISESAT. Modul je zakryt víkem, které je v místě detektoru Timepix ztenčeno. B.) Vizualizace umístění detektorů a průlet částic detektory.



**Obrázek 51.:** a.) Vizualizace výsledného mikro satelitu RISESAT a detektorového modulu. B.) Fotografie realizovaného mikro satelitu, který je určen pro předletovou verifikaci.

Řídící počítač mikro satelitu poskytuje čas do všech měřících modulů. Tento čas je zaznamenán ke každému snímku z detektoru Timepix. Na základě této vlastnosti bude možno mapovat rozložení energetických částic s prostorovým rozlišením  $0.1^\circ$ . Vývojové fáze tohoto projektu byly úspěšně dokončeny. Nyní se je vyvíjen finální letový kus mikro satelitu RISESAT, který poté bude vynesena na příslušnou oběžnou dráhu.

## 12 Experimenty

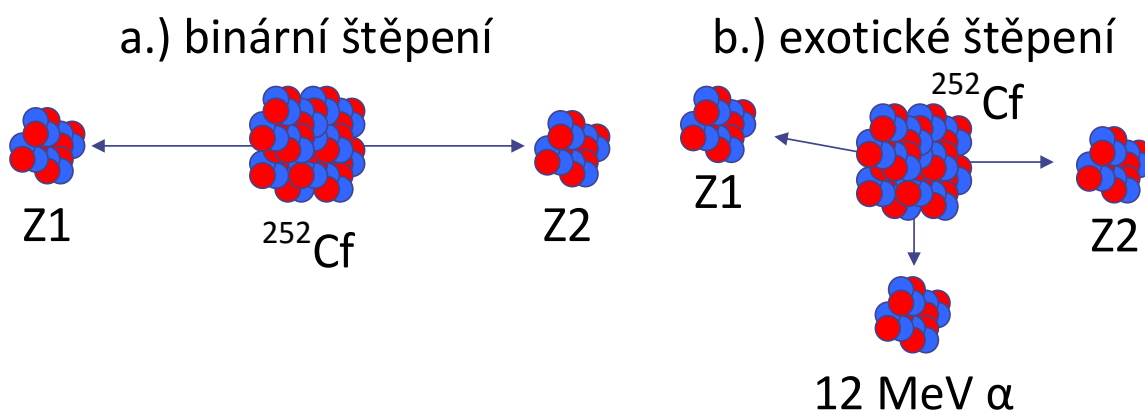
Tato kapitola obsahuje popis dvou hlavních výzkumných projektů z oboru částicové fyziky, na kterých jsem se podílel během mého doktorského studia. Následující experimenty jsou založeny na přesné synchronizaci dvou až čtyř FITPixů pro polohově citlivou detekci produktů štěpení těžkých jader.

### 12.1 Spektroskopie exotických štěpných fragmentů

Cílem těchto experimentů pod vedením Doc. Ing. Carlos Granja, Ph.D. bylo experimentální studium štěpných fragmentů, kde jsem zajišťoval technické vybavení experimentů. Štěpné fragmenty jsou vesměs radioaktivní jádra, která se následně rozpadají  $\beta^-$  rozpadem. Cílem této práce je měřit úhlová rozdělení a úhlové korelace emitovaných fragmentů.

#### 12.1.1 Exotické štěpné fragmenty od $^{252}\text{Cf}$

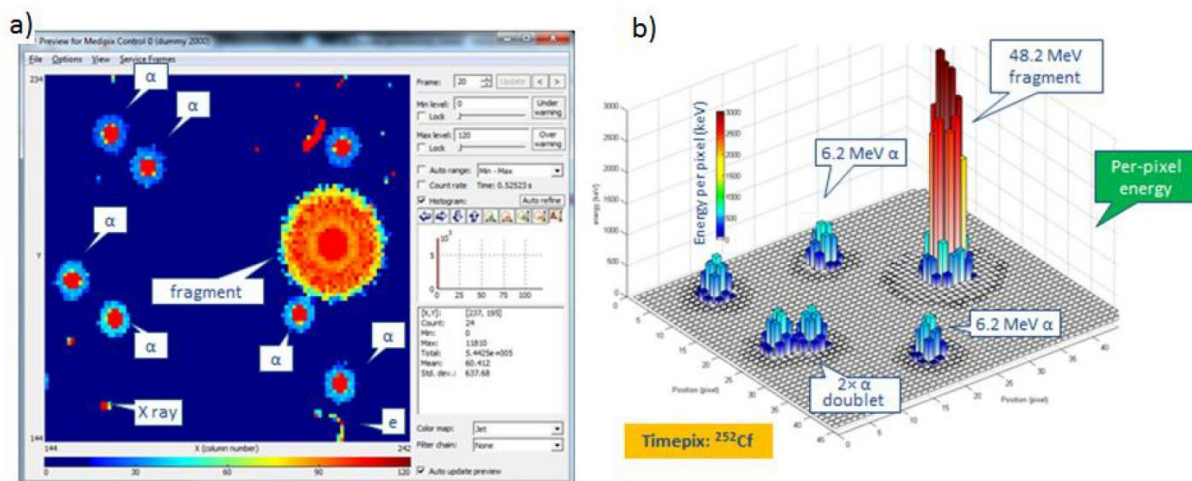
Jak bylo naznačeno v minulé kapitole, tak exotickými štěpenými fragmenty rozumíme lehké produkty rozpadu, kdy se původní jádro těžkého prvku rozštěpí na tři a více fragmentů. Pro studium tohoto jevu bylo vybráno Kalifornium, přesněji izotop  $^{252}\text{Cf}$ . Cf je silně radioaktivní kovový prvek, který je možné připravit uměle pomocí ozařování jader Curia (Cm). Cf vyzařuje též záření  $\alpha$ ,  $\gamma$  a neutronové záření. Pro studium dynamiky rozpadu těžkých jader a struktury atomového jádra je vhodné měřit vzácné kanály štěpení  $^{252}\text{Cf}$ , a to do tří fragmentů (ternary fission) a do čtyř fragmentů (quaternary fission), při kterém jsou emitovány jeden a dva vzácné lehké fragmenty kromě dvou hlavních těžkých fragmentů. Jeden tento jev je  $10^7$  krát méně častý než binární štěpení. Binární a exotické štěpení je znázorněno na obrázku č. 52.



**Obrázek 52.:** a.) binární štěpení, b.) trojitý rozpad kde dochází k rozpadu těžkého jádra na tři fragmenty.



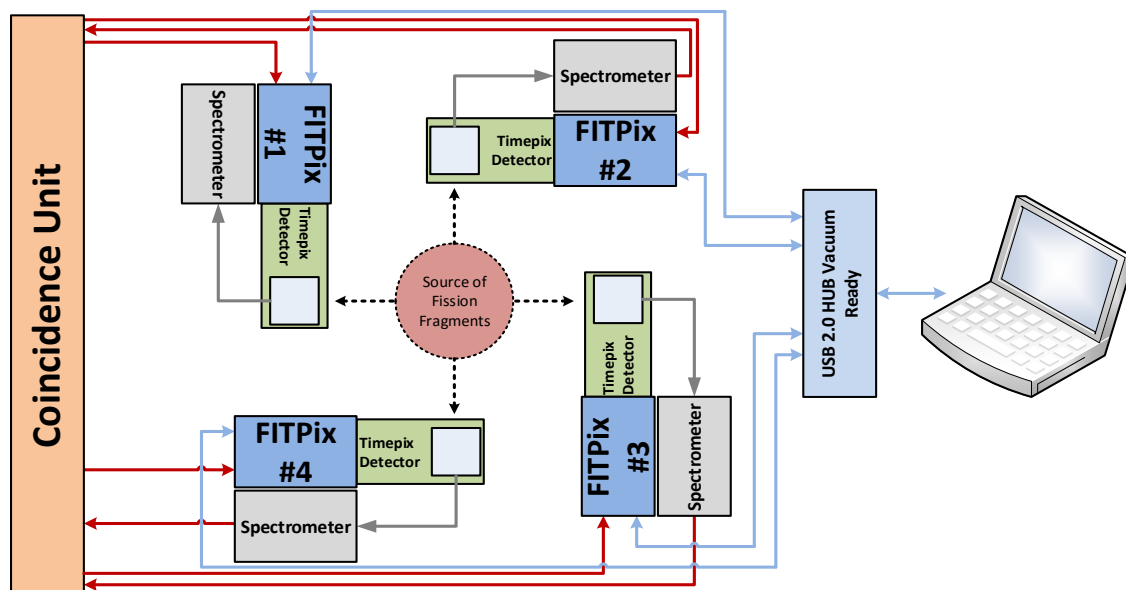
Pro přesnou polohově citlivou detekci byla vytvořena měřicí aparatura pomocí čtyř detektorů Timepix ovládanými pomocí FITPixů a jednoho spektrometru. Na obrázku č. 53 je znázorněna odezva částic v detektoru Timepix, které jsou emitovány  $^{252}\text{Cf}$ . Je velmi patrný rozdíl v náboji deponovaném do sensoru mezi částicí  $\alpha$  a fragmentem štěpné reakce.



**Obrázek 53.:** a.) Vizualizace naměřených dat pomocí softwaru Pixelman. Částice z  $^{252}\text{Cf}$  jsou měřeny v TOT módu detektoru, b.) Trojrozměrné zobrazení detekovaných částic. Na ose Z je vyznačena energie deponovaná do pixelu detektoru Timepix.

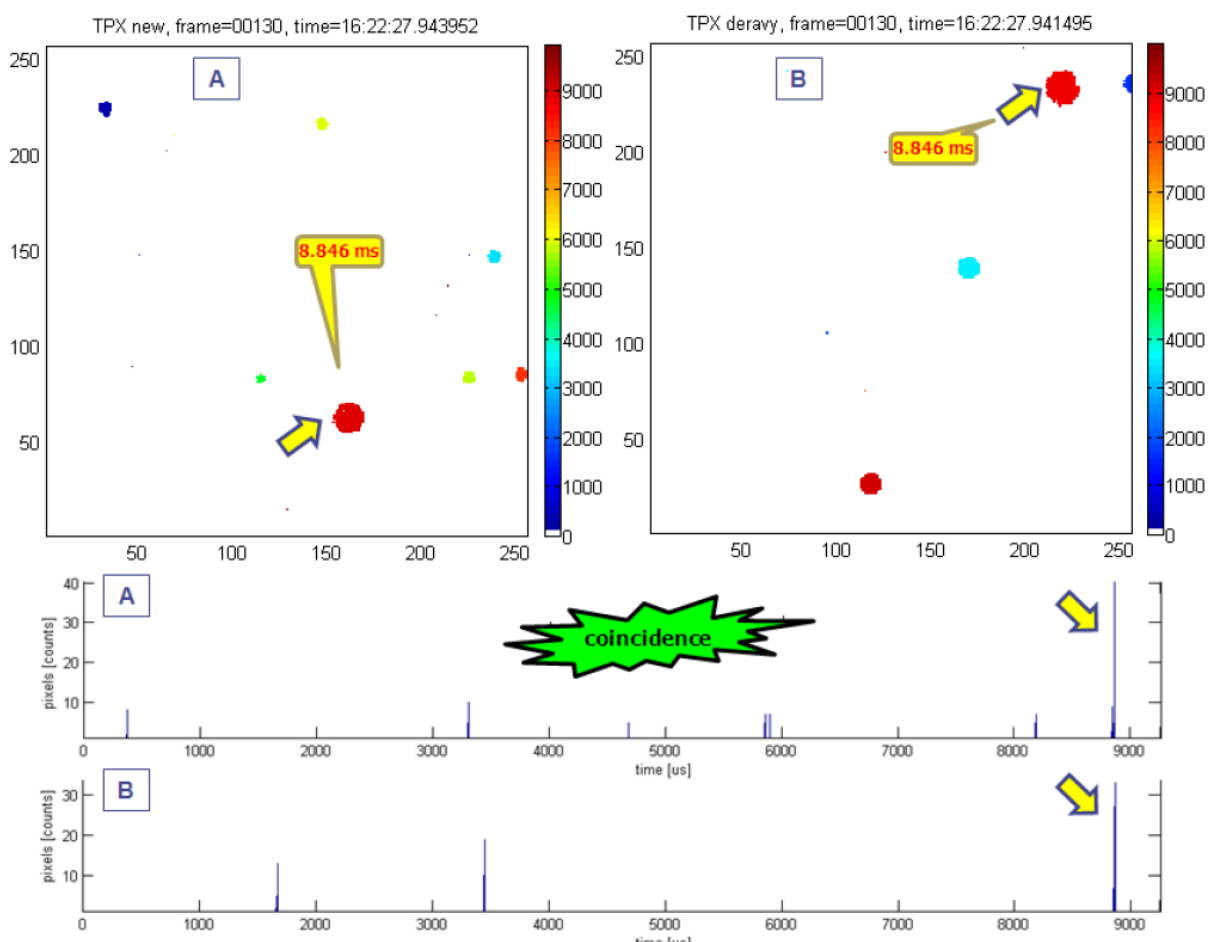
### 12.1.2 Polohově citlivá detekce vzácných fragmentů štěpení

Obrázek č. 54 znázorňuje schématické zapojení měřicí aparatury pro detekci vzácných fragmentů štěpení a měření jejich úhlových korelací.



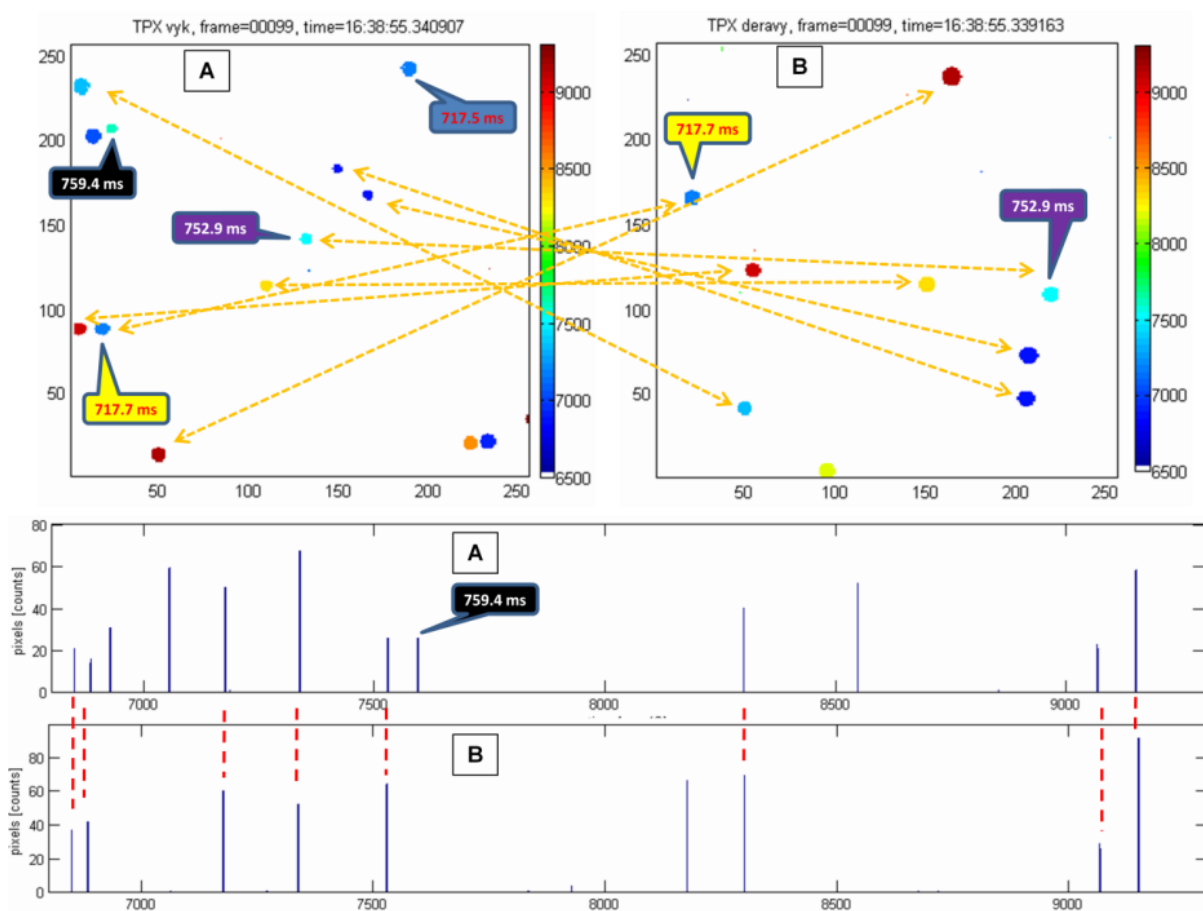
**Obrázek 54.:** Schématické znázornění komponent měřicí aparatury složené ze čtyř detektorů Timepix pro detekci vzácných fragmentů štěpení a měření jejich úhlových korelací.

Každý detektor Timepix je provozován pomocí rozhraní FITPix skrze sériové rozhraní detektoru. Každý detektor Timepix je dodatečně vybaven jednokanálovým analogovým spektrometrem pro rychlou spektrometrii signálu ze společné elektrody detektoru Timepix s nastaveným rozsahem 0,1 – 100 MeV. Spektrometry poskytují spouštěcí signál pomocí nastavitelného prahu, který lze programově nastavit tak, aby bylo možno vybrat události na základě jejich deponované energie do detekčně citlivého objemu sensoru. Tímto lze potlačit nežádoucí události, jako jsou  $\alpha$  částice z  $\alpha$  rozpadu které jsou pro  $^{252}\text{Cf}$  energie nižší než 6 MeV. Pro účely řízení generovaného signálu a synchronizace čtení dvou a více detektorů Timepix bylo nutné navrhnout a otestovat takzvaný synchronizační modul. Synchronizační jednotka vyhodnocuje pulsy ze spektrometrů a signály #BUSY z FITPixů. Pokud dojde k události v některém ze spektrometrů a zároveň jsou rozhraní FITPix připravena k měření, tak je měření spuštěno. Po dokončení měření jsou odeslána data ze všech detektorů do PC. Na obrázku č. 55 je znázorněno ověření přesné synchronizace detektorů.



**Obrázek 55.:** Demonstrace synchronizace dvou detektorů Timepix, ve kterých je zachyceno binární štěpení a časový průběh dopadu částic do detektorů po dobu měření 10 ms.

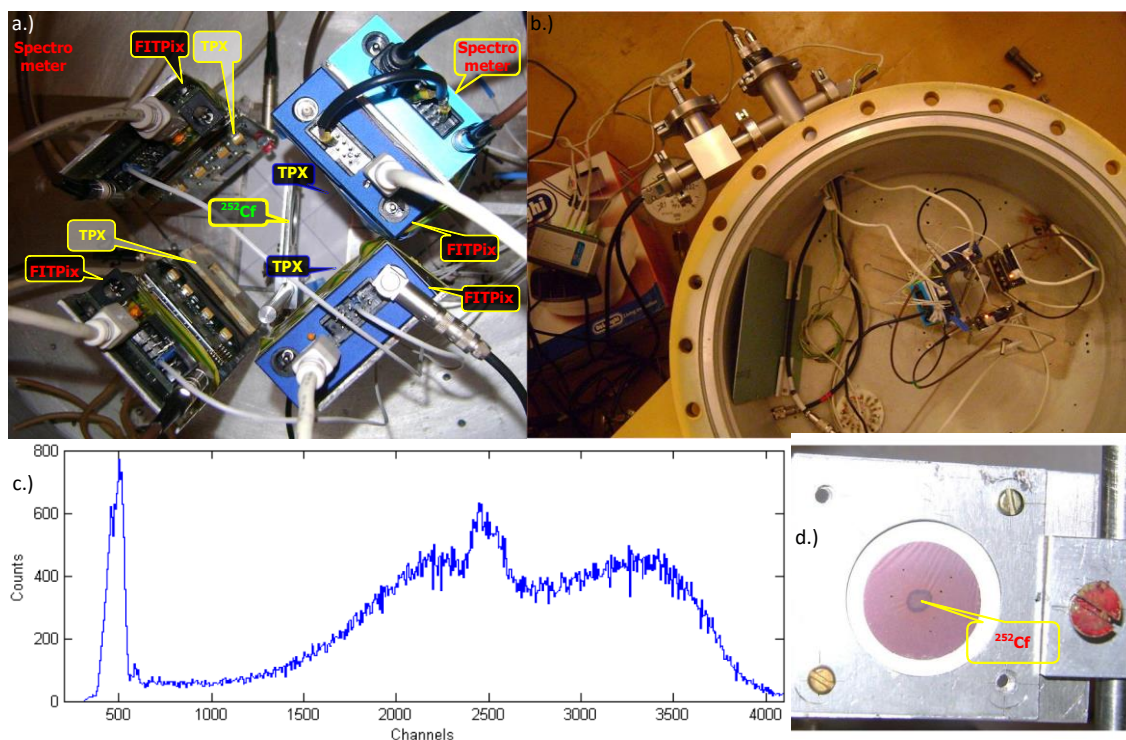
V případě binárního štěpení bychom měli vždy ve dvou protilehlých detektorech Timepix vidět štěpný fragment. Pokud je pro měření použit Timepix mód, tak oba fragmenty musí obsahovat shodný čas. Dle obrázku je vidět, že částice jsou detekovány oběma detektory ve stejný čas, což dokazuje, že jde o fragmenty ze štěpné jaderné reakce. Pro ověření byla použita perioda měřících hodin 1  $\mu$ s. Ostatní částice jsou částice  $\alpha$  jelikož nemají v protilehlém detektoru částici, která by dopadla ve stejný čas a také mají menší plochu v odezvě detektoru. Jelikož plocha částice na sensoru je úměrná velikosti energie částice, tak lze snadno rozlišit typ částice v Timepix módu. Pokud bychom měřili delší čas, tak bude na dvou protilehlých detektorech více událostí, které pochází z binárního štěpení, což je znázorněno na obrázku č. 56.



**Obrázek 56.:** Obdobně jako na obrázku č. 55 je zde znázorněno více koincidenčních událostí, které byly zaznamenány po dobu 1 s. V dolní části obrázku je zobrazeno pouze 350 ms z celé doby měření.

Částice na obrázku byly změřeny v době 350 ms. Stabilita chování měřící aparatury byla ověřena pomocí dlouhodobého měření, ve kterém bylo naměřeno několik milionů snímků detektory Timepix. V případě exotického štěpení bychom měli zaznamenat štěpný fragment ve třech nebo všech čtyřech detektorech Timepix.





**Obrázek 57.:** a.) detektory a zařízení FITPix, b.) fotografie aparatury ve vakuové komoře, c.) spektrum  $^{252}\text{Cf}$ , d.) tenký terčík na kterém je naneseno  $^{252}\text{Cf}$ , které je umístěno uprostřed mezi detektory.

Experimentální souprava byla složena ze čtyř detektorů Timepix, které byly provozovány ve vakuu, jak lze vidět na obrázku č. 57. Při těchto experimentech bylo použito oboustranného velmi tenkého terčíku s  $^{252}\text{Cf}$ . Z vývoje a testování měřící aparatury vyplynuly dva možné režimy měření. První režim měření se vyznačuje nastavením detektoru v módu Timepix a dlouhou dobou měření. Druhý režim měření používá krátkou dobu měření, typicky 50  $\mu\text{s}$  až 100  $\mu\text{s}$  a v detektoru je nastaven mód TOT.

## 12.2 Detekce SEE v integrovaných obvodech

Během posledního roku mého doktorského studia jsem se podílel v rámci grantu CANUT – Centre for Advanced Nuclear Technologies na projektu, který si kladl za cíl pomocí detektoru Timepix určit polohu SEE (Single Event Effects) v libovolném integrovaném obvodu. SEE je na rozdíl od radiačního poškození integrovaného obvodu jev, kdy může dojít k chybě činnosti nebo totálnímu zničení integrovaného obvodu vlivem jediné částice. SEE jsou způsobovány nejčastěji neutrony, vysokoenergetickými ionty nebo protony. SEE jsou rozděleny do několika skupin:

- SEU / Single Event Upset - vlivem ionizace a vytvoření náboje v integrovaném obvodu může dojít ke změně logické hodnoty, což zapříčiní chybu funkce zařízení.

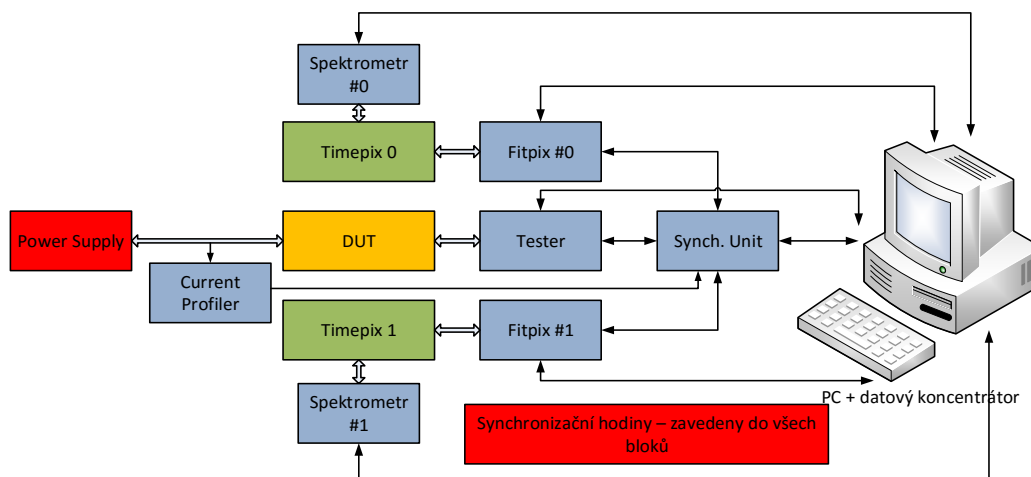
- SEL / Single Event Latch-Up – u CMOS technologie dojde k vytvoření zkratu mezi napájením a zemí. Tento jev nemusí vést k trvalému poškození a po opětovném zapnutí zařízení je funkce obnovena.
- SEGR / Single Event Gate Rupture – Vlivem ionizace dojde k vytvoření vodivé cesty v oxidu křemíku tranzistoru, čímž dojde ke zvýšení klidového proudu. Vlivem tohoto poškození dochází k postupné degradaci tranzistoru, až dojde k trvalé poruše.
- SEB / Single Event Burnout – Tento jev je stejný jako v případě SEL, ale dojde vlivem vysokého proudu k trvalému poškození integrovaného obvodu.

Tyto jevy jsou přítomny jak na povrchu země, tak ve vyšších vrstvách atmosféry a ve volném vesmíru. Na povrchu země jsou tyto jevy způsobovány i sprškami kosmického záření, které generují vysokoenergetické neutrony a protony. Druhou nejčastější příčinou jsou izotopy obsažené v nečistotách v pouzdech integrovaných obvodů, které vyzařují záření  $\alpha$ . Dále je nutné s těmito jevy také počítat v prostředích jako jsou jaderné reaktory, urychlovače nebo zařízeních určených pro hadronovou léčbu rakoviny. Tyto jevy mohou pro dnešní integrované obvody s miliardami tranzistorů, jako jsou moderní procesory nebo FPGA obvody znamenat jisté nebezpečí. I na povrchu země může dojít k SEE od kosmického záření, byť nejde o tak častý jev. Už pro integrované obvody v dopravním letadle je riziko SEE téměř 500x vyšší než na povrchu země. Pro nasazení ve vesmíru, je již četnost chyb natolik vysoká, že musí být používány součástky odolné proti SEE nebo zařízení musí být schopno chyby odhalit a předejít chybné funkci systému. V současnosti je nejčastější metodou testování odolnosti integrovaných obvodů proti SEE používán svazek neutronů nebo protonů o průměru několik  $\mu\text{m}$ . Pomocí tohoto svazku dochází ke skenování povrchu integrovaného obvodu a k určení citlivých míst, které nejsou odolné proti SEE.

Cílem tohoto projektu je vytvořit metodiku měření a prototyp měřící stanice, která by místo mikro svazku neutronového nebo protonového záření využívala neutronového nebo protonového záření, které bude ozařovat celý integrovaný obvod nebo více takových integrovaných obvodů. Tím pádem bude možno použít běžné urychlovače částic a celé testování zlevnit. Zároveň by mělo dojít i ke zrychlení testování, jelikož místo skenování bude možno ozařovat větší plochu. Jelikož pixelový detektor Timepix je schopen měřit s rozlišením 55  $\mu\text{m}$ , tak je ideálním kandidátem pro takovéto účely.

### 12.2.1 Měřící stanice SEE

Byl proveden návrh měřící stanice pro lokalizaci SEE pomocí detektorů Timepix a zařízení FITPix 3.0. Na obrázku č. 58 je znázorněno blokové schéma měřící stanice.



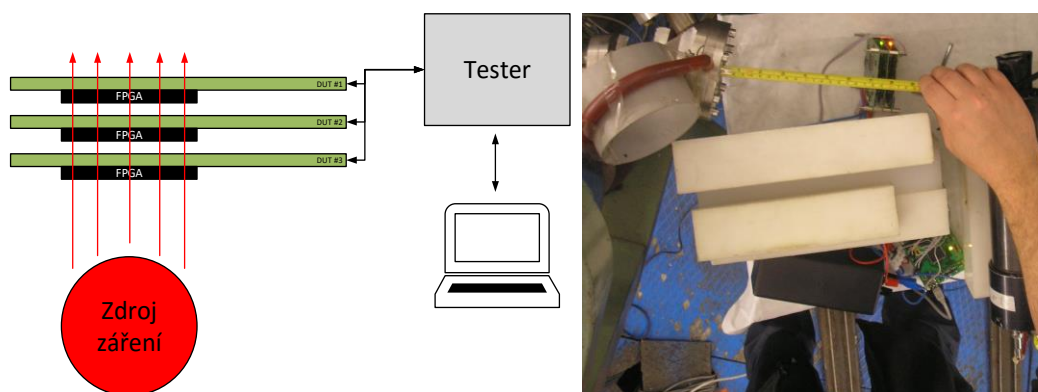
**Obrázek 58.:** Blokové schéma měřicí stanice pro lokalizaci SEE pomocí detektorů Timepix.

Testovaný integrovaný obvod (DUT – Device Under Test) bude umístěn mezi detektory Timepix. Při průletu částice, která vyvolá SEE budou ovládnuty detektory a ostatní subsystemy. Díky polohově citlivým detektorům bude určena poloha SEE v integrovaném obvodu. SEE bude detektován v libovolném integrovaném obvodu pomocí testovacích stimulů, které jsou individuálně vytvořeny pro každý DUT. Tester stimuluje DUT, a také kontroluje řádnou funkci DUT. V případě zjištění SEE odešle informaci o zjištěné chybě spolu s časovou značkou. Spektrometr analyzuje energie dopadajících částic a akumuluje spektrum záření, kterému je systém vystaven. Zároveň indikuje dopadající částice dle energie s možností filtrování dle energie. Pokud je detekována částice, tak spektrometr odešle nadřazenému systému energii a časovou značku. Jako DUT jsou myšleny elektronické součástky, jenž se vystaví ionizujícímu záření. Tester bude tyto součástky stimulovat a zároveň kontrolovat jejich funkci. V úvahu přicházejí MCU, Paměti, FPGA, diskrétní hradla. Synchronizační jednotka ovládá FITPixy. Spuštění FITPixů je iniciováno na základě signálů od ostatních bloků. Každá část systému disponuje signálem, který je použit jako synchronizační signál. Speciální napájecí zdroj napájí pouze DUT a to z toho důvodu, aby v případě SEE bylo možno odpojit napájení pouze pro DUT a tím ho restartovat. Ostatní části měřicí stanice nejsou vystaveny záření, jelikož jsou odstíněny. Synchronizační hodiny jsou zavedeny do každého bloku. Díky tomu je každý blok schopen generovat časovou značku, která je předávána spolu s daty. Tím je usnadněna analýza událostí.

### 12.2.2 Měření SEE pomocí neutronů

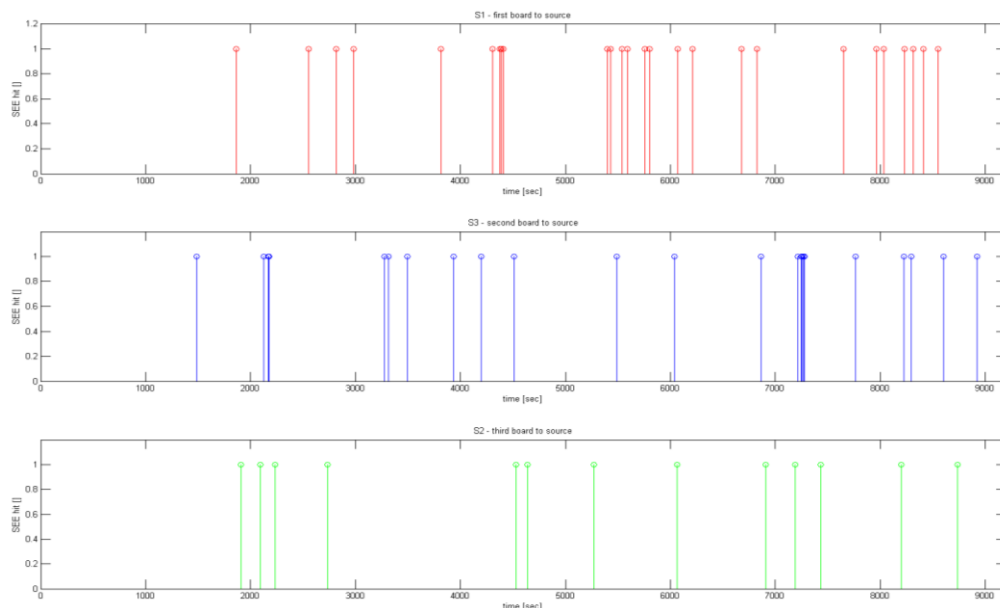
Před sestavením měřicí stanice bylo nutné ověřit, zdali budeme schopni SEE zjistit. Pro první ověřovací testy byly zvoleny FPGA obvody od firmy Altera, které disponují funkcí kontroly

konfigurační paměti a jsou vyrobeny 90 nm technologiím, která je citlivá na SEE. V případě narušení konfiguračních dat FPGA od SEE je generován signál, který událost notifikuje. Byly vytvořeny tři kusy DUT, které byly umístěny za sebou po 1 cm. Signály indukující SEE byly přivedeny do modulu Testeru, který je vyhodnocoval. V případě notifikace SEE došlo k odeslání hlášení o chybě s časovou značkou. Zároveň příslušný DUT byl restartován a uveden do zpět do stavu bez chyby. Na obrázku č. 59 je znázorněno schéma měření.



**Obrázek 59.:** a) schéma principu detekce SEE v FPGA obvodech, b) fotografie z experimentu, DUT je umístěn 8 cm od zdroje neutronů, Tester je odstíněn plastovými bloky, aby nebyl ovlivněn neutronovým zářením.

Měření probíhalo po dobu 2,5h a bylo detekováno v každém DUT 10 až 15 SEE za hodinu. Měření probíhalo na urychlovači Van de Graff, který je provozován Ústavem technické a experimentální fyziky, ČVUT. Urychlovač generoval neutrony o energii 14 MeV.



**Obrázek 60.:** Čestnost SEE po dobu měření na VdG urychlovači. Červený graf je vyneseno z dat DUT, který byl nejbližší zdroji neutronů.

### 12.2.3 Měření SEE pomocí iontů

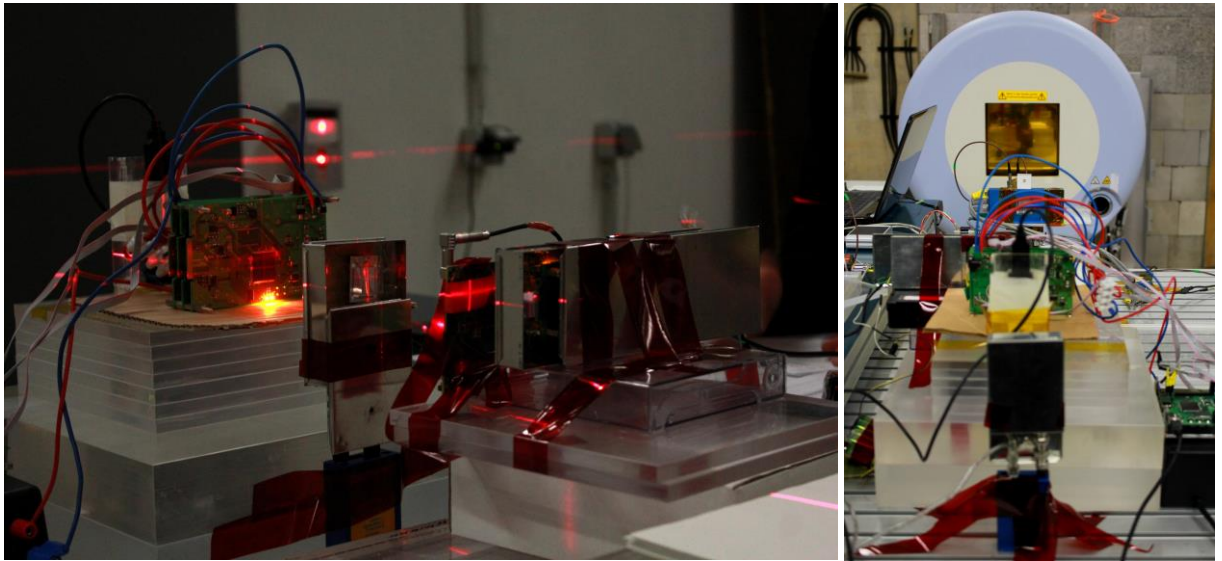
Druhé ověřovací měření proběhlo v HIT v Heidelbergu (Heidelberg Ion-Beam Therapy Center), kde je v provozu synchrotronový urychlovač iontů sloužící k léčbě rakoviny. Měření bylo provedeno s protony, ionty uhlíku a kyslíku. V tabulce č. 5 je souhrn měření a počtů SEE, které byly detekovány.

**Tabulka 5.:** Výsledky měření SEE na urychlovači v HIT.

| Experiment | Částice       | Energie [MeV] | Intenzita [částic/s] | Počet událostí [-] |        |        | Doba měření [s] |
|------------|---------------|---------------|----------------------|--------------------|--------|--------|-----------------|
|            |               |               |                      | DUT #1             | DUT #2 | DUT #3 |                 |
| 1          | Protony       | 100           | 8,00E+07             | 24                 | 30     | 23     | 7,5             |
| 2          | Protony       | 100           | 2,00E+08             | 60                 | 62     | 80     | 15,5            |
| 3          | Protony       | 100           | 8,00E+08             | 113                | 116    | 111    | 29              |
| 4          | Protony       | 100           | 2,50E+09             | 792                | 1143   | 788    | 285,75          |
| 5          | Ionty uhlíku  | 88            | 1,00E+04             | 0                  | 71     | 0      | 17,75           |
| 6          | Ionty uhlíku  | 200           | 1,00E+04             | 4                  | 25     | 74     | 6,25            |
| 7          | Ionty uhlíku  | 300           | 1,00E+04             | 4                  | 1      | 2      | 0,25            |
| 8          | Ionty kyslíku | 100           | 1,00E+04             | 3                  | 3      | 2      | 0,75            |

Nejvíce SEE bylo generováno pomocí neutronů. Ionty uhlíku a kyslíku SEE způsobovaly též, ale s nižší četností.



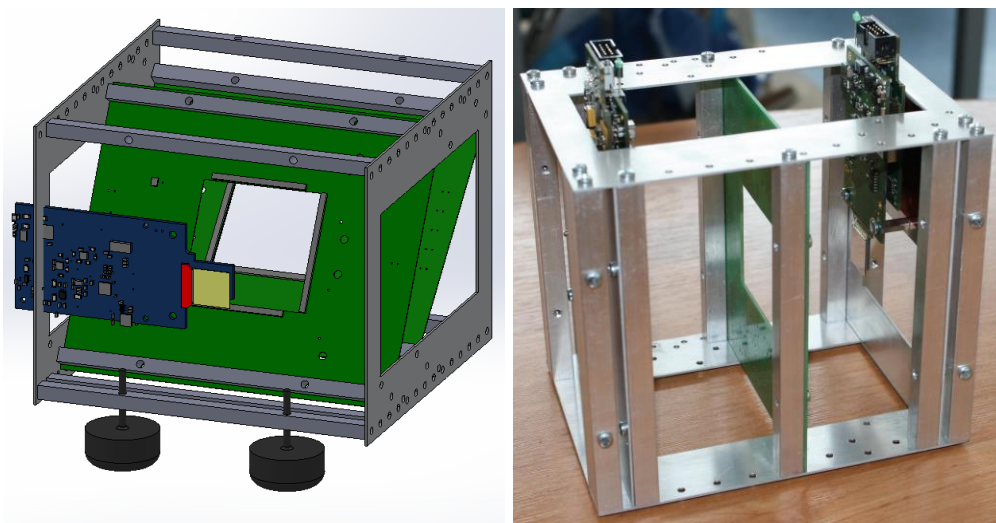


**Obrázek 61.:** Experiment v HIT Heidelberg. Na fotografii vlevo je vidět DUT se záměrným křížem, kde prochází svazek iontů. Na fotografii vpravo je vidět instalovaná aparatura a vyústění svazku iontů.

Pomocí těchto dvou experimentů bylo ověřeno, že je možné vytvořit vzorky pro testování odolnosti proti SEE, které jsou schopny pomocí vhodného firmwaru tuto událost notifikovat do testeru.

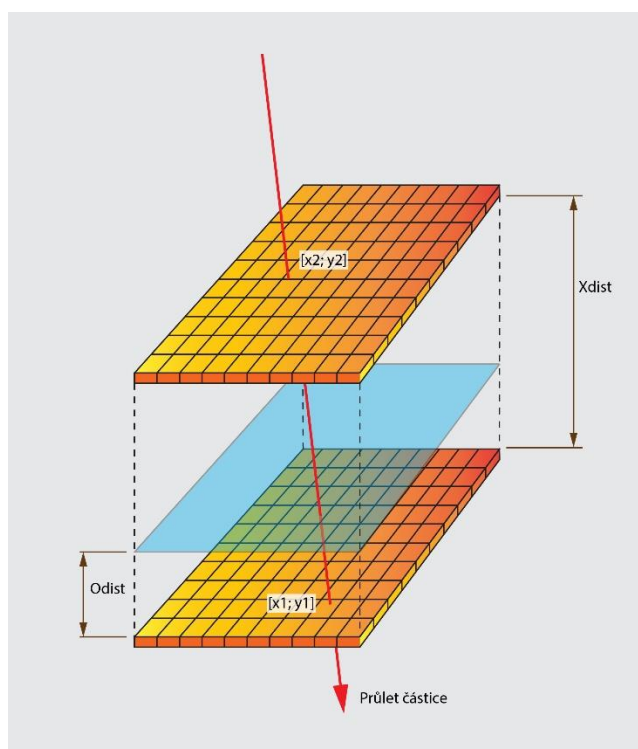
#### 12.2.4 Měřící stanice pro testování odolnosti SEE

Na základě předchozích experimentů byla sestavena měřící stanice. Do vyrobeného rámu byly osazeny dvě zařízení FITPix 3.0, tak aby byly vůči sobě přesně usazena a bylo možné dopočítat pozici SEE v DUT. Uspořádání modulů měřící stanice je znázorněn na obrázku č. 62.



**Obrázek 62.:** a) návrh měřící stanice pro detekci SEE. Mezi detektory je umístěn DUT, který je upevněn na desce, která poskytuje pro DUT napájení a konektory pro Tester, b) první prototyp měřící stanice s osazenými zařízeními FITPix 3.0.

Pomocí této stanice je možno určit polohu částic, které prolétly detektory, a též modulem DUT. Jako modelový příklad uvažují dva pixelové detektory, které jsou svisle uspořádány ve vzdálenosti  $X_{dist}$  od sebe. Všechny pixely se překrývají. Mezi těmito detektory je umístěna rovina ve vzdálenosti  $O_{dist}$  od detektoru 1 a má stejnou velikost jako pixelové detektory. Rovina je symetrická vůči středu stejně jako detektory. Oběma detektory proletí těžká, nabitá částice. Každý detektor zaznamená souřadnice jejího dopadu. Úkolem je určit souřadnice kde se částice nacházela ve vzdálenosti  $O_{dist}$  od detektoru. Výpočet těchto souřadnic lze provést pomocí rovnic parametrického vyjádření pomyslné přímky neboli trajektorii částice. Roviny jsou uvažovány tak, že rovina spodního detektoru má souřadnici Z rovnou nule. Dále můžeme předpokládat, že  $z = O_{dist}$  a pro vzdálenost horního detektoru platí  $z = X_{dist}$ . Modelový příklad je znázorněn na obrázku č. 63.



**Obrázek 63.:** Ilustrace uspořádání pixelových detektorů a trajektorie letu částice.

Soustava rovnic tedy bude vypadat následovně:

$$X = x_1 + (x_2 - x_1) * t, (20)$$

$$Y = y_1 + (y_2 - y_1) * t, (21)$$

$$Z = z_1 + (z_2 - z_1) * t, (22)$$

Vzdálenost roviny od detektoru  $O_{dist}$  známe. Známa je také vzdálenost mezi detektory  $X_{dist}$ . Proto můžeme rovnici vyjadřující souřadnici  $Z$  přepsat jako:

$$O_{dist} = 0 + X_{dist} * t, (23)$$

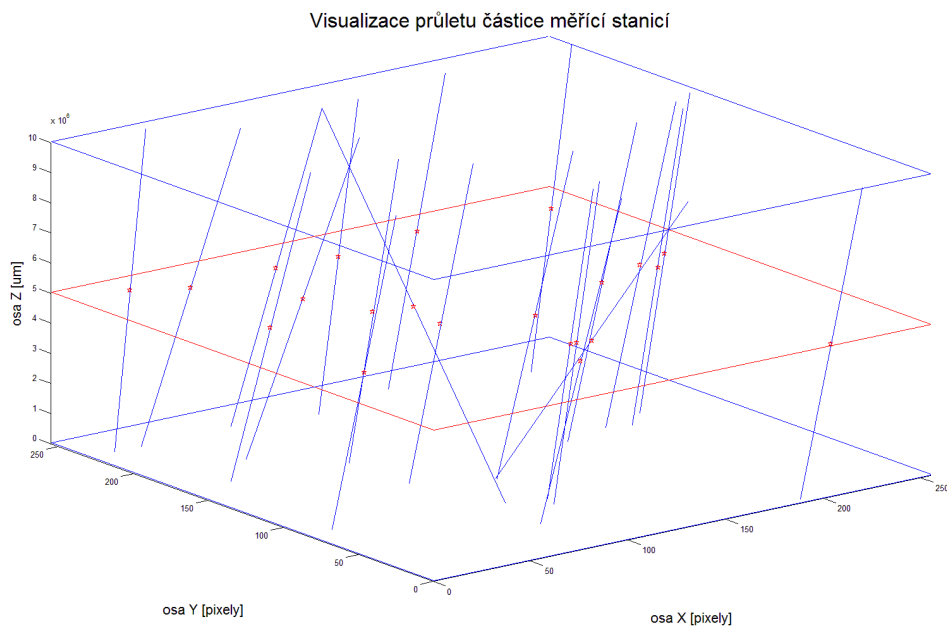
Vyjádřením neznámé  $t$  získáme parametr náležející přímce, po které se částice pohybovala. Následně získáme souřadnice částice dosazením do prvních dvou rovnic.

Souřadnice  $[x_1, y_1]$  a  $[x_2, y_2]$  jsou body, kde dopad částice zaznamenal první a druhý detektor.

$$X = x_1 + (x_2 - x_1) * t, (24)$$

$$Y = y_1 + (y_2 - y_1) * t, (25)$$

Nyní  $[X, Y]$  jsou souřadnice bodu v DUT, kde došlo k SEE. Na obrázku č. 64 je znázorněna lokalizace na datech naměřených v HIT Heidelberg.



**Obrázek 64.:** Vizualizace drah částic měřicí stanicí. Červené hvězdičky znázorňují místo průletu částice skrz DUT, kde by mohlo dojít k SEE.



## 13 Závěr

V souladu s vytyčenými cíli byla vyvinuta nová platforma pro částicové pixelové detektory z rodiny Medipix. Všechna zařízení známá před započítím vývoje platformy FITPix byla překonána ve všech parametrech. Rychlost čtení dat je nyní pomocí zařízení FITPix až  $170 \times$  vyšší než v případě předchozích zařízení vyvinutých v Ústavu technické a experimentální fyziky na ČVUT v Praze při zachování malých rozměrů. Zároveň je zařízení FITPix  $19 \times$  rychlejší než zařízení MUROS z NIKHEF s významně menšími rozměry a možností nasazení ve vakuu. Dalším významným posunem je možnost synchronizace více zařízení FITPix, nebo synchronizace pomocí externího synchronizačního signálu s odezvou do 70 ns.

Během doby mého studia bylo vyrobeno přes pět set kusů všech typů zařízení FITPix. Zařízení FITPix je využíváno nyní pro výzkum na půdě Ústavu technické a experimentální fyziky na ČVUT v Praze a na Fakultě elektrotechnické, Západočeské univerzity v Plzni. Mimořádným úspěchem se dá také považovat to, že zařízení FITPix bylo zakoupeno pro vědecké účely také věhlasnými zahraničními vědeckými institucemi jako je CERN, JINR Dubna, University of Houston, DESY - Deutsches Elektronen-Synchrotron, University of Freiburg, HIT Heidelberg a mnoho dalších.

Na začátku mého studia nebylo cílem dostat případné zařízení pro vědecké účely do vesmíru. Ačkoliv se to zdálo jako nemožné, jelikož aplikace ve vesmíru jsou mimořádně náročné z pohledu technické realizace, tak se povedlo dostat na oběžnou dráhu zařízení SATRAM, které je založeno na zařízení FITPix, což lze považovat za mimořádný úspěch, který překračuje má původní očekávání. Na základě projektu SATRAM, který dokázal přínos pixelových detektorů pro nasazení ve vesmíru je plánováno několik dalších misí s detektory Timepix jako je projekt RISESAT.

Dalším významným úspěchem je to, že zařízení FITPix si našlo cestu i do komerční sféry. Firma Advacam nyní nabízí široké portfolio produktů založených na platformě FITPix a dále tuto platformu rozvíjí pro komerční nasazení. Firma Jablotron použila zařízení FITPix jako vzor pro částicovou kameru MX-10 pro vzdělávací účely, které bylo prodáno téměř sto kusů zejména do zahraničí.

Platforma FITPix dosáhla též významného úspěchu v akademickém prostředí. Se zařízením FITPix bylo provedeno mnoho experimentů jak vědci na půdě ÚTEF ČVUT, tak i v mnoha zahraničních institucích, které vedly k velkému portu publikací. Publikace FITPix - fast interface for Timepix pixel detectors, která je základní publikací, jež prvně informovala vědeckou komunitu o zařízení FITPix má nyní šedesát devět citací.

Detektory z rodiny Medipix prodělaly jen během mého doktorského studia významný posun v nabízené funkcionalitě. Také hardware a software, který slouží k ovládání těchto detektorů, dosáhl za posledních několik let významného pokroku. V budoucnu bude důraz nepochybně kladen na podporu velkých ploch detektorů a zejména na snímkovou rychlost takových detektorů. Ze současných deseti snímků za sekundu bude potřeba, aby tato zařízení umožňovala několik set snímků za sekundu. Další důležitou oblastí budou autonomní zařízení, která budou data schopna vyhodnocovat přímo v elektronickém zařízení a uživateli předávat již zpracované výsledky. V takových zařízeních bude důraz kladen nejen na funkci, ale i na spotřebu, což ovlivní i vývoj samotných detektorů.

## 14 Seznam zkratek

|          |   |
|----------|---|
| $\alpha$ | záření alfa   |
| $\beta$  | záření beta   |
| $\gamma$ | záření gama   |
| $\nu$    | neutrino  |
| A/D      | Analogově digitální převodník                           |
| ASIC     | Application-Specific Integrated Circuit                 |
| BWD      | Basic Window Discriminator                              |
| CERN     | Conseil Européen pour la Recherche Nucléaire            |
| CM       | Color Mode  |
| CMOS     | Complementary Metal–Oxide–Semiconductor                 |
| CSM      | Charge Summing Mode                                     |
| CSRC     | Czech Space Research Center                             |
| D/A      | Digitálně analogový převodník                           |
| DUT      | Device Under Test                                       |
| ESA      | European Space Agency                                   |
| eV       | elektronvolt, jednotka práce a energie mimo soustavu SI |
| FPGA     | Field Programmable Gate Array                           |
| FITPix   | Fast Interface for Timepix detector                     |
| FSM      | Finite State Machine                                    |
| FSR      | Fast Shift Register                                     |
| FW       | Firmware  |
| FWHM     | Full width at half maximum                              |
| GM       | Geigerův-Müllerův detektor                              |
| HIT      | Heavy Ion-Beam Therapy Center                           |

|        |   |
|--------|---|
| HW     | Hardware  |
| HPGe   | High-purity Germanium                               |
| ISS    | International Space Station                         |
| LDO    | Low Dropout regulator                               |
| LE     | Logic Elements                                      |
| LEO    | Low Earth Orbit                                     |
| LVDS   | Low-voltage differential signaling                  |
| MB     | Mega Byte   |
| MCU    | Microcontroller Unit                                |
| n      | neutron   |
| N      | nukleonové číslo atomu                              |
| NIKHEF | National Institute for Subatomic Physics            |
| OMR    | Operation Mode Register                             |
| p      | proton  |
| PC     | Personal Computer                                   |
| $R_e$  | hloubka proniknutí elektronu                        |
| RISAT  | Rapid International Scientific Experiment Satellite |
| RLE    | Run Length Encoding                                 |
| SATRAM | Space Application of Timepix Radiation Monitor      |
| SEE    | Single Event Effects                                |
| SEU    | Single Event Upset                                  |
| SEL    | Single Event Latch-Up                               |
| SEGR   | Single Event Gate Rupture                           |
| SEB    | Single Event Burnout                                |
| SPI    | Serial Peripheral Interface                         |

|      |   |
|------|---|
| SPM  | Single Pixel Mode                               |
| SW   | Software  |
| TOT  | Time Over Threshold                             |
| TSL  | Timepix Synchronization Logic                   |
| UART | Universal Asynchronous Receiver and Transmitter |
| USB  | Universal Serial Bus                            |
| VDG  | Van de Graff                                    |
| Z    | protonové číslo atomu                           |
| ZZE  | Zákon zachování energie                         |

## 15 Seznam Obrázků

|   |    |
|---|----|
| Obrázek 1.: Schéma rozpadu $\alpha$ . Dceřiné jádro a $\alpha$ částice mají opačný směr. ....   | 12 |
| Obrázek 2.: a.) rozpad $\beta^-$ , b.) rozpad $\beta^+$ .....   | 14 |
| Obrázek 3.: Vliv mrtvé doby detektoru na odezovou funkci detektoru. Vlevo: Neparalyzující mrtvá doba, Vpravo: Paralyzující mrtvá doba. Převezato z [3]. ....  | 18 |
| Obrázek 4.: Ilustrační obrázek energie částice. Energie, byť monochromatická je rozmazána v gaussian. Pokud je rozlišení detektoru vyšší FWHM je menší. Převezato z [2]. ....   | 19 |
| Obrázek 5.: Principiální blokové schéma GM detektoru. Převezato z [1]. ....   | 19 |
| Obrázek 6.: Principiální blokové schéma scintilačního detektoru. V pravé části na obrazovce je typický tvar scintilačního spektra záření gama - ve srovnání se skutečným čárovým spektrem nahoře. Převezato z [1]. .... | 20 |
| Obrázek 7.: Blokové schéma polovodičového detektoru. Vpravo je ukázka srovnání polovodičového spektra záření gama se spektrem scintilačním. Převezato z [1]. ....   | 21 |
| Obrázek 8.: Principiální zapojení hybridního polovodičového pixelového detektoru. Detektor je rozdělen na ASIC čip a samotný senzor. Jsou spojeny technologií bump-bonding. Převezato z [6]. ....                       | 22 |
| Obrázek 9.: Vlevo: fotografie detektoru Medipix2MXR, vpravo: Schéma a princip detekce a řez detektorem. Převezato z [6]. ....   | 23 |
| Obrázek 10.: Blokové schéma detektoru Medipix2MXR. Převezato z [6]. ....  | 24 |
| Obrázek 11.: Schéma zapojení jednoho pixelu v ASIC čipu detektoru. Pixel je rozdělen na analogovou (vlevo) a digitální část (vpravo). Převezato z [6]. ....   | 24 |
| Obrázek 12.: Zapojení předzesilovače v každém pixelu v ASIC čipu. Převezato z [6]. ....   | 25 |
| Obrázek 13.: Blokové schéma komunikační periferie detektoru Medipix2MXR. Převezato z [6].   | 26 |
| Obrázek 14.: Blokové schéma analogové a digitální části v pixelu detektoru Timepix. Převezato z [6]. ....   | 27 |
| Obrázek 15.: Blokové schéma analogové a digitální části pixelu pro Medipix3. Převezato z [5].   | 28 |
| Obrázek 16.: Blokové schéma komunikační periferie detektoru Medipix3. Všechny signály jsou LVDS standardu a výstupní šířka sběrnice může být 1 b, 2b, 4b nebo 8b. Převezato z [5]. ....                                 | 29 |
| Obrázek 17.: Blokové schéma systému USB 1.22 Interface. Převezato z [8]. ....   | 30 |
| Obrázek 18.: Deska plošného spoje systému USB 1.22 Interface (vpravo) s připojeným detektorem Medipix2MXR (vlevo). ....   | 31 |
| Obrázek 19.: USB Lite Interface slučující detektor Timepix a elektronický systém, který vychází z návrhu USB 1.22 Interface. ....   | 32 |

|  |    |
|--|----|
| Obrázek 20.: Blokové schéma systému Muros2 postaveného na FPGA integrovaném obvodu. Převzato z [11].....   | 33 |
| Obrázek 21.: a.) Jeden modul systému Relaxd, b.) plocha sestavená z několika modulů v chladicím boxu. Převzato z [12]. .....   | 33 |
| Obrázek 22.: Blokové schéma systému Relaxd. Převzato z [12]. .....   | 34 |
| Obrázek 23.: Architektura softwarového balíčku Pixelman. Převzato z [14].....  | 35 |
| Obrázek 24.: Rentgenový radiografický snímek břicha živé myši. Snímky jsou korigovány na nehomogenitu odezvy jednotlivých pixelů. Jsou dobře zachyceny jak detaily stavby kostí, tak struktury měkkých tkání. Extrémní odstup signálu od šumu je demonstrován obrázkem v malém kruhovém výřezu. Je v něm zachycena oblast v blízkosti pánevní kosti. Přesto je ve výřezu vidět orientovaná struktura. Je to projekce srsti na povrchu myši! Dynamický rozsah umožňuje dosažení takového kontrastu, který umožňuje uvidět chlup o průměru cca 20 $\mu\text{m}$ skrz tělo myši. Tyto výsledky jsou naprosto unikátní. Převzato z [15]..... | 36 |
| Obrázek 25.: Na obrázku jsou zobrazeny dva snímky z detektoru Medipix2MXR. Oba snímky obsahují trajektorie sub-atomových částic. Tečky jsou detekované fotony $\gamma$ záření nebo . Zakřivené trajektorie jsou výsledkem detekce rychlých elektronů. Dlouhá rovná čára je muon z kosmického záření a velké kruhy jsou částice $\alpha$ (pravý snímek).....  | 37 |
| Obrázek 26.: Elektronický systém obsahuje několik základních bloků, které se můžou lišit dle konkrétního experimentu a verze hardware. ....  | 39 |
| Obrázek 27.: Bloková struktura firmware v FPGA obvodu v zařízení FITPix. ....  | 41 |
| Obrázek 28.: Blokové schéma modulu Detector Interface. ....  | 44 |
| Obrázek 29.: Průběh signálů pro měření bez synchronizace. Měření je spuštěno příkazem z nadřazeného systému. ....  | 47 |
| Obrázek 30.: Průběh signálů pro měření se synchronizací. Měření je spuštěno externí událostí. ....   | 48 |
| Obrázek 31.: Průběh signálů pro měření se synchronizací. Měření je ukončeno externí událostí. ....   | 48 |
| Obrázek 32.: Průběh signálů pro měření se synchronizací. Měření je spuštěno příkazem a ukončeno externí událostí. ....   | 48 |
| Obrázek 33.: Diagram stavového automatu, který je realizován v modulu Detector Interface. ....   | 49 |
| Obrázek 34.: Princip detekce počtu detektorů zapojených v sérii, která probíhá po startu zařízení FITPix. Nejprve je vygenerována sestupná hrana na signálu Enable In prvního detektoru. Poté následuje generování taktovacího signálu a po dokončení maticové operace je detektorem vygenerována sestupná hrana na signálu Enable Out, která spustí stejnou činnost   |    |

|   |    |
|---|----|
| v druhém detektoru. Po dokončení operace i v druhém detektoru dojde k vygenerování sestupné hrany na signálu Enable Out v druhém detektoru, která je detektována pomocí zařízení FITPix, které po celou dobu testu čítalo počet taktů taktovacího signálu pro detektory. Na základě počtu taktů dojde rozhodnutí kolik je vloženo detektorů v sérii. .... | 50 |
| Obrázek 35.: Blokové schéma předzpracování dat ve vysokorychlostním režimu. ....  | 51 |
| Obrázek 36.: Blokové schéma předzpracování dat v sekvenčním režimu. ....  | 52 |
| Obrázek 37.: a.) Typické snímky pořízení detektorem Timepix, které zobrazují kosmické záření b.) graf zobrazuje závislost kompresního poměru v závislosti na počtu částic, které byly detekované v celé ploše matice. ....  | 54 |
| Obrázek 38.: a) blokové schéma zařízení FITPix 1.0 – 2.3, b) fotografie výsledného hardware. ....   | 56 |
| Obrázek 39.: Radiografie dvou mravenců se zařízení FITPix při rychlosti 50 snímků za sekundu. ....  | 57 |
| Obrázek 40.: Radiografie dvou mravenců se zařízení IEAP - USB 1.22 Interface při rychlosti 5 snímků za sekundu. ....  | 57 |
| Obrázek 41.: Znázornění hardwarového řešení zařízení FITPix 3.0, které je rozděleno na dvě části – Baseboard a Interface Board. ....  | 58 |
| Obrázek 42.: a) Interface Board pro detektor Timepix v paralelním režimu, b) Interface Board pro detektor Timepix v sériovém režimu, c) Interface Board pro čtyři detektory Timepix, d) Interface Board pro detektor Timepix3, e) Interface Board pro detektor Medipix3, f) Blokové schéma Baseboard. ....  | 59 |
| Obrázek 43.: FITPix 3.0 ve verzi s Interface Board, který umožňuje paralelní čtení dat z detektoru. ....  | 60 |
| Obrázek 44.: Princip konverze neutronového záření s použitím pixelového detektoru. ....   | 61 |
| Obrázek 45.: SATPix prototyp s detektorem Timepix a SpaceWire převodníkem na USB. ....  | 62 |
| Obrázek 46.: a) Mapy radiace (prostorové mapy a časové histogramy) měřené po dobu 6 h (nahore) a 40 dní (dole) pomocí zařízení SATRAM operujícího na palubě satelitu Proba-V. b) Průběh dávkového příkonu v čase. Tyto obrázky byly zpracovány kolegy z ÚTEF ČVUT z nasbíraných pomocí zařízení SATRAM. Převzato z [18].....                              | 63 |
| Obrázek 47.: Částicová kamera MX-10 od firmy Jablotron a.s., která je založena na zařízení FITPix 3.0. ....   | 64 |
| Obrázek 48.: Fotografie velkoplošného detektoru a radiografický obrázek žárovky pořízené tímto zařízením. ....  | 65 |



|  |    |
|--|----|
| Obrázek 49.: Plošný spoj je realizován na čtyřech vrstvách. Všechny součástky jsou použity ve vývodových pouzdrech, které umožňují optickou kontrolu kvality zapájení součástek. Blokové schéma znázorňuje strukturu částicového pixelové detektoru pro satelit RISESAT..... | 66 |
| Obrázek 50.: a.) Fotografie výsledného detektorového modulu pro mikro satelit RISESAT. Modul je zakryt víkem, které je v místě detektoru Timepix ztenčeno. B.) Vizualizace umístění detektorů a průlet částic detektory. ....  | 67 |
| Obrázek 51.: a.) Vizualizace výsledného mikro satelitu RISESAT a detektorového modulu. B.) Fotografie realizovaného mikro satelitu, který je určen pro předletovou verifikaci. ....  | 68 |
| Obrázek 52.: a.) binární štěpení, b.) trojitý rozpad kde dochází k rozpadu těžkého jádra na tři fragmenty.....   | 69 |
| Obrázek 53.: a.) Vizualizace naměřených dat pomocí softwaru Pixelman. Částice z $^{252}\text{Cf}$ jsou měřeny v TOT módu detektoru, b.) Trojrozměrné zobrazení detekovaných částic. Na ose Z je vyznačena energie deponovaná do pixelu detektoru Timepix. ....               | 70 |
| Obrázek 54.: Schématické znázornění komponent měřící aparatury složené ze čtyř detektorů Timepix pro detekci vzácných fragmentů štěpení a měření jejich úhlových korelací. ....  | 70 |
| Obrázek 55.: Demonstrace synchronizace dvou detektorů Timepix, ve kterých je zachyceno binární štěpení a časový průběh dopadu částic do detektorů po dobu měření 10 ms. ....   | 71 |
| Obrázek 56.: Obdobně jako na obrázku č. 55 je zde znázorněno více koincidenčních událostí, které byly zaznamenány po dobu 1 s. V dolní části obrázku je zobrazeno pouze 350 ms z celé doby měření. ....  | 72 |
| Obrázek 57.: a.) detektory a zařízení FITPix, b.) fotografie aparatury ve vakuové komoře, c.) spektrum $^{252}\text{Cf}$ , d.) tenký terčik na kterém je naneseno $^{252}\text{Cf}$ , které je umístěno uprostřed mezi detektory.....  | 73 |
| Obrázek 58.: Blokové schéma měřící stanice pro lokalizaci SEE pomocí detektorů Timepix. ....   | 75 |
| Obrázek 59.: a) schéma principu detekce SEE v FPGA obvodech, b) fotografie z experimentu, DUT je umístěn 8 cm od zdroje neutronů, Tester je odstíněn plastovými bloky, aby nebyl ovlivněn neutronovým zářením. ....  | 76 |
| Obrázek 60.: Čestnost SEE po dobu měření na VdG urychlovači. Červený graf je vynesena z dat DUT, který byl nejbližší zdroji neutronů. ....   | 77 |
| Obrázek 61.: Experiment v HIT Heidelberg. Na fotografii vlevo je vidět DUT se záměrným křížem, kde prochází svazek iontů. Na fotografii vpravo je vidět instalovaná aparatura a vyústění svazku iontů.....   | 78 |

|   |    |
|---|----|
| Obrázek 62.: a) návrh měřicí stanice pro detekci SEE. Mezi detektory je umístěn DUT, který je upevněn na desce, která poskytuje pro DUT napájení a konektory pro Tester, b) první prototyp měřicí stanice s osazenými zařízeními FITPix 3.0. .... | 78 |
| Obrázek 63.: Ilustrace uspořádání pixelových detektorů a trajektorie letu částice. ....   | 79 |
| Obrázek 64.: Snímky z detektorů, které obsahují částice a dopočítané body v DUT, kde došlo k průletu částice. ....  | 80 |

## 16 Seznam tabulek

|   |    |
|---|----|
| Tabulka 1.: Tabulka příkazů zařízení FITPix. ....                           | 43 |
| Tabulka 2.: Srovnání syntéz jednotlivých bloků pro předzpracování dat. .... | 53 |
| Tabulka 3.: Výsledky syntéz pro FITPix 1.0 - 2.3 v FPGA od Lattice. ....    | 58 |
| Tabulka 4.: Výsledky syntéz pro FITPix 3.0 v FPGA od Altera. ....           | 61 |
| Tabulka 5.: Výsledky měření SEE na urychlovači v HIT. ....                  | 77 |

## 17 Seznam použité literatury a zdroje informací

- [1] Vojtěch Ulman, Jaderná fyzika a fyzika ionizujícího záření [online], <http://astronuklfyzika.cz/index.htm>
- [2] Knoll G. F., "Radiation detection and measurement", 3rd ed. New York: Wiley, 2000, 802s., ISBN: 0-471-07338-5.
- [3] X. Llopart, M. Campbell, R. Dinapoli, D. San Segundo, E. Pernigotti, Medipix2 a 64-k pixel readout chip with 55- $\mu\text{m}$  square elements working in single photon counting mode, *IEEE Trans. Nucl. Sci.*, 49/2002:2279-83.
- [4] X. Llopart, R. Ballabriga, M. Campbell, L. Tlustos and W. Wong, Timepix, A 65 k programmable pixel readout chip for arrival time, energy and/or photon counting measurements, *Nucl. Instrum. Meth. A* 581 (2007) 485.
- [5] R. Ballabriga, G. Blaj, M. Campbell, M. Fiederle, D. Greiffenberg, E. Heijne, X. Llopart, R. Plackett, S. Procz, L. Tlustos, D. Tureček, W. Wong, "Characterization of the Medipix3 pixel readout chip", *Journal of Instrumentation* 6 (2011) C01052.
- [6] X. Llopart, Design and characterization of 64K pixels chips working in single photon processing mode, Mid Sweden University Doctoral Thesis 27 (2007).
- [7] F. Krummenacher, "Pixel detectors with local intelligence: an IC designer point of view", *Nucl. Instr. Meth. A*, vol. 305 (1991), 527-532.
- [8] Z. Vykydal, J. Jakůbek, S. Pospíšil, "USB Interface for Medipix2 Pixel Device Enabling Energy and Position Detection of Heavy Charged Particles", *Nucl. Instr. and Meth. A* 563 (2006), 112-115.
- [9] Z. Vykydal, J. Jakůbek, "USB Lite-Miniaturized readout interface for Medipix2 detector", *Nucl. Instr. and Meth. A*, Volume 633, Supplement 1, Pages: S48-S49, doi: 10.1016/j.nima.2010.06.118 (2011).
- [10] Turecek D. et al, Small Dosimeter based on Timepix device for International Space Station, *Journal of Instrumentation* C12037 (2011).
- [11] David San Segundo Bello, Martin van Beuzekom, Peter Jansweijer, Hans Verkooijen, Jan Visschers, An interface board for the control and data acquisition of the Medipix2 chip, *Nucl. Instr. and Meth. A* 509 (2003), 164-170.

- [12] Visser J. et al, A Gigabit per second read-out system for Medipix Quads, Nucl. Instr. and Meth. A (2010).
- [13] Nikhef - Nationaal instituut voor subatomaire fysica [online], <http://www.nikhef.nl/>.
- [14] Turecek D et al, Pixelman: a multi-platform data acquisition and processing software package for Medipix2, Timepix and Medipix3 detectors, Journal of Instrumentation C01046 (2011).
- [15] Jakubek J. et al, Digitální transmisní radiografie s pixelovými detektory Medipix, Čs. čas. fyz. 58 (2008).
- [16] J. Bouchami, A. Gutierrez, A. Houdayer, J. Idarraga, J. Jakůbek, C. Lebel, C. Leroy, J. Martin, M. Platkevič, S. Pospíšil, "Study of the charge sharing in silicon pixel detector with heavy ionizing particles interacting with a Medipix2 device", NIM A, Vol. 607, Issue 1, p. 196-198 (2009).
- [17] J. Jakůbek, A. Cejnarová, T. Holý, S. Pospíšil, J. Uher, Z. Vykýdal, "Pixel Detectors for Imaging with Heavy Charged Particles", Nucl. Instr. and Meth. A, 591, 155-158, (2008)
- [18] Granja, C. - Polanský, Š. - Pospíšil, S. - Vykýdal, Z. - Tureček, D. - et al., Directional visualization of space radiation quanta with Timepix/SATRAM spacecraft payload on board ESA Proba-V satellite, Proceedings X Latin American Symposium on Nuclear Physics and Applications. Trieste: SISSA/ISAS, 2014, p. 1-10. ISSN 1824-8039.

## 18 Seznam autorových publikovaných prací

### 18.1 Impaktované články

- [IF1] KRAUS, V., HOLÍK, M., JAKŮBEK, J., KROUPA, M., SOUKUP, P., ET AL., FITPix - fast interface for Timepix pixel detectors, Journal of Instrumentation. 2011, vol. 6, art. no. C01079, p. 1-6. ISSN 1748-0221
- [IF2] HOLÍK, M., KRAUS, V., GEORGIEV, V., SKÁLA, J., KUBÍK, Z., HROMÁDKA, M., JAKŮBEK, J., GRANJA, C. Influence of electromagnetic interference on the analog part of hybrid pixel detectors. Journal of Instrumentation, 2011, roč. Neueden, č. 6, s. 1-10. ISSN: 1748-0221
- [IF3] KRAUS, V., HOLÍK, M., JAKŮBEK, J., GEORGIEV, V. FITPix Data Preprocessing Pipeline for the Timepix Single Particle Pixel Detector. Journal of Instrumentation, 2012, roč. 7, č. C04011, s. 1-8. ISSN: 1748-0221
- [IF4] VAVŘÍK, D., HOLÍK, M., JAKŮBEK, J., JAKŮBEK, M., KRAUS, V., KREJČÍ, F., SOUKUP, P., TUREČEK, D., VACÍK, J., ŽEMLIČKA, J. Modular pixelated detector system with the spectroscopic capability and fast parallel read-out. Journal of Instrumentation, 2014, roč. 9, č. 6, s. 1-9. ISSN: 1748-0221
- [IF5] ŽEMLIČKA, J., HOLÍK, M., KRAUS, V., JAKŮBEK, J. Fast Spectroscopic Imaging with Pixel Semiconductor Detector Timepix and Parallel Data Reading. Journal of Instrumentation, 2014, roč. 9, č. April 2014, s. 1-8. ISSN: 1748-0221

### 18.2 Články ve sborníku

- [P1] HOLÍK, M., KRAUS, V., SOUKUP, P. USB medipix interface. In Elektrotechnika a informatika 2009. Část 2., Elektronika. Plzeň: Západočeská univerzita, 2009. s. 43-46. ISBN: 978-80-7043-809-1
- [P2] KRAUS, V. Předzpracování dat z částicového pixelového detektoru Timepix. Plzeň, 2010., ISBN: 978-80-7043-914-2,
- [P3] KRAUS, V., HOLÍK, M., BARTOVSKÝ, J., GEORGIEV, V., JAKŮBEK, J., SCHNEIDER, D. Space Weather Monitor Based on the Timepix Single Particle Pixel Detector. In TELFOR 2010. Bělehrad, Srbsko TELFOR, 2010. s. 795-798. ISBN: 978-86-7466-392-9

- [P4] HOLÍK, M., KRAUS, V. Sledování rozpadu těžkých jader pomocí detektoru Timepix a rozhraní FITPix. In *Elektrotechnika a informatika 2011. Část 2., Elektronika*. Plzeň: Západočeská univerzita v Plzni, 2011. s. 31-34. ISBN: 978-80-261-0015-7
- [P5] KRAUS, V., HOLÍK, M. Spektroskopie štěpných fragmentů pomocí pixelových detektorů. In *Elektrotechnika a informatika 2011. Část 2., Elektronika*. Plzeň: Západočeská univerzita v Plzni, 2011. s. 61-64. ISBN: 978-80-261-0015-7
- [P6] GRANJA, C., KRAUS, V., JAKŮBEK, J., POSPÍŠIL, S. - MAŠEK, P. - ET AL., Spatially Correlated and Coincidence Detection of Fission Fragments with the Pixel Detector Timepix, *IEEE Nuclear Science Symposium 2010 Conference Record*. Piscataway: IEEE, 2011, p. 131-137. ISSN 1082-3654. ISBN 978-1-4244-3962-1.
- [P7] HOLÍK, M., KRAUS, V. Jednotka pro generování triggeru ze signálu společné elektrody pixelového detektoru radiace. In *Elektrotechnika a informatika 2012. Část 2., Elektronika*. Plzeň: Západočeská universita v Plzni, 2012. s. 45-48. ISBN: 978-80-261-0119-2
- [P8] MASOPUST, J., VEŘTÁT, I., POKORNÝ, M., LINHART, R., VOBORNÍK, A., MRÁZ, J., FIALA, P., KAVALÍR, T., ŠTEBEROVÁ, O., BÜLLOW, J., HRUBEC, M., KRAUS, V. Komunikační a navigační systémy pikosatelitu PilsenCUBE. In *Pravidelné setkání zájemců o mikrovláknovou techniku, 36. seminář*. Praha: Česká elektrotechnická společnost, ÚOS Mikrovláknová technika, 2012. s. 27-30. ISBN: 978-80-02-02371-5 , ISSN: neuvedeno
- [P9] MASOPUST, J., VEŘTÁT, I., POKORNÝ, M., LINHART, R., VOBORNÍK, A., MRÁZ, J., FIALA, P., KAVALÍR, T., ŠTEBEROVÁ, O., BÜLLOW, J., HRUBEC, M., KRAUS, V. Projekt experimentálního pikosatelitu PilsenCUBE. In *Pravidelné setkání zájemců o mikrovláknovou techniku, 36. seminář*. Praha: Česká elektrotechnická společnost, ÚOS Mikrovláknová technika, 2012. s. 23-26. ISBN: 978-80-02-02371-5 , ISSN: neuvedeno
- [P10] KRAUS, V. Přehled elektronických systémů pro částicový pixelový detektor Timepix. In *Elektrotechnika a informatika 2012. Část 2., Elektronika*. Plzeň: Západočeská univerzita v Plzni, 2012. s. 77-80. ISBN: 978-80-261-0119-2
- [P11] VYKYDAL, Z., HOLÍK, M., KRAUS, V., POSPÍŠIL, S., ŠOLC, J., ET AL., A Highly Miniaturized and Sensitive Thermal Neutron Detector for Space Applications, *IX LATIN AMERICAN SYMPOSIUM ON NUCLEAR PHYSICS AND APPLICATIONS*. Melville, New York: American Institute of Physics, 2012, p. 393-396. ISSN 0094-243X. ISBN 978-0-7354-1003-9.

- [P12] KRAUS, V., GRANJA, C., Coincidence module for spectral- and time-correlated multi-particle detection with four pixel detectors Timepix, ISINN 19 Proceedings. Dubna: Joint Institute for Nuclear Research, 2012, ISBN 5-9530-0015-4.
- [P13] GRANJA, C., KRAUS, V., KOPATCH, Y., POSPÍŠIL, S., TELEZHNIKOV, S., Online coincidence detection of fission fragments and light charged particles, ISINN 19 Proceedings. Dubna: Joint Institute for Nuclear Research, 2012, ISBN 5-9530-0015-4.
- [P14] GRANJA, C., KRAUS, V., PLATKEVIČ, M., POSPÍŠIL, S. - KOPATCH, Y., ET AL., Spatial- and Time-Correlated Detection of Fission Fragments, Third International Workshop on Compound Nuclear Reactions and Related Topics. Les Ulis: EDP Sciences, 2012, art. no. 10004, p. 1-5. ISSN 2100-014X. ISBN 978-2-7598-0726-0.
- [P15] HOLÍK, M., KRUTINA, A., BARTOVSKÝ, J., GEORGIEV, V., KRAUS, V. SPECTRIG – device for triggering and spectroscopy with the pixelated particle detector. In 20th Telecommunications Forum TELFOR 2012. Bělehrad: IEEE, 2012. s. 959-962. ISBN: 978-1-4673-2984-2
- [P16] GRANJA, C., HOLÍK, M., JAKŮBEK, J., KRAUS, V., KUWAHARA, T., PLATKEVIČ, M., POSPÍŠIL, S., TUREČEK, D., VALACH, O., VYKYDAL, Z. Timepix-based Miniaturized Radiation Micro-Tracker for the Micro-Satellite RISESAT. In Proceedings of 29th International Symposium on Space Technology and Science 2013. 2013. s. 1-5.
- [P17] HOLÍK, M., KRAUS, V., GEORGIEV, V., BROULÍM, J. The interface for the pixelated particle detector with the capability of the spectroscopy function and the coincidence measurement operation. In 21st Telecommunications Forum (TELFOR) Proceedings of Papers. Neueden: IEEE, 2013. s. 557-560. ISBN: 978-1-4799-1419-7
- [P18] GRANJA, C., KRAUS, V., POSPÍŠIL, S., PUGATCH, V., KYVA, V., ET AL., Position-Sensitive Coincidence Detection of Nuclear Reaction Products with Two Timepix Detectors and Synchronized Readout, Proceedings X Latin American Symposium on Nuclear Physics and Applications. Trieste: SISSA/ISAS, 2014, ISSN 1824-8039.
- [P19] CARLOS GRANJA, VALERY PUGATCH, YURI KOPATCH, VACLAV KRAUS, STANISLAV POSPISIL, GADIR AHMADOV, SERGEI A. TELEZHNIKOV, A. OKHRYMENKO, M. PUGACH, D. STOROZHUK, AND V. KYVA, Position-Sensitive Coincidence Detection of Nuclear Reaction Products with Configurable Array of Timepix Detectors, Proceedings 10th Latin American Symposium on Nuclear Physics and Applications, XLASNPA 2014



- [P20] FRANTISEK KREJCI, JAN JAKUBEK, VACLAV KRAUS, MICHAEL HOLIK, JAN ZEMLICKA, STANISLAV POSPISIL, ULLI KÖSTER, CARINA HÖGLUND, JENS BIRCH, LARS HULTMAN, RICHARD HALL-WILTON, JIRI VACIK, and IVO TOMANDL, Characterization of Timepix Detector coated with 10B4C film for high resolution Neutron Imaging, Astroparticle, Particle, Space Physics and Detectors for Physics Applications. August 2014, 489-493, DOI: 10.1142/9789814603164\_0076
- [P21] PAVEL BROULÍM, JAN BARTOVSKÝ, JAN BROULÍM, PETR BURIAN, VJAČESLAV GEORGIEV, MICHAEL HOLÍK, VÁCLAV KRAUS, ALEŠ KRUTINA, JAN MOLDASCHL, VLADIMÍR PAVLÍČEK, STANISLAV POSPÍŠIL, JAKUB VLÁŠEK, Compact device for detecting single event effects in semiconductor components, 23rd Telecommunications Forum – Telfor, Serbia, ISBN: 978-1-5090-0054-8

## 19 Příloha B – Seznam funkčních vzorků

- [FVZ1] SOUKUP, P., HOLÍK, M., KRAUS, V., JAKŮBEK, J., KROUPA, M., Hi-Speed portable USB-TimePIX Interface, 2009
- [FVZ2] SOUKUP, P., HOLÍK, M., KRAUS, V., JAKŮBEK, J., FITPix - Fast Interface for TimePix, 2010
- [FVZ3] KRAUS, V., POUPA, M. Vývojová deska s EP3C16 pro aplikace se softwarovým procesorem Nios II. 2010.
- [FVZ4] KRAUS, V., HOLÍK, M., GEORGIEV, V. Koincidenční jednotka pro spektroskopii štěpných fragmentů pomocí detektoru Timepix a rozhraní FITPix. 2011.
- [FVZ5] KRAUS, V., HOLÍK, M., GEORGIEV, V. Medipix3 Debug Interface. 2011.
- [FVZ6] HOLÍK, M., KRAUS, V., GEORGIEV, V. Timepix debug interface. 2011.
- [FVZ7] KRAUS, V. - GRANJA, C., Coincidence system for synchronized multi-device operation of pixel detectors, 2011
- [FVZ8] KRAUS, V. Datové rozhraní pro řízení experimentu a čtení dat z pixelových detektorů, 2012, 50 s. ISBN: neuvedeno
- [FVZ9] KRAUS, V., ŠPÍREK, P. Koincidenční jednotka s nízkou spotřebou a vysokou odolností vůči IZ. 2012.
- [FVZ10] KRAUS, V., BARTOVSKÝ, J., HOLÍK, M., GEORGIEV, V., KRUTINA, A. Basic Single Event Effect Tester. 2012.
- [FVZ11] HOLÍK, M., KRAUS, V. Interface board pro Medipix3 detektor. 2012.
- [FVZ12] HOLÍK, M., KRAUS, V. Interface board pro Timepix detektor. 2012.
- [FVZ13] SOUKUP, P., SVOBODA, Z., JAKŮBEK, J., HOLÍK, M., KRAUS, V., FITPix 3.0 MPX3 Seriál, 2012
- [FVZ14] SOUKUP, P., SVOBODA, Z., JAKŮBEK, J., HOLÍK, M., KRAUS, V., FITPix 3.0 TPX Parallel, 2012
- [FVZ15] VYKYDAL, Z. - POSPÍŠIL, S. - KRAUS, V. - TUREČEK, D. - GRANJA, C. - ET AL., Engineering model of the Space Application of Timepix Radiation Monitor (SATRAM), 2012
- [FVZ16] PLATKEVIČ, M., GRANJA, C., JAKŮBEK, J., TUREČEK, D., KRAUS, V., ET AL., Breadboard model of Timepix particle tracker for RISESAT spacecraft payload, 2013
- [FVZ17] POLANSKÝ, Š., KRAUS, V., HOLÍK, M., TUREČEK, D., Digital radiation particle camera MX-10, 2013
- [FVZ18] PLATKEVIČ, M., GRANJA, C., KRAUS, V., HOLÍK, M., TUREČEK, D., ET AL., Engineering model of Timepix particle tracker for RISESAT spacecraft payload, 2013

- [FVZ19] JAKŮBEK, J., VAVŘÍK, D., HOLÍK, M., JAKŮBEK, M., KRAUS, V., ET AL., Modular system of pixel detectors ModuPIX, 2013
- [FVZ20] POLÁČEK, L., KRAUS, V., OLŠÁK, D. Detektor záření FITPixLite. 2013.
- [FVZ21] POLÁČEK, L., KRAUS, V. Rozšiřující modul detektoru záření. 2014.
- [FVZ22] VAVŘÍK, D., JAKŮBEK, M., JAKŮBEK, J., KRAUS, V., Camera for spectroscopic transmission and emission imaging with optimized 500 um thick sensors, 2014

## 20 Příloha A – Obsah CD

Na přiloženém CD jsou vyjma vlastního textu práce též přiloženy FPGA projekty pro jednotlivá zařízení, na kterých jsem po dobu mého doktorského studia pracoval a případně další data, která jsou k mé práci vázána.

Struktura CD:

- 000\_AtlasUpgrade – zdrojové kódy pro FPGA
- 001\_FITPixWeb – zdrojové kódy webové prezentace FITPixu
- 002\_Risesat – zdrojové kódy pro FPGA
- 003\_Satram - zdrojové kódy pro FPGA
- 004\_SatpixESA - zdrojové kódy pro FPGA
- 005\_SatpixPilsenCube - zdrojové kódy pro FPGA
- 006\_FITPix\_Timepix - zdrojové kódy pro FPGA
- 007\_FITPix\_Medipix3RX - zdrojové kódy pro FPGA
- 008\_FITPix3\_Timepix - zdrojové kódy pro FPGA
- 009\_FITPix3\_Medipix3RX - zdrojové kódy pro FPGA
- 010\_FITPixLite - zdrojové kódy pro FPGA
- 100\_Documentation – dokumentace k zařízení FITPix
- 101\_Scripts – Python skripty pro testování různých verzí FITPixu
- 102\_FTDI\_Deskripty – Nastavení USB, konfigurační soubory
- 200\_FW\_Release – konfigurační soubory FPGA pro standardní verze FITPixu
- 300\_MatlabCodes – skripty a aplikace pro ověření synchronizace SEE měřicí stanice