

# Kapitola 1

## Systémy pre ukladanie a spracovanie signálu z detektorov

### 1.1 Elektronika a príklady jednoduchých detekčných systémov

Elektronika je kľúčovou súčasťou všetkých moderných detekčných systémov. Účelom front-end elektroniky a systémov na spracovanie signálu je

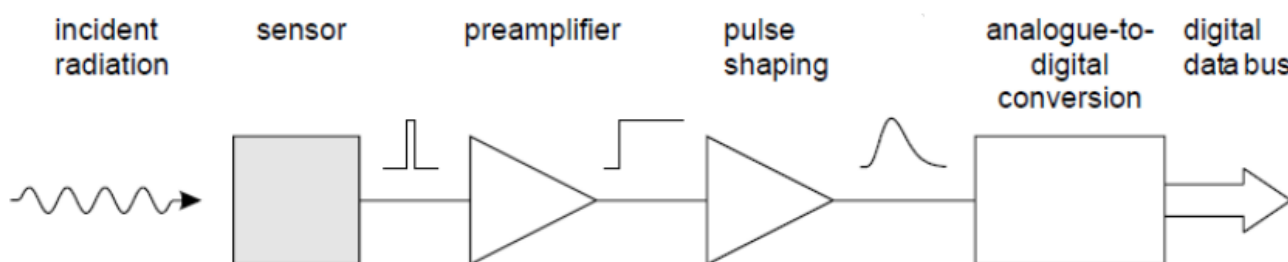
- Nadobudnutie (získaní) elektrického signálu zo snímača. Typicky sa jedná o krátky elektrický impulz.
- Prispôbenie časovej odpovedi systému na optimalizáciu minimálneho detekčného systému, energetického merania, času príchodu, necitlivosti senzora na tvarovanie signálu alebo kombinácia týchto efektov.
- Digitalizácia signálu a jeho následné uloženie na neskoršiu analýzu

Aj keď sú konfigurácie detektorov pomerne dosť zložité, vyžaduje sa použitie len niekoľkých základných princípov získavania signálu. Existujú niektoré spoločné základné prvky vyčítacích systémov. Front-end obsahuje predzosilňovač, tvarovač pulzu, vyrovnávaciu pamäť a digitalizér, ktorý konvertuje bežný analógový vstup na digitálny výstup. V dnešných, vysoko energických fyzikálnych systémoch prakticky všetky detektory vyžadujú konverziu primárnej detekcie na elektrické signály.

Existujú dva základné typy detektorov, ktoré môžeme rozdeliť podľa produkcie signálu

- Priama produkcia signálu: Pri priamom zisťovaní sa absorbovaná energia premieňa priamo na náboj, tj. elektrón-ión, elektrón-diera pár. Napríklad v driftových komorách, mnohokáblových proporcionálnych komorách (MWPC), ionizačných komorách (kalorimetre), polovodičových detektoroch (stripové a pixelové)

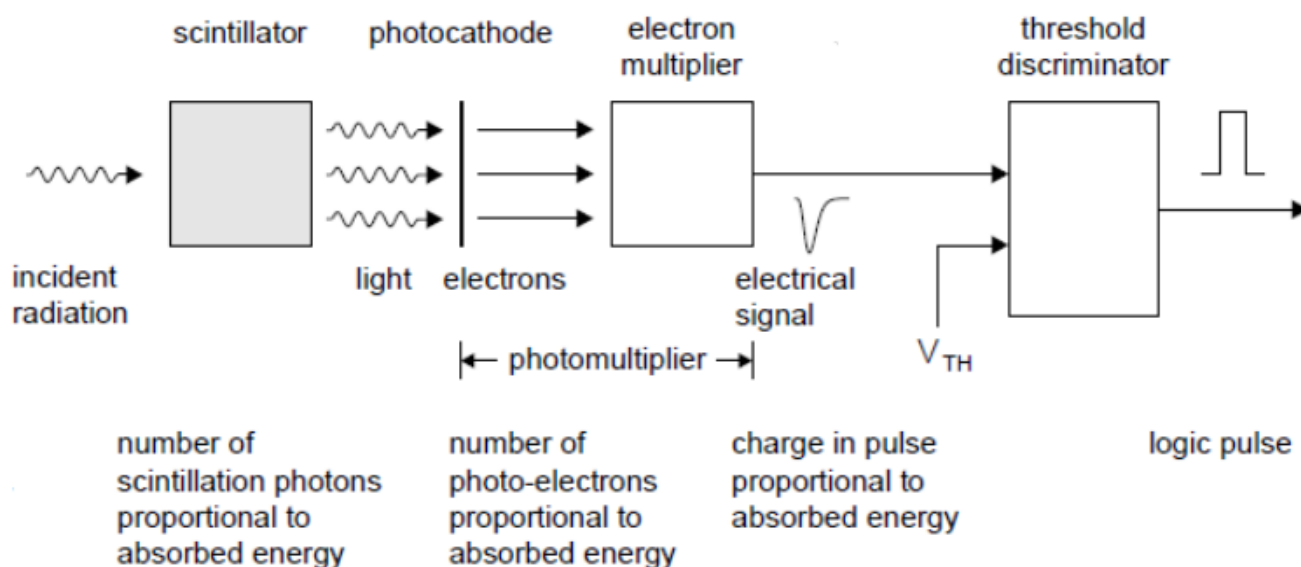
- **Nepriama produkcia:** Nepriame detektory sú primárne scintilačné detektory, kde sa scintilačné svetlo mení na elektrický signál rôznymi technikami. Napríklad vo fotonásobičoch, polovodičových fotodiódach, lavínových fotodiódach, polovodičových fotonásobičoch.



Obr. 1.1: Schéma priamej detekcie signálu.

Na obrázku (1.1) môžeme vidieť príklad schémy priamej detekcie signálu. Senzor konvertuje energiu uloženú nabitou časticou (alebo fotónovou) na elektrický signál. Vytvorený signálny náboj môže byť dosť malý, preto je potrebné signál senzora zosilniť. Veľkosť signálu senzora je predmetom štatistických výkyvov a elektronický šum ďalej rozmazáva signál, predzosilňovač musí byť starostlivo navrhnutý tak, aby sa minimalizoval elektronický šum. Dôležitým parametrom je kapacita senzora a kapacita zosilňovača pretože pomer signál-šum narastá s narastajúcou kapacitou.

Príspevok elektronického šumu závisí kriticky aj od ďalšej fázy, tvarovača pulzu, ktorý určuje šírku pulzu systému a tým aj celkový príspevok elektronického šumu. Tvarovač tiež obmedzuje trvanie impulzu, ktorý nastavuje maximálnu možnú frekvenciu signálu. Výstup tvarovača pulzu smeruje do analog-digital konvertora (ADC), ktorý konvertuje veľkosť analógového signálu na bitový vzorku vhodnú pre následné digitálne ukladanie a spracovanie.



Obr. 1.2: Schéma nepriamej detekcie signálu.

Na obrázku (1.2) môžeme pre zmenu vidieť príklad schémy nepriamej detekcie signálu. Scintilačný detektor využíva nepriamu detekciu, pričom najskôr sa absorbovaná energia premení na

viditeľné svetlo. Nastáva zvýšenie amplitúdy pomocou elektrónového násobiča. Signál na výstupe fotonásobiča (PMT) je prúdový impulz, integrovaný v priebehu času. Tento impulz obsahuje signálny náboj, ktorý je úmerný absorbovanej energii. PMT výstupný impulz je privádzaný priamo do prahového diskriminátora, ktorý sa zapne, keď signál prekročí vopred určenú prahovú hodnotu ( $V_{TH}$ ). Elektrónový násobič môže poskytnúť dostatočný zisk, takže nie je potrebný žiadny predzosilňovač.

## 1.2 Signálna integrácia

Signál zo senzoru je zvyčajne krátky prúdový pulz,  $i_s(t)$ . Avšak, fyzikálna veličina, ktorá nás zaujíma je častokrát depozitovaná energia v detektore. Nato aby sme ju získali musíme vyintegrovat cez všetky prúdové pulzy

$$E \sim Q_s = \int i_s(t) dt.$$

Táto integrácia môže byť vykonaná v ľubovoľnej fáze lineárneho systému, takže je možné

- integrovať na sensorovej kapacite
- použitie integrujúceho predzosilňovača - nábojovo-závislý predzosilňovač
- rýchlo odobrať a digitalizovať aktuálny impulz a sčítať numericky

Keď sa mobilné nosiče nábojov pohybujú smerom k elektródam, menia indukovaný náboj na sensorových elektródach, ktoré tvoria kondenzátor  $C_d$ . Ak má zosilňovač veľmi malý vstupný odpor  $R_i$ , potom časová konštanta,  $T = R_i(C_d + C_i)$ , na vybitie snímača je malá, a zosilňovač bude cítiť signálny prúd.  $C_i$  je dynamická vstupná kapacita, viď (1.3). Ak je vstupná časová konštanta veľká v porovnaní s trvaním prúdového pulzu potom bude prúdový pulz integrovaný na sensorovej kapacite a výsledné napätie na vstupe zosilňovača bude

$$V_i = \frac{Q_s}{C_d + C_i}.$$

Takže vidíme, že veľkosť signálu závisí od kapacity senzora. V systéme s rôznymi kapacitami sensorov by sme sa museli vysporiadať s ďalšími kalibráciami.

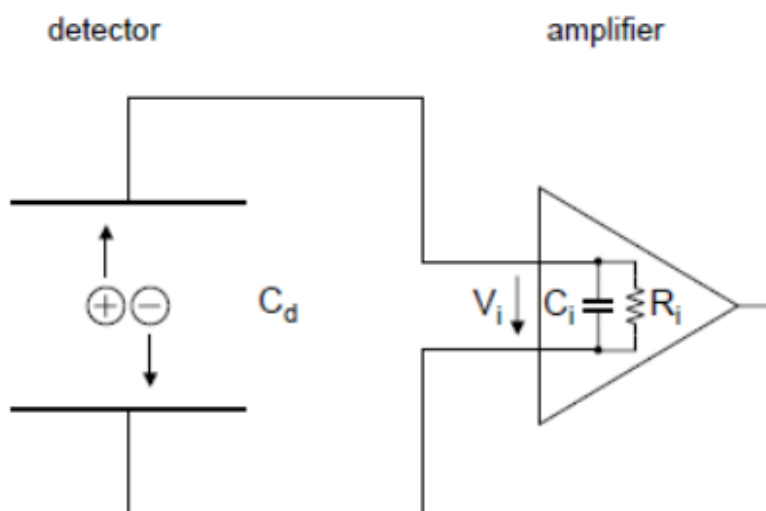
## 1.3 Elektronický šum

Uvažujme prúd prúdiaci cez vzorku, ktorá je ohraničená dvoma elektródami. tj. pohybujúcich sa  $n$  elektrónov s rýchlosťou  $v$ . Indukovaný prúd závisí na medzere  $I$  medzi elektródami ako

$$i = \frac{nev}{I}.$$

Fluktuácia tohto prúdu je daná celkovým diferenciálom

$$\langle di \rangle^2 = \left( \frac{ne}{I} \langle dv \rangle \right)^2 + \left( \frac{ve}{I} \langle dn \rangle \right)^2,$$

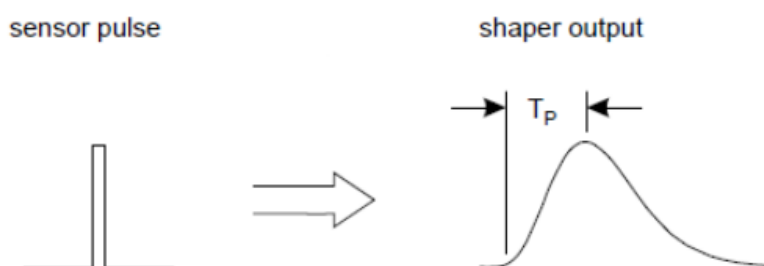


Obr. 1.3: Schéma vyintegrovania signálu.

kde môžeme sčítať tieto členy, keďže sú nekorelované. Z tohto vidíme, že dva mechanizmy prispievajú k celkovej fluktuácii šumu, rýchlosť a počet elektrónov. Fluktuácie v rýchlosti pochádzajú z termálneho pohybu. Zdrojom fluktuácii v počte nosičov je zachytávanie nosičov, pretože nedostatky v kryštálovej mriežke alebo nečistoty v plynch môžu zachytávať nosiče nábojov a uvoľňovať ich po charakteristickej dobe.

## 1.4 Tvarovanie pulzu

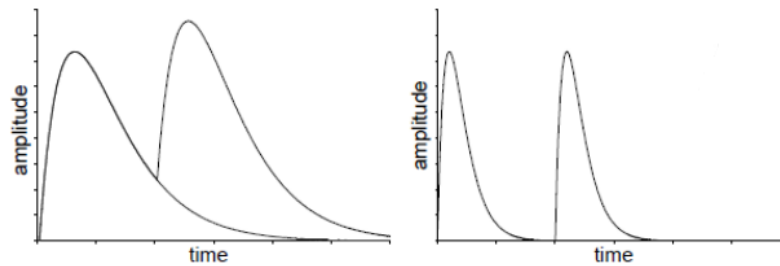
Impulzové tvarovanie má dva protichodné efekty. Prvým je obmedzenie šírky pulzu tak, aby zodpovedala času merania. Príliš veľká šírka pulzu zvýši šum bez zvyšovania signálu. Zvyčajne impulzový tvarovač transformuje úzky sensorový impulz do širšieho impulzu s postupne zaokrúhleným maximom v čase vrcholu  $T_P$ , vid' obrázok (1.4).



Obr. 1.4: Zmena pulzu tvarovačom.

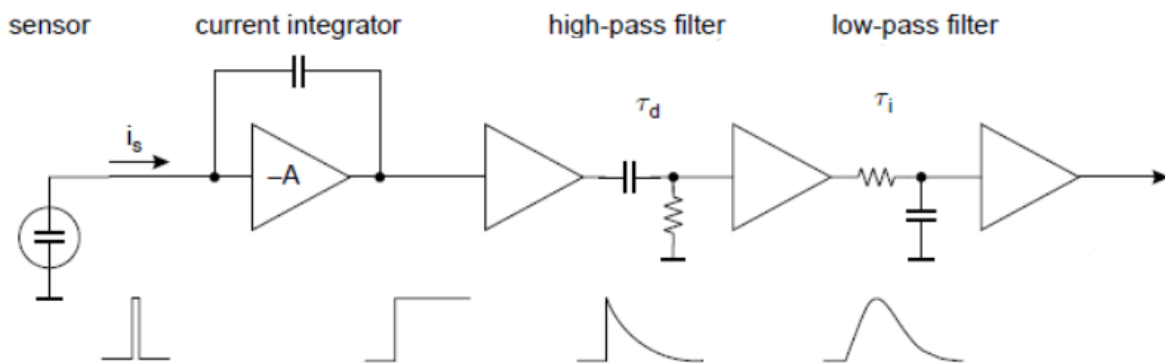
Druhým cieľom je obmedziť šírku impulzov tak, aby sa mohli merať po sebe idúce signálové impulzy bez prekrytia (bez pile-up), vid' obrázok (1.5). Pri navrhovaní tvarovača je potrebné vybalancovať tieto protichodné efekty. Optimálne tvarovanie závisí od aplikácie.

Signálny prúd zo snímača je integrovaný, aby vytvoril krokový impulz s dlhým rozpadom. Následný high-pass filter ("diferenciátor") obmedzuje šírku impulzu a low-pass filter ("integrátor")



Obr. 1.5: Znázornenie dvoch pulzov s rôznou oblasťou prekrytia.

zvyšuje čas nábehu na vytvorenie impulzu s hladkým hrotom, viď obrázok (1.6).



Obr. 1.6: Tvarovanie pulzu.

## 1.5 Konverzia analógu na digitál

Pre ukladanie údajov a následnú analýzu musí byť analógový signál na výstupnom formáte digitalizovaný. Dôležité parametre pre analógovo-digitálne meniče (ADC) použité v detekčných systémoch sú nasledovné:

- rozlíšenie: zrnitosť digitalizovaného výstupu
- diferenciálna nelinearita: Ako jednotné sú prírastky digitalizácie?
- integrálna nelinearita: Je digitálny výstup úmerný analógovému vstupu?
- čas konverzie: Koľko času je potrebné na konverziu analógového signálu na digitálny výstup?
- výpočetná rýchlosť: Ako rýchlo môže začať nová konverzia po dokončení predchádzajúcej konverzie bez zavedenia škodlivých artefaktov?
- Stabilita: Menia sa parametre konverzie s časom?

Uvedieme nejaké metódy, ktorými sa prevádza analógový signál na digitálny: flash conversion ADC (najjednoduchšia), successive-approximation ADC (najpoužívanejšia) alebo the Wilkinson ADC.

## 1.6 Trigger system

Trigger system experimentu je systém, ktorý v reálnom čase rozhoduje o tom, ktorú podmnožinu údajov z objemu detektora, detektor vyčíta a archivuje pre offline analýzu. Pekným a jednoduchým príkladom trigger-u: pri rozptylovom experimente budú zaznamenané len častice, ktoré sa rozptýlia pod uhlom  $\theta$ .

Pri nasledujúcom opise budeme vychádzať z Trigger systému, ktorý je používaný na experimente STAR. V jednoduchosti ide o to, že celý detektor môžeme rozdeliť na pomalé detektory (jedná sa o tie hlavné detektory ako Time Projection Chamber alebo Heavy Flavor Tracker) a rýchle detektory (napríklad Beam-Beam counter, Zero Degree Calorimeter, Vertex Position Detector). Tieto pomalé detektory pod náporom obrovského množstva dát nedokážu analyzovať všetky udalosti, ktoré v detektore nastali. Preto je potrebné uľahčiť im prácu a to tak, že použijeme rýchle detektory, ktoré rozhodnú, či udalosť spadá do vopred zvolených kritérií.

STAR Trigger systém je funkčne rozdelený na štyri rôzne úrovne - L0, L1, L2, L3. Interakcie, ktoré prechádzajú kritériami výberu v týchto po sebe nasledujúcich trigger úrovniach, sa posielajú do úložiska.

### Level 0:

Tento level je najrýchlejší a analyzuje nespracované data a určuje, či sa požadovaný typ interakcie vyskytol v zrážke dvoch častíc. Údaje používané na tejto úrovni sú väčšinou z ZDC, BBC a VPD detektorov. Keď data spĺňajú podmienky tohto levelu tak pokročia do ďalšieho.

### Level 1, Level 2:

Level 1 a 2 fungujú v časovom období niekoľkých milisekúnd, počas ktorých sa údaje analyzujú podrobnejšie, aby sa zistilo, či udalosť spĺňa viac jemnejšie požadované kritériá. Ak tomu tak nie je, proces digitalizácie sa preruší a detektory sa uvoľnia pre nový triggering.

### Level 3:

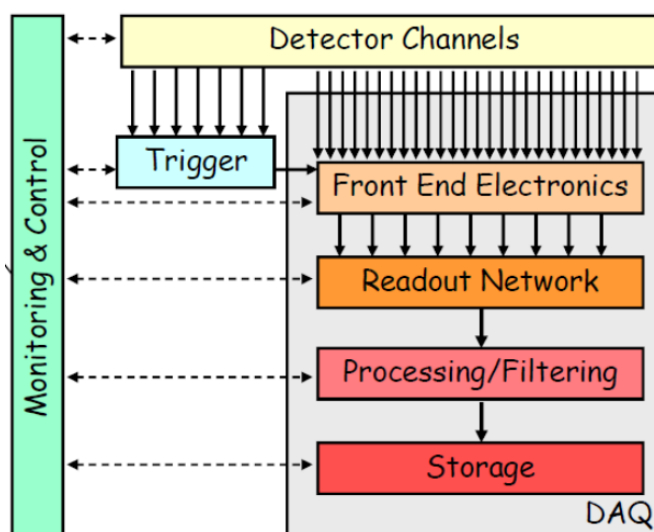
Na tejto úrovni sa spraví konečné rozhodnutie. Ak údaje prechádzajú touto úrovňou, budú odoslané do úložiska. Tento level taktiež zahŕňa on-line zobrazenie, aby jednotlivé udalosti mohli byť vizuálne kontrolované v reálnom čase tj. že počas naberania dát si môže človek pozrieť aktuálny stav detektora.

## 1.7 DAQ

Systém DAQ (Data Acquisition) zhromažďuje dáta z rôznych častí detektora, konvertuje dáta do vhodného formátu a ukladá ich do trvalého ukladania. Požiadavky systému DAQ:

- poskytovanie online služieb (kontrola systému spustenia, monitorovanie toku dát, ovládanie detektorov atď.)

- uchovanie záznamov o stave údajov a stave detektora
- zabránenie poškodeniu dát
- poskytnutie flexibility pri zaznamenávaní údajov v rôznych konfiguráciách (uviedenie do prevádzky, kalibrácia, fyzikálne spracovanie údajov)
- minimalizácie doby nečinnosti
- cenová dostupnosť



Obr. 1.7: Schéma DAQ systému.

- DAQ systém zhromažďuje údaje vytvorené detektorom a uchováva ich (pre pozitívne trigger rozhodnutia).
- Front-end elektronika prijíma signály od detektorov, triggerov, časovačov a produkuje digitalizované informácie.
- Readout network číta front-end data a formuje kompletne udalosti - event building.
- Centrálny DAQ ukladá údaje o udalostiach, dokáže spracovať a filtrovať údaje.

## 1.8 Mŕtva doba DAQ

Mŕtva doba DAQ je zlomok času, ktorom experiment nemôže zaznamenať žiadne data. Medzi zdroje tohto mŕtveho času patri:

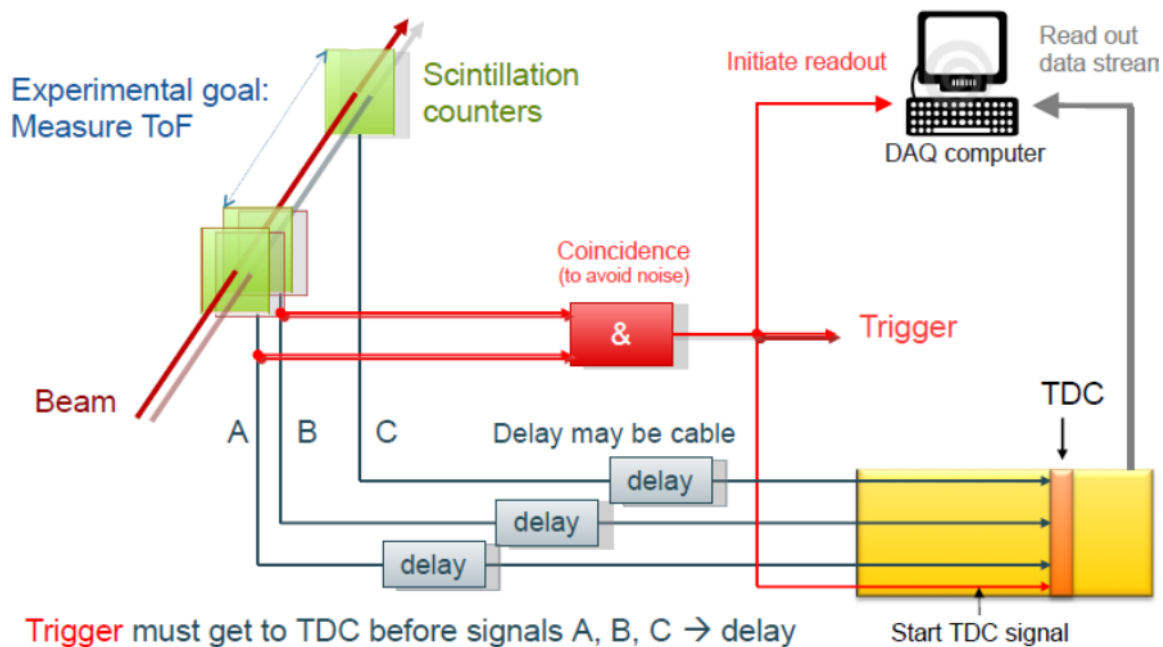
- mŕtva doba readout a trigger systému
- Prevádzková mŕtve časy (napr. Začiatky/zastávky obdobia zberu dát)

- T/DAQ down-time (napríklad zlyhanie počítača)
- detektora down-time (napríklad po výpadku vysokého napätia)

Všimnite si, že logika mŕtveho času je potrebná, aby sa zabránilo spúšťaniu inej udalosti pred úplným odčítaním detektora. Systém T/DAQ musí byť navrhnutý tak, aby minimalizoval mŕtvy čas.

## 1.9 Jednoduchý T/DAQ systém

Uvažujme experiment určený na meranie času letu (TOF) častíc prechádzajúcich scintilačnými čítačmi. Tieto údaje budú vyčítané s elektronikou Time-to-Digital Converter (TDC), viď obrázok (1.8).



Obr. 1.8: Schéma uvažovaného experimentu.

Vzniknuté obmedzenia:

- trigger rozhodnutie musí byť veľmi rýchle aby sa spustilo TDC pred príchodom signálov A, B, C.
- TDC vyčítanie do DAQ počítača je trochu pomalé.
- významná mŕtva doba ak je trigger rozsah veľký:  $\text{readout mŕtva doba} = \text{trigger rozsah} \times \text{celkový readout time}$

## 1.10 Multi-level trigger

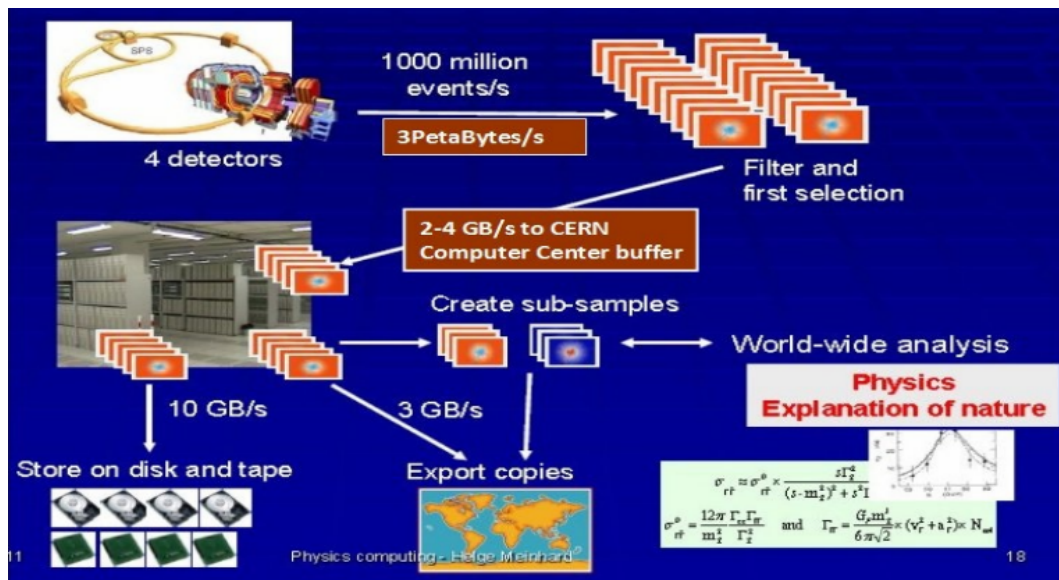
Často nemôžeme dosiahnuť požiadavky na vysokú efektivitu signálu a vysoké potlačenie pozadia s mimoriadne krátkym trigger oneskorením (zpožďením). Preto vzniká potreba zaviesť koncept



multi-level trigger. Prvý trigger level má veľmi krátke oneskorenie, vysokú efektivitu signálu, ale skromné potlačenie pozadia. Niekedy sa nazýva pre-trigger. Následné trigger levely dosahujú vysoké potlačenie pozadia, s typicky vyšším oneskorením. Toto je vlastne to, čo sme už opisovali vyššie, keď sme opisovali trigger systém pre STAR experiment.

## 1.11 Tok dát na ALICE

Z hľadiska toku údajov je LHC veľmi komplexné potrubie toku údajov. Tieto údaje sa musia pohybovať nepretržite, pretože žiadna vyrovnávacia pamäť nie je dostatočne veľká na to, aby zvládla uchovať také množstvo údajov. Akékoľvek prerušenie toku dát vytvára vážne problémy. Údaje musia byť k dispozícii s veľmi krátkym oneskorením. Na obrázku (1.9) môžeme vidieť čo schéma toku dát obsahuje.



Obr. 1.9: Schéma toku dát na experimente ALICE.

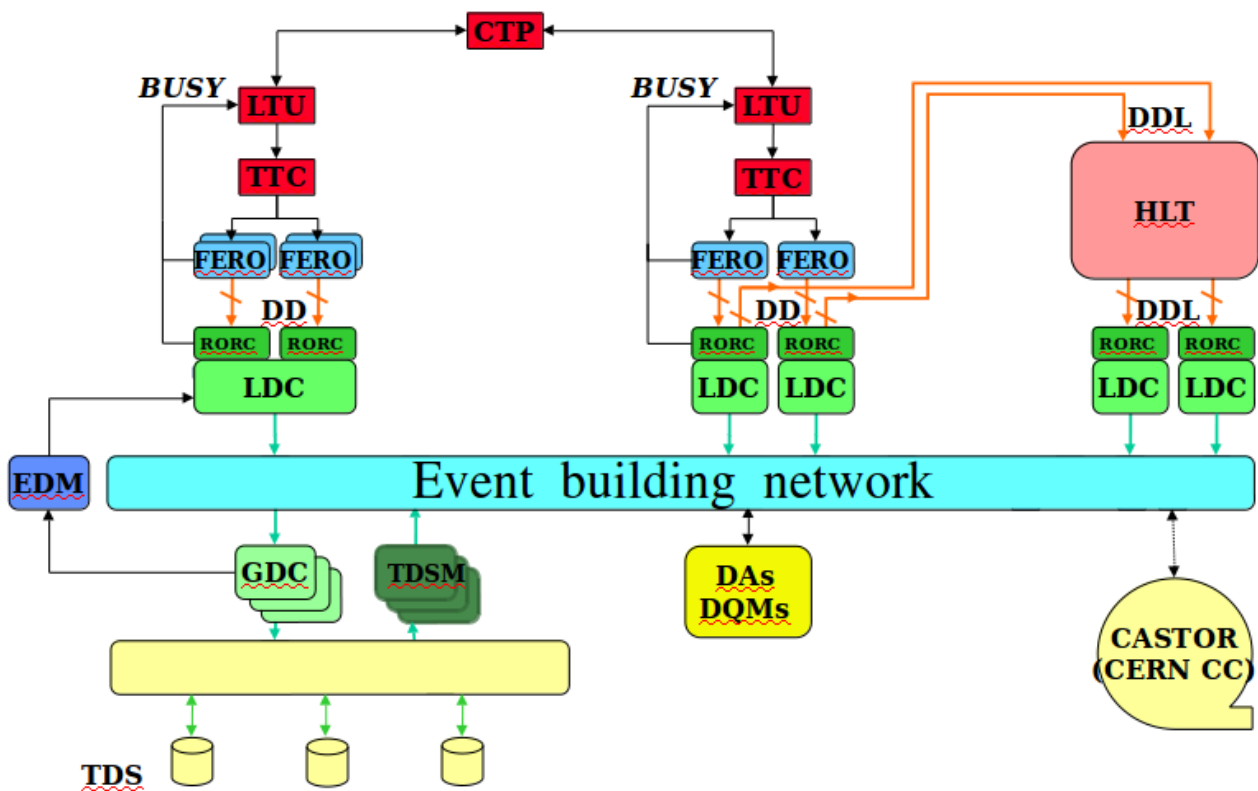
## 1.12 ALICE trigger, DAQ a HLT

Akronymy detektorov a systémov:

- ECS: Experiment Control System
- LTU: Local Trigger Unit - subdetektorové rozhranie
- TRG: Trigger system
- TTC: Trigger and Time control
- CTP: Central Trigger Processor
- DCS: Detector Control System

- DAQ: Data Acquisition system
- HLT: High Level Trigger
- FERRO: Front End ReadOut electronics - pripojený k detektoru dáva vstup DAQ
- DDL: Detector Data Link - prepojenie medzi FERRO and DAQ
- LDC: Local Data Concentrator - vstupný bod pre DAQ, jeden alebo viac LDC sú priradené ku každému detektoru
- GDC: Global Data Collector
- Read-Out Receiver Card

### The ALICE CTP/DAQ/HLT architecture



Obr. 1.10: Architektúra experimentu ALICE.

Jednotlivé systémy experimentu ALICE a proces tvorenia eventov:

- Trigger - CTP → LTUs → TTC → FERROs
- Výstup z detektora - FERROs → DDLs → RORCs - surové dáta z detektorov vstúpia do DAQ
- Vstup do HLT - RORCs → Splitters → DDLs → HLT - vybrané časti údajov sú duplikované a odoslané do HLT

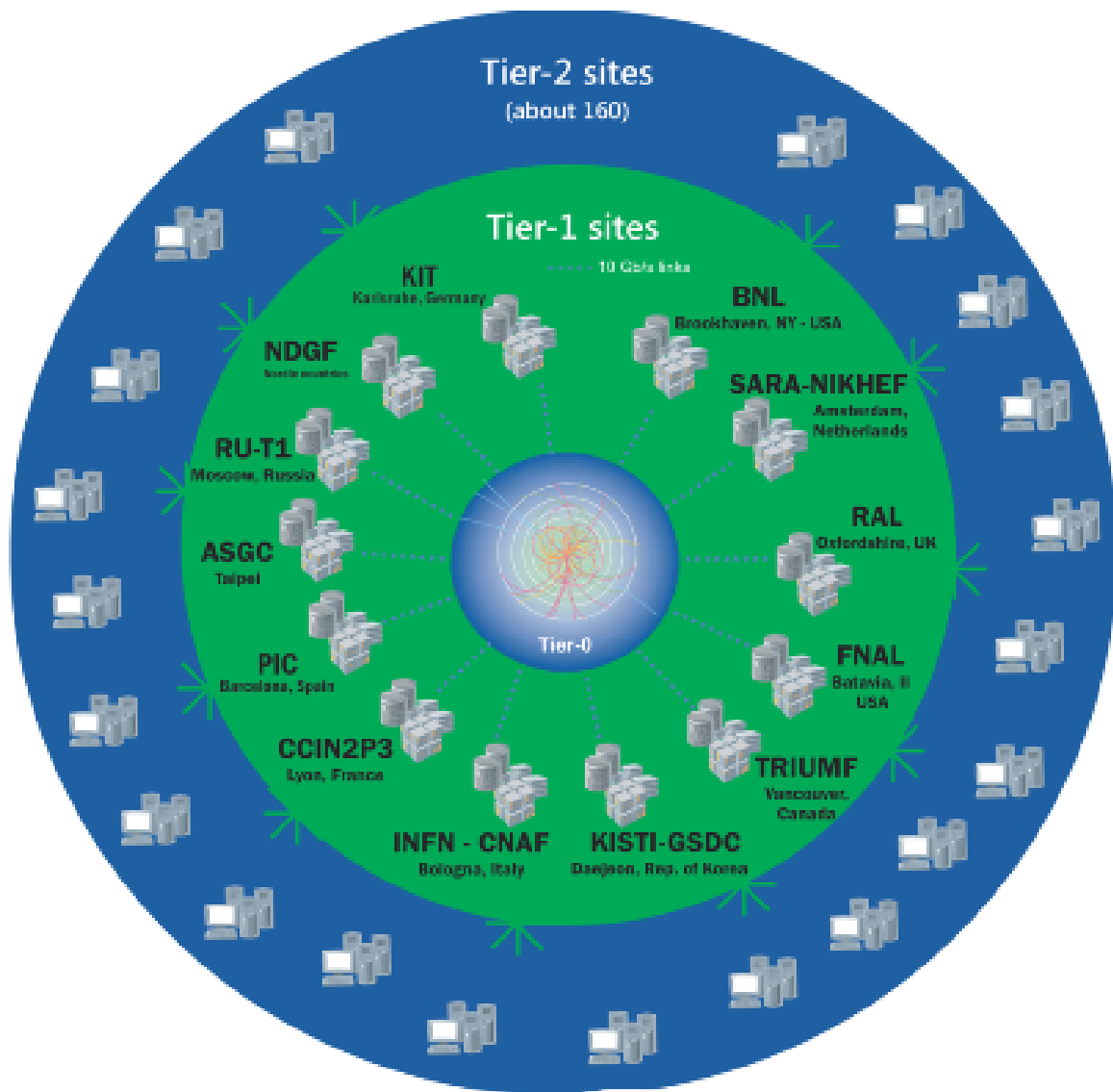
- Spracovanie a výstup v HLT -  $HLT \rightarrow DDLs \rightarrow RORCs \rightarrow LDCs$  - spracované údaje a rozhodnutia z HLT sa posielajú do DAQ.
- Full-event - LDCs majú teraz full-event rozdelený do sub-eventov.
- Sub-eventy môžu byť zlikvidované, nahradené alebo akceptované v súlade s rozhodnutím HLT.
- Event building -  $LDCs \rightarrow GDCs$  - akceptované sub-eventy sa posielajú na GDC, kde sú udalosti vytvorené/spojené.
- Objektivizácia a nahrávanie -  $GDCs \rightarrow TDS$  - udalosti sú objektivizované (vo formáte Ali-ROOT) a zaznamenávané v TDS.
- Migrácia -  $TDS \rightarrow TDSM\ movers \rightarrow Tier\ 0$  - dátové bloky sa presunú z TDS do mriežky a zaregistrujú sa v Alien.
- Online spracovanie -  $LDCs/GDCs \rightarrow DAs/DQMs$  - časť údajov je spracovávaných online pomocou Detector Algorithms (DAs) a Data Quality Monitoring (DQM) modulov.

## 1.13 Worldwide LHC Computing Grid (WLCG) - 20.6.2005

Projekt Worldwide LHC Computing Grid (WLCG) je celosvetová spolupráca viac ako 170 výpočtových centier v 42 krajinách, ktoré spájajú národné a medzinárodné gridové infraštruktúry. Poslaním projektu WLCG je poskytnúť globálne výpočtové zdroje na ukladanie, distribúciu a analýzu približne 50 Petabajtov údajov očakávaných v roku 2018 generovaných Large Hadron Collider (LHC) v CERN. Rozloženie štruktúry WLCG môžeme vidieť na obrázku (1.11).

- Tier 0: nahrávanie a archivovanie dát, prvotné rekonštrukcie dát, distribúcia dát - CERN + Wignerov inštitút
- Tier 1: permanentné úložiska, centrálna riadená analýza, simulácie v niektorých prípadoch, opätovné spracovanie - 14 centier
- Tier 2: simulácie, analýza koncového používateľa - viac ako 150 centier

Nato aby Wignerov inštitút patril do Tier 0 musí veľmi ale veľmi rýchlo dostávať dáta z CERN-u. Preto boli natiahnuté dva 100 Gb/s káble medzi CERN-om a Wignerovým inštitútom (Maďarsko) na vytvorenie Tier 0 so sieťovým oneskorením (množstvo času, ktoré dáta potrebujú na presun z CERN-u do Wigner inštitútu) cca 25 ms.



Obr. 1.11: Schéma rozloženia WLCG.