

Atlas - najväčší detektor častíc na svete

RNDr. Pavol Stríženec, CSc

ÚEF SAV, Košice

- ◆ K čomu slúži
- ◆ Základné parametre
- ◆ Konštrukcia a princípy
- ◆ Príklad kalibrácie detektora
- ◆ Ľudia a prevádzka
- ◆ Budúcnosť



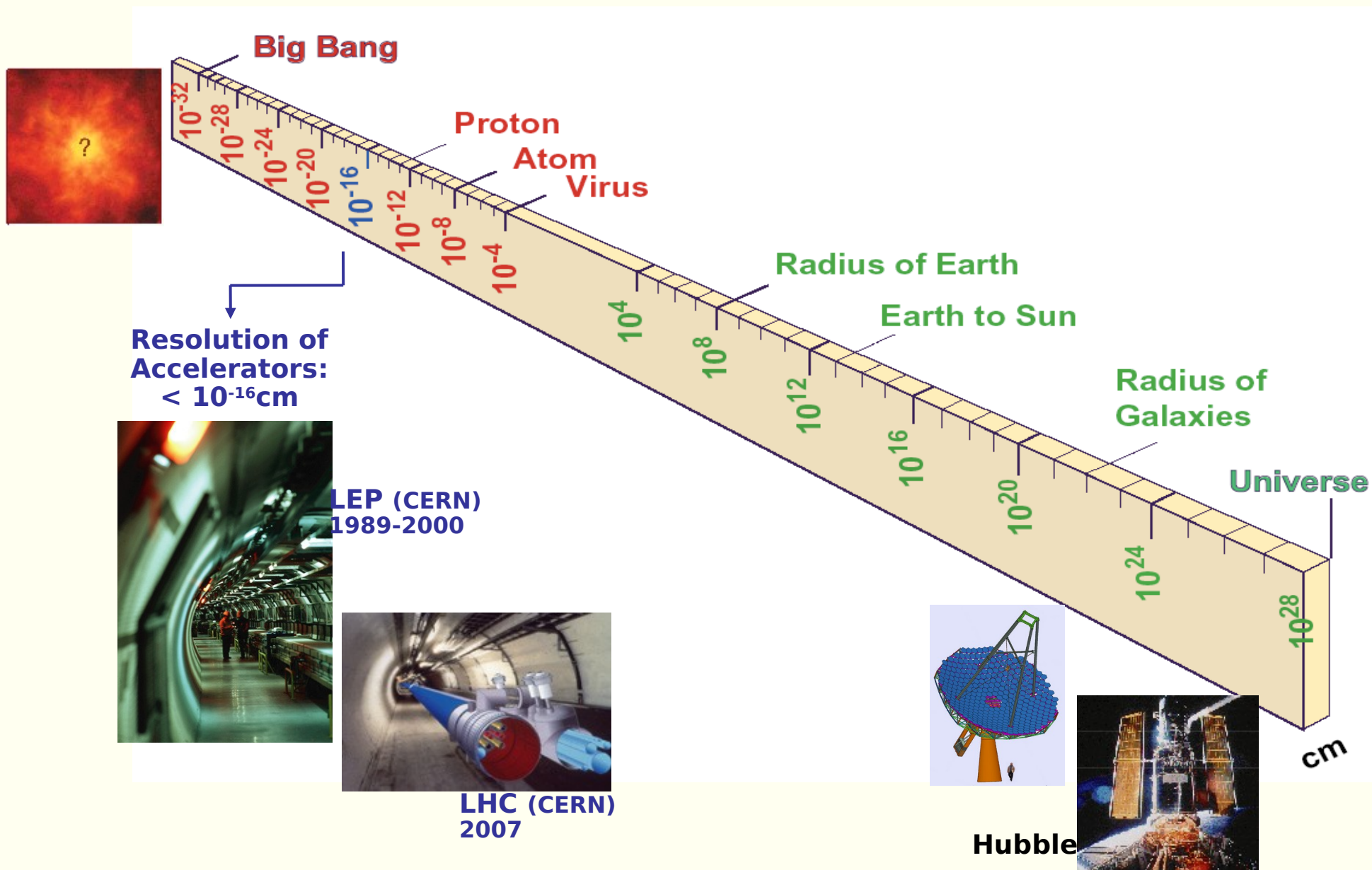
K čomu slúži

- ◆ Meranie častíc (energia, náboj, dráha) vznikajúcich pri zrážkach v LHC (protóny alebo jadrá)
- ◆ Z týchto veličín vieme zistiť ďalšie - typ, hmotnosť, spôsob rozpadu, silu vzájomnej interakcie, ...
- ◆ Meranie veľmi náročné - potreba vývoja nových technológií, mnoho z nich sa rýchlo uchyťí aj mimo výskumu (detektory pre medicínu, hadrónová terapia, ...). Samozrejme takýto veľký projekt významne posunul detektorovú technológiu
- ◆ Nutná spolupráca mnohých vedeckých oblastí, vzor pre iné multiodborové projekty. V kolektíve sú od elektronikov a odborníkov z fyziky tuhých látok, cez časticových fyzikov, fyzikov nízkyh teplôt až po teoretických fyzikov.
- ◆ Týmto preveríme, prípadne rozšírime naše vedomosti o základnom fungovaní vesmíru a jeho ďalšieho vývoja
- ◆ Pracujeme v extrémne malej priestorovej škále - paradoxne potrebujeme extrémne veľké zariadenie
- ◆ Široko medializovaný objav Higgsovho bozónu je len jednou, malou, aj keď nie bezvýznamnou časťou fyzikálneho programu
- ◆ Dôležitou časťou je hľadanie fyziky za Štandardným modelom, najmä čo najpresnejším premeraním všetkých predpovedí, ale aj hľadaním efektov ktoré SM nevie popísať
- ◆ Otázky prvotného vývoja Vesmíru sú rovnako časťou fyzikálneho programu

Atlas - najväčší detektor častíc na svete

• K čomu slúži

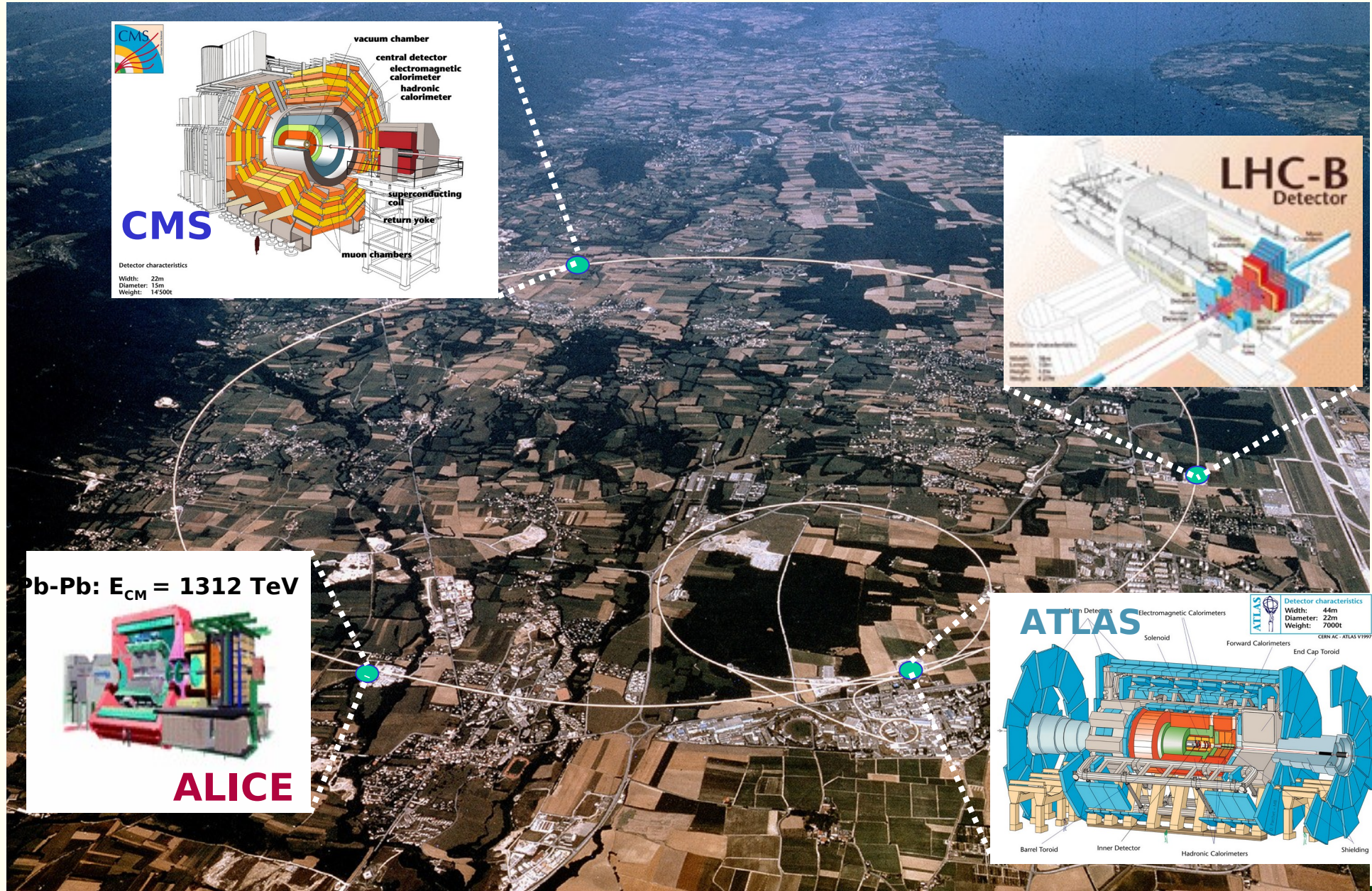
- Pre ilustráciu skúmanej priestorovej škály:



Atlas - najväčší detektor častíc na svete

Základné parametre

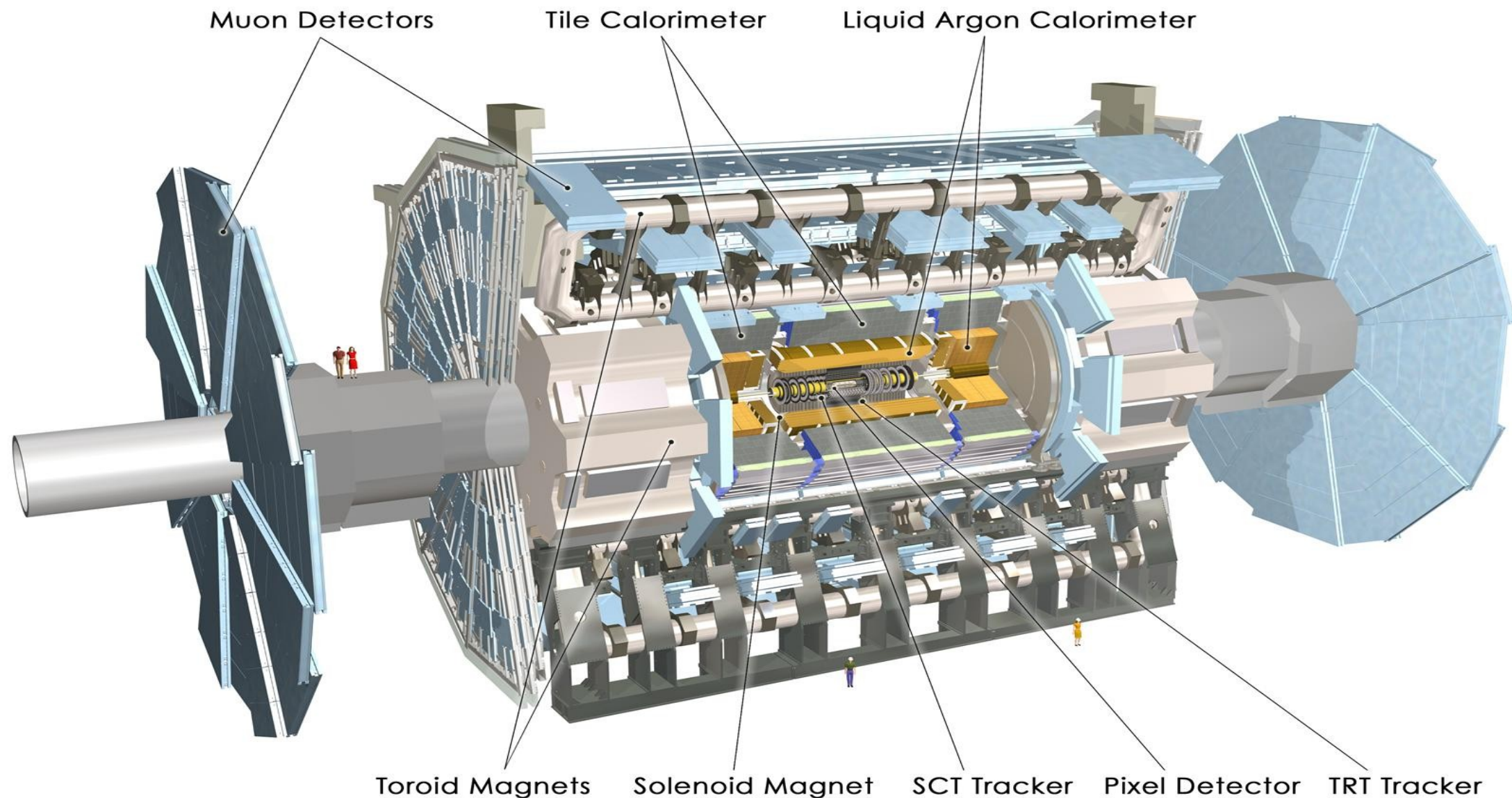
- Širšia perspektíva - veľké experimenty na LHC:



Atlas - najväčší detektor častíc na svete

• Základné parametre

- ◆ 46 m dlhý, 25 m vysoký, váži viac ako 7000 ton, meria pomocou viac ako 100 miliónov elektronických kanálov (3000 km káblov)



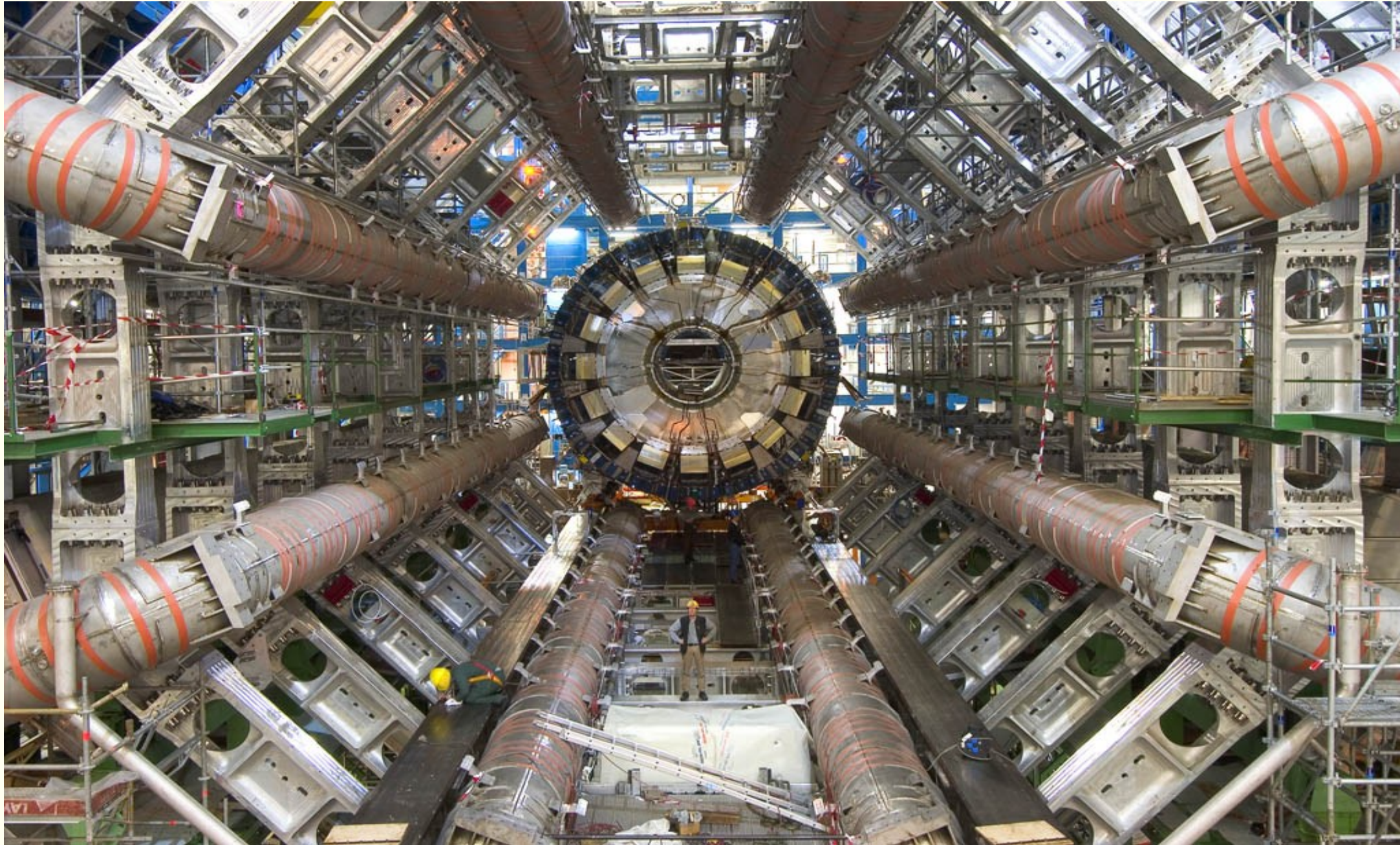
Atlas - najväčší detektor častíc na svete

• Základné parametre



Atlas - najväčší detektor častíc na svete

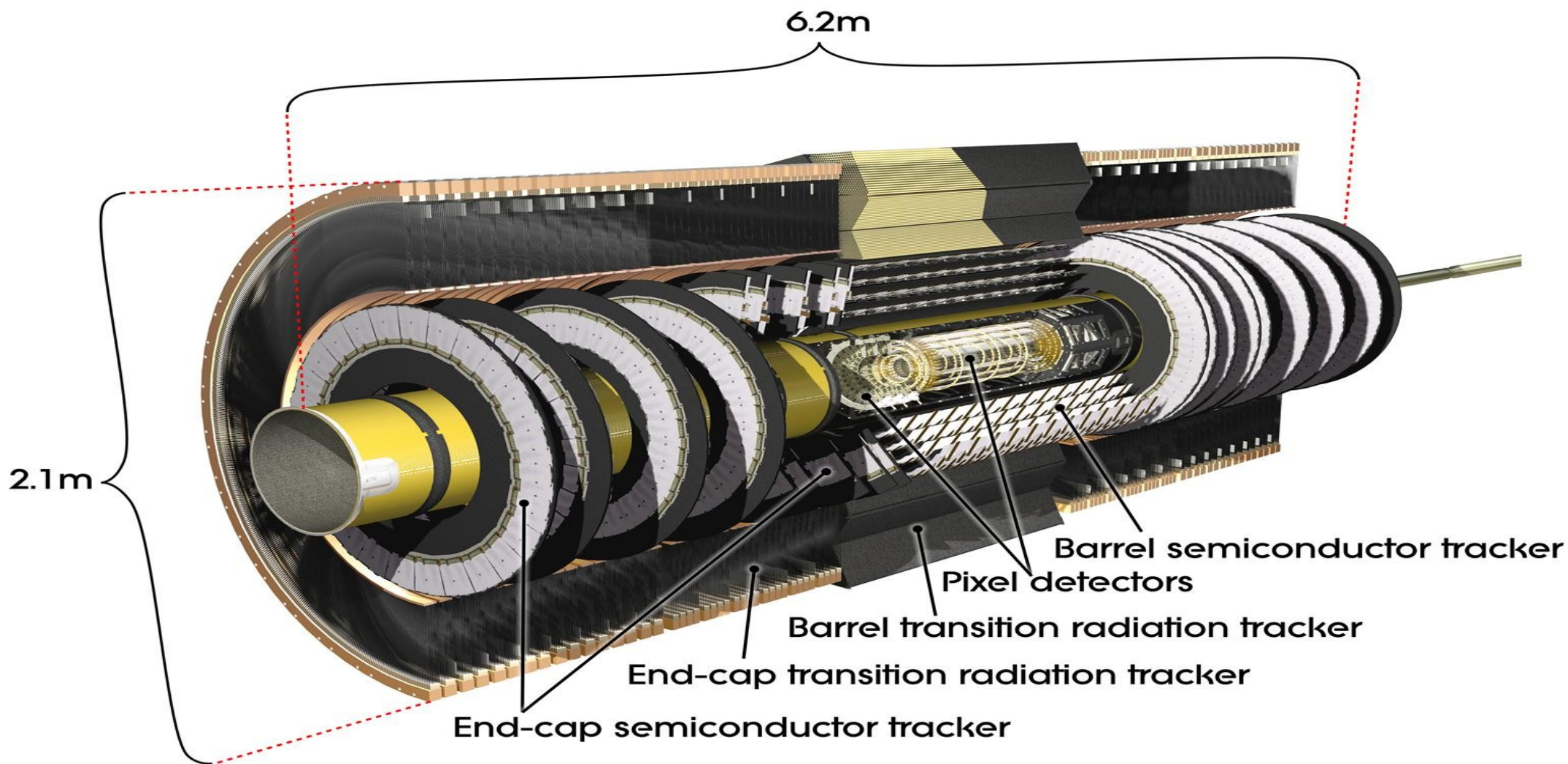
• Základné parametre



Atlas - najväčší detektor častíc na svete

Konštrukcia a princípy

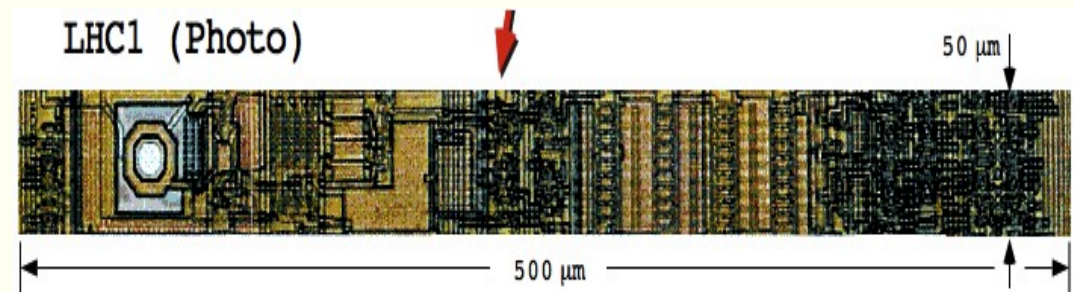
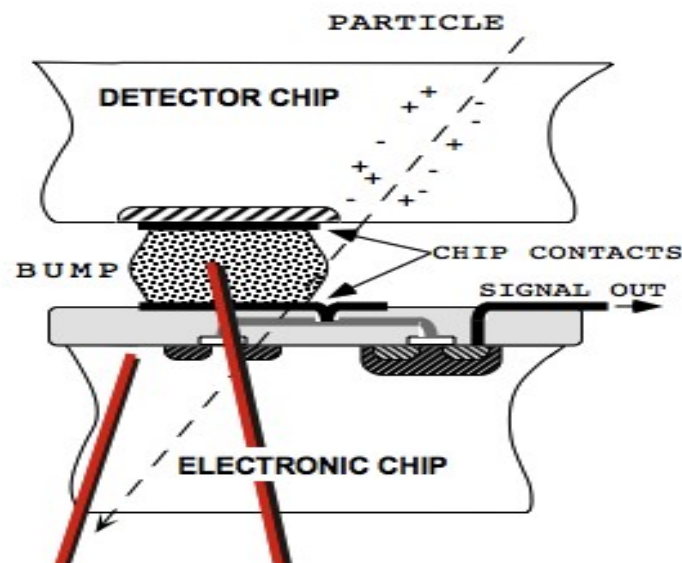
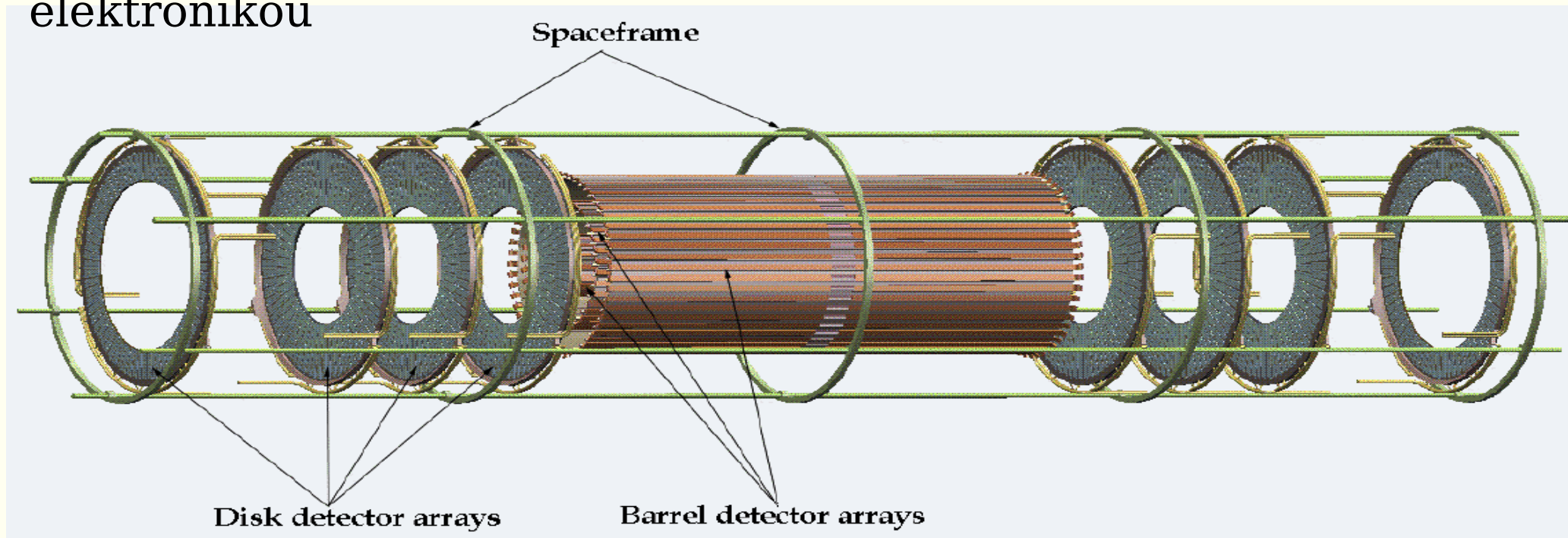
- ◆ Vnútorňý, dráhový detektor, polovodičová a plynová technológia, úlohou je zmerať polohu častíc v čo najviac bodoch
- ◆ Čo najmenej “mŕtveho” materiálu



Atlas - najväčší detektor častíc na svete

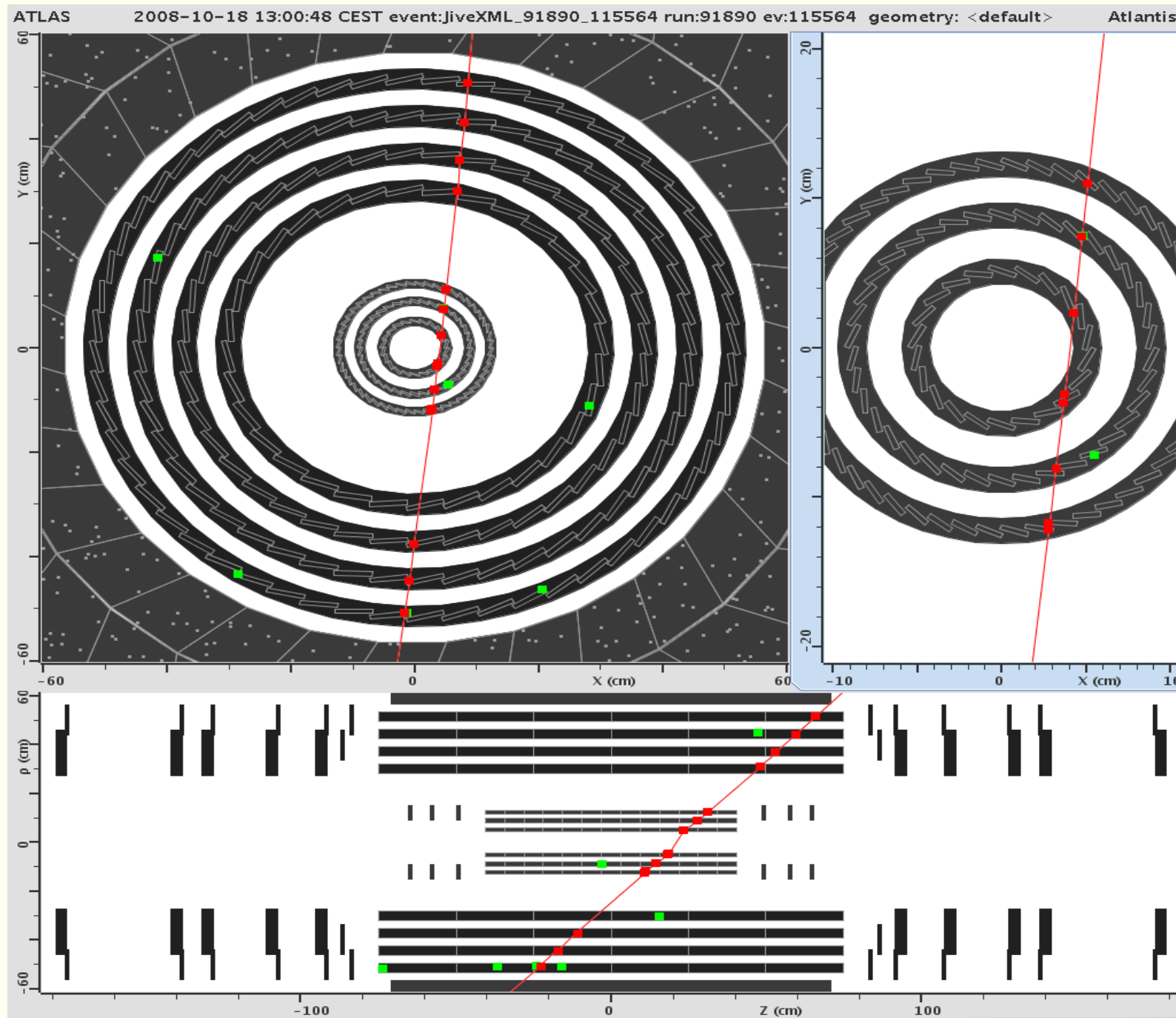
Konštrukcia a princípy

- Pixel detector je vlastne matica Si diód s patričnou vyčítavacou elektronikou



Konštrukcia a princípy

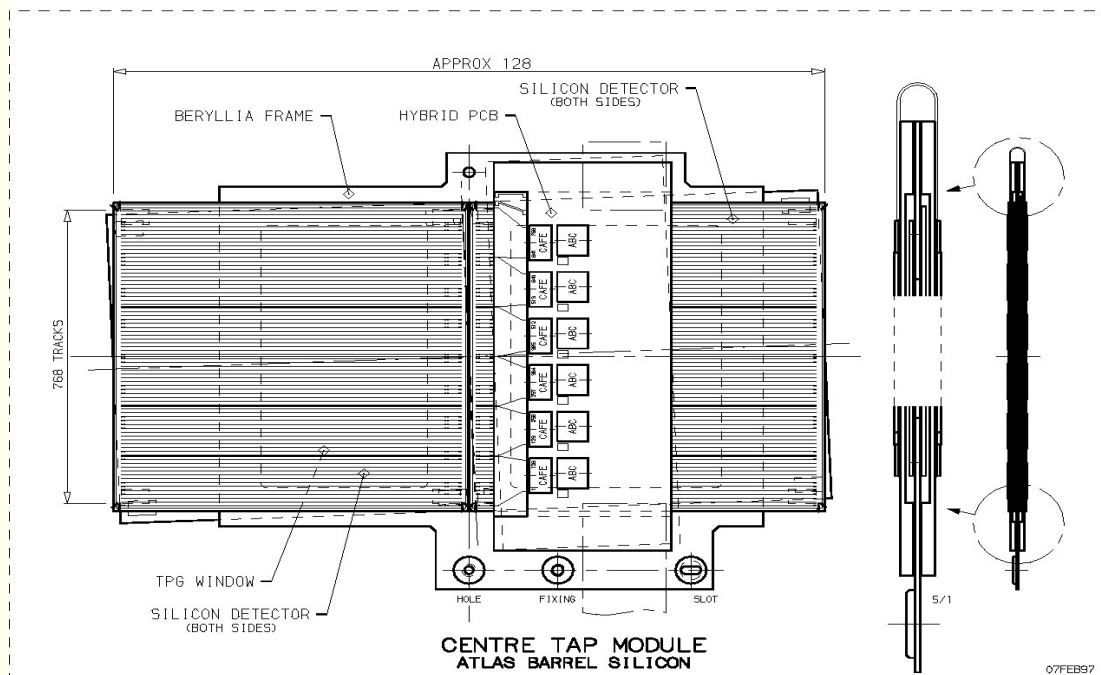
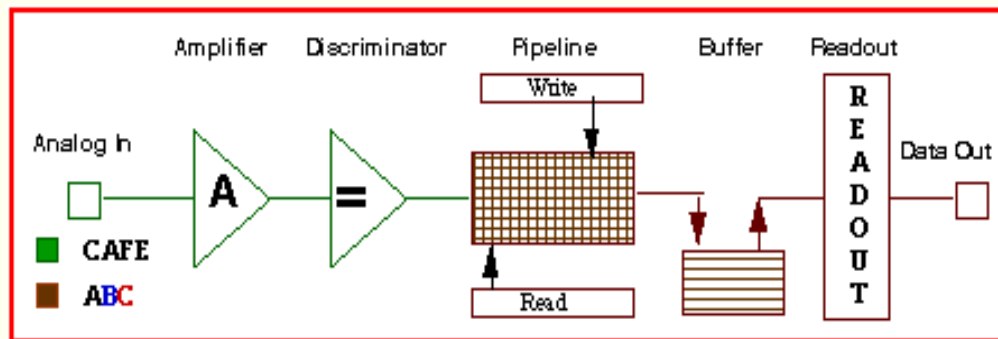
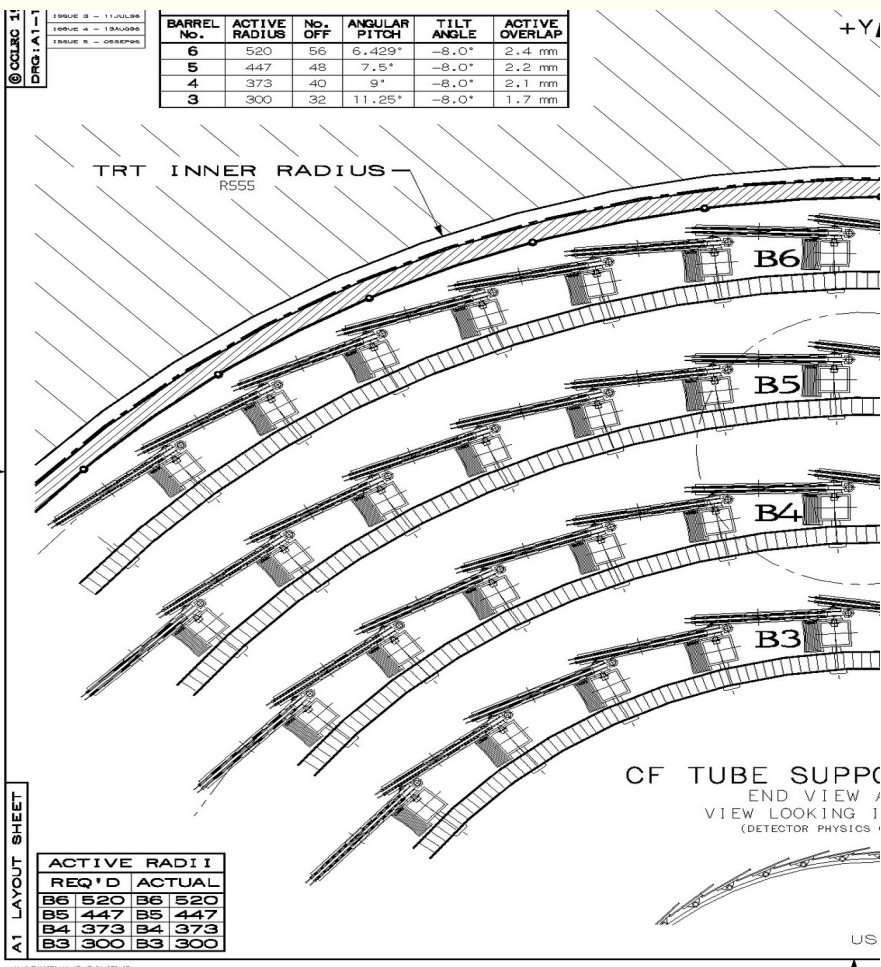
- Príklad, mión z kozmiky v pixel det.



Atlas - najväčší detektor častíc na svete

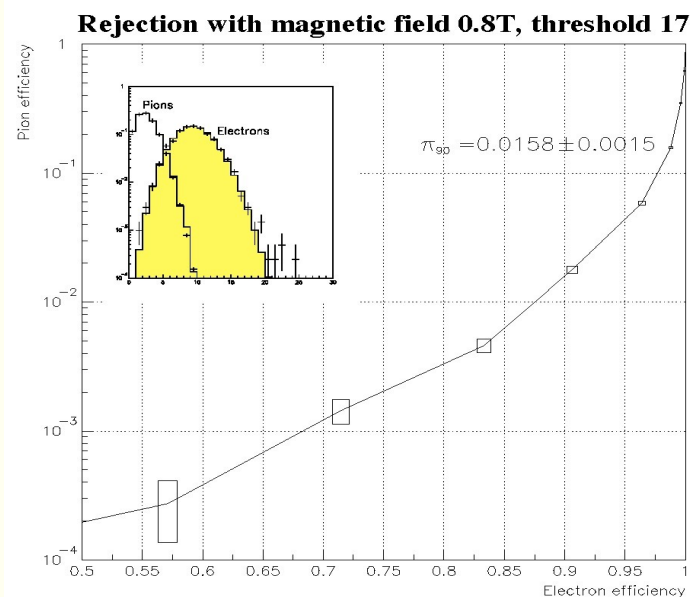
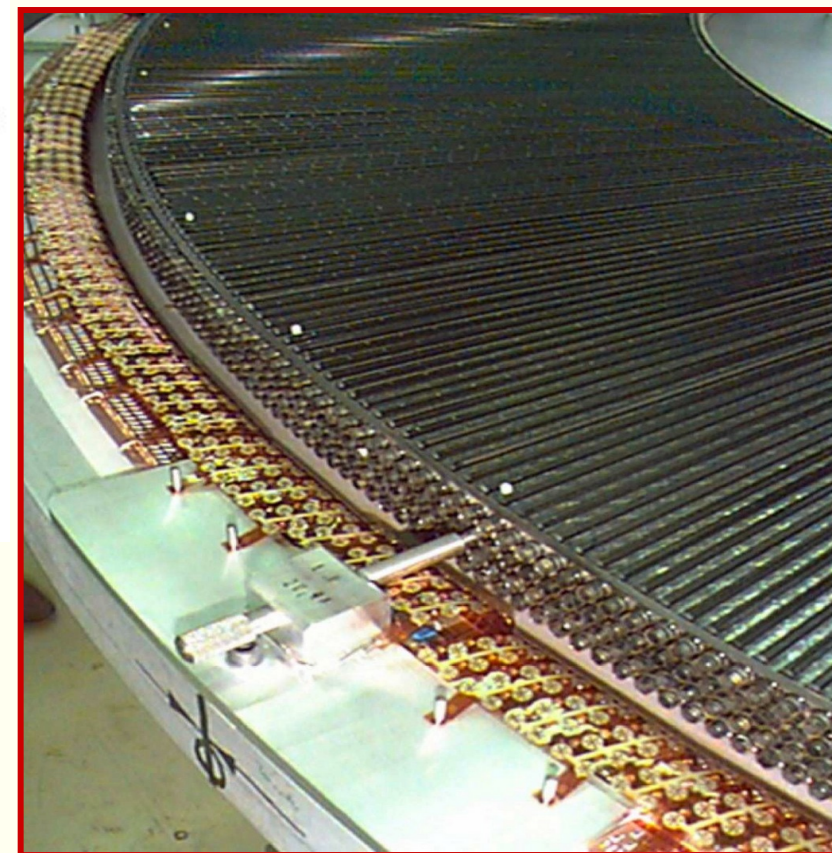
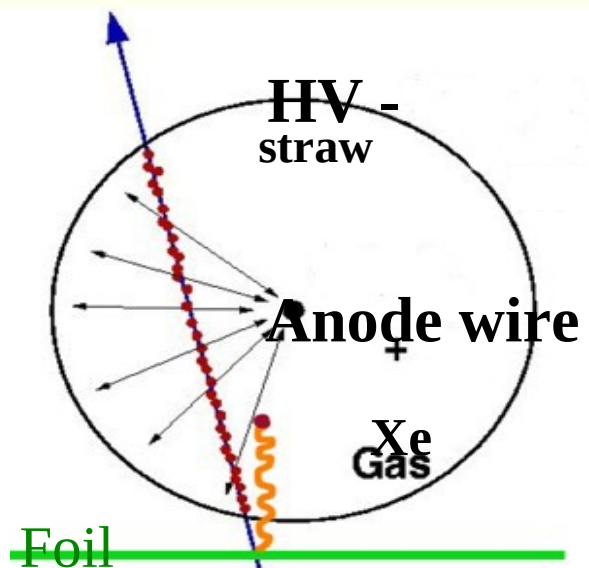
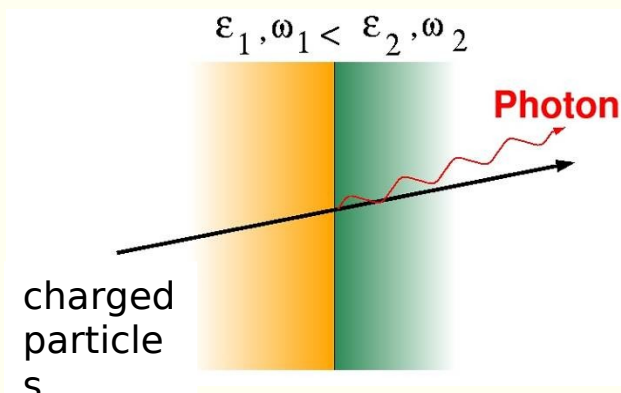
Konštrukcia a princípy

- SCT - (semi-conductor tracker) opäť polovodičový detektor, Si stripy pod rôznymi uhlami na presnú rekonštrukciu dráh



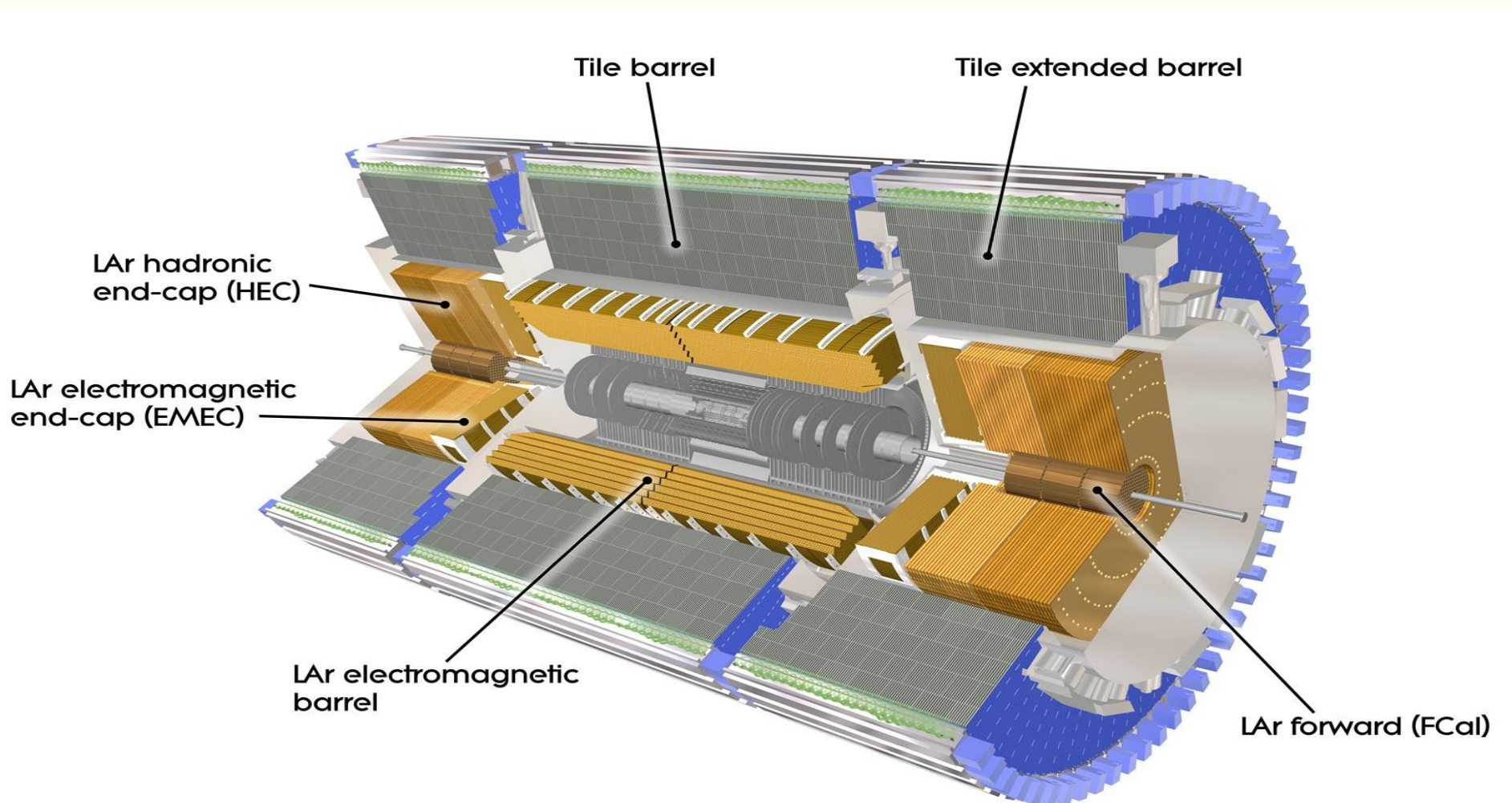
Konštrukcia a princípy

- TRT - Transition radiation tracker - využíva fakt, že nabitá relativistická častica emituje žiarenie (fotóny) kedykoľvek prejde hranicu dvoch dielektricky rozdielnych prostredí. Polypropylénová fólia preložená pomedzi tenké trubičky s plynom, ktoré detekujú častice
- Keďže pri danej hybnosti elektrón vyžiari viac TR než pión, či protón, sú vhodné na identifikáciu častíc



Konštrukcia a princípy

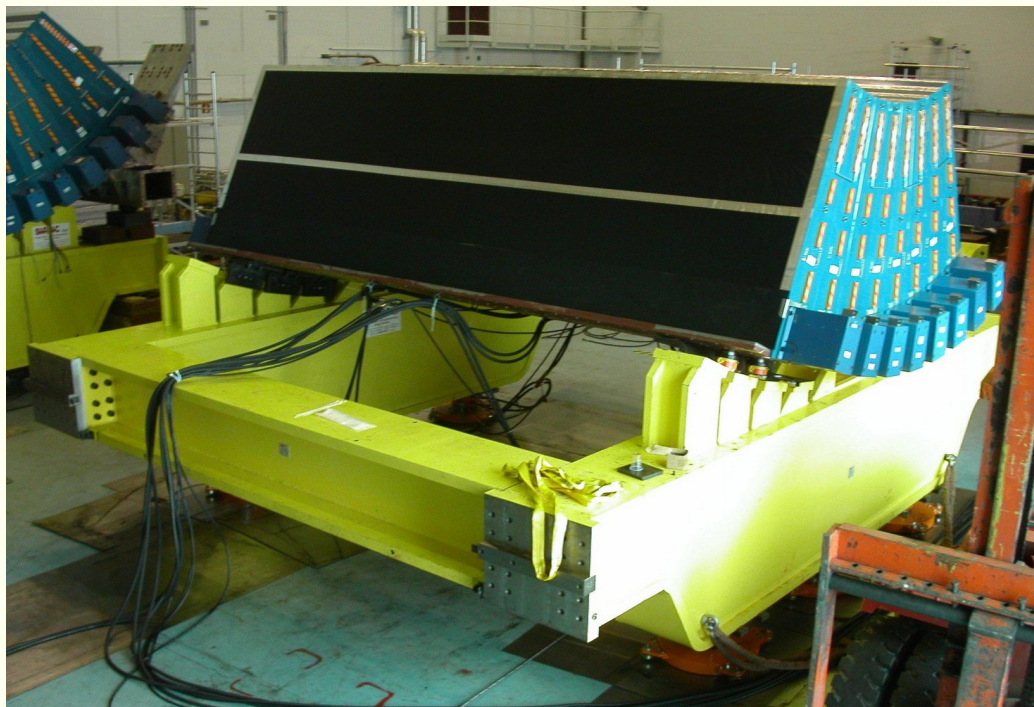
- ◆ Kalorimetre merajú energiu častíc ich celkovým pohltením, vzorkovací princíp striedania tzv. absorbéra (ktorý nemeria, iba spôsobí brzdenie častice) a aktívneho média, ktoré meria energiu.
- ◆ Elektromagnetický (meria elektróny a fotóny) a hadrónový (silne interagujúce častice). Aktívne médium LAr a plastový scintilátor.



Atlas - najväčší detektor častíc na svete

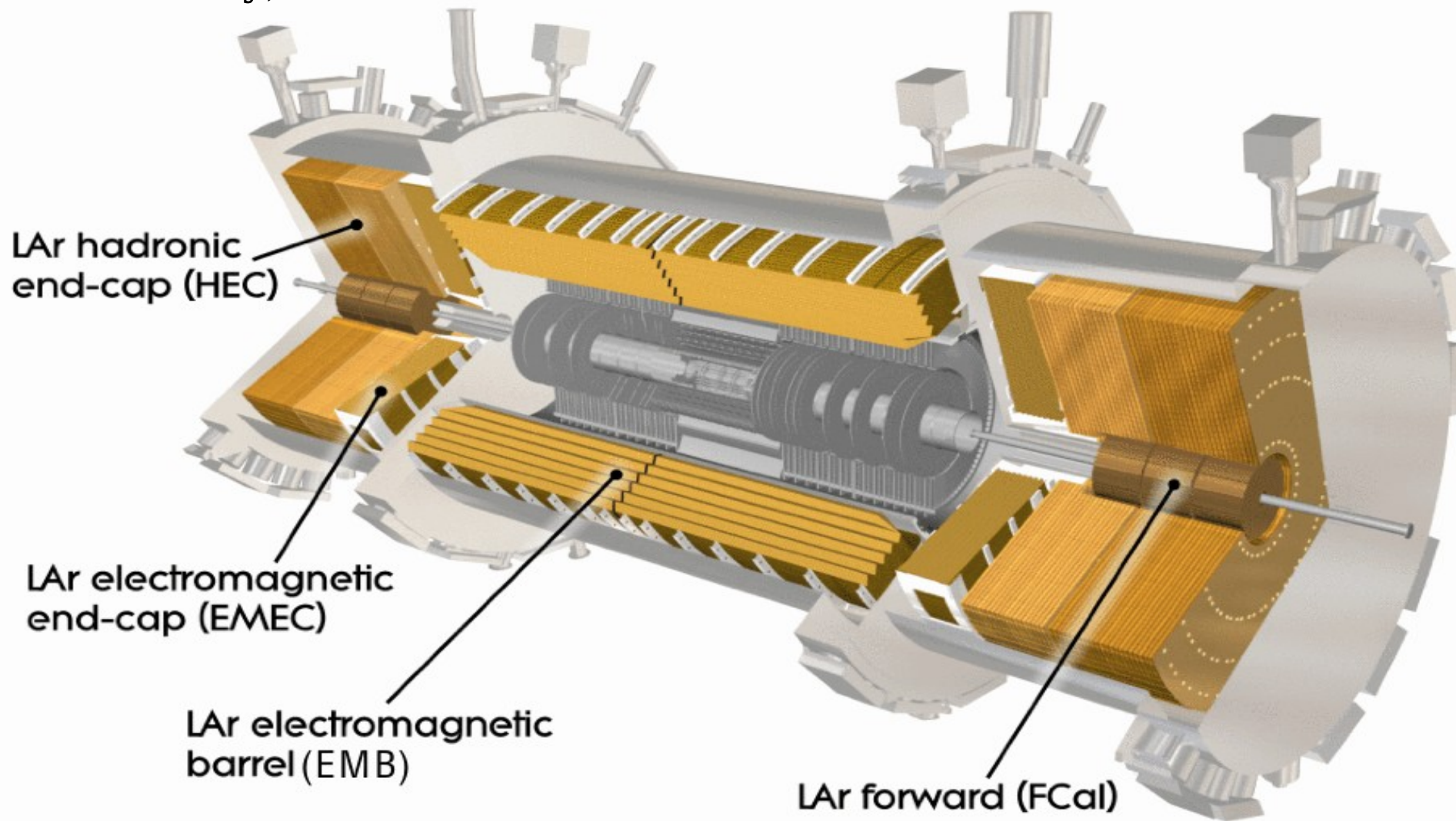
• Konštrukcia a princípy

- ◆ Na predstavu skutočných rozmerov, prvá časť Tile kalorimetra pri montáži a preprave



Konštrukcia a princípy

- ◆ LAr kalorimeter - EM barrel, hadrónový endcap a forward (EM aj hadrónový)

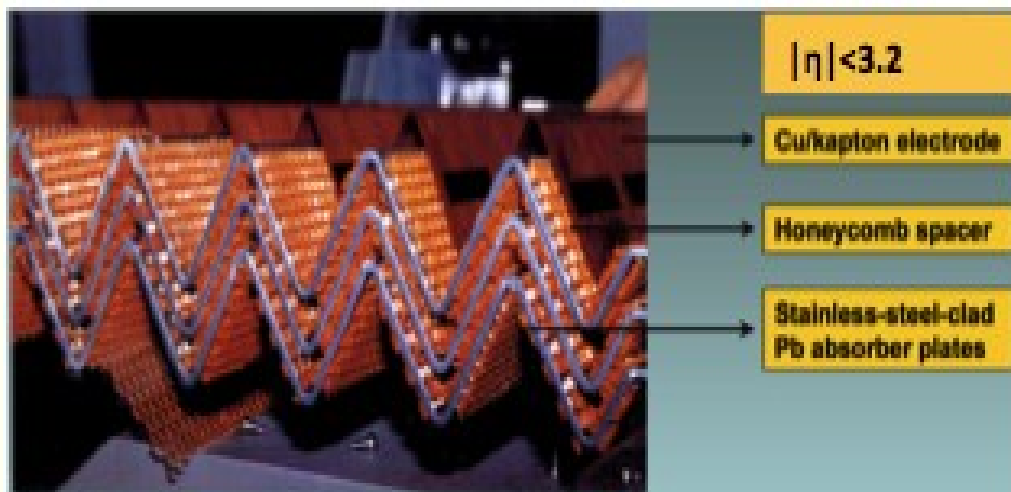


Atlas - najväčší detektor častíc na svete

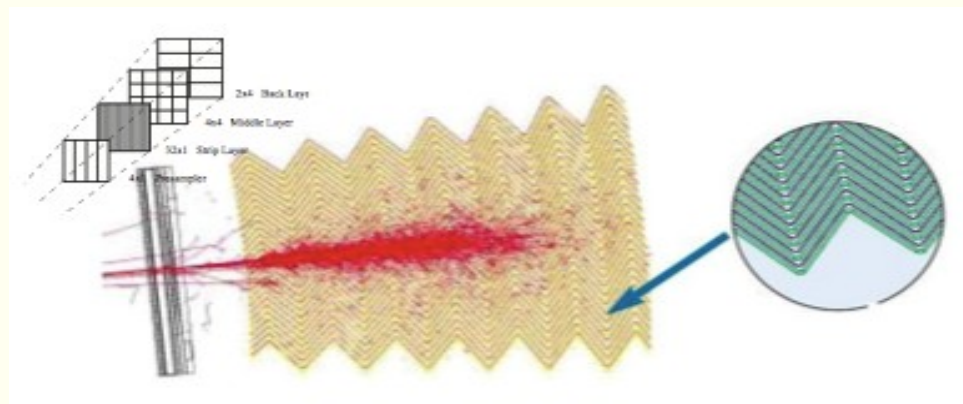
Konštrukcia a princípy

LAr kalorimeter - princíp registrácie častíc

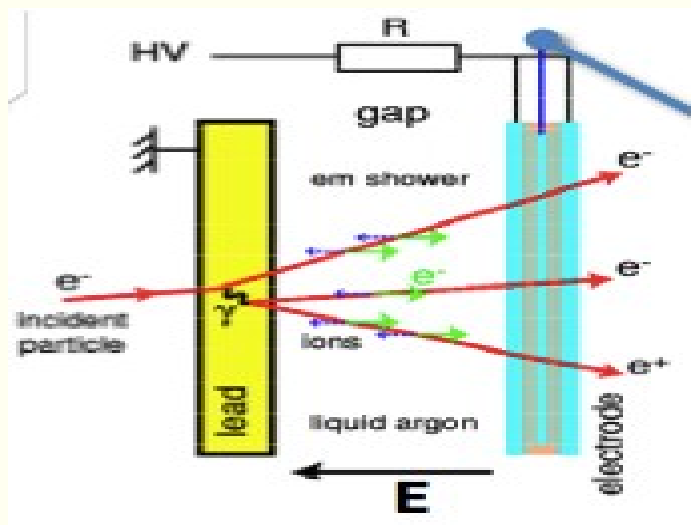
takzvaná "akoredeon" štruktúra



aby zachytila čo najviac signálu zo spršky, čítanie segmentované do buniek v 4 vrstvách



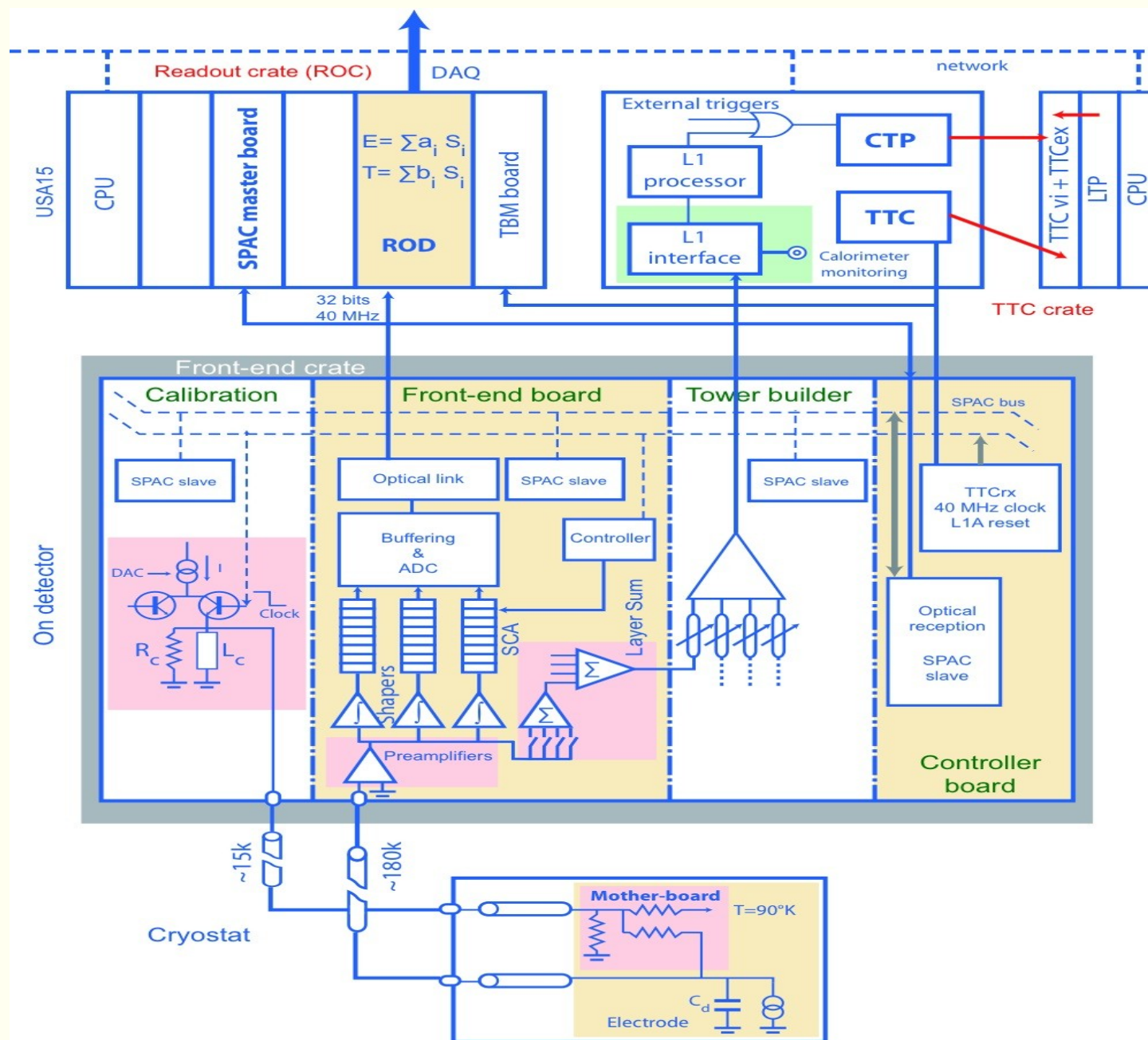
vysoké napätie na elektróde, ionizačné elektróny tvoria merateľný prúd



Atlas - najväčší detektor častíc na svete

Príklad kalibrácie detektora

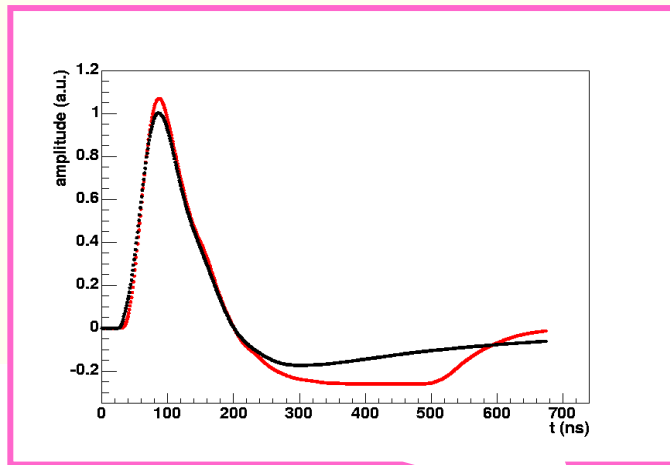
LAr kalorimeter - elektronický reťazec



- ◆ 1524 FEB dosiek, každá s 128 kanálmi
- ◆ 122 kalibračných dosiek, tiež s 128 kanálmi
- ◆ 122 kontrolných dosiek
- ◆ pre trigger 134 LTDB (LAr Trigger Digitizer Board), nové od 2022

Príklad kalibrácie detektora

- LAr kalorimeter - elektronická kalibrácia



Čierna krivka - kalibračný signál (elektronika nevie vyrobiť trojuholníkový signál, iba exponentu).

Červená krivka, predpovedaný fyzikálny signál

ADC to DAC (Ramps)

$$E_{\text{cell}} = F_{\mu\text{A} \rightarrow \text{MeV}} \cdot F_{\text{DAC} \rightarrow \mu\text{A}} \cdot \frac{1}{\frac{M_{\text{phys}}}{M_{\text{cali}}}} \sum_{i=1}^{M_{\text{ramps}}} R_i \left[\sum_{j=1}^{N_{\text{samples}}} a_j (s_j - p) \right]^i$$

Cell energy

Sampling fraction

Calibration board

Optimal Filtering Coefficients

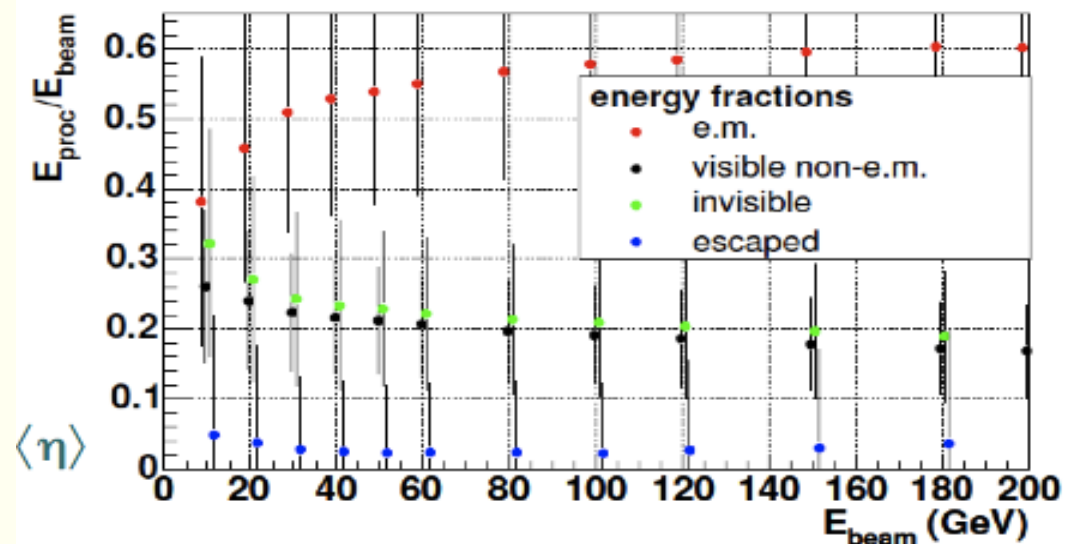
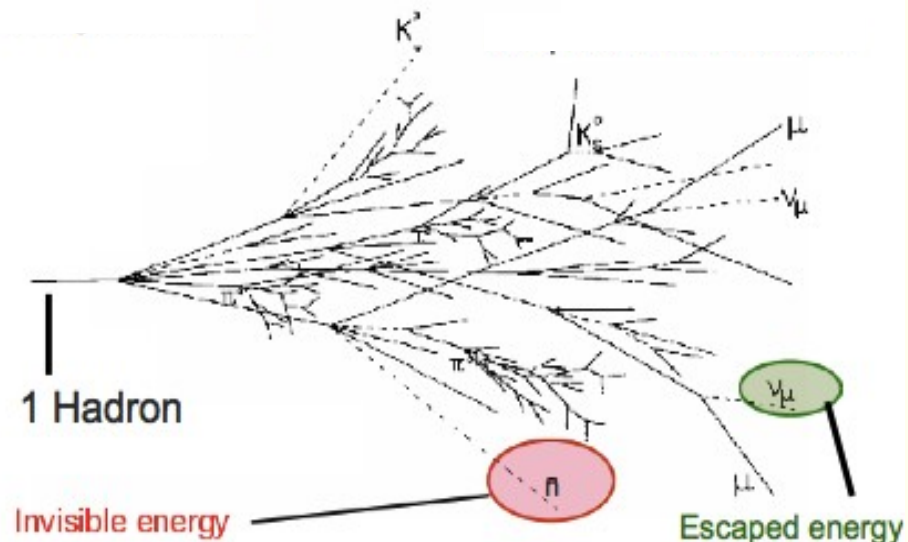
Pedestals

Táto formula opisuje LAr elektronickú kalibráciu (od signálu v ADC sampochoch po základnú energiu kalorimetrickej bunky) Táto formula používa všeobecný polynomiálny fit M_{ramps} - stupňa pre rampy. V skutočnosti doteraz používame lineárny fit (ukazuje sa, že elektronika je veľmi lineárna, a okrem toho chceme aplikovať iba lineárnu transformáciu online (v DSP) aby sme ju mohli zrušiť offline, a aplikovať nejakú presnejšiu kalibráciu).

Príklad kalibrácie detektora

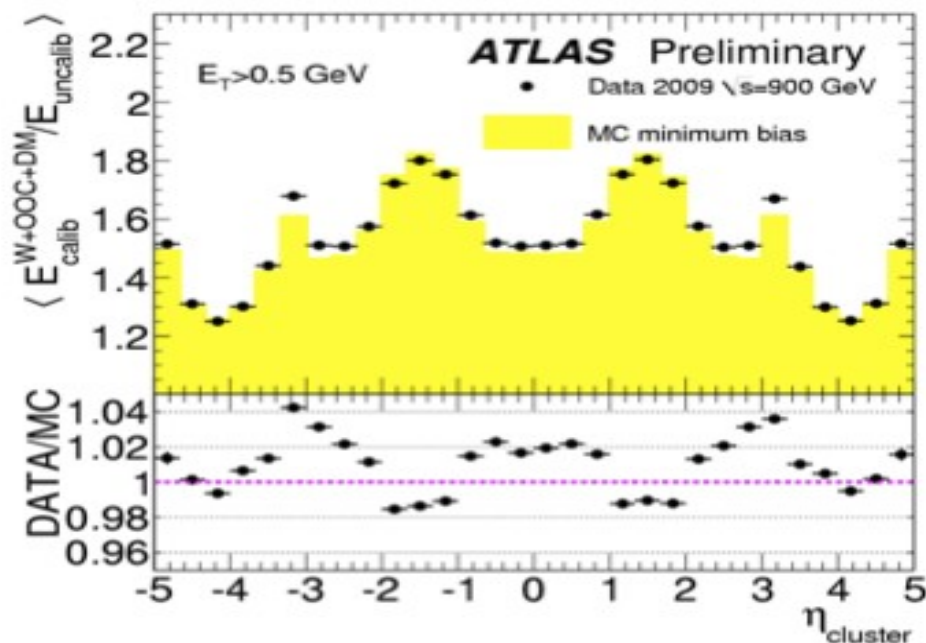
Kalorimeter - energetická kalibrácia

podiel rôznych druhov uloženej energie v závislosti na energii pôvodného hadrónu



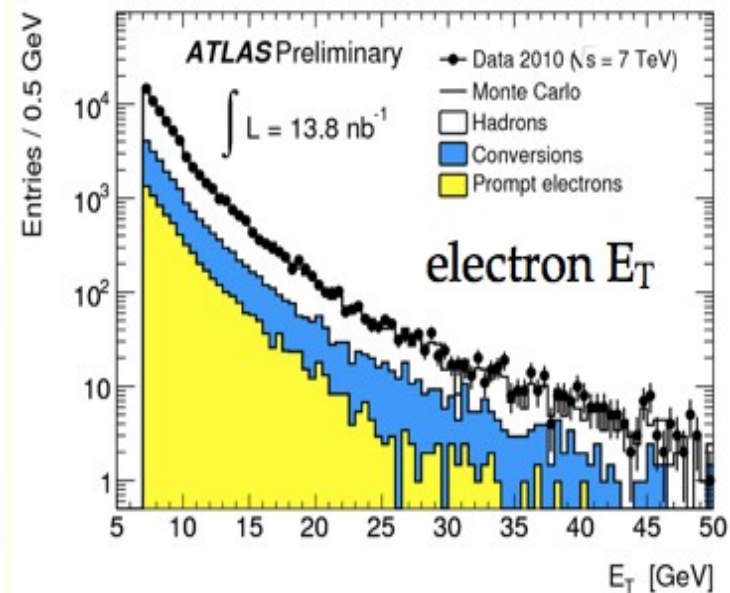
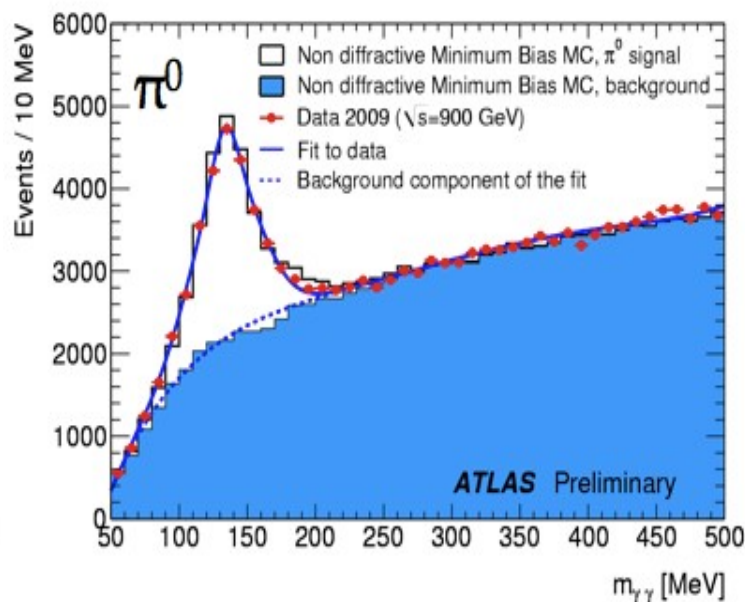
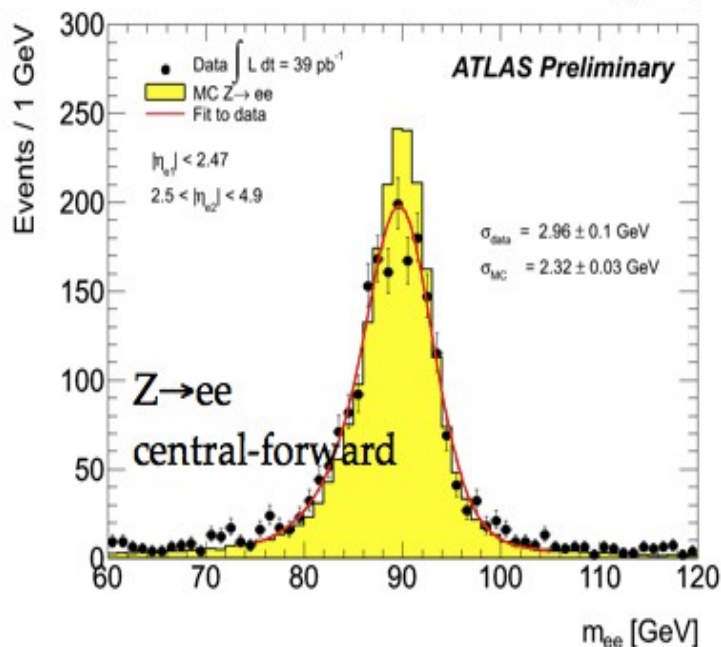
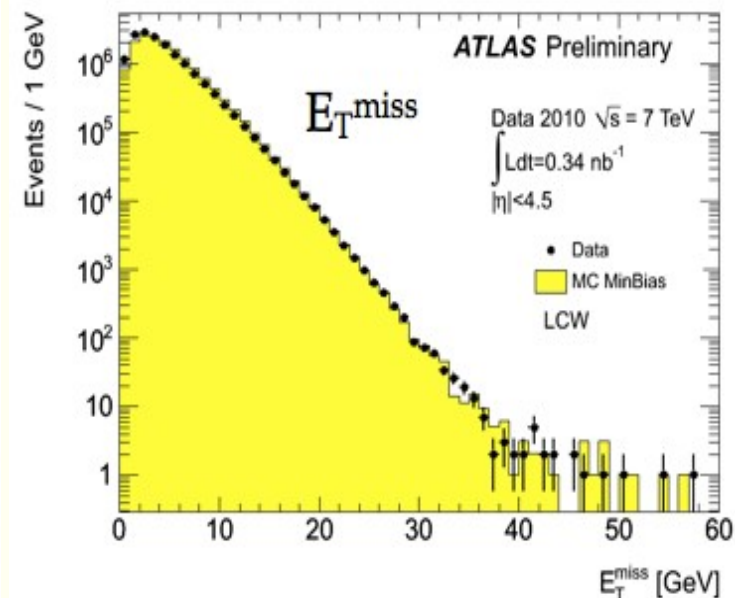
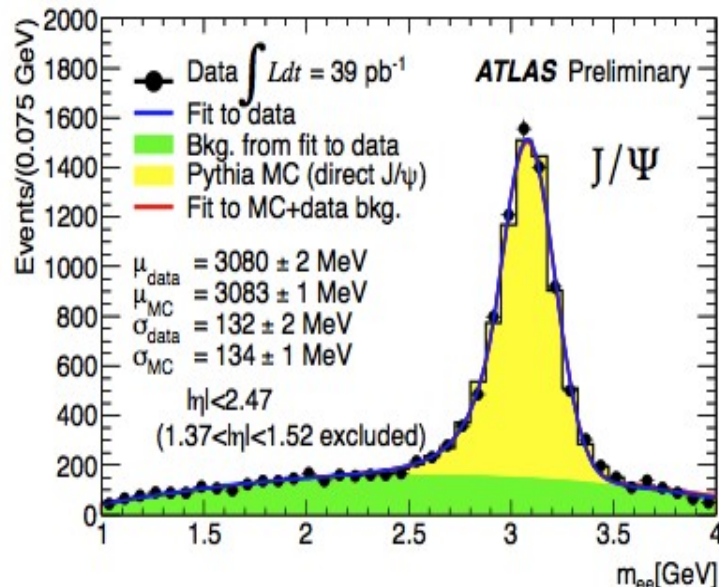
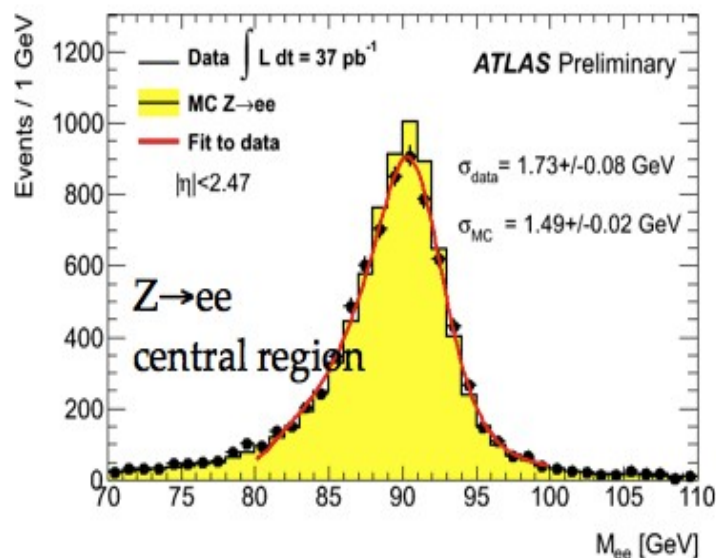
Lokálna hadrónová kalibrácia:

- ◆ klasifikuje 3d klastre v kalorimetri
- ◆ aplikuje váhy (z MC) na hadrónové klastre
- ◆ koriguje na energiu mimo klastra
- ◆ koriguje na energiu uloženú v mŕtvom materiáli kalorimetra



Príklad kalibrácie detektora

- LAr kalorimeter - pár výsledkov z dát

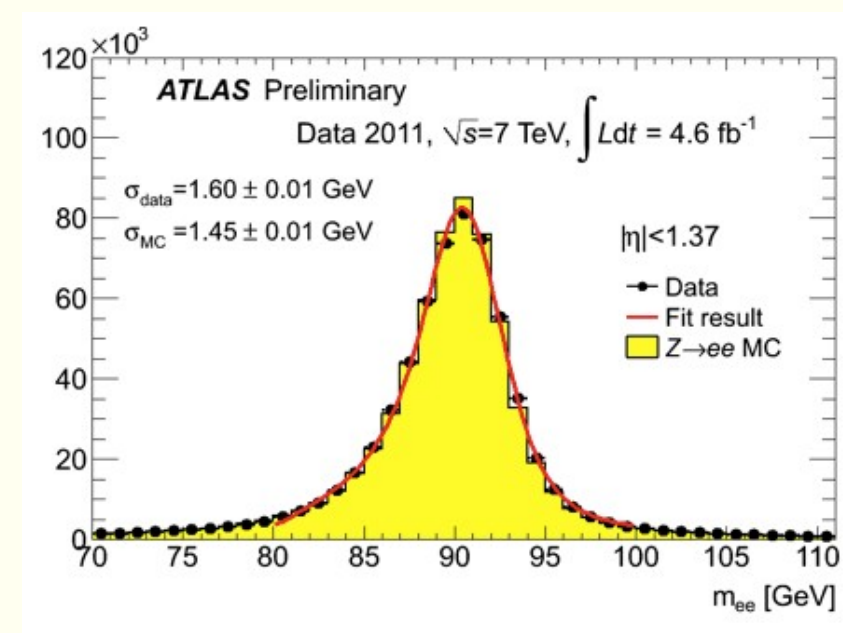
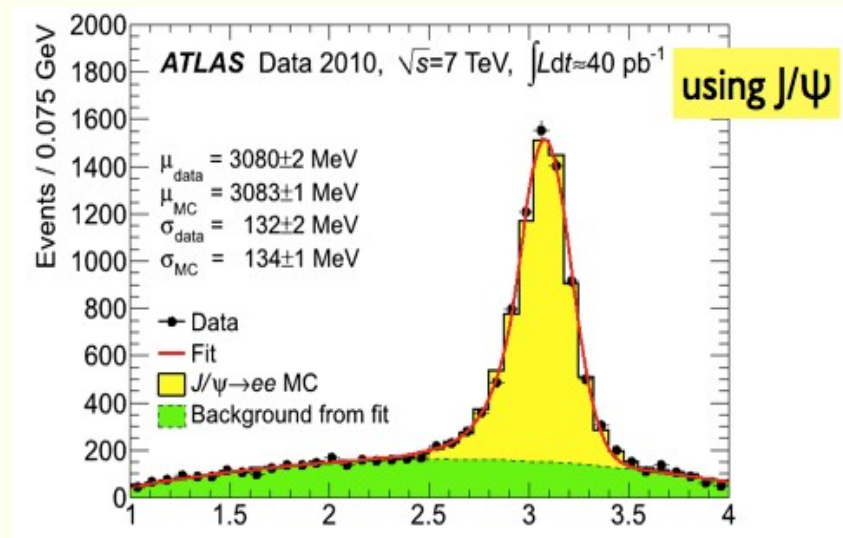
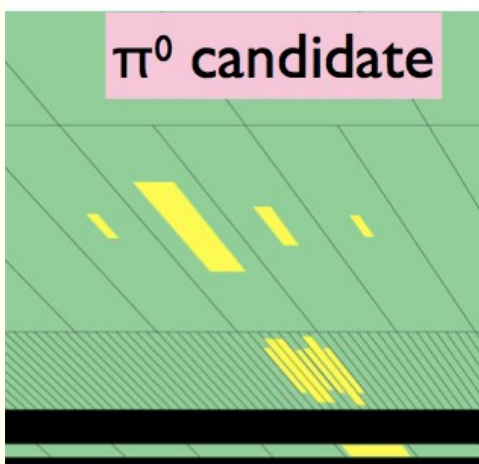
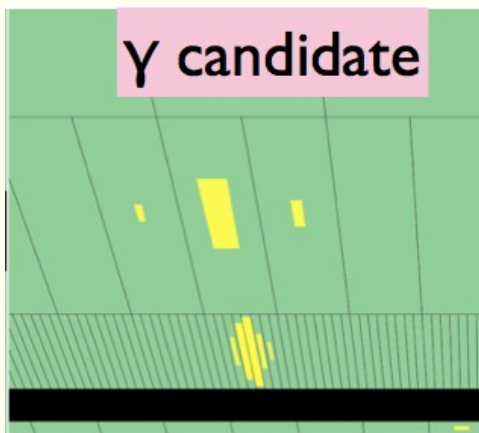


Príklad kalibrácie detektora

- LAr kalorimeter – ako prispel napr. k určeniu Higgsovej častice

napríklad excelentným rozlíšením π^0 a γ

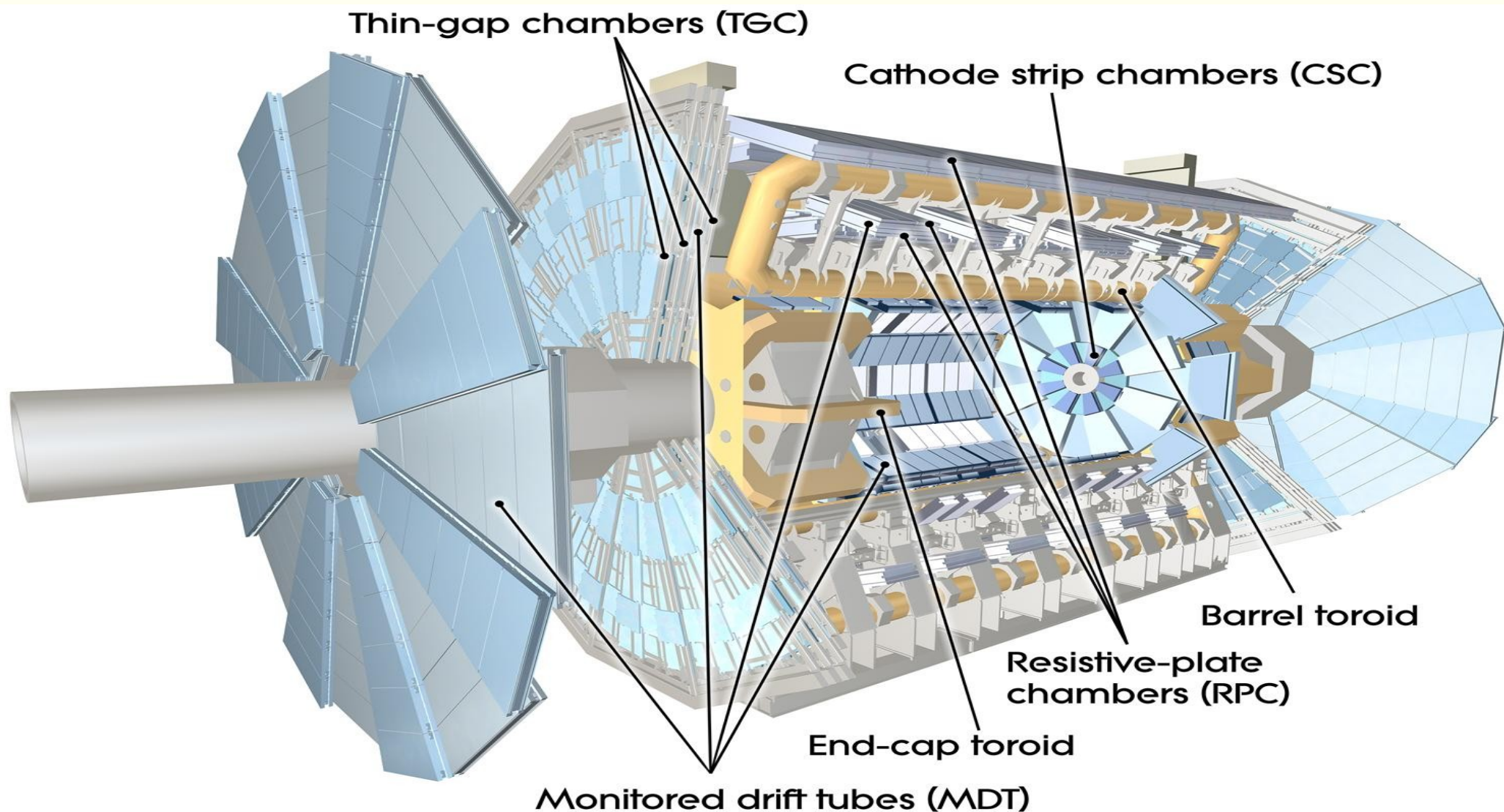
ako aj vynikajúcim energetickým rozlíšením



Atlas - najväčší detektor častíc na svete

Konštrukcia a princípy

- ♦ Miónový systém detekuje slabointeragujúce mióny, ktoré prešli kalorimetrami. Plynová technológia.



Atlas - najväčší detektor častíc na svete

Konštrukcia a princípy

- ◆ Miónový systém tvorí podstatnú časť objemu Atlasu

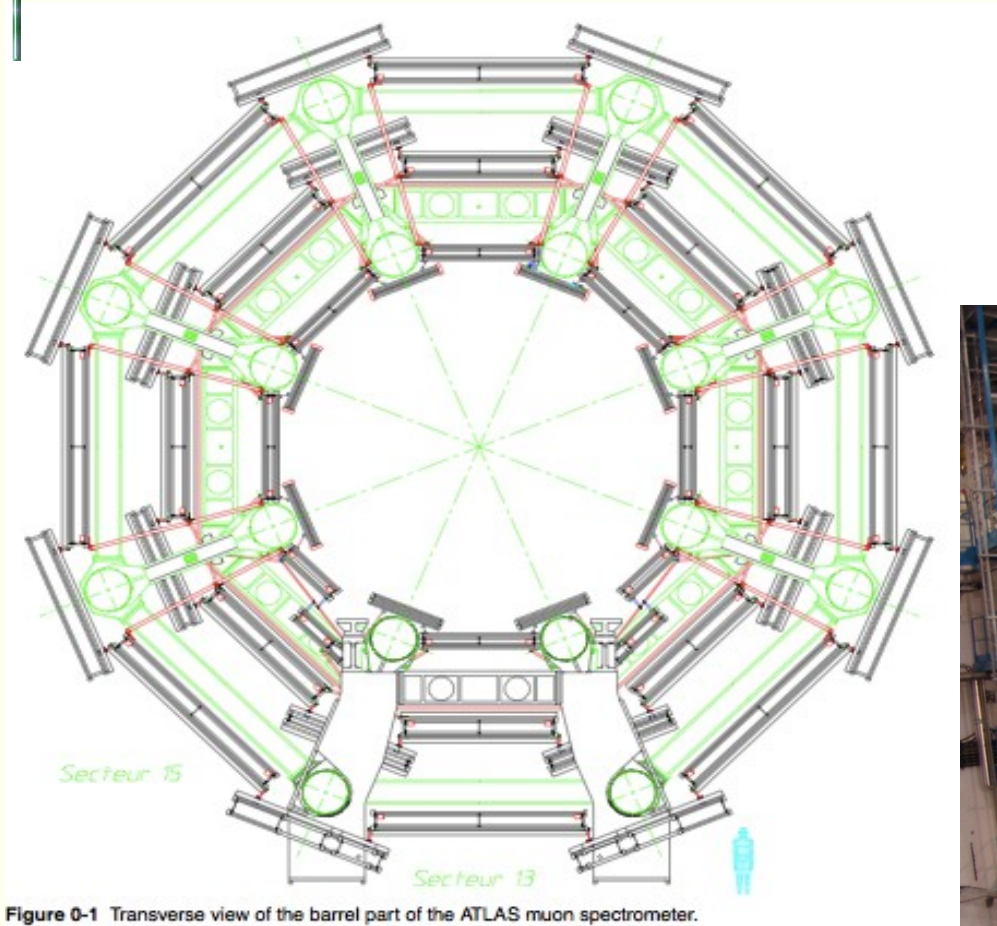
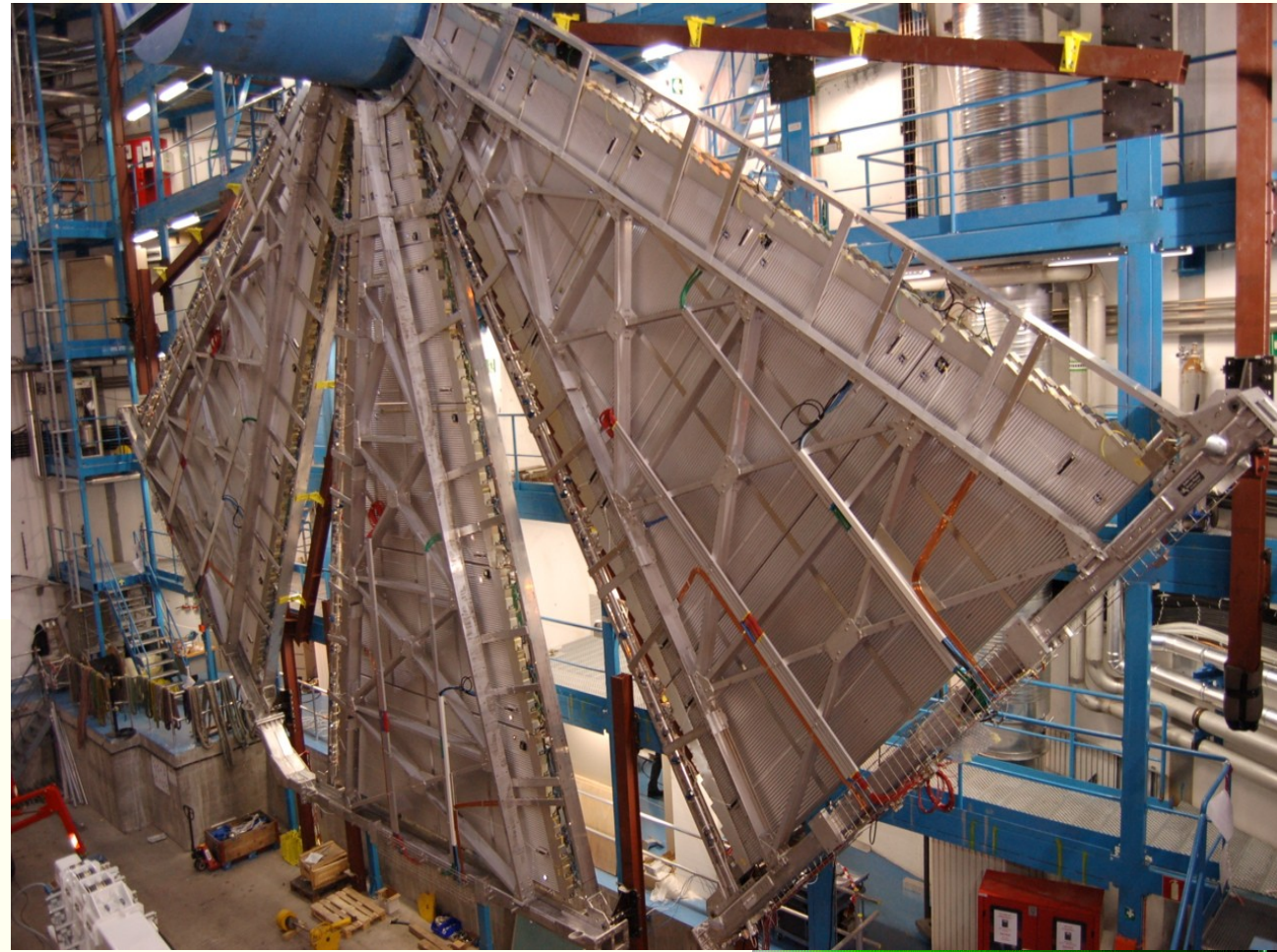


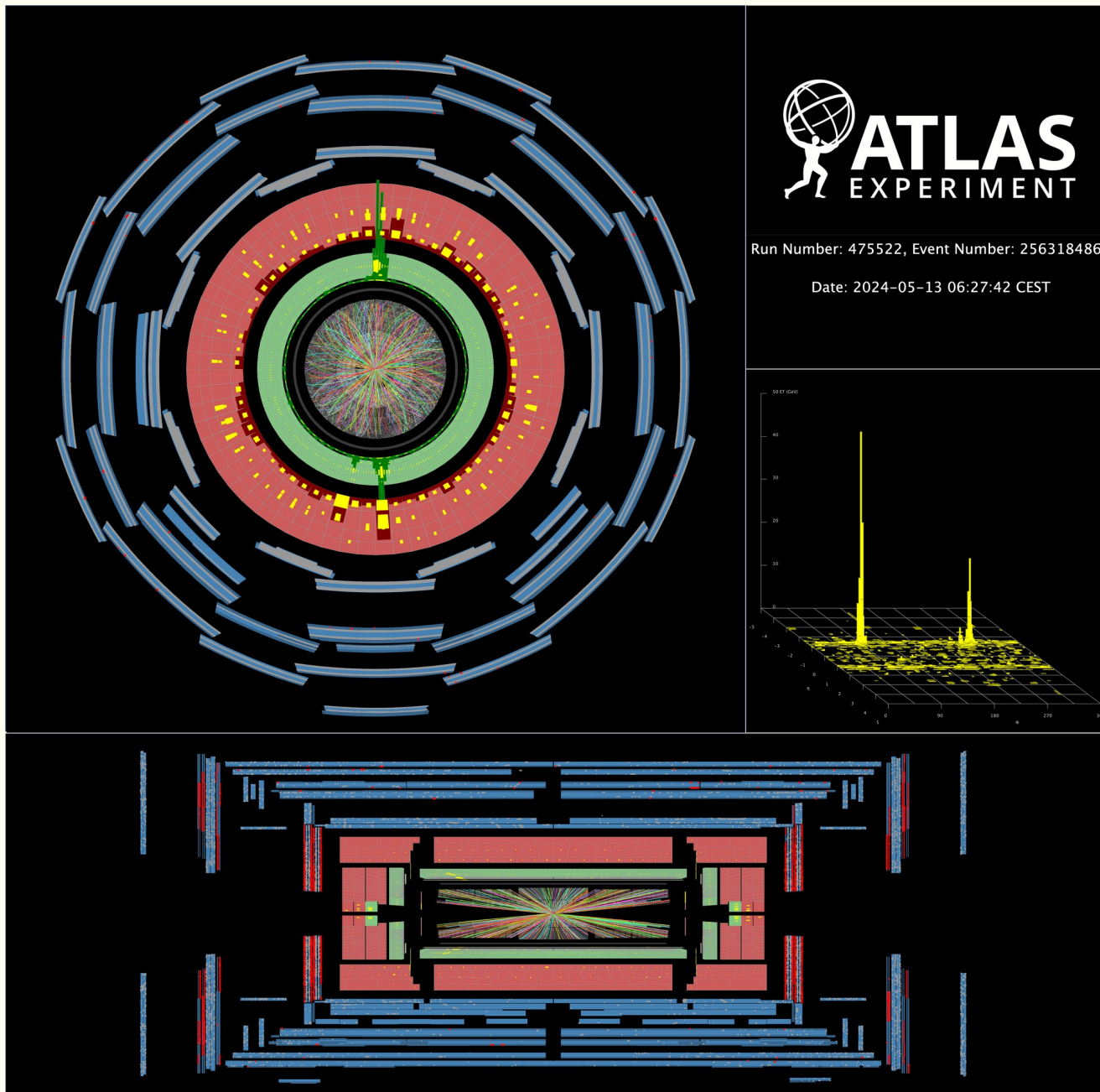
Figure 0-1 Transverse view of the barrel part of the ATLAS muon spectrometer.



Atlas - najväčší detektor častíc na svete

Konštrukcia a princípy

- Ilustrácia reálnej práce, konkrétny prípad zachytený tento rok:



Konštrukcia a princípy

- ◆ Magnety - solenoid okolo vnútorného detektora, toroidy pre miónový systém

End-Cap Toroid parametre

5.0 m axiálna dĺžka

10.7 m outer diameter

2x8 cievok

2x0.25 GJ uložená energia

2x160 ton studenej hmotnosti

2x240 ton celková hmotnosť

4 T pole na supravodiči

2x13 km Al/NbTi/Cu vodiča

20.5 kA nominálny prúd

4.7 K pracovná teplota

Barrel Toroid parametre

25.3 m dĺžka

20.1 m vonkajší priemer

8 cievok

1.08 GJ uloženej energie

370 ton studená hmotnosť

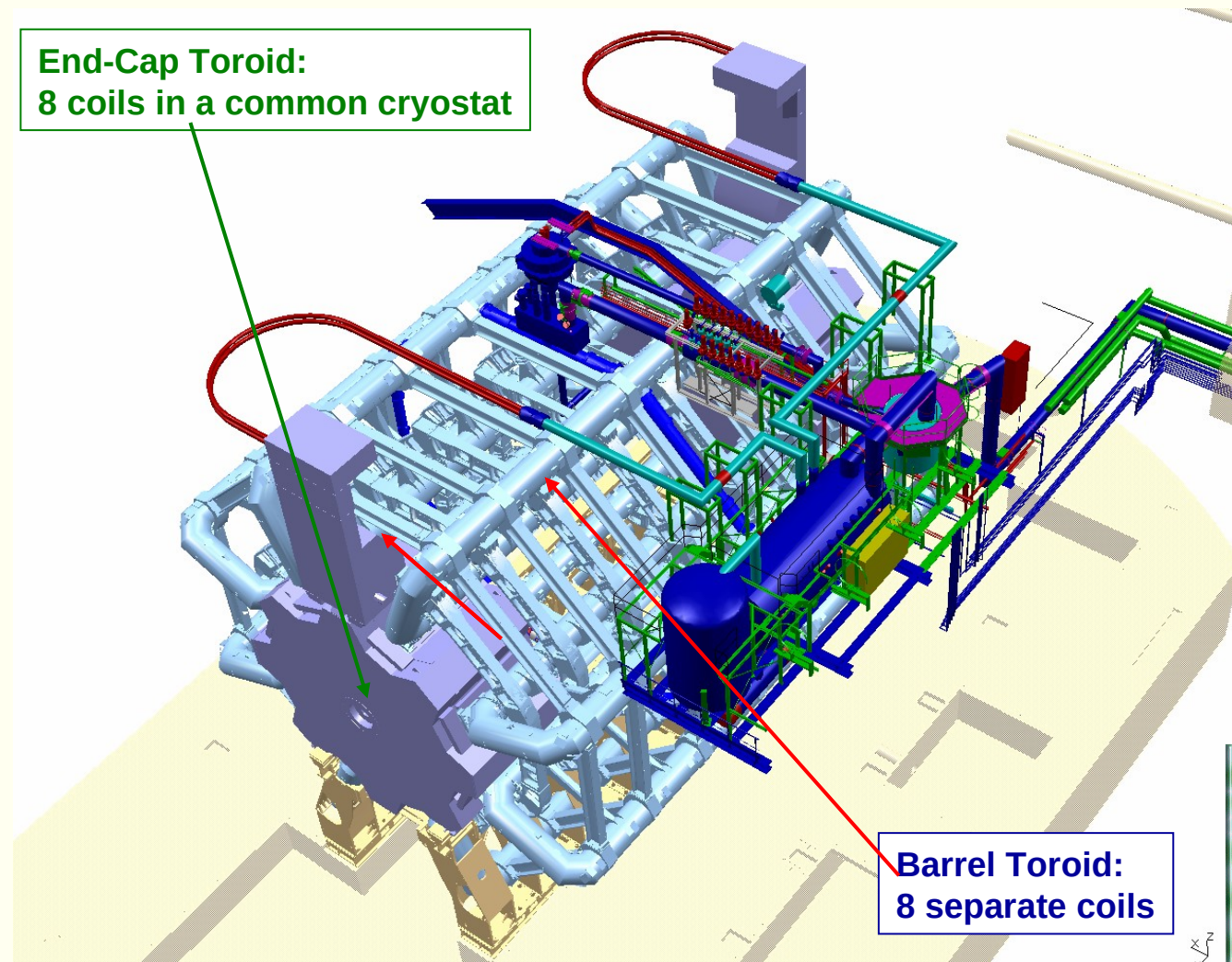
830 ton celková hmotnosť

4 T pole na supravodiči

56 km Al/NbTi/Cu vodiča

20.5 kA nominálny prúd

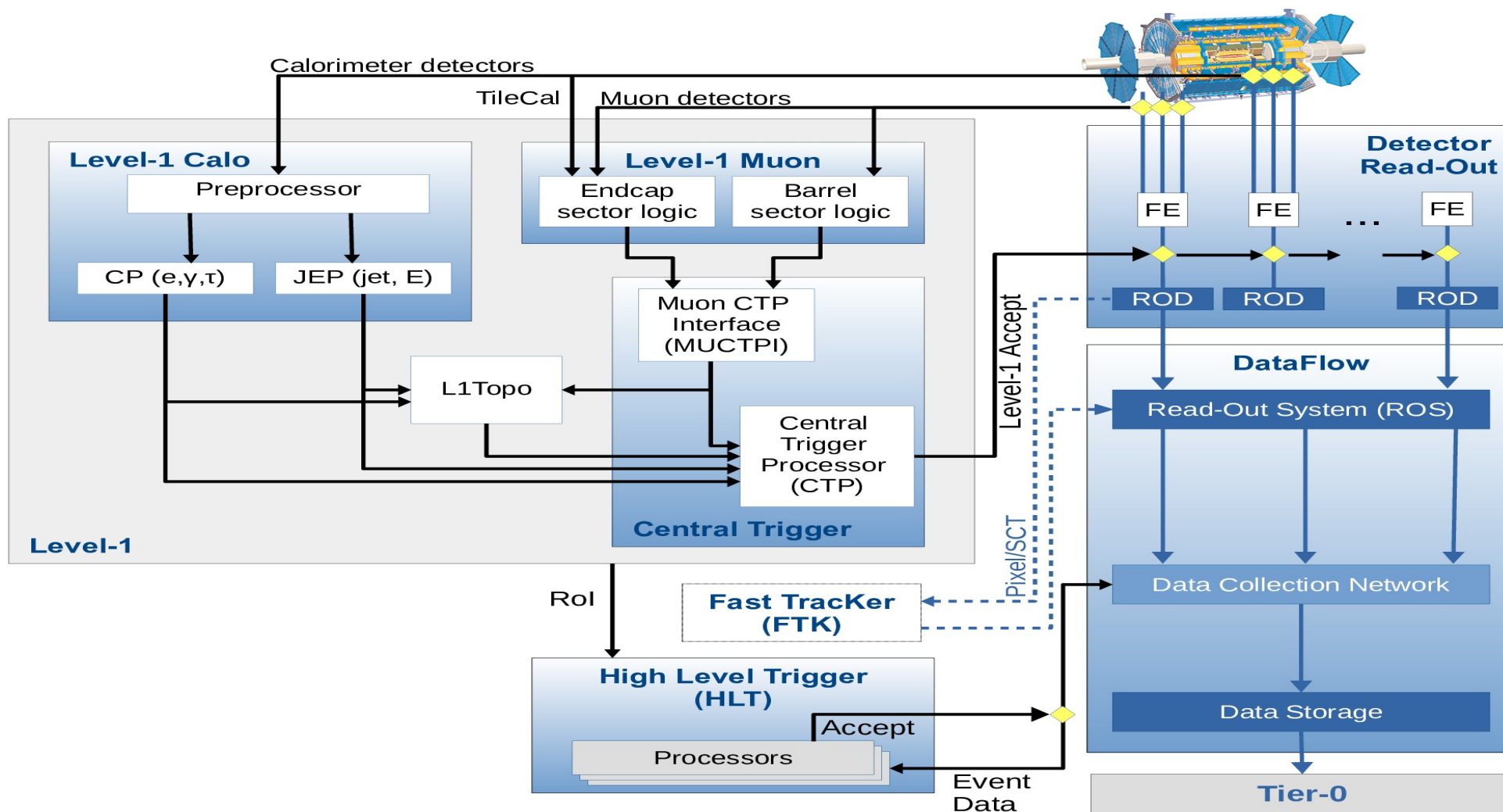
4.7 K pracovná teplota



Atlas - najväčší detektor častíc na svete

Konštrukcia a princípy

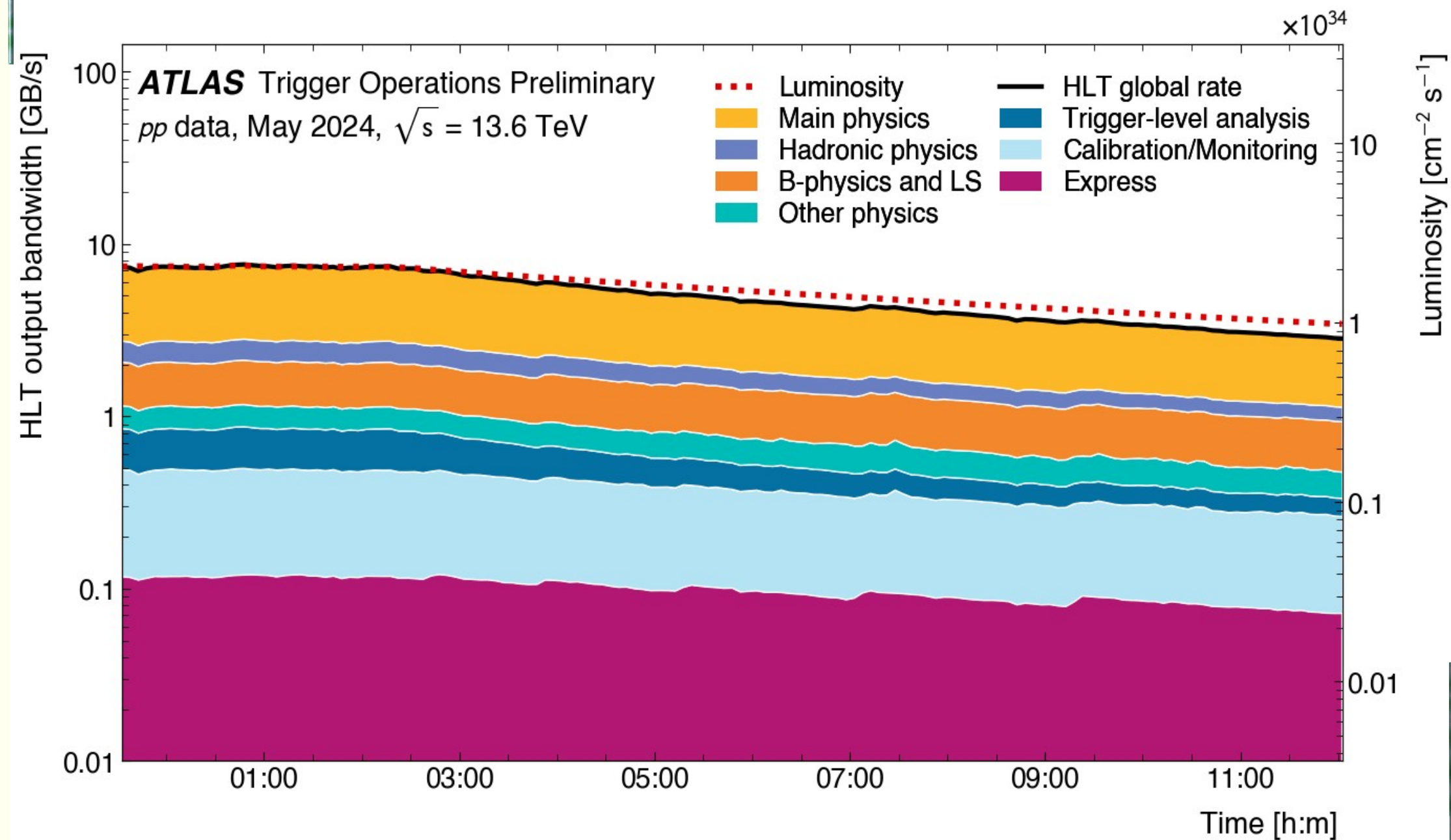
- Okrem detektorov je dôležitá súčasť trigger - systém ktorý dostatočne rýchlo a čo najpresnejšie zistí, či zrážka a jej produkty sú zaujímavé a treba ich spracúvať, alebo nie
- Dvojvrstvový systém, prvá vrstva využíva špecializovaný hardware, ďalšia štandardné PC technológie v spojení s širokopriepustnou sieťou a špecializovaným softwarom



Atlas - najväčší detektor častíc na svete

Konštrukcia a princípy

- Trigger -filtrované dáta - závislosť na luminozite, počas runu



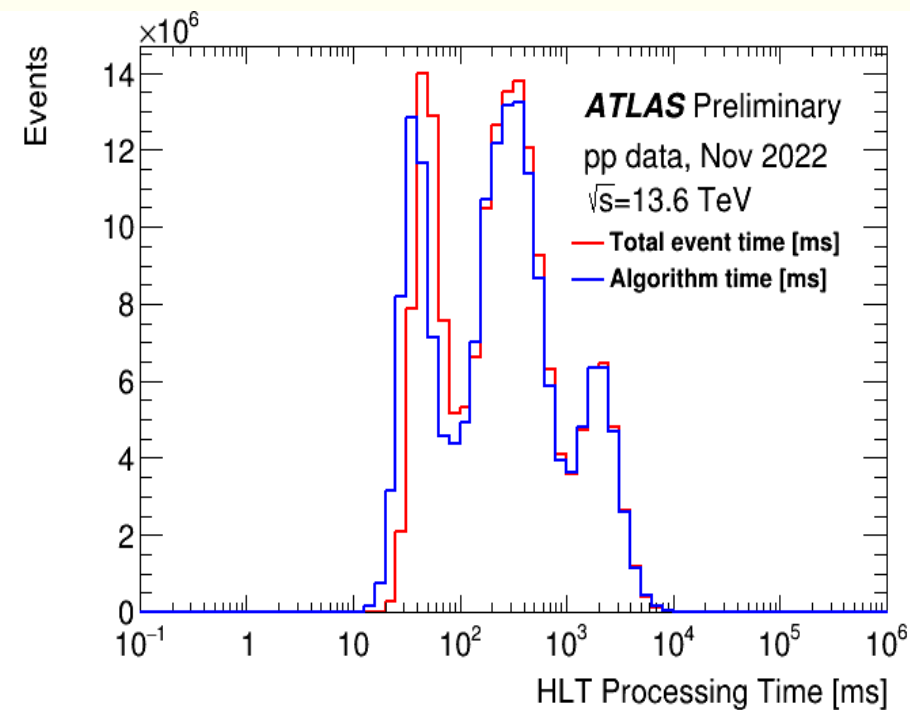
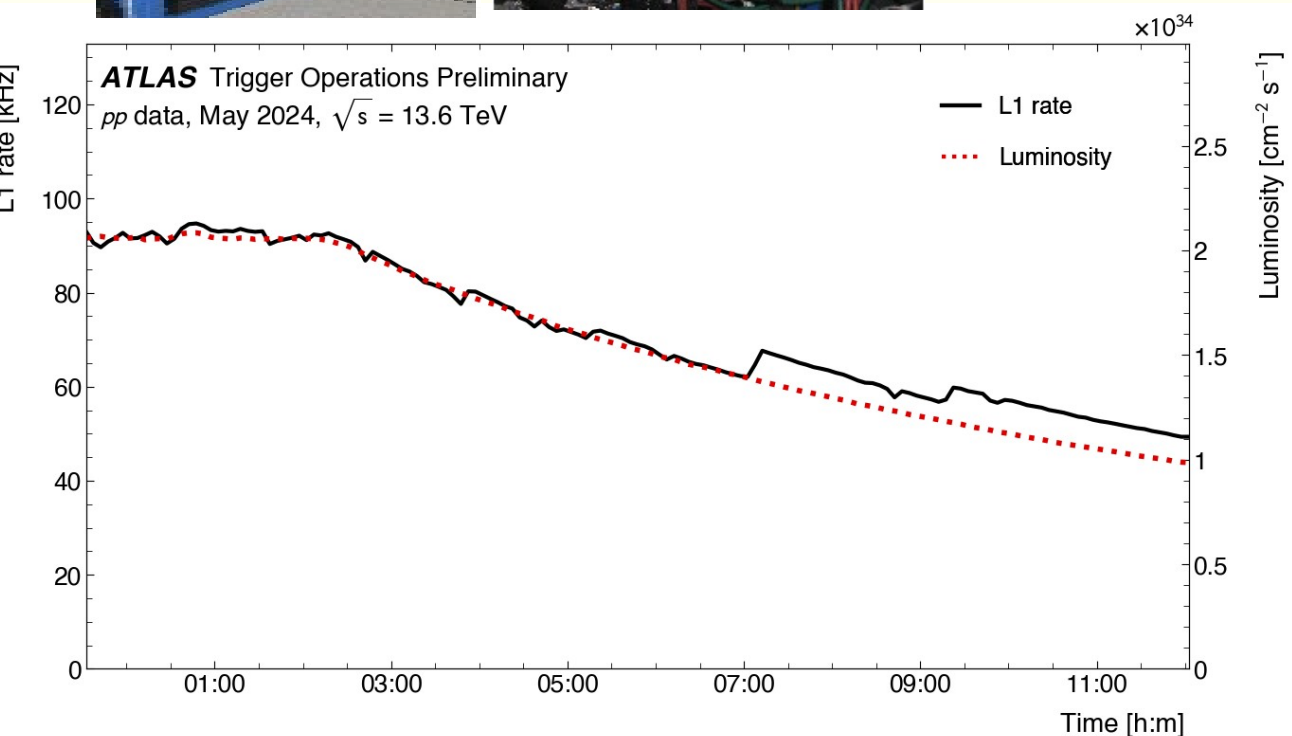
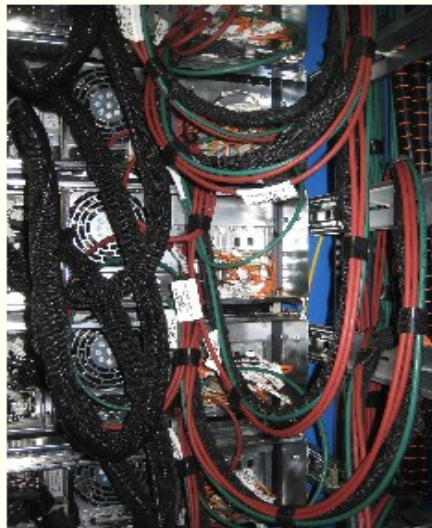
Atlas - najväčší detektor častíc na svete

Konštrukcia a princípy

◆ DAQ - zber a uloženie dát, monitoring

počítače druhej úrovne triggra

ROS-vyčítanie dát z detektorov



Konštrukcia a princípy

- ◆ Všetky detektory potrebujú množstvo podporných systémov:
 - ◆ elektrický a sieťový rozvod
 - ◆ ventilácia a chladenie
 - ◆ kryogenika (magnet, LAr kalorimetre)
 - ◆ bezpečnostné a monitorovacie systémy
 - ◆ počítačová infraštruktúra
- ◆ Všetky tieto subsystémy, ako aj detektory potrebujú ľudskú obsluhu, napriek vysokému stupňu automatizácie, mnohé súčasti sú vlastne prototypy, a treba sa naučiť ich ovládať, nájsť možné problémy,....
- ◆ Samostatná kapitola je počítačová infraštruktúra na rekonštrukciu a analýzu dát - používa sa najmodernejšia technológia “počítačového gridu”
- ◆ Konštrukcia a testovanie diverzifikované do mnohých spolupracujúcich inštitúcií, často aj do priemyslu, ak bol schopný splniť náročné požiadavky
- ◆ Slovensko sa tiež zúčastnilo ako konštrukcie, tak aj momentálne prispieva na prevádzku detektora a analýzu dát

Ľudia a prevádzka

- Nielen detektorom a technológiou je ATLAS najväčší na svete, je aj najväčším vedeckým kolektívom pracujúcim na spoločnom projekte - vyše 6000 pracovníkov (z toho 3000 vedeckých pracovníkov) z vyše 185 inštitúcií v 42 krajinách (stav k marcu tohto roka)



Ľudia a prevádzka

- Okrem počtu krajín, ktoré sú priamo zapojené do kolaborácie, je zaujímavá aj štatistika krajín, z ktorých pochádzajú ľudia spolupracujúci na detektore. Vidieť krásne dosah ATLAS kolaborácie vo svete, 103 krajín



Ľudia a prevádzka

- ◆ Nad činnosťou celého experimentu dozerajú ako pracovníci CERNu (všeobecná infraštruktúra), tak samotní zúčastnení vedeckí pracovníci (detektor a spracovanie dát), je povinnosťou každého autora participovať na smenách
- ◆ Nepretržité smeny v riadiacom stredisku, on-call experti na riešenie prípadných väčších problémov, experti na rozvoj systému, prípadne na veľké zásahy a opravy (zhruba raz za rok je možné vykonať údržbu a opravy na detektore). Väčšinou jednotlivé inštitúcie preberajú zodpovednosť za istú časť systému
- ◆ Dôležitou aktivitou sú mítingy a porady, kolaborácia funguje ako samoregulujúci sa organizmus, neexistuje silná hierarchia



Atlas - najväčší detektor častíc na svete

Ľudia a prevádzka

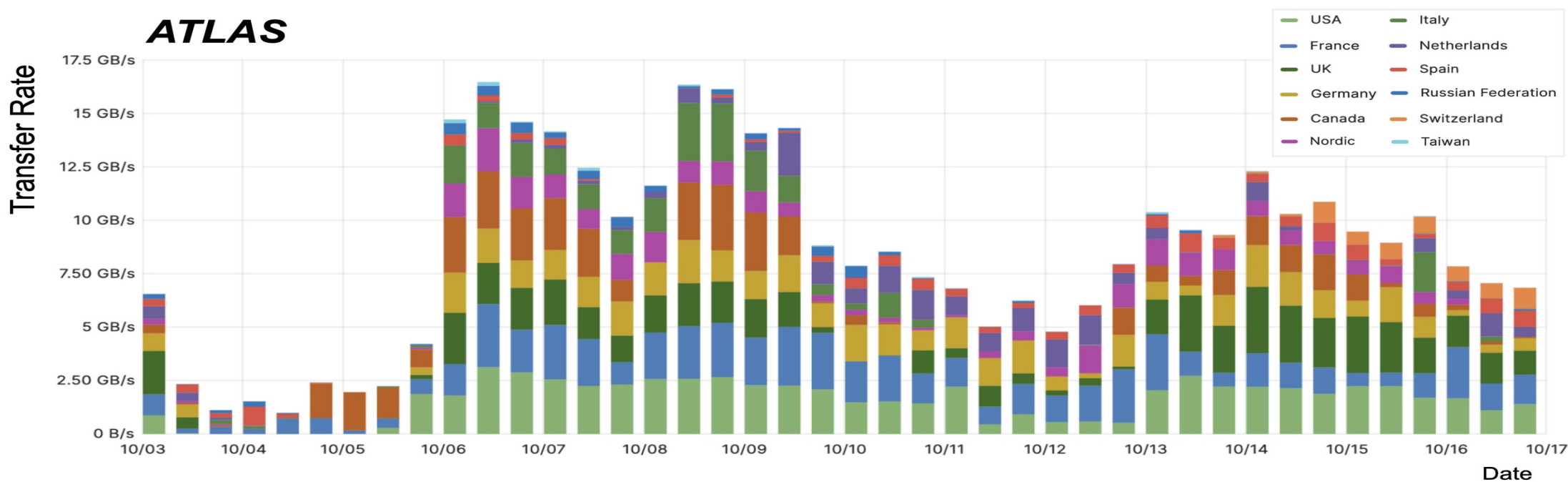
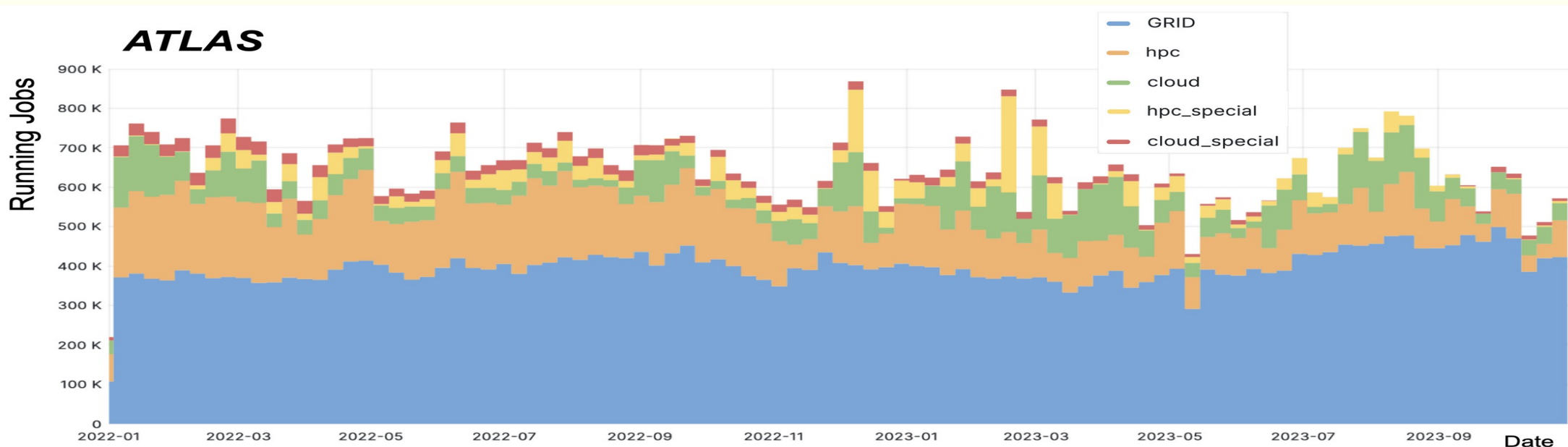
- ♦ Aktívna účasť slovenských fyzikov a technikov



Atlas - najväčší detektor častíc na svete

Prevádзка - výpočtová technika

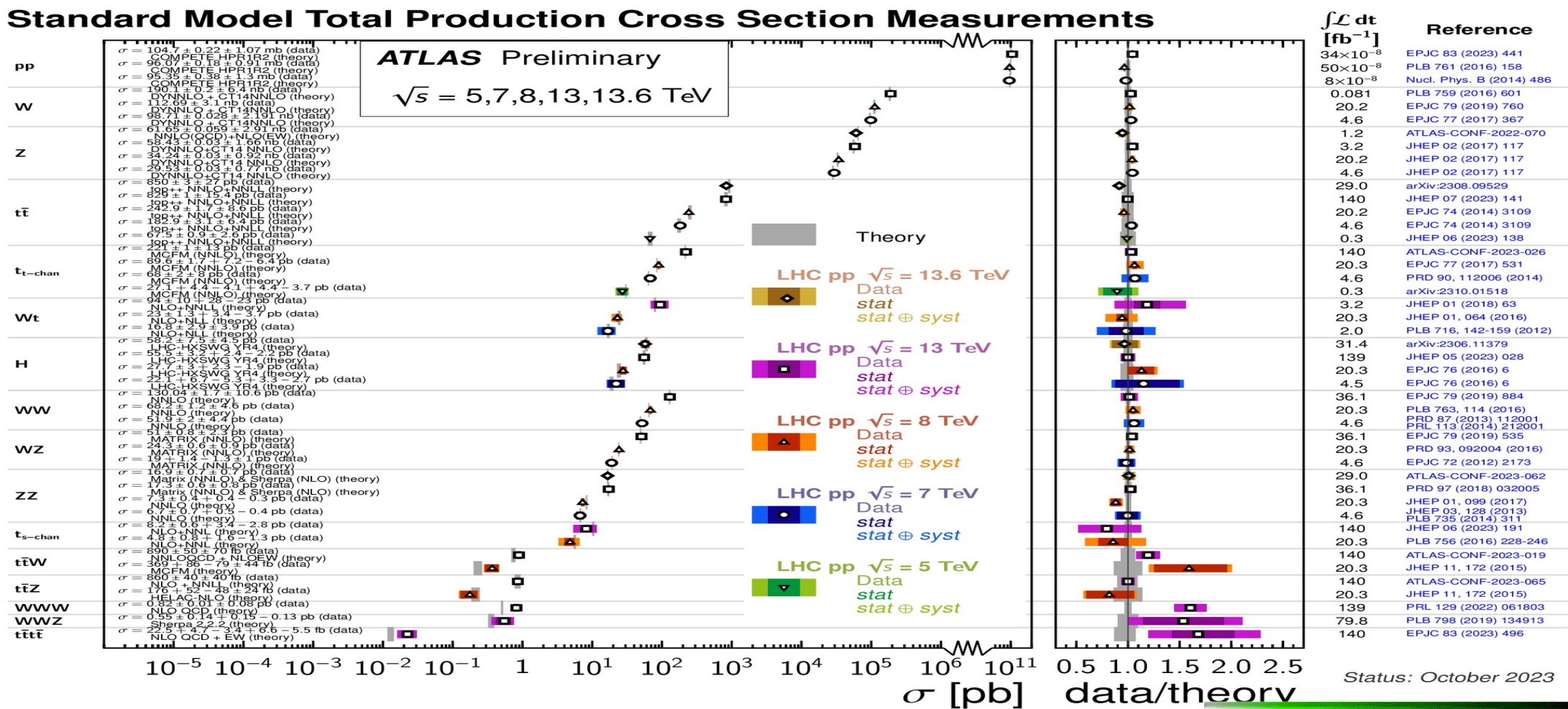
- ◆ Spracovanie dát na gride, počet bežiacich úloh a objemy prenášaných dát



Budúcnosť

- ◆ Detektor bol plánovaný na 20-25 rokov prevádzky, LHC začalo poskytovať zrážky v decembri 2009, reálnu štatistiku naberá od roku 2011
- ◆ Výsledky sú široko známe - potvrdenie Higgsovho bozónu, základné premeranie jeho parametrov a výrazné ohraničenia alternatívnych modelov, nakoľko všetky doterajšie merania potvrdzujú (v rámci presnosti merania) predpovede ŠM

Standard Model Total Production Cross Section Measurements



◆ Budúcnosť

- ◆ Momentálne LHC pracuje a detektory nabierajú dáta v tzv. Run-3, v roku 2026 začne odstávka, počas ktorej bude upgradnutý na podstatne väčšiu luminozitu (počet zrážok za jednotku času), až 10krát
- ◆ Doterajšie výsledky merania Higgsovho bozónu a parametrov Štandardného modelu potvrdili teoretické predpovede a zatiaľ nenašli nič, čo by sa modelu vymykalo
- ◆ Mame nádej, že so zvýšenou luminozitou objavíme náznaky novej fyziky (hocičo čo SM nie je schopný predpovedať), ale určite premeriame s veľkou presnosťou vlastnosti Higgsovho bozónu
- ◆ Ak detektor ukáže svoju životnosť aj po skončení Run-4, je možné že predĺži prevádzku až do rokov 2040-2045
- ◆ Projekt naozaj dlhodobý, dajú sa v jeho rámci nájsť mnohé výskumné témy, aj s ktorými sa pôvodne nerátalo
- ◆ Aktívna slovenská účasť v budúcnosti potrebuje zapojenie študentov
- ◆ Ako dlhodobý projekt má široké možnosti pre zapojenie sa v rôznych oblastiach
- ◆ Vedci paralelne už rozmýšľajú o detektoroch pre budúcu generáciu urýchľovačov