ALFA

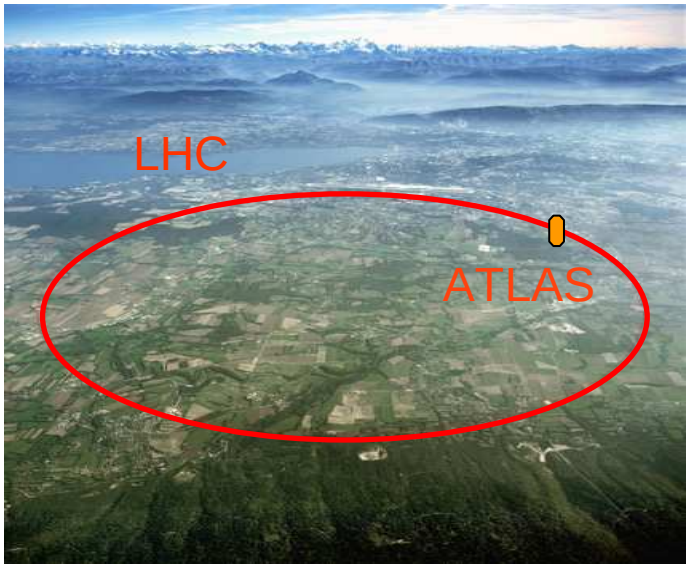
(**A**bsolute **L**uminosity measurement **F**or **A**tlas)

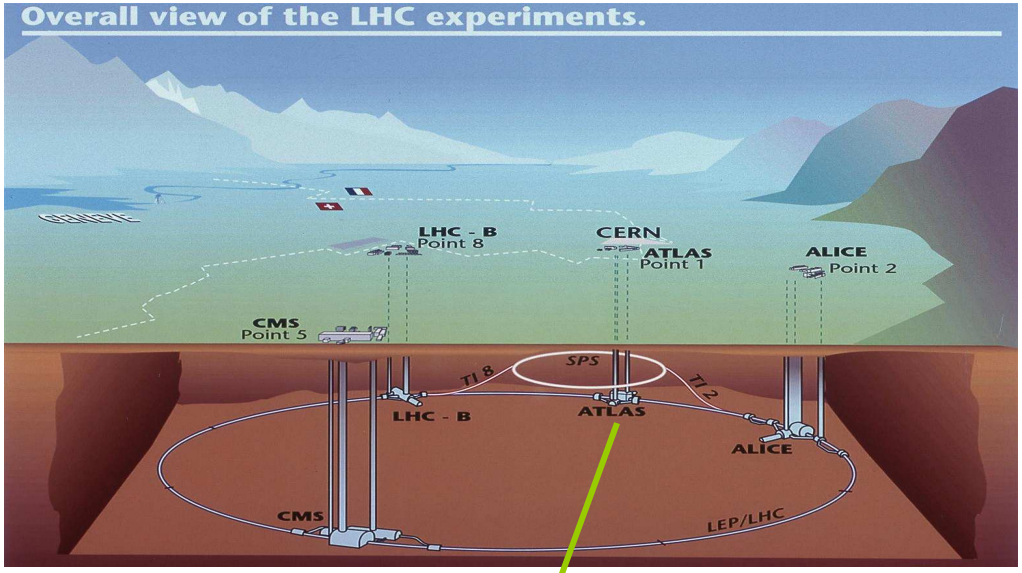
měření luminosity a difrakce

Tomáš Sýkora

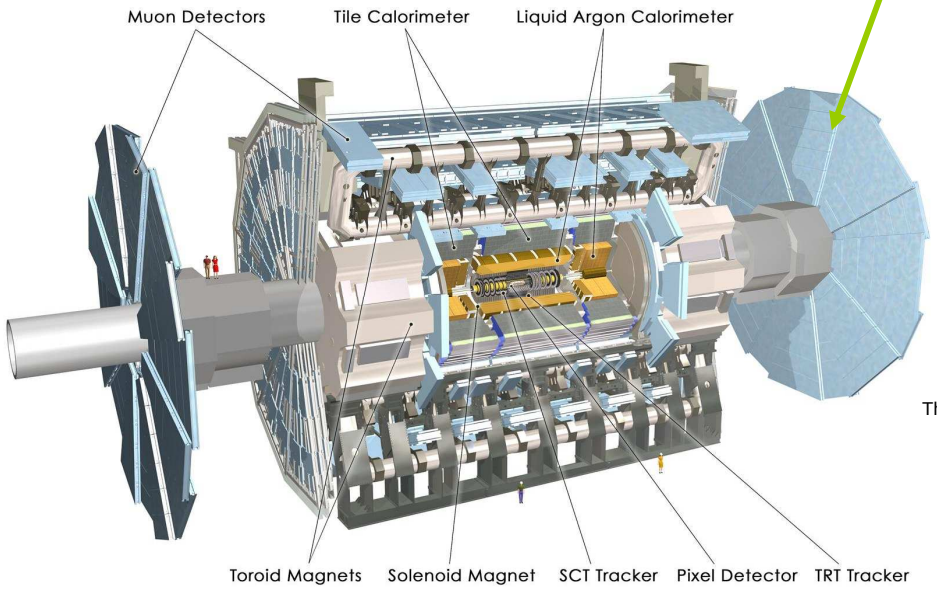
Ústav částicové a jaderné fyziky
Matematicko-fyzikální fakulta
Univerzita Karlova v Praze

ATLAS v rámci Large Hadron Collider (LHC)





detektor ATLAS



The ATLAS Experiment at CERN, http://atlas.ch

ATLAS – fyzika v dopředné oblasti

fyzika v dopředné oblasti byla původně orientovaná na

- **měření luminosity pomocí římských hrnců (Roman Pots – RP) á la TOTEM***
- **monitoring luminosity pomocí detektoru čerenkovského typu LUCID****
- **detekci neutronů (ZDC)**

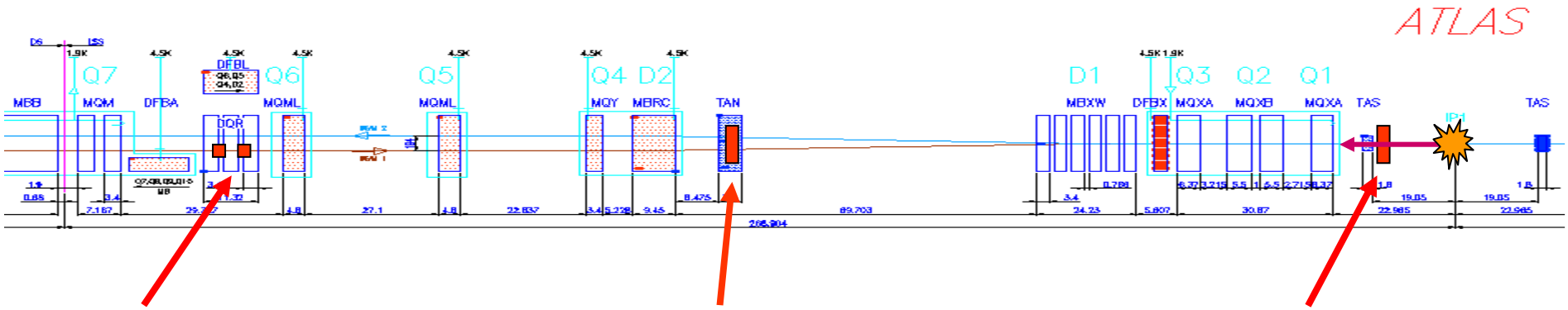
nicméně procesy

- **tvrdé & měkké difrakce**
- **dvojité pomeronové výměny**

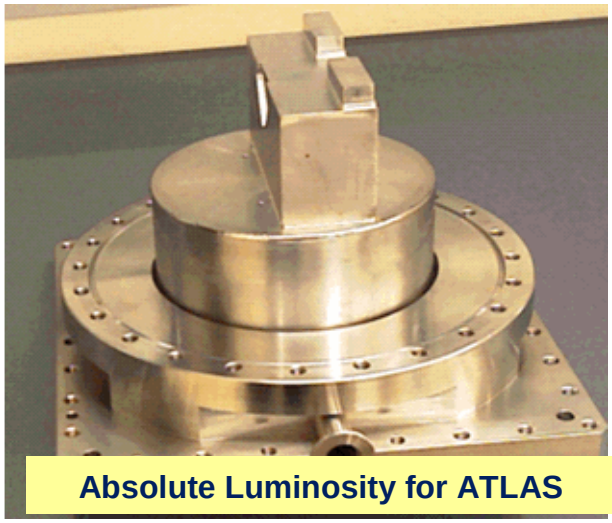
je možno, při splnění určitých podmínek, studovat pomocí kombinované informace z centrálního detektoru & detektorů v RP (ALFA) nebo „Hamburg movable beam pipe" (AFP)

* TOTal Elastic and diffractive cross section Measurement
** LUminosity Cherenkov Integrating Detector

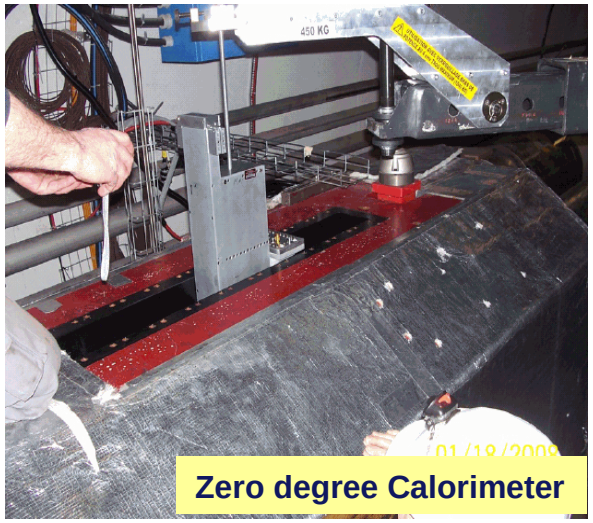
ATLAS - dopředné detektory (schválené)



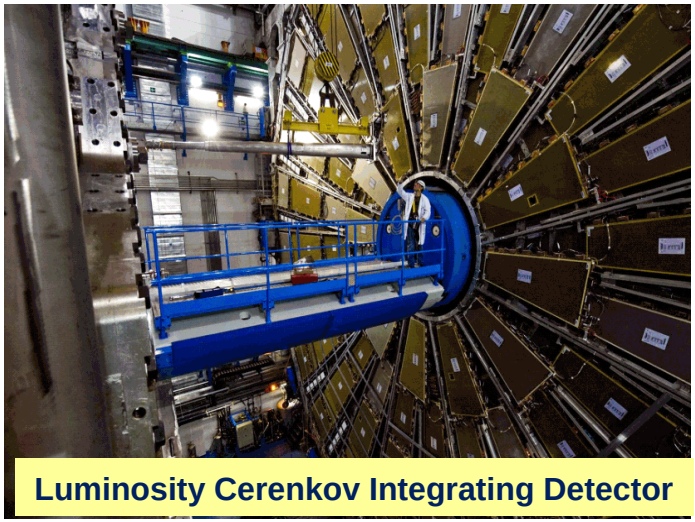
ALFA, 240 m **ZDC, 140 m** **LUCID, 17 m**



Absolute Luminosity for ATLAS



Zero degree Calorimeter



Luminosity Cerenkov Integrating Detector

luminosita & její měření

luminosita

luminosita (Wikipedia)

"*the number of particles per unit area per unit time times the opacity of the target, usually expressed in either the cgs units* $cm^{-2}\ s^{-1}$ *or* $b^{-1}\ s^{-1}$*.*
The integrated luminosity is the integral of the luminosity with respect to time. The luminosity is an important value to characterize the performance of an accelerator."

$$\frac{\mathrm{d}N}{\mathrm{d}t} = L\sigma \qquad \frac{\mathrm{d}\sigma}{\mathrm{d}\Omega} = \frac{1}{L}\frac{\mathrm{d}^2 N}{\mathrm{d}\Omega \mathrm{d}t}$$

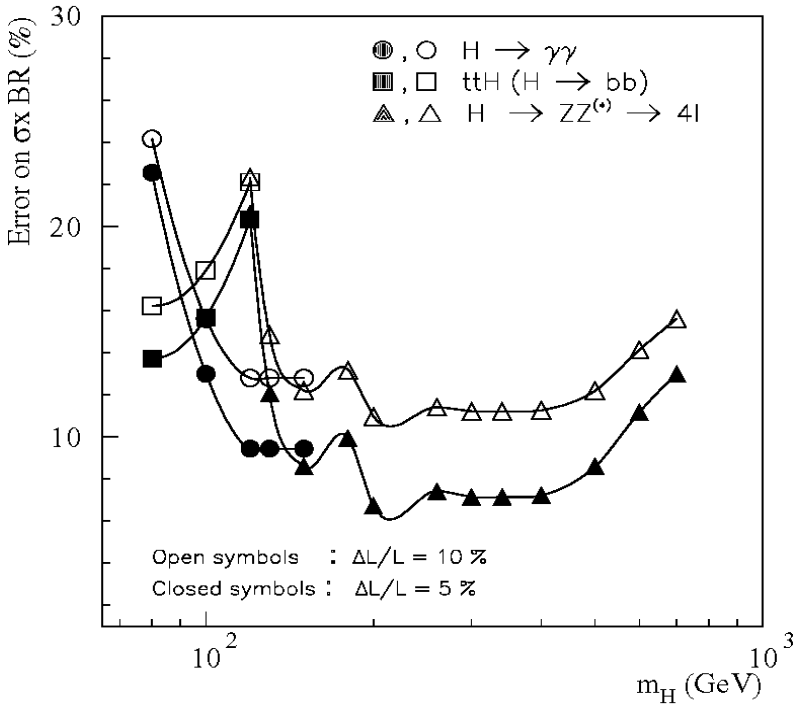
L – luminosita, N – počet interakcí, σ – totální účinný průřez

potřeba stanovení luminosity

integrovaná luminosita → účinný průřez ➡ přesnost – co nejvyšší

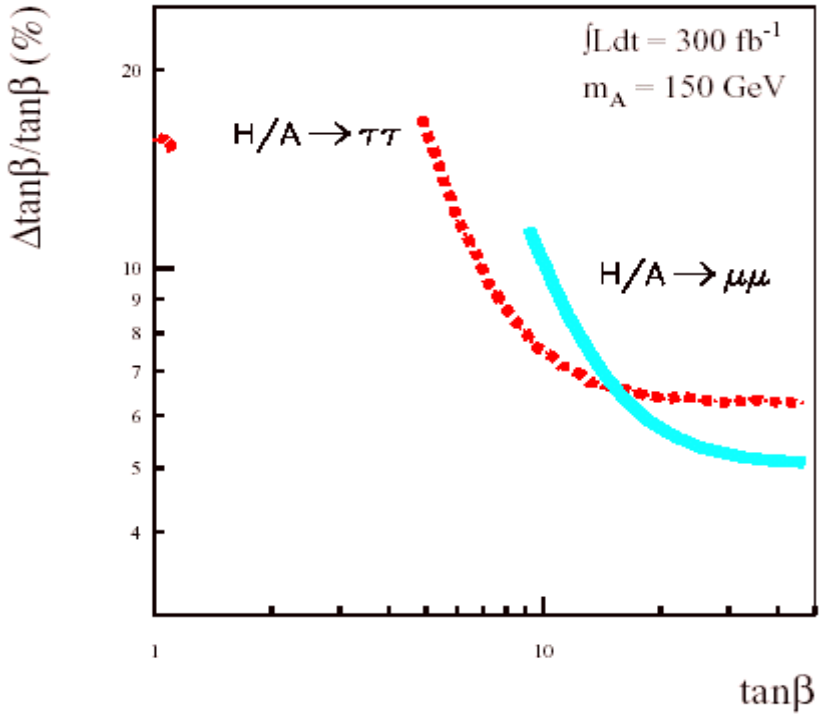
aktuální luminosita (bunch by bunch) ➡ korekce pile-up, beam-tuning

význam přesného stanovení luminosity – příklady



Vliv relativní přesnosti luminosity na přesnost měření $\sigma_H \times BR$ pro různé kanály, jako funkce m_H, pro $\int L dt$ = 300 fb^{-1}. Je to dominující nepřesnost: 10% (prázdné symboly), 5% (plné symboly).

[ATLAS TDR 15, p. 732]



Systematická chyba dominovaná stanovením luminosity
MSSM model, tanβ=v_2/v_1, $v_{1,2}$ vakuové stř. hodnoty

[ATLAS TDR 15, p. 780]

měření luminosity

- použitím teoreticky velmi dobře známého procesu (σ) s vysokou četností *R*, *R* = d*N*/d*t*, např. inklusivní W/Z proces

$$L = \left[\frac{\mathrm{d}N}{\mathrm{d}t} \right] / \sigma$$

očekávaná přesnost ~ 5-10%, typický signál p_{Tlept} >25 GeV, $|\eta_{lept}|$< 2.5, E_{Tmiss} >25 GeV, izolovaný lepton

- použitím údajů s urychlovače

$$L = F \frac{f \sum_i N_1^i N_2^i}{(\sigma_x \sigma_y)_{\mathrm{ID}}} = \xi F \frac{f k_b N \gamma}{r_p \beta_{\mathrm{ID}}}$$

kde *f* (=11kHz) je beam-revolution frequency, *F*(=0.9) je nenulový „crossing angle" faktor,
$N_{1,2}^i$ je počet protonů ve srážejících se paketech, *ξ*(=0.0034) je „beam-beam tune-shift parameter",
k_b je počet paketů, *γ* is Lorentzův faktor pro svazek, r_p je klasický poloměr protonu

očekávaná přesnost 10%, může být lepší [ISR (Intersection Storage Ring) dosáhl 1%]
Helmut Bukhardt - Absolute Luminosity from Machine Parameters, Indico 10.04.2008
H. Burkhardt and P. Grafstrom, "*Absolute luminosity from machine parameters*", LHC-Project-Report-1019 (2007).

technika Van der Meer-a – transverse beam scans

vhodné pro velkou β* optiku a nízkou luminositu jinak je měření silně ovlivněno interakcí svazků [ATLAS TDR 14, p. 438]

- elastický rozptyl pro malé úhly ⁒

měření luminosity **elastický rozptyl na malých úhlech**

- použitím elastického rozptylu a kompletní četnosti *R*

$$\frac{d\sigma_{\rm el}}{dt} = \frac{1}{16\pi s^2}|A_{\rm el}|^2 = \frac{1}{16\pi s^2}(|{\rm Re}\,A_{\rm el}|^2 + |{\rm Im}\,A_{\rm el}|^2) = \frac{1}{16\pi s^2}|{\rm Im}\,A_{\rm el}|^2\left(1 + \frac{|{\rm Re}\,A_{\rm el}|^2}{|{\rm Im}\,A_{\rm el}|^2}\right)$$

$$\sigma_{\rm tot} = \frac{1}{s}{\rm Im}\,A_{\rm el}|_{t=0} \longrightarrow = \frac{1}{16\pi s^2}\sigma_{\rm tot}^2 s^2\left(1 + \frac{|{\rm Re}\,A_{\rm el}|^2}{|{\rm Im}\,A_{\rm el}|^2}\right)$$

$$\rho = \frac{{\rm Re}\,A_{\rm el}}{{\rm Im}\,A_{\rm el}}\bigg|_{t=0} \longrightarrow = \frac{\sigma_{\rm tot}^2}{16\pi}(1+\rho^2)$$

$$\sigma_{\rm tot} = \frac{16\pi}{1+\rho^2}\frac{{\rm d}R_{\rm el}/{\rm d}t|_{t=0}}{R_{\rm tot}} \qquad L = \frac{1}{16\pi}\frac{R_{\rm tot}^2}{{\rm d}R_{\rm el}/{\rm d}t|_{t=0}}(1+\rho^2)$$

$$R_{\rm x} = \sigma_{\rm x}\,L$$

problém s akceptancí pro vysoké η, bude zapotřebí odhad z MC

$$L = (1+\rho^2)a \Rightarrow a = \frac{L}{1+\rho^2} \Rightarrow \frac{\Delta L}{L} = \frac{2a\rho\Delta\rho}{L} = \frac{2\rho\Delta\rho}{1+\rho^2} \sim 2\rho\Delta\rho$$

$$\rho = 0.1361 \pm 0.0015\ {}^{+0.0058}_{-0.0025}$$

$$\frac{\Delta L}{L} \leqslant 2\rho\Delta\rho \leqslant 2 \cdot 0.15 \cdot 0.02 = 0.6\%$$

- použitím elastického rozptylu a totálního účinného průřezu

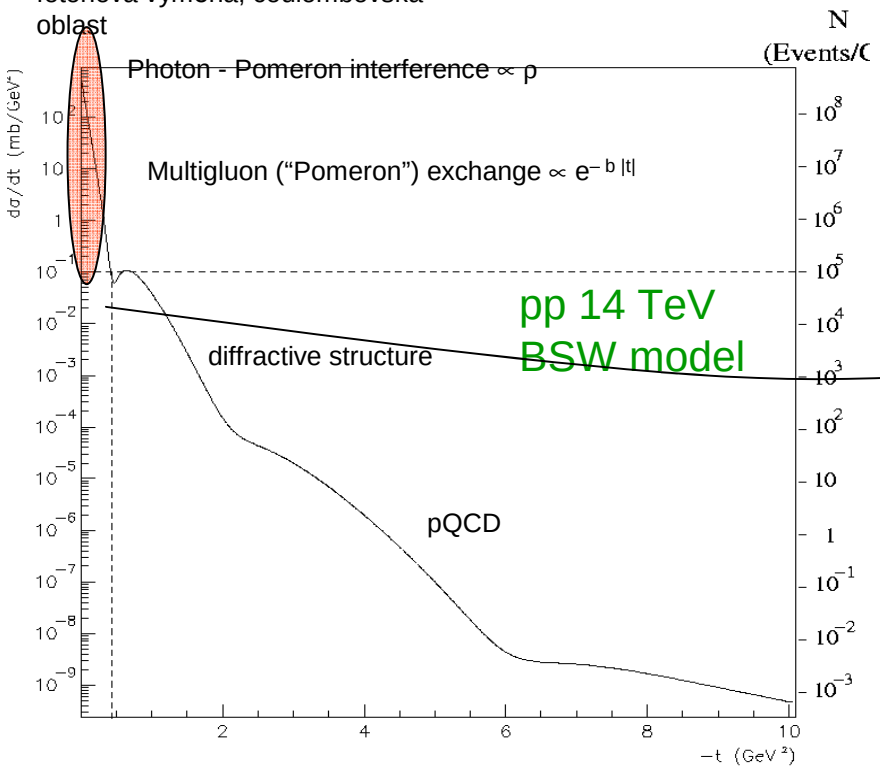
$$\frac{1}{L} = \frac{1}{16\pi}\frac{\sigma_{\rm tot}^2}{{\rm d}R_{\rm el}/{\rm d}t|_{t=0}}(1+\rho^2)$$

je nutno mít nezávislé měření σ_{tot} (např. z TOTEMu)

měření luminosity – Coulombovská interakční oblast

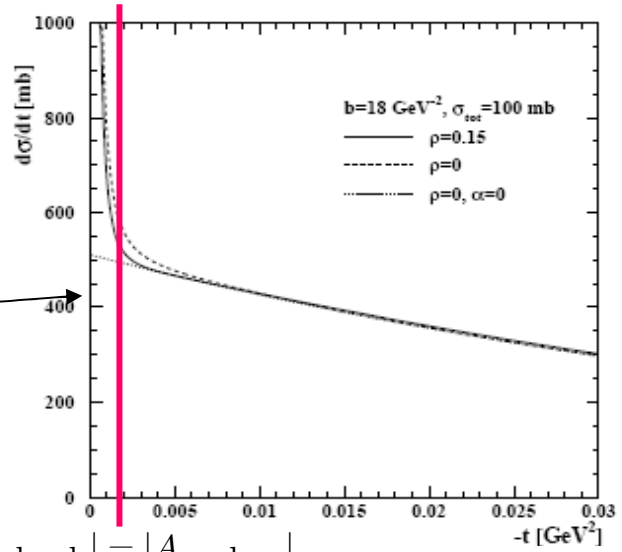
$$\frac{dN_{\mathrm{tot}}}{dt} \sim L\,|A_{\mathrm{coulomb}} + A_{\mathrm{nuclear}}|^2 = L\left[\frac{4\pi\alpha^2}{t^2} - \frac{\alpha\rho\sigma_{\mathrm{tot}}}{t}\exp\left(-\frac{B|t|}{2}\right) + \frac{\sigma_{\mathrm{tot}}^2}{16\pi}(1+\rho^2)\exp(-B|t|)\right]$$

fotonová výměna, coulombovská oblast



BSW - M. Bauer, B. Stech and M. Wirbel, Z. Phys. C34, 103 (1987)

volné parametry L, B, ρ, σ_{tot}



$|A_{\mathrm{coulomb}}| = |A_{\mathrm{nuclear}}|$

relevantnost/kontroverznost +

zjednodušeno, musíme uvážit

- electromagnetický form faktor
- závislost ρ a B na t
- saturační efekty

teorie

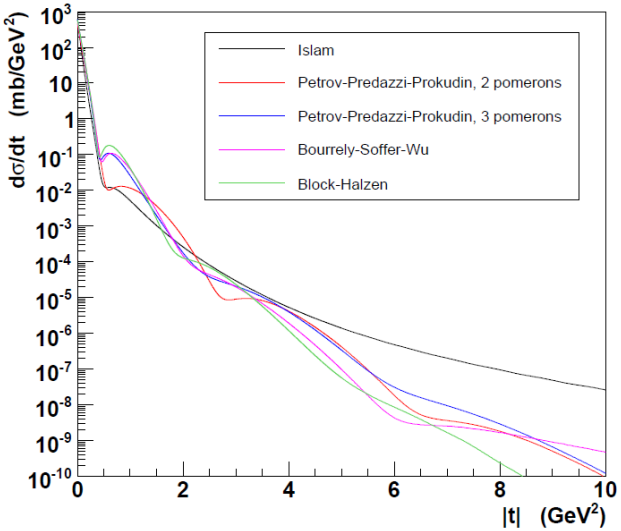
- akceptanci

měření, MC

$$-t\big|_{|A_{\mathrm{coulomb}}|=|A_{\mathrm{nuclear}}|} \approx \frac{8\pi\alpha}{\sigma_{\mathrm{tot}}} \approx 6\times10^{-4}\ \mathrm{GeV}^2$$

ke zjednodušením

(HUBERT NIEWIADOMSKI – doctoral thesis, TOTEM, 2008)



• $|t| < 6.5 \times 10^{-4}$ GeV^2 (at $\sqrt{s}$=14TeV): The Coulomb region where elastic scattering is dominated by photon exchange: $d\sigma/dt \approx 1/t^2$.
• 10^{-3} GeV^2 < $|t|$ < 0.5 GeV : The nuclear region described in a simplified way by "single-Pomeron exchange"* with an approximately exponential cross section $d\sigma/dt \approx e^{-B|t|}$ (Figure 3.7, left). This quasi-exponential domain is important for the extrapolation of the nuclear part dN_{el}/dt of the differential counting-rate to $t = 0$, needed for the measurement of σ_{tot}. The t-dependence of the exponential slope $B(t) = d/dt \ln d\sigma/dt$ reveals slight model dependent deviations from the exponential shape (Figure 3.7, right). This theoretical uncertainty contributes to the systematic error of the total cross section measurement.
• Between the above two regions, the nuclear and Coulomb scattering interfere, complicating the extrapolation of the nuclear cross-section to $t = 0$.
• 0.5 GeV^2 < $|t|$ < 1 GeV^2: A region exhibiting the diffractive structure of the proton (diffractive peak).
• $|t|$ > 1 GeV^2: The domain of central elastic collisions at high $|t|$, described by perturbative QCD, e.g. in terms of triple-gluon exchange with a predicted cross-section proportional to $|t|^{-8}$. The model dependence of the predictions being very pronounced in this region, measurements will be able to test the validity of the different models.

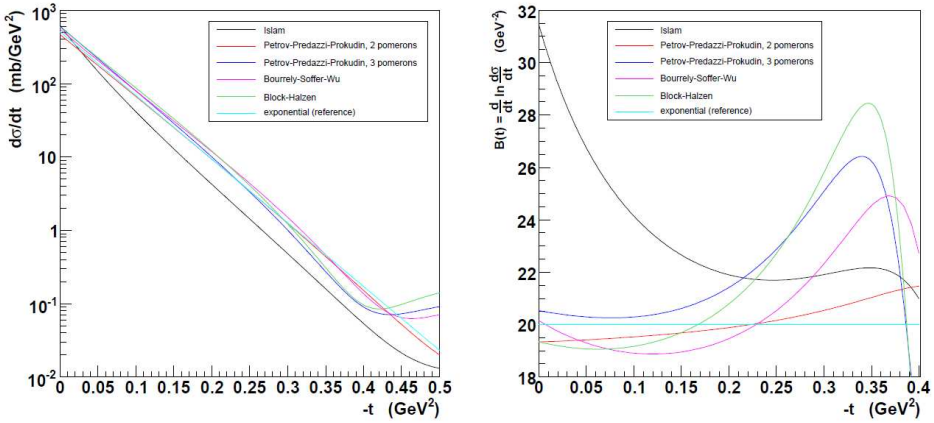


Figure 3.7: Left: Differential cross-section of elastic scattering at 14 TeV as predicted by various models, focussing on the quasi-exponential domain at low $|t|$. Right: Exponential slope of the differential cross-section. The deviations from a constant slope show how the cross-sections differ from a pure exponential shape.

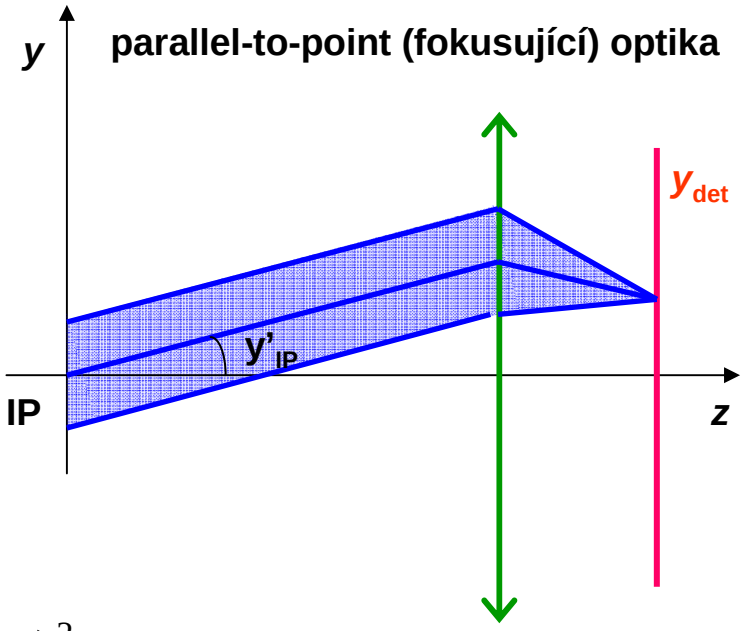
měření luminosity – výběr optiky

potřebujeme se dostat do oblasti $|t| = 6 \times 10^{-4}$ GeV^2 ➡ nutnost najít speciální optiku ➡ byla zvolena vysoká β optika, tzv. **paralel-to-point**

$$y = \sqrt{\beta/\beta_{IP}}\,(\cos\psi + \alpha^* \sin\psi)\, y_{IP} + \sqrt{\beta\beta_{IP}}\,\sin\psi\, y'_{IP}$$

protože $\psi \sim \pi/2$ a $\alpha_{IP} \sim 0$:

$$y = \sqrt{\beta\beta_{IP}}\; y'_{IP}$$



$$-t = (p\vartheta)^2 \geqslant (py'_{IP})^2 = p^2 \frac{y^2}{\beta\beta_{IP}} = p^2 \frac{(n\sigma)^2}{\beta\beta_{IP}} = p^2 n^2 \frac{\varepsilon}{\beta_{IP}} \qquad \sigma = \sqrt{\varepsilon\beta}$$

pro $\varepsilon \sim 1\mu$m rad a bezpečnostní vzdálenost 15σ dostáváme $\beta_{IP} \sim 2600$m

luminosita & její měření – shrnutí

- existuje řada způsobů jak luminositu měřit
  - použitím známého procesu
  - použitím údajů z urychlovače
  - použitím elastického rozptylu

výzvou je použití coulombovské oblasti a zároveň technická realizace detektoru, současně se speciální urychlovací optikou

musíme splnit následující

- umístit detektory ~1.5 mm od os LHC svazků
- provozovat detektory v sekundárním vakuu uvnitř Římských hrnců
- dosáhnout rozlišení detektorů *sx* = *sy* pod 100 μm (cíl je 30 μm)
- mít detektor „bez hranice“ [edgeless] (< 100 μm)

LUCID

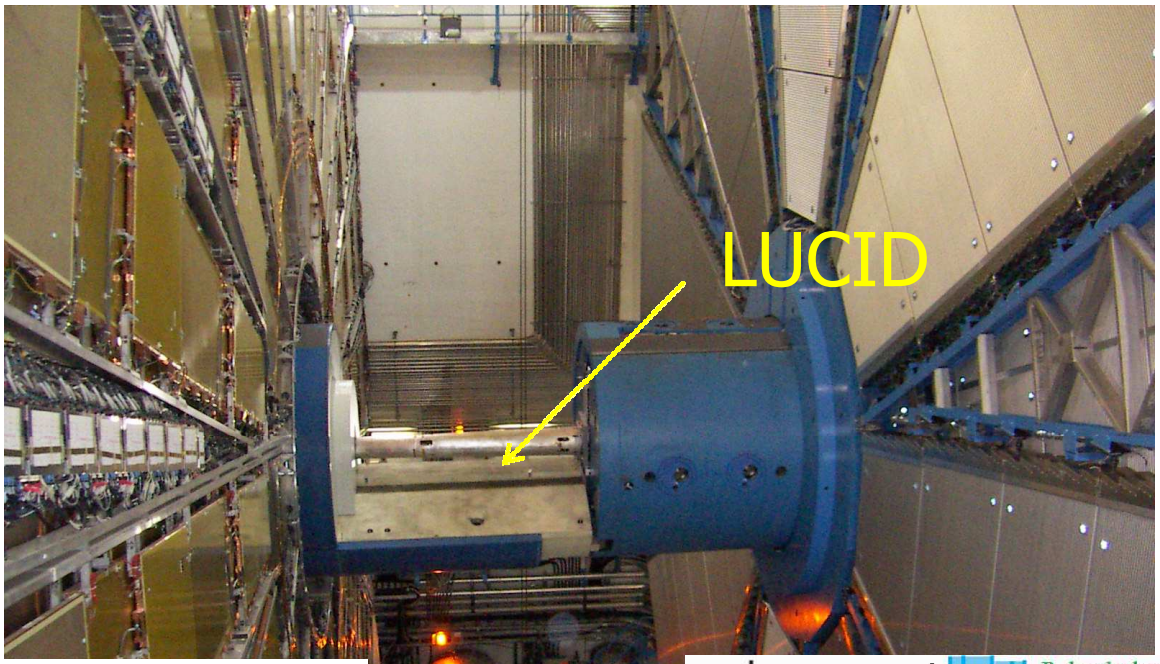
LUCID

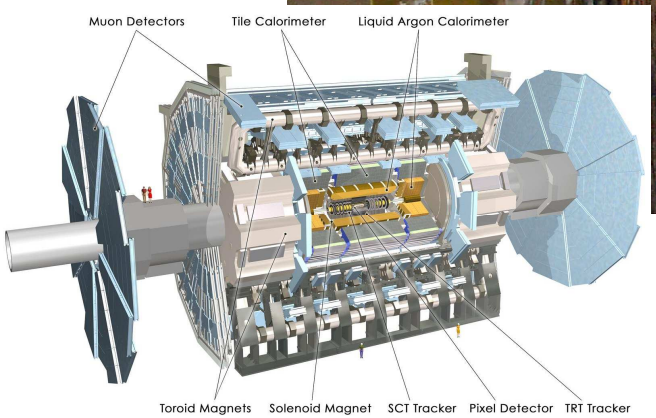
Hlavním posláním LUCIDu je detekce neelastických *pp* rozptylů za účelem měření integrované a aktuální luminosity pro experiment ATLAS společně s monitorováním parametrů svazků.
LUCID může být použit pro difrakční fyziku jako rapidity-gap veto nebo pro označení difrakčního signálu.

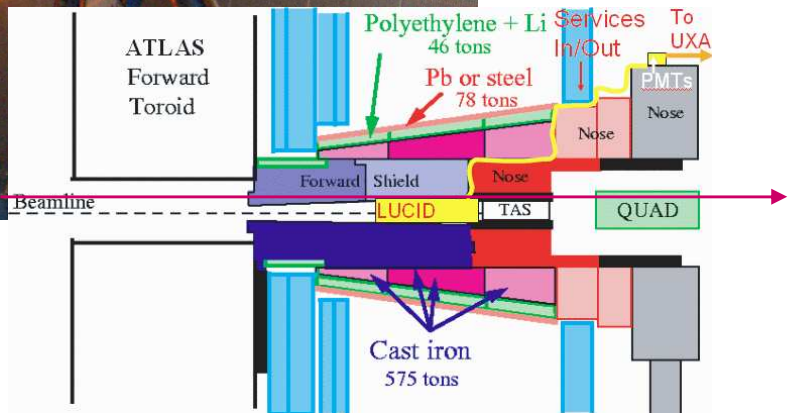
Pokud bude úroveň luminosity ~10^{32} cm^{-2} s^{-1} nebo menší, detektor bude zjišťovat počet bunch crossings, při kterých dojde k interakci.
Pro projektovanou luminositu bude většina bunch crossings produkovat více nežli 1 interakci.
Základním principem činnosti detektoru je předpoklad, že počet interakcí v bunch crossing je úměrný počtu částic LUCIDem detekovaných. Toto platí i v případě, že většina částic pochází ze sekundárních interakcí.

LUCID tak neměří absolutní luminositu, ale relativní a musí být kalibrován.

LUCID (LUminosity Čerenkov Integrating Detector)







LUCID : ATLAS LUminosity using Čerenkov Integrating Detector

- lumi monitoring: <N> of inelastic pp interactions
- rapidity gap triggering

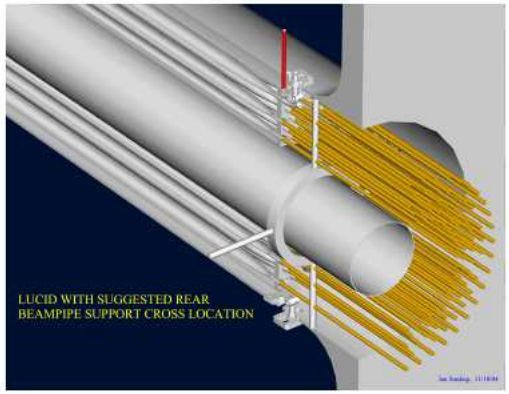
Gas filled Čerenkov light tubes around the beam pipe at ~17 m from IP.

Proposed: 40 x 5 tubes.

$5.5<|\eta|<6.0$

Tube length 1.5 m
Čerenkov light angle ≈3⁰

Readout:
1) "Winston cone" + fiber bundle
2) directly coupled PMTs

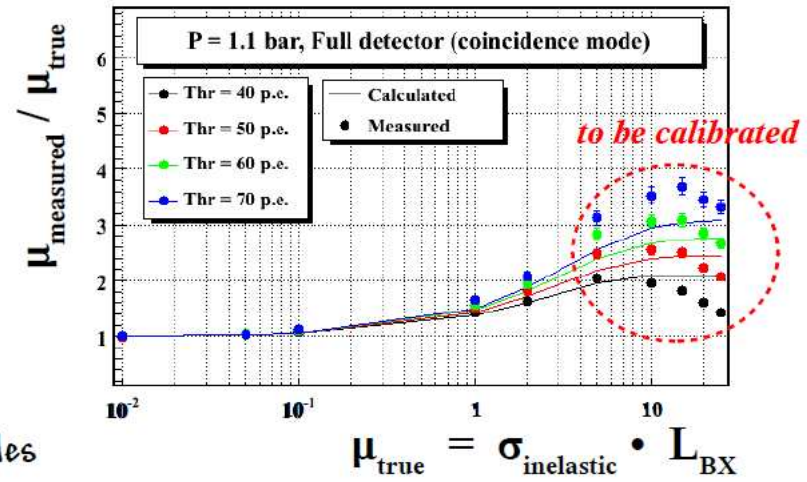


Lumi with "hit counting" method

the number of particles is estimated with the number of detector hits

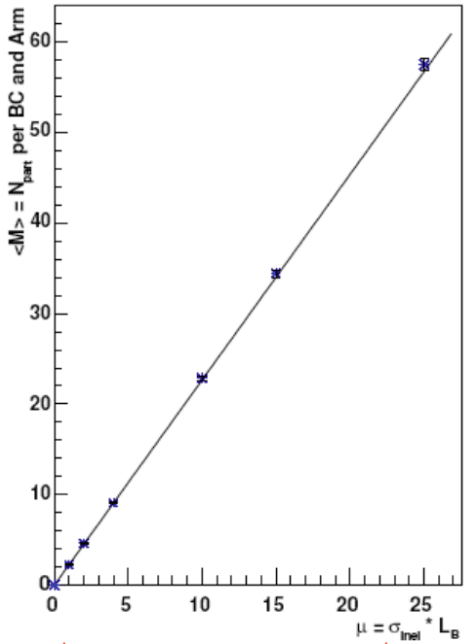
$$\mu_{BX} = \frac{\langle N_{particles/BX} \rangle}{\langle N_{particles/pp} \rangle} = \frac{\langle N_{hits/BX} \rangle}{\varepsilon_{pp} \cdot \langle N^{detected}_{hits/pp} \rangle}$$

- Single side mode: at least 1 hit in a module
- Coincidence mode: at least one hit in both modules



LUCID – princip kalibrace

- LUCID bude kalibrován
  - v první fázi pomocí údajů o luminositě z LHC
  - na základě dobře známých procesů
  - pomocí ALFA detektoru
- klíčovým pro kalibraci pomocí ALFA je lineární chování LUCIDu při přechodu od nízké luminosity na vysokou
- kalibraci bude nutno provést při každé modifikaci LUCIDu

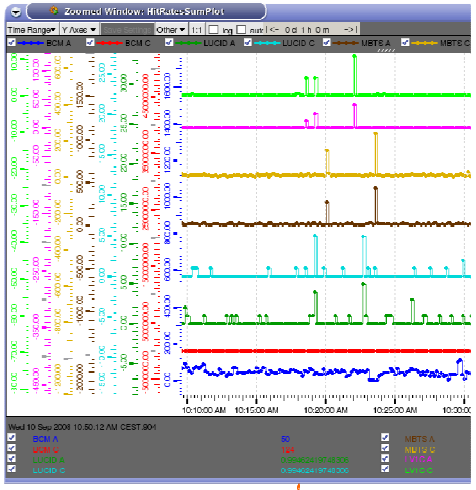


$L = 10^{34}\ cm^{-2}s^{-1}$

$L = 10^{27}\ cm^{-2}s^{-1}$

LUCID shrnutí

- 2008: ukončení konstrukce detektoru a získání prvních dat



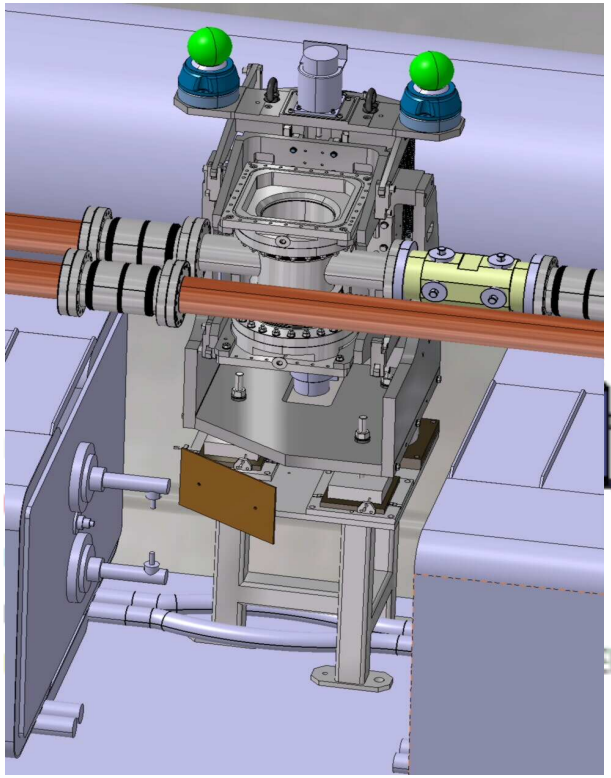
- LUCID je funkčním detektorem v pokročilé fázi kolaudace

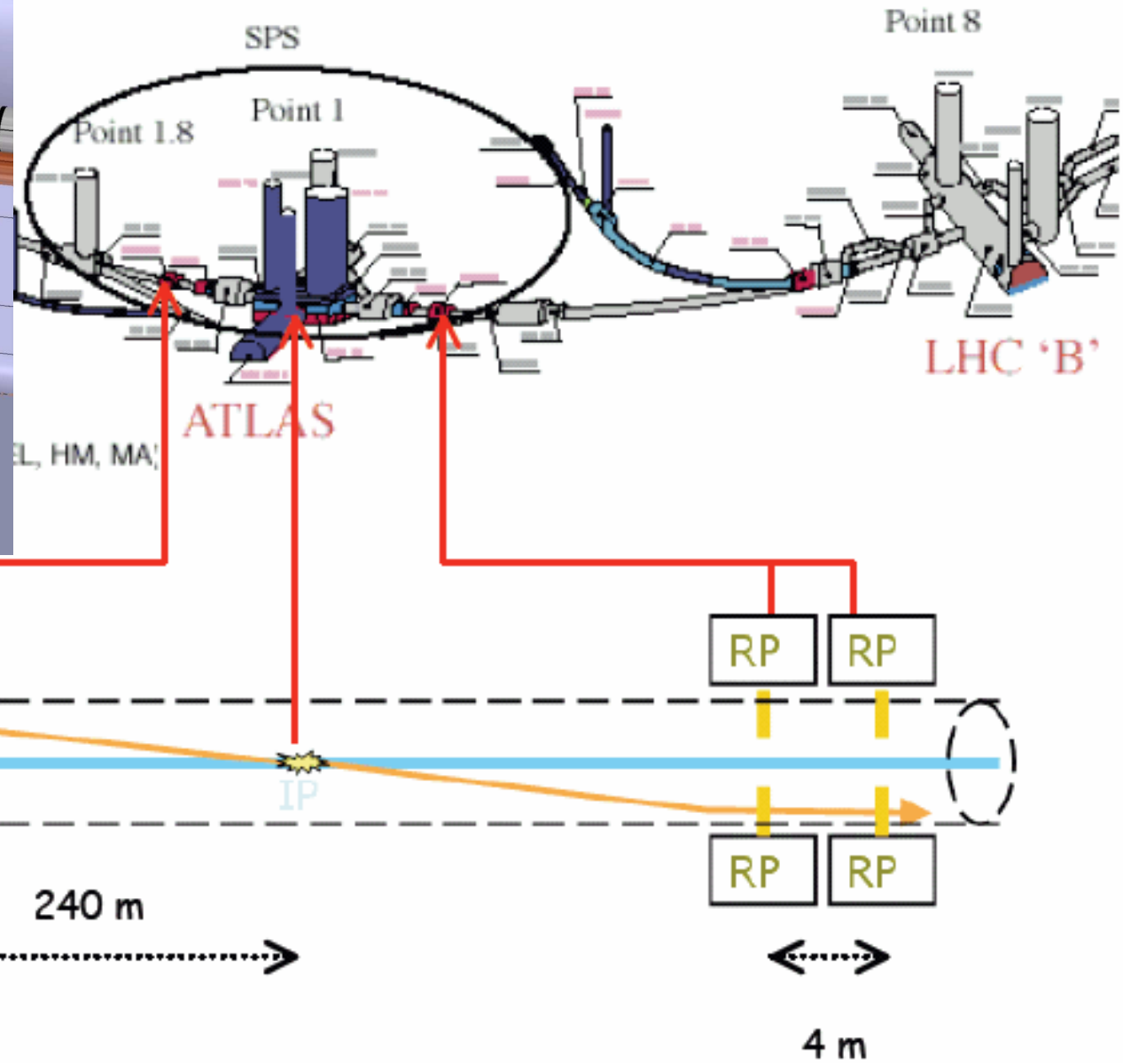
- stále však dochází (během přestávky) k vyhodnocování, konsolidaci a opravám

ALFA

hardware

ALFA – umístění





instituce spolupracující na ALFA detektoru v rámci experimentu ATLAS

CERN *European Laboratory for Particle Physics (CERN)*

Czech Republic
Institute of Particle & Nuclear Physics, Faculty of Mathematics and Physics, Charles University, Prague
Institute of Physics, Academy of Science of the Czech Republic, Prague
Palacky University, Olomouc

France
Laboratoire de l'Accélérateur Linéaire, Univ. Paris-Sud, CNRS/IN2P3, Orsay, France

Germany
Justus-Liebig University Giessen, Giessen
DESY, Hamburg und Zeuthen
Institute fur Physics, Humboldt Universität Berlin, Berlin

Great Britain
Department of Physics and Astronomy, University of Mancherster, Manchester

Poland
University of Cracow

Portugal
Laboratorio de Fisica Experimental e Instrumentacao em, Particulas, Lisbon, Portugal

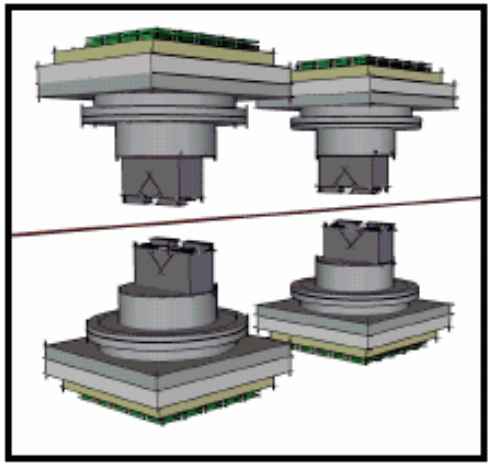
Spain
Instituto de Fisica Corpuscular IFIC, Univ. de Valencia

Sweden
Department of Experimental High Energy Physics, University of Lund, Lund

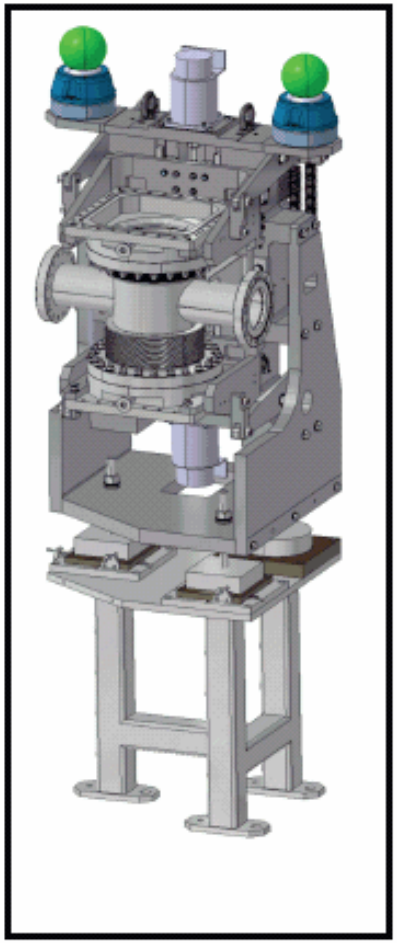
United States of America
Department of Physics and Astronomy, Stony Brook University, Stony Brook

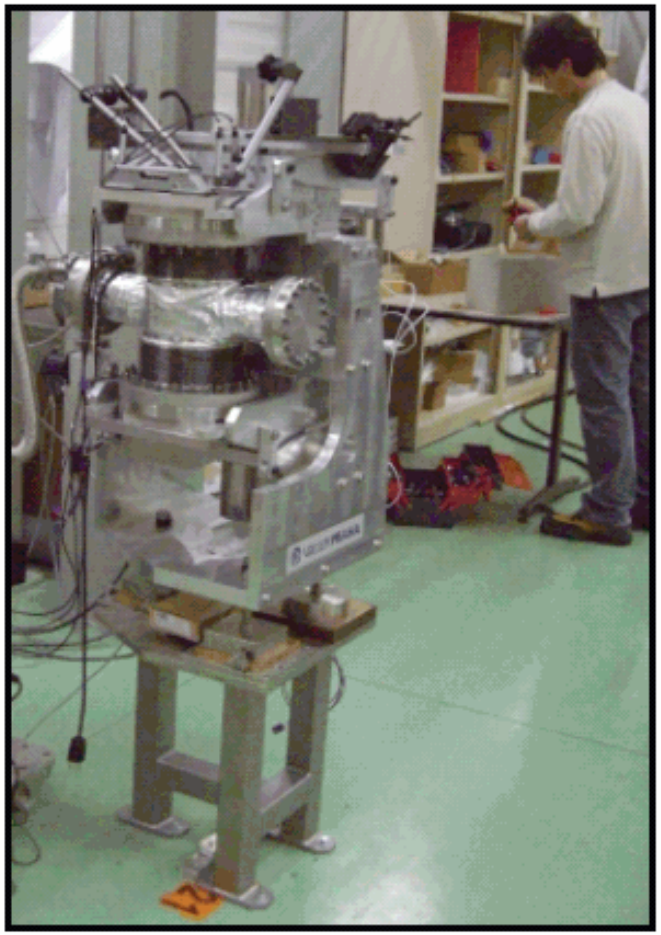
ALFA – římské hrnce (RP)

vysunutá (parkovací) posice



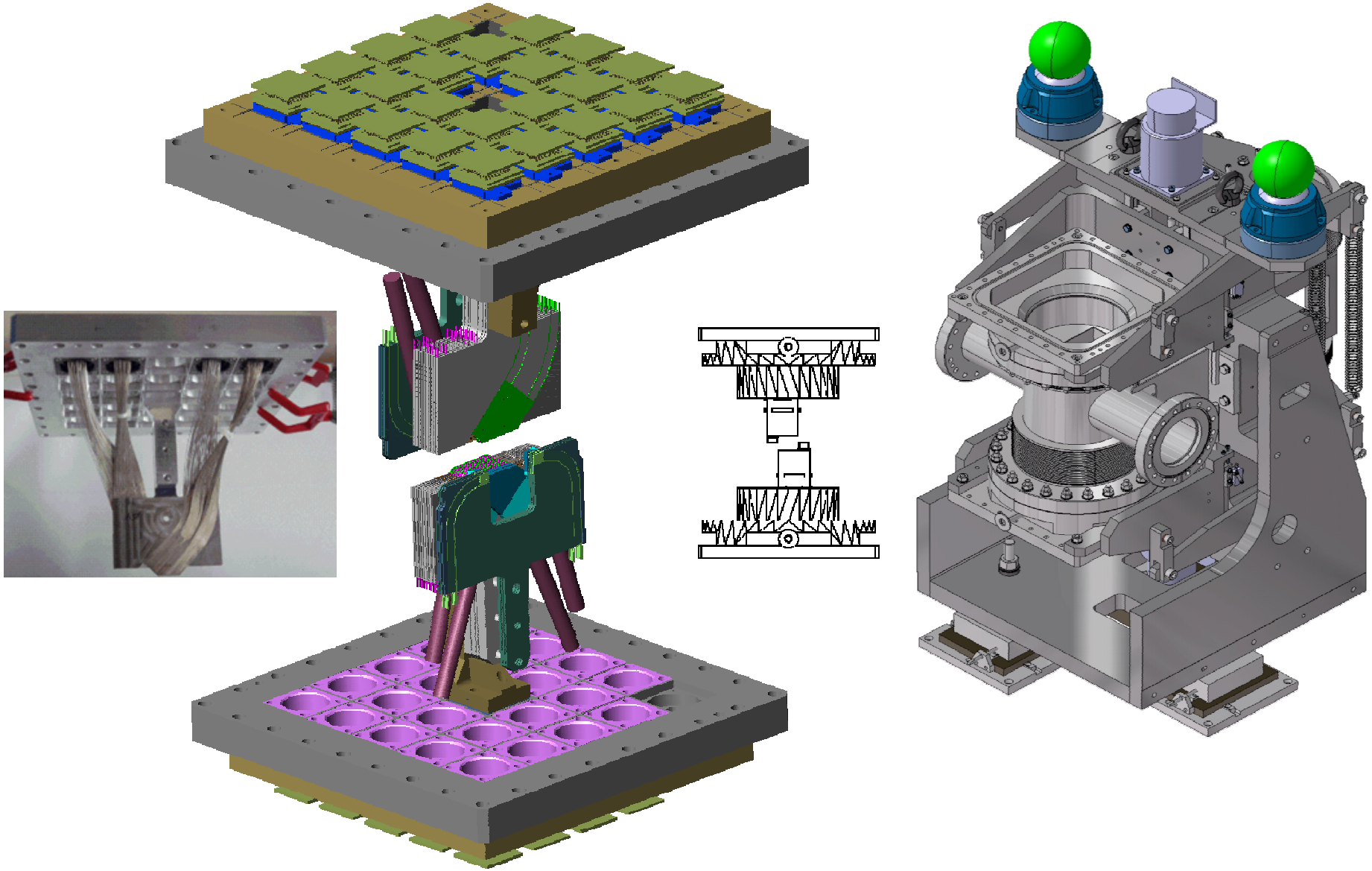
pracovní posice



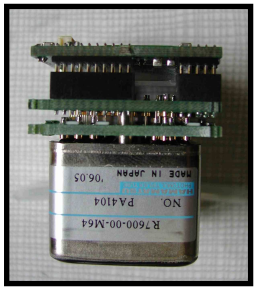


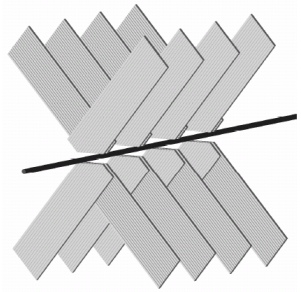
mechanika pro římské hrnce – Vakuum Praha

ALFA – detektor v RP



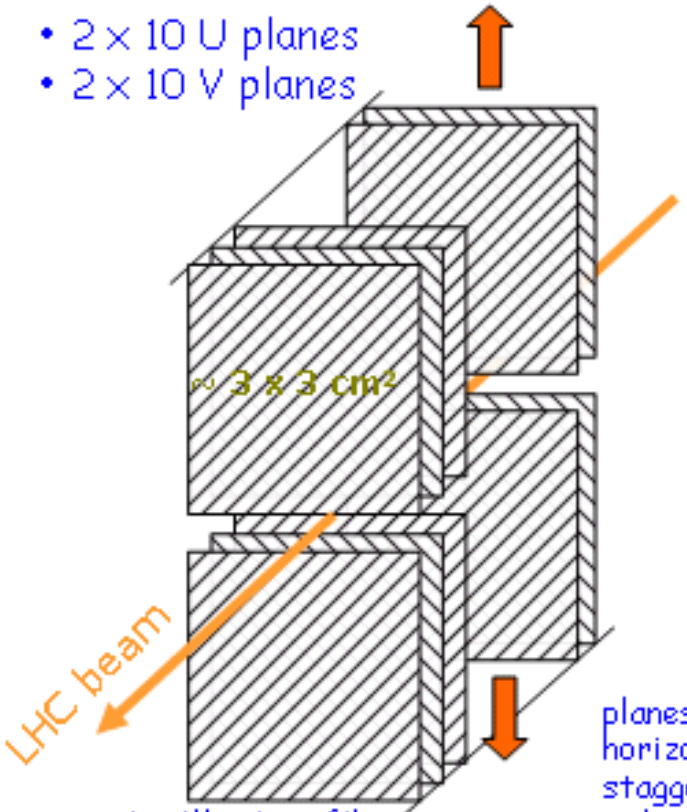
ALFA – koncept detektoru





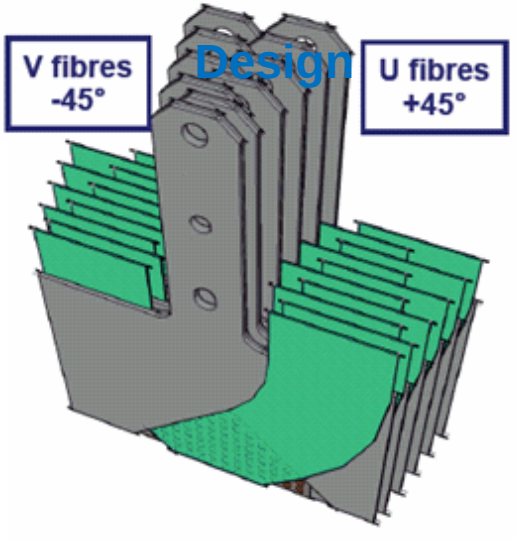
Concept

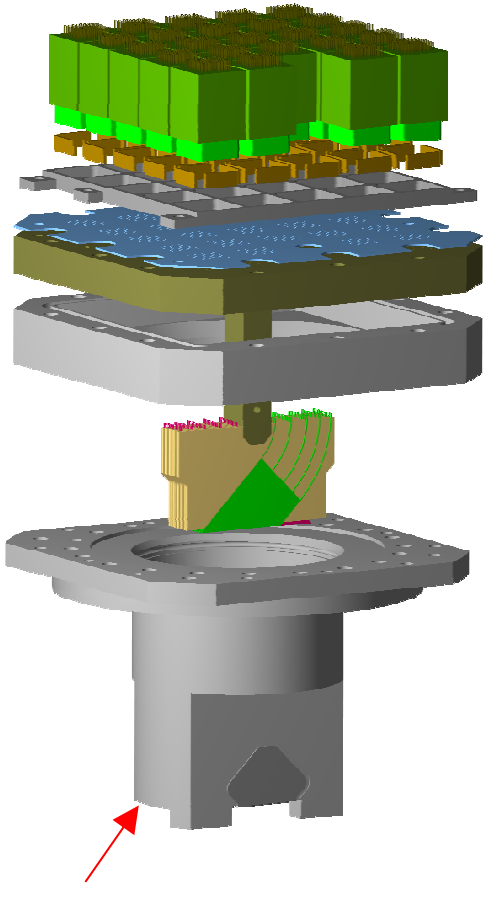
- 2 × 10 U planes
- 2 × 10 V planes



- scintillating fibres
- 0.5 mm² square

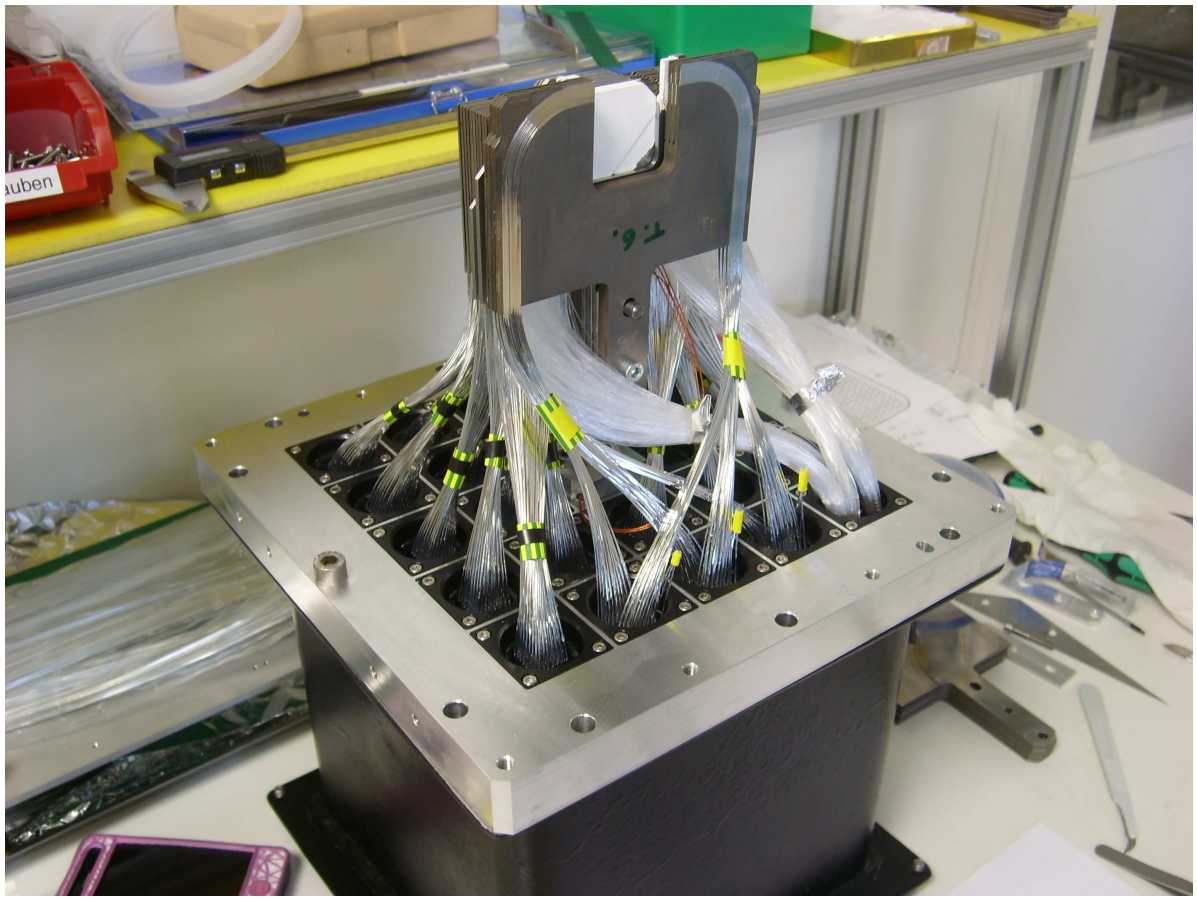
planes are horizontally staggered by multiples of 70.7 micrometer



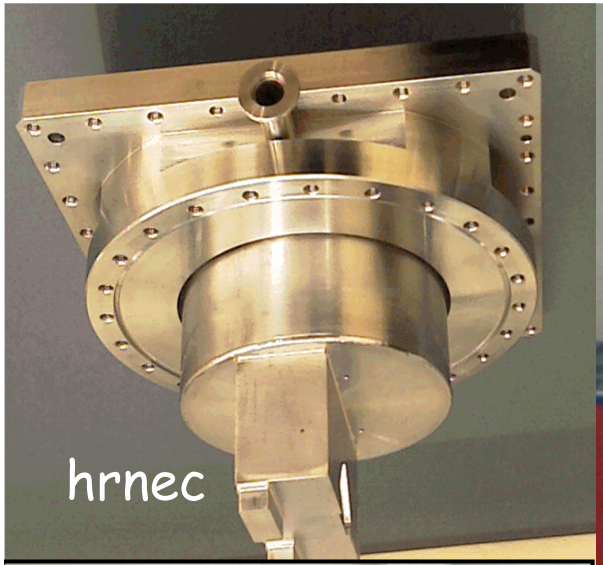


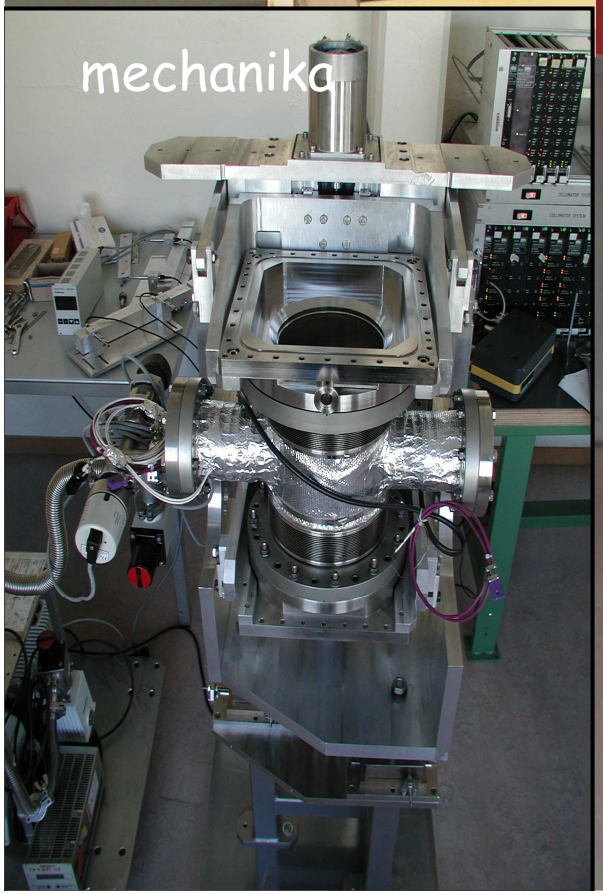
římský hrnec

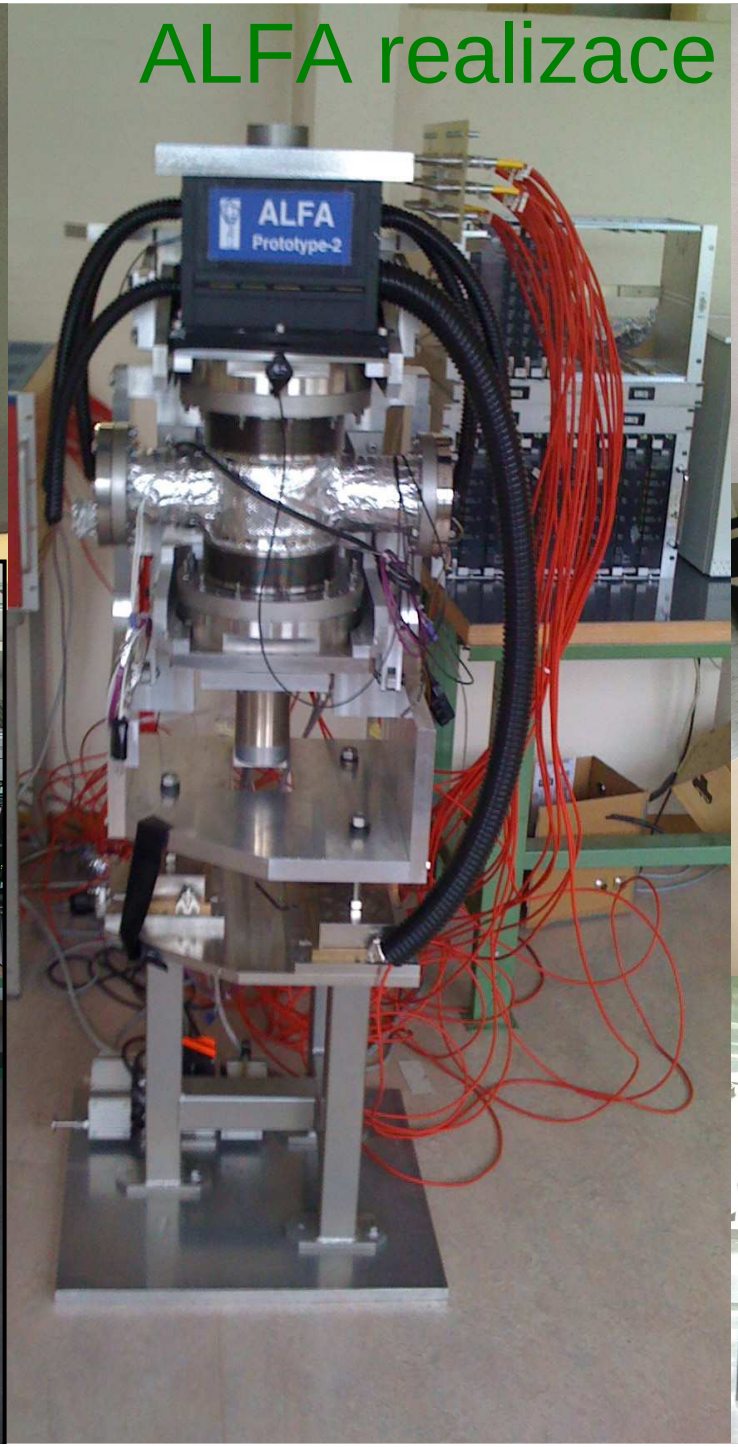
ALFA – první kompletní detektor



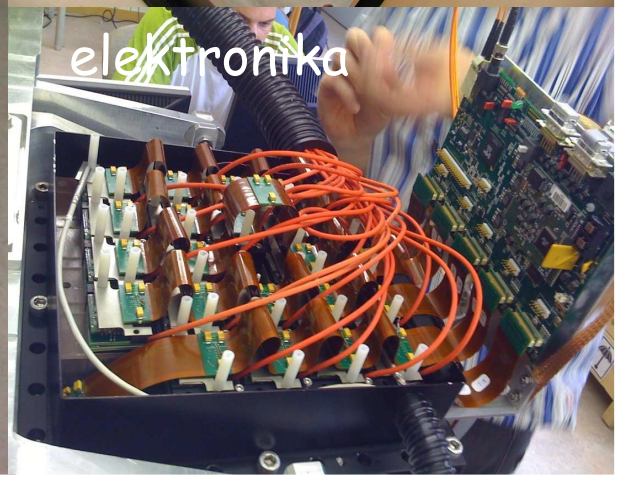
ALFA realizace


hrnec

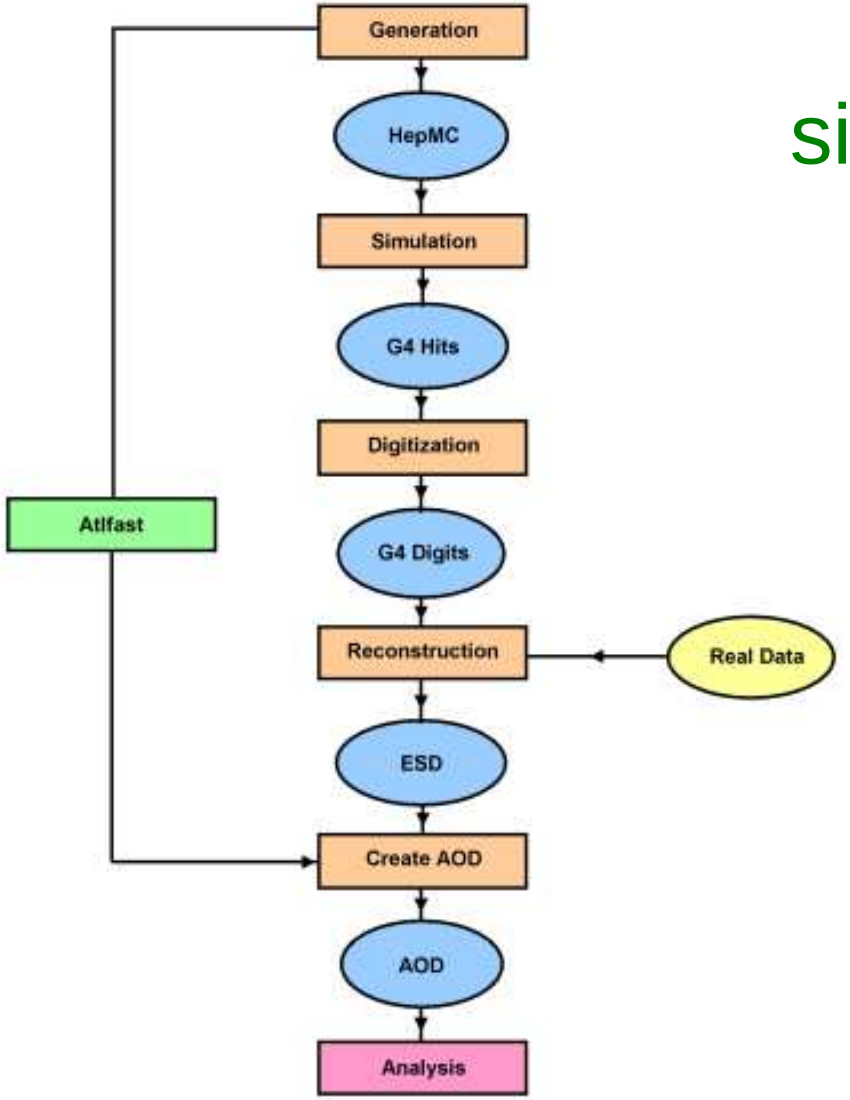

mechanika



detektor


elektronika

simulace



- ForwardDetectors
  - ALFA
    - ALFA_Digitization
    - ALFA_EventCnv
      - ALFA_EventAthenaPool
      - ALFA_EventTPCnv
      - ALFA_RawDataByteStreamCnv
    - ALFA_G4_SD
    - ALFA_GeoModel
    - ALFA_RawEv
    - ALFA_RecEv
    - ALFA_Reconstruction
      - ALFA_GloRec
      - ALFA_LocRec
    - ALFA_SimEv
  - ForwardIdCnv
  - FPTracker
  - LUCID
  - ZDC

simulace transportu protonu

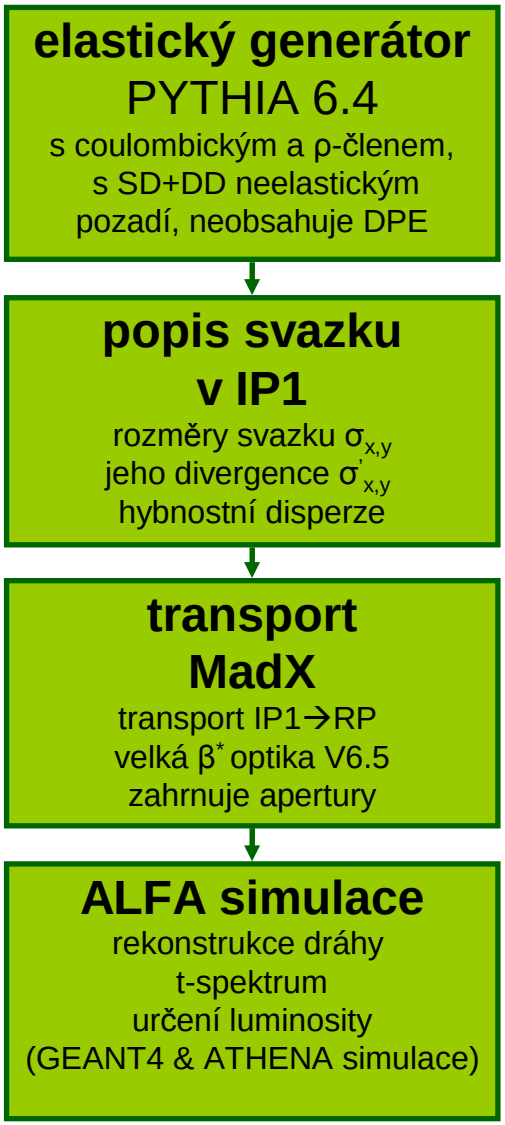
- S. Cavallier, M. Heller (LAL-Orsay), H. Stenzel, D. Pelikan (Giessen), T. S.
- nástroj – MAD-X, FP track, … (Peter Sherwood, AFP)

Studie provedené Cavalier&Heller-em (C&H) ukázaly nemožnost měření elastického rozptylu pro kolizní nebo vstřikovací optiku při 450 GeV. Nastavení optiky neumožňuje pozorování událostí s dostatečně velkým *t*.

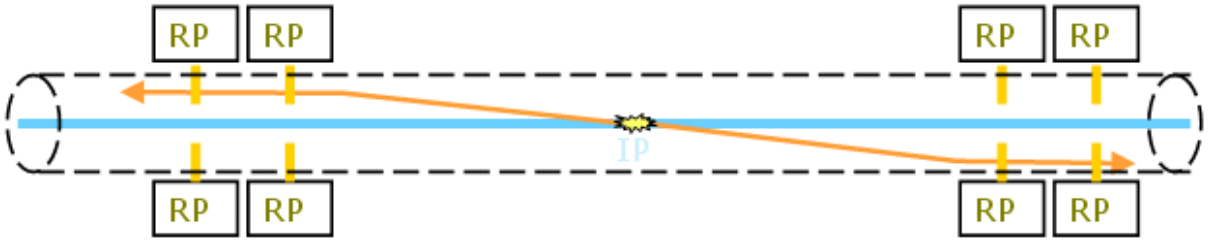
Helmut Burkhardt a Simon White (AB skupina CERN) vyvinuli 90m β* optiku pro experiment TOTEM. C&H provedli odpovídající srovnání pro IP1 a optimalizovali optiku pro experiment ALFA. Ta poskytuje fázi ≈ 90° ve vertikální rovině (parallel-to-point focusing optics). Použití 90m β* optics původně navržené pro TOTEM se zdá možné a umožní měření parametru B a celkového účinného průřezu s dostatečnou přesností. Probíhá studium systematických chyb.
Nastavení odpovídá 7 TeV svazku, ale bude přeškálováno pro 5 TeV (či níže).

elastický rozptyl

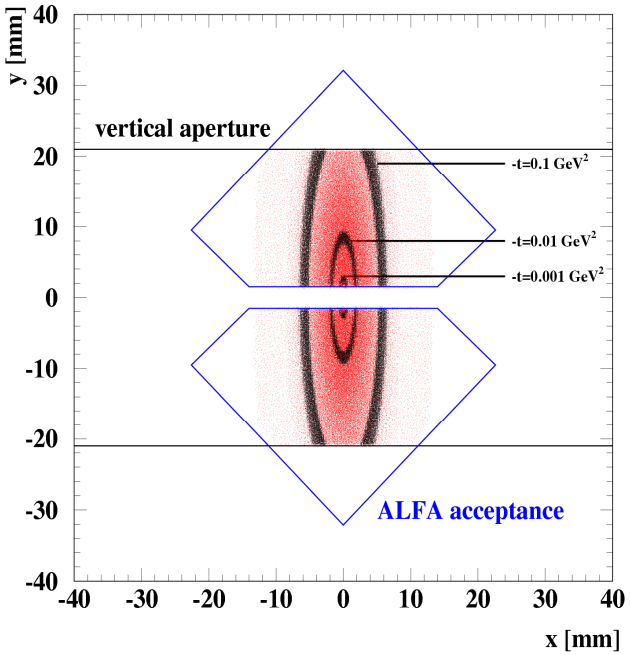
měření luminosity – simulace

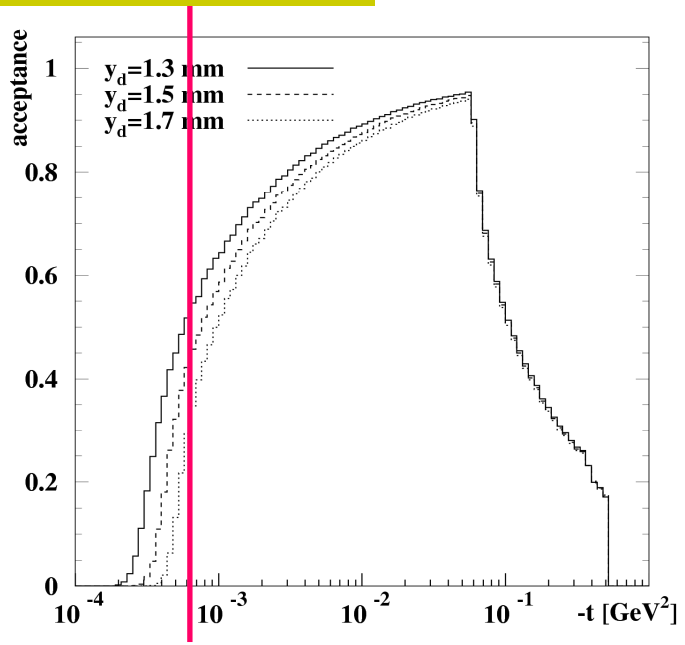


měření luminosity – optika



- 10 M událostí odpovídajících 100 hodinám při L = 10^{27} cm^{-2} s^{-1}
- hrana detektoru 1.5 mm od svazku





$$-t|_{|A_{\text{Coulomb}}|=|A_{\text{nuclear}}|} \approx \frac{8\pi\alpha}{\sigma_{\text{tot}}} \approx 6\times10^{-4}\,\text{GeV}^2$$

měření luminosity – fit

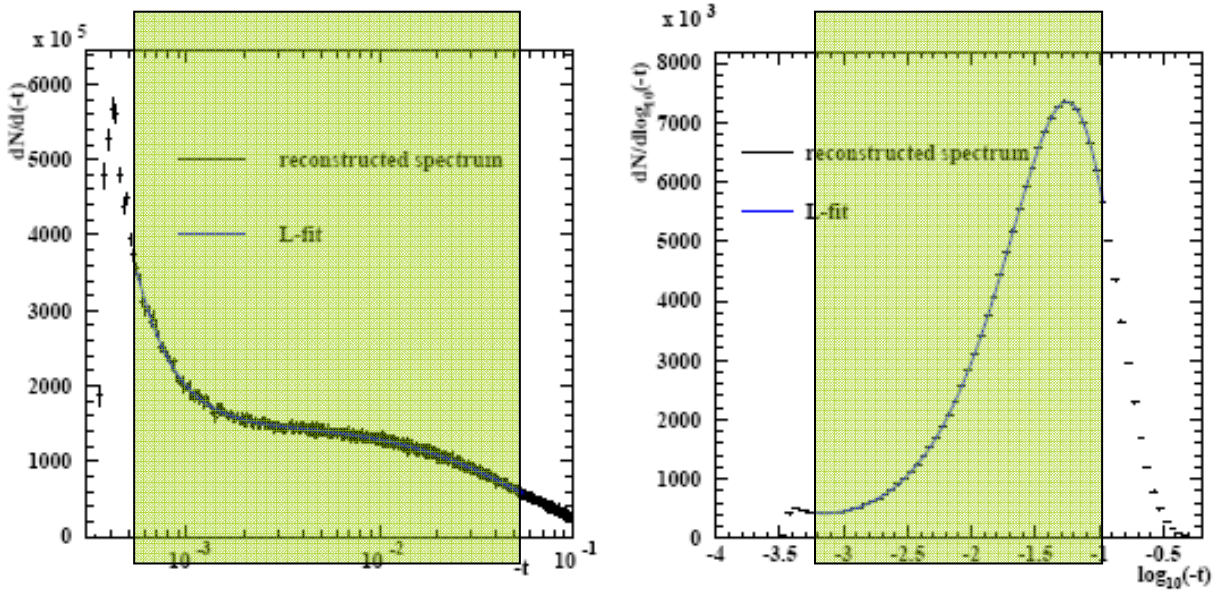


Figure 9-10 The reconstructed and corrected t-spectrum in two representations, linear(left) and logarithmic (right), together with the resulting luminosity fit.

Table 9-2 Fit results for the luminosity and forward physics parameters.

	Input	Linear fit	Error [%]	Log. fit	Error[%]	**Correlation with L** [%]
L [10^{26} cm $^{-2}$ s^{-1}]	8.10	8.151	1.77	8.057	1.89	
σ_{tot} [mb]	101.511	101.14	0.9	101.77	1.0	-99
b [GeV^{-2}]	18	17.93	0.25	17.97	0.12	57
ρ	0.15	0.143	4.3	0.146	3.8	89
Fit range		0.00055< -t < 0.055		-3.2 < τ < -1.0		
Fit quality [χ^2/Ndof]		2845/2723		33.2/44		

Ndof = number of degrees of freedom

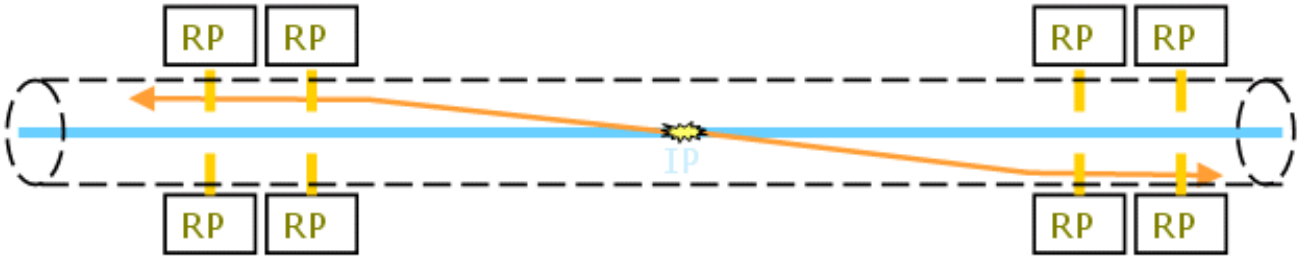
luminosita – přesnost

Systematic uncertainties	Linear fit	Logarithmic fit
Statistical error [%]	1.77	1.89
Beam divergence [%]	0.31	0.30
Crossing angle [%]	0.18	0.15
Optical functions [%]	0.59	0.76
Phase advance [%]	1.0	1.4
Detector alignment [%]	1.3	0.9
Geometrical detector acceptance [%]	0.52	0.43
Detector resolution [%]	0.35	0.19
Background subtraction [%]	1.10	1.51
Total experimental systematic uncertainty [%]	2.20	2.57
Total uncertainty [%]	2.82	3.19

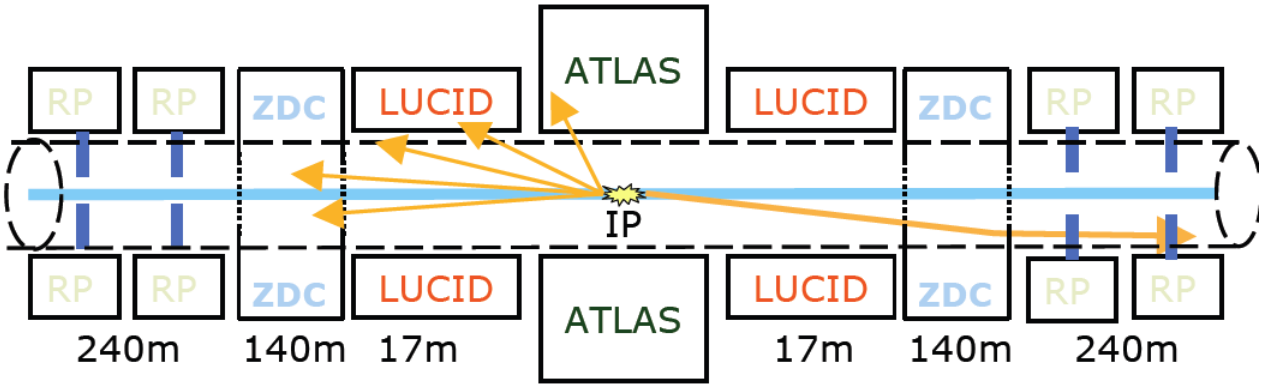
jednonásobná difrakce

elastický proces vs. difrakce

elastický proces



jednonásobná difrakce (SD) - pozadí pro elastický proces



událost SD může být zamítnuta díky informaci z vrcholu a díky nerovnoběžnosti protonů. pozadí SD tak může být redukováno na zanedbatelnou úroveň, zároveň ale SD může být zajímavým předmětem studia a to nezávisle na měření luminosity

difrakce – motivace

- měření – účinný průřez, t & x_{IP}-rozdělení, …
- stanovení parametrů modelů – upřesnění jejich hodnot
- měření luminosity (LUCID) – pokud se nepodaří dosáhnout coulombické oblasti

$$\sigma_{\mathbf{tot}} = \frac{1}{s}\,\mathrm{Im}\;A_{\mathrm{el}}\big|_{t=0} \qquad L = \frac{R_{\mathrm{tot}}}{\sigma_{\mathbf{tot}}}$$

$$\sigma_{\mathbf{tot}} = \frac{16\,\pi}{1+\rho^{2}}\,\frac{dR_{\mathrm{el}}/dt\big|_{t\to 0}}{R_{\mathrm{tot}}} \qquad L = \frac{1+\rho^{2}}{16\,\pi}\,\frac{R_{\mathrm{tot}}^{2}}{dR_{\mathrm{el}}/dt\big|_{t\to 0}}$$

požaduje měření *totálního* četnosti & extrapolaci elastického rate k $t = 0$

pro určení totální četnosti je možno použít MBTS
(Minumum Bias Trigger Scintillator)

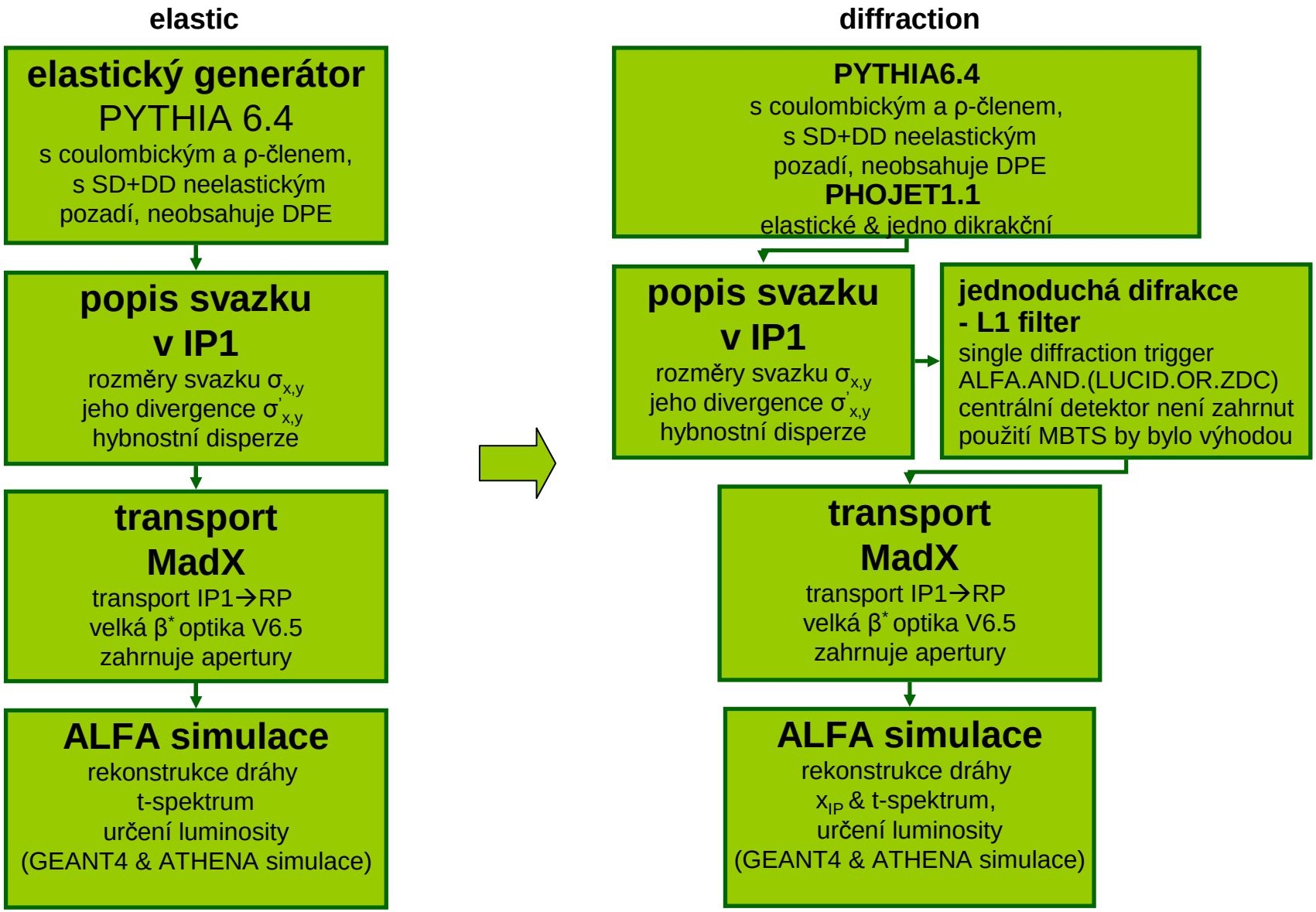
$$\sigma_{\mathrm{tot}} = \sigma_{\mathrm{el}} + \sigma_{\mathrm{inel}} = \sigma_{\mathrm{el}} + \sigma_{\mathrm{ND}} + \underbrace{\sigma_{\mathrm{SD}} + \sigma_{\mathrm{DD}}}_{\text{minimum bias events}}$$

CSC note on minimum bias:

[Moraes Arthur, Minimum Bias CSC Note Results]

vzorek	MBTS_1_1	MBTS_2
Ne difrakční	99%	100%
dvojitá difrakce	54%	82%
jednonásobná difrakce	45%	68%
šum	0.05%	0.05%

difrakce – MC realizace

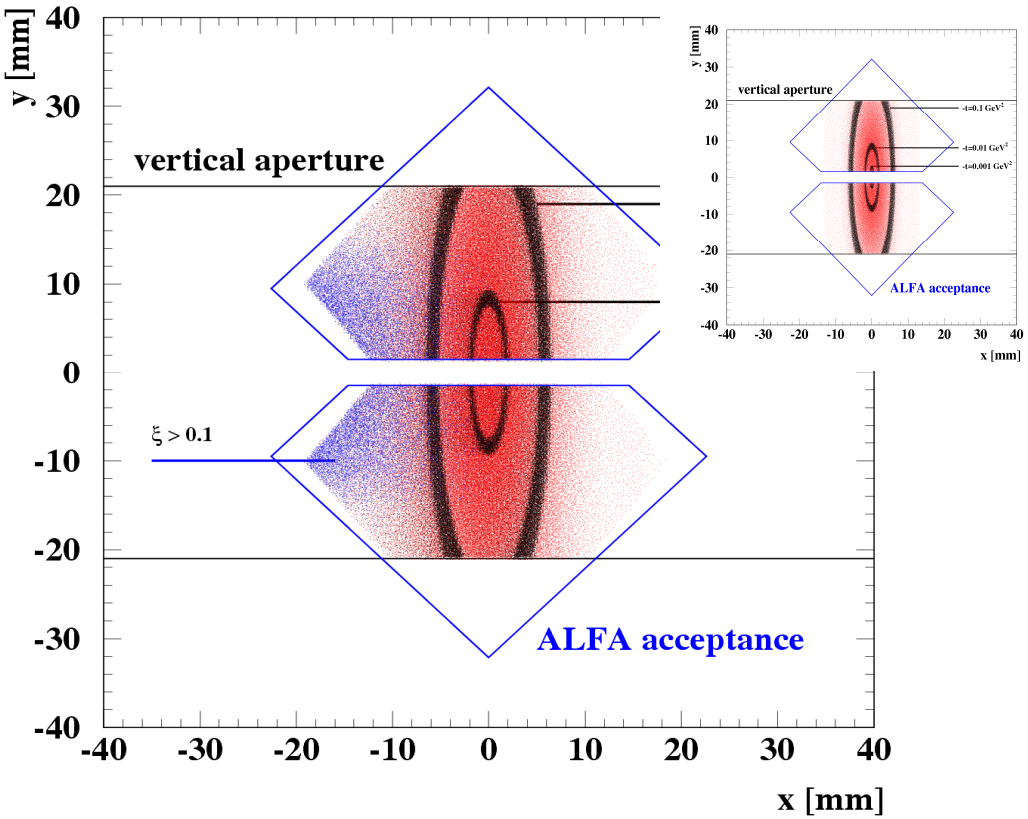


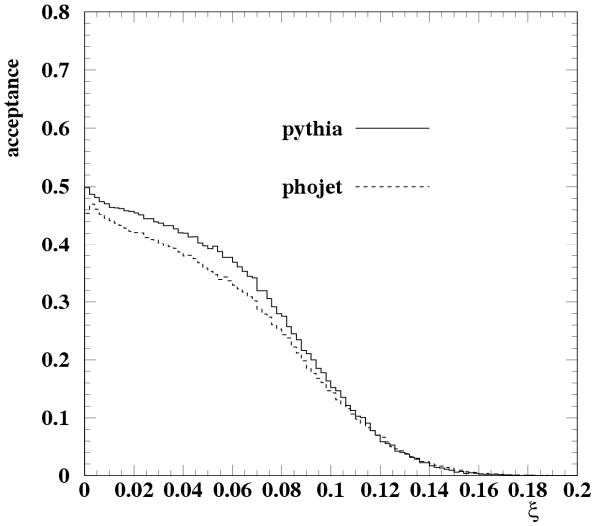
jednonásobná difrakce v číslech

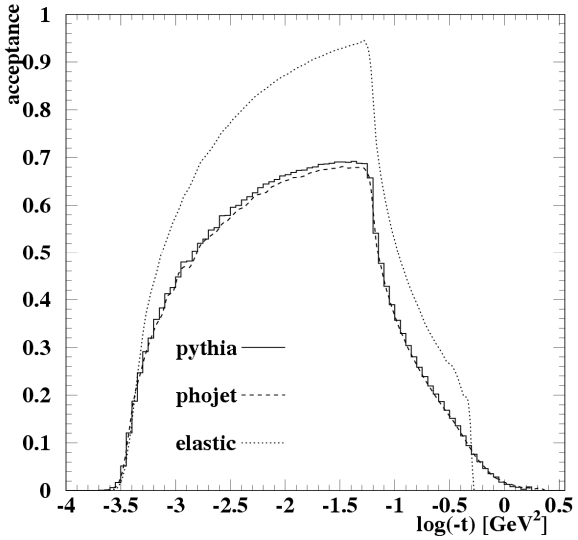
[mb]	Pythia	Phojet
elastický rozptyl	34.2 (modified) 22.2 (default)	34.5
jednonásobná difrakce	14.3	11.0
dvojitá difrakce	10.2	4.1
minimum bias non-diffractive	54.7	67.9
totální účinný průřez	101	119

účinnost [%]	Pythia	Phojet
pre-selekce		
ξ<0.2	97.1	94.8
ZDC [E>1 TeV]	53.9	38.7
LUCID [1 track]	45.2	57.3
celková preselekce	75	74
RP selekce relativně k pre-selekci		
ALFA	60.1	54.2
celková akceptance	45.0	40.1

jednonásobná difrakce v obraze







rozložení zásahů pro vzorek 10 M jednonásobných difrakčních událostí

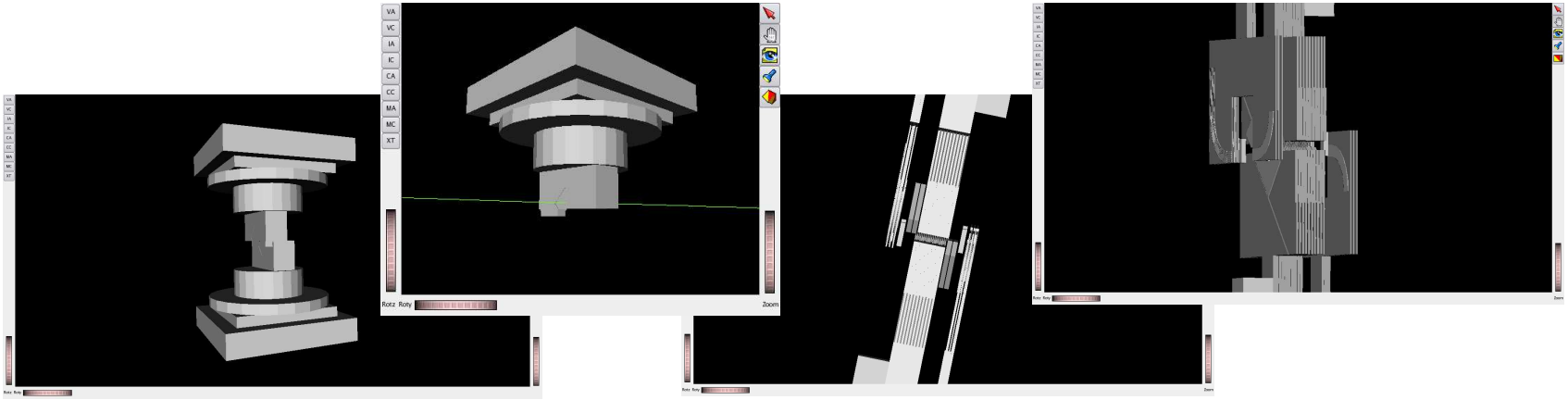
simulace PYTHIA & MAD-X

celková akceptance:

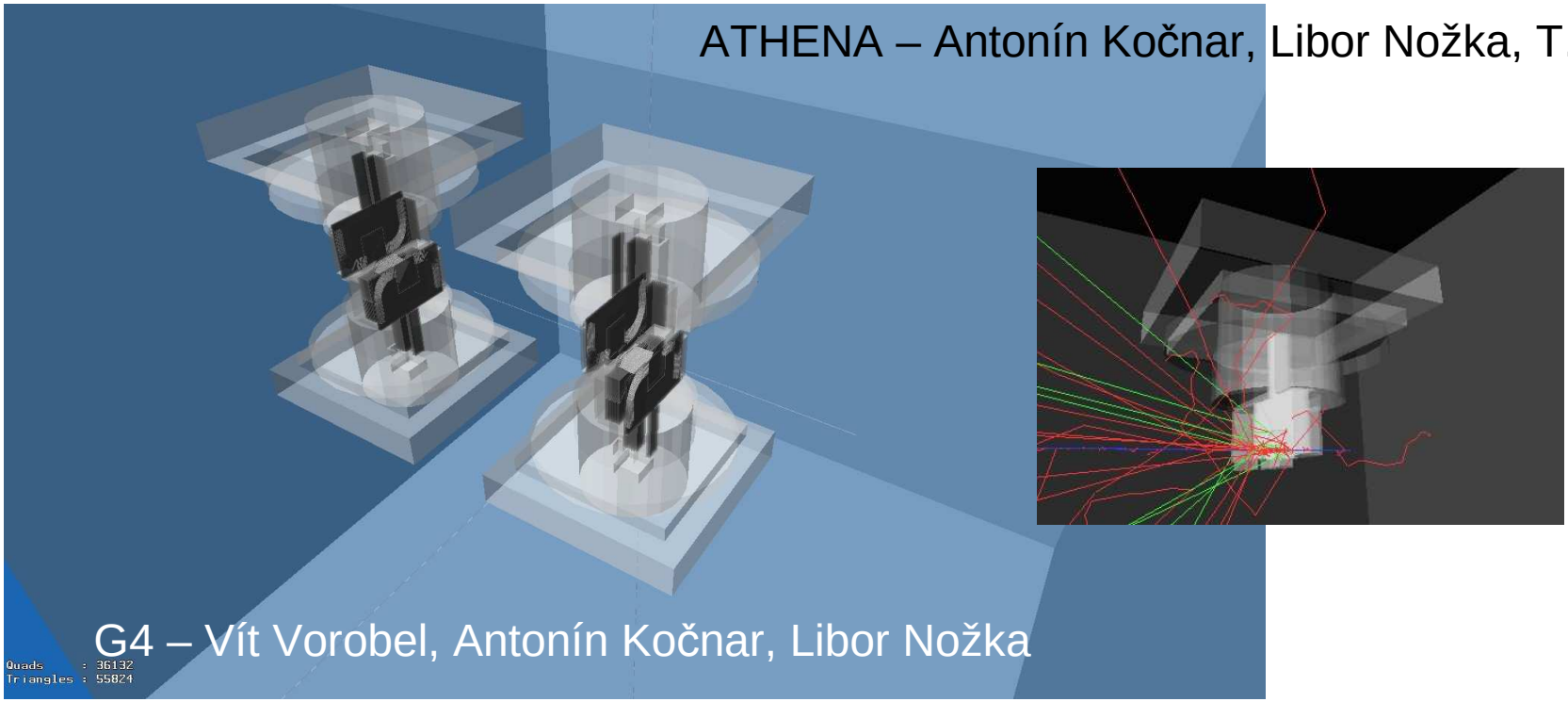
PYTHIA	**45.0 %**
PHOJET	**40.1 %**

simulace detektoru a realita

ALFA detektor – ATHENA & vlastní simulace v G4

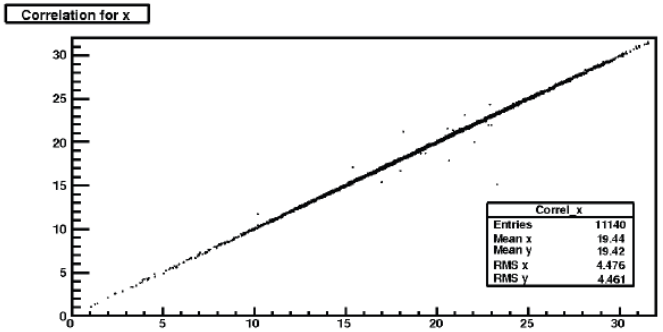


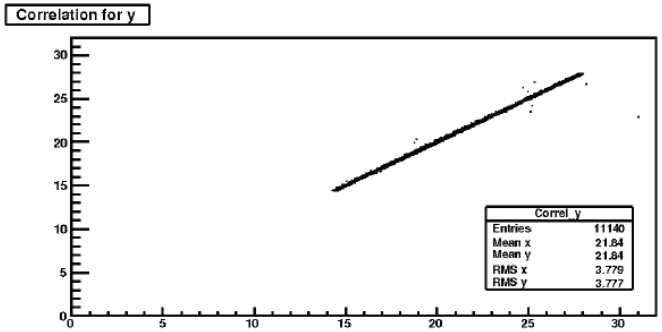
ATHENA – Antonín Kočnar, Libor Nožka, T. S.

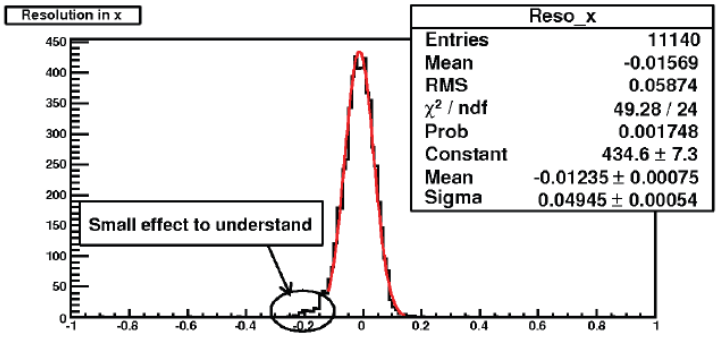


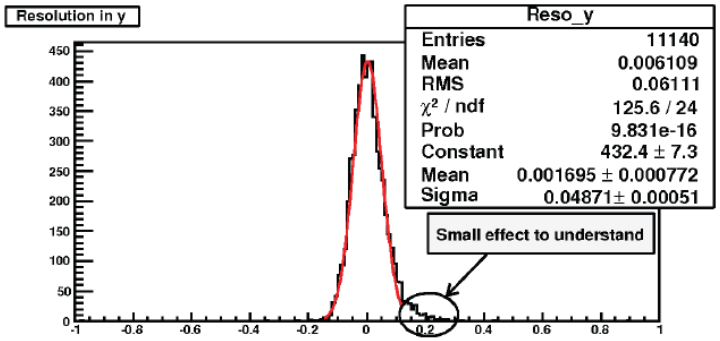
G4 – Vít Vorobel, Antonín Kočnar, Libor Nožka

ALFA test beam 2008 – výsledky (M. Heller)





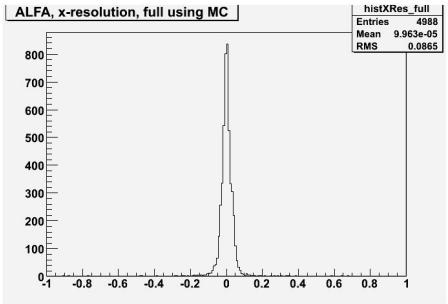


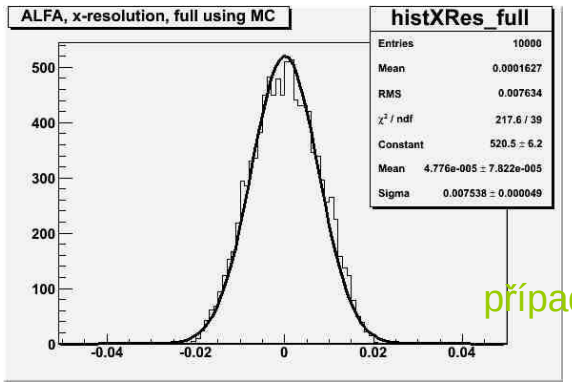


a simulace v ATHENA & GEANT

AHENA

jiný rekonstr. alg.





případ vertikálních částic

V. Vorobel

závěr

- měření luminosity je velmi důležité pro efektivní chod LHC a pro stanovení hodnot chyb parametrů měřených v experimentu ATLAS

- fyzika dopředné oblasti sice není oficiální prioritou # 1 ATLAS-u, bez ní však ATLAS nebude mít žádnou difrakční fyziku [a ta je bohatá, viz např. HERA (H1, Zeus) nebo Tevatron (CDF)]
  - realizace AFP projektu je vysoce žádoucí
  - výměna vláknových ALFA detektorů za radiačně odolné

- ALFA Česká Republika
  - Praha: Rupert Leitner, Tomáš Sýkora, Štefan Valkár, Vít Vorobel
  - Olomouc: Petr Hamal, Miroslav Hrabovský, Libor Nožka (, Antonín Kočnar)

  je zájem o další spolupracovníky

- užší spolupráce ALFA & AFP 220 – sdílí stejnou simulaci a mohou, v principu, později utvořit celek (ALFA upgrade)