

Srovnání modelových představ o rozvoji spršek kosmického záření s detailními Monte Carlo simulacemi.

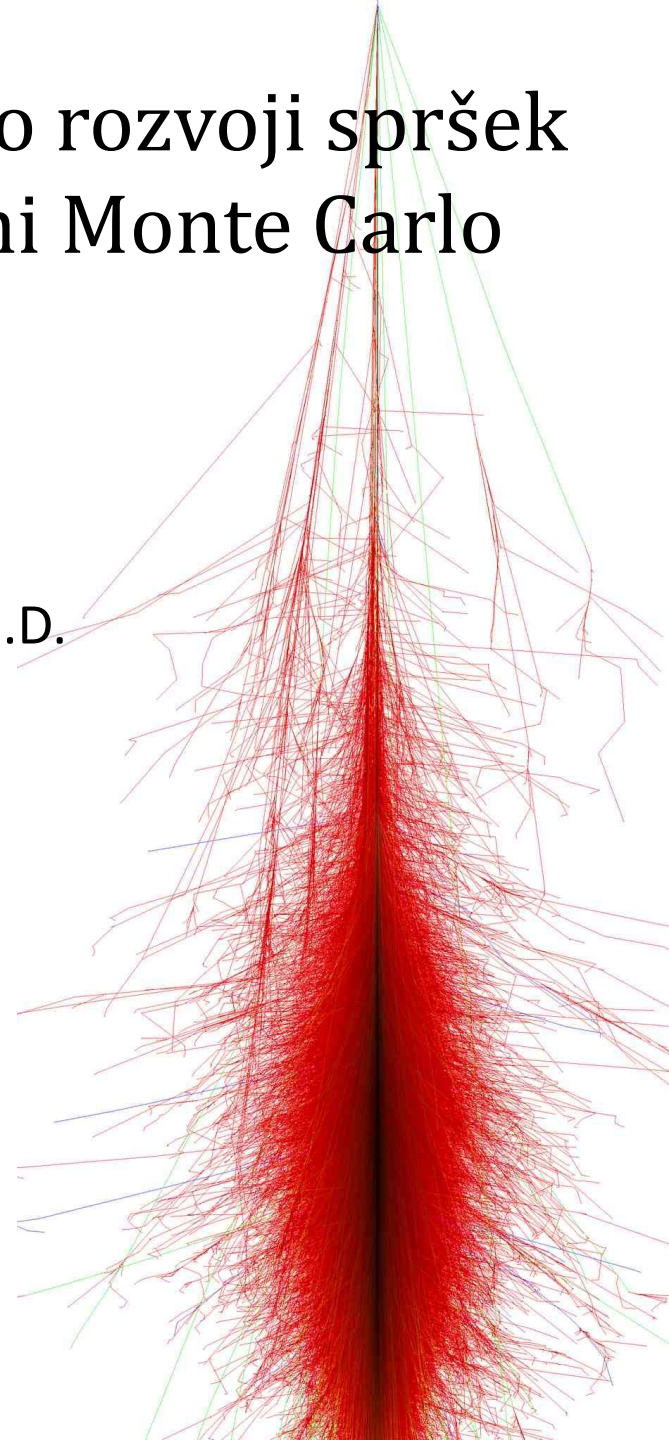
Alena Bakalová

Školitel: Ing. Jakub Vícha, Ph.D.



ČVUT v Praze

Fakulta jaderná a fyzikálně inženýrská



Obsah

- Modelové představy o rozvoji spršky kosmického záření
- Simulace spršek kosmického záření
- Energetický vývoj hloubky maxima spršky
- Energetický vývoj počtu mionů ve spršce
- Rozdíl hloubky mionového maxima a maxima spršky

Heitlerův model EM spršek

- K rozpadu dochází vždy po vzdálenosti d (splitting length)

$$d = \lambda_r \ln 2$$

- Proces přestává když částice dosáhnou kritické energie ξ_e^c

$$n_c = \frac{\ln\left(\frac{E_0}{\xi_e^c}\right)}{\ln 2}$$

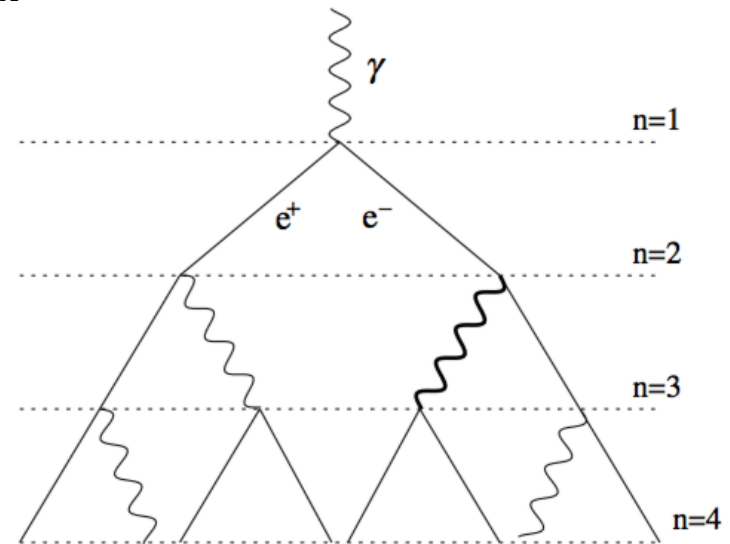
$$N_{\max} = 2^{n_c}$$

- Hloubka maxima spršky X_{\max}

$$X_{\max}^\gamma = n_c \lambda_r \ln 2$$

- Elongation rate

$$\Lambda = \frac{dX_{\max}}{d \log_{10} E_0}$$



Převzato z [1]

Heitler-Matthewsův model

- Hadronové spršky, atmosféra složena z vrstev tloušťky

$$d = \lambda_I \ln 2$$

- Hadrony interagují po projití jednou atmosférickou vrstvou - N_{ch} nabitých pionů a $1/2 N_{ch}$ neutrálních pionů

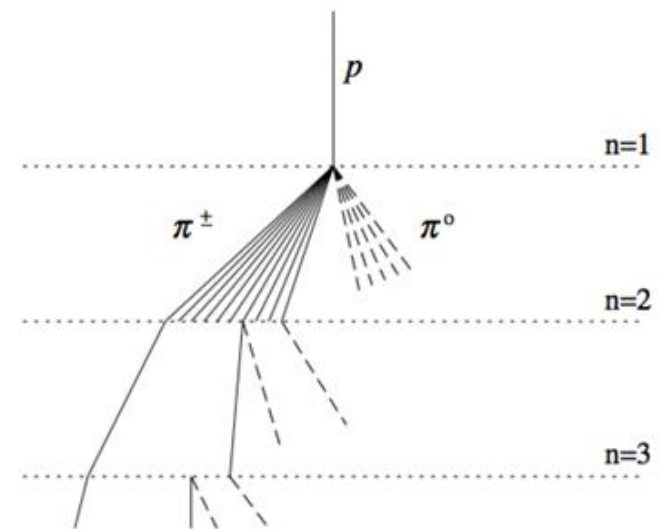
$$n_c = \frac{\ln\left(\frac{E_0}{\xi^c}\right)}{\ln\left(\frac{3}{2} N_{ch}\right)}$$

- Piony se rozpadnou na miony

$$N_\mu = N_\pi = (N_{ch})^{n_c} \quad N_\mu = \left(\frac{E_0}{\xi^c}\right)^\beta \quad \beta = 0,85$$

- Elongation rate

$$\Lambda^p = \Lambda^\gamma + \frac{d(X_0 - \lambda_I \ln(3N_{ch}))}{d \log_{10} E_0} = 58 \text{g} \cdot \text{cm}^{-2}$$



Převzato z [1]

Superpoziční model

- Jádru s nukleonovým číslem A a primární energií E_0
 - A nezávislých spršek s energiemi E_0 / A
- Ze simulačních dat navržen předpis pro maximum spršky

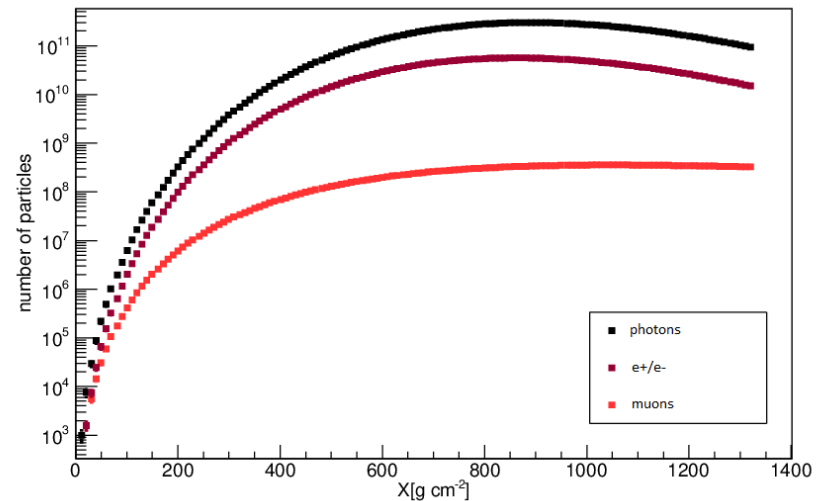
$$\langle X_{\max} \rangle = X_0 + \Lambda \log_{10} \left(\frac{E}{E_0 A} \right) + \xi \ln A + \delta \ln A \log_{10} \left(\frac{E}{E_0} \right)$$

$$\Lambda^A = \Lambda + \delta \ln A$$

	Sibyll 2.1	EPOS-LHC	QGSJet II-04
X_0	795,1±0,3	806,1±0,3	790,4±0,3
Λ	57,9±0,3	56,3±0,3	54,4±0,3
ξ	0,06±0,12	0,47±0,12	-0,33±0,12
δ	0,08±0,11	1,15±0,11	0,69±0,11

CONEX

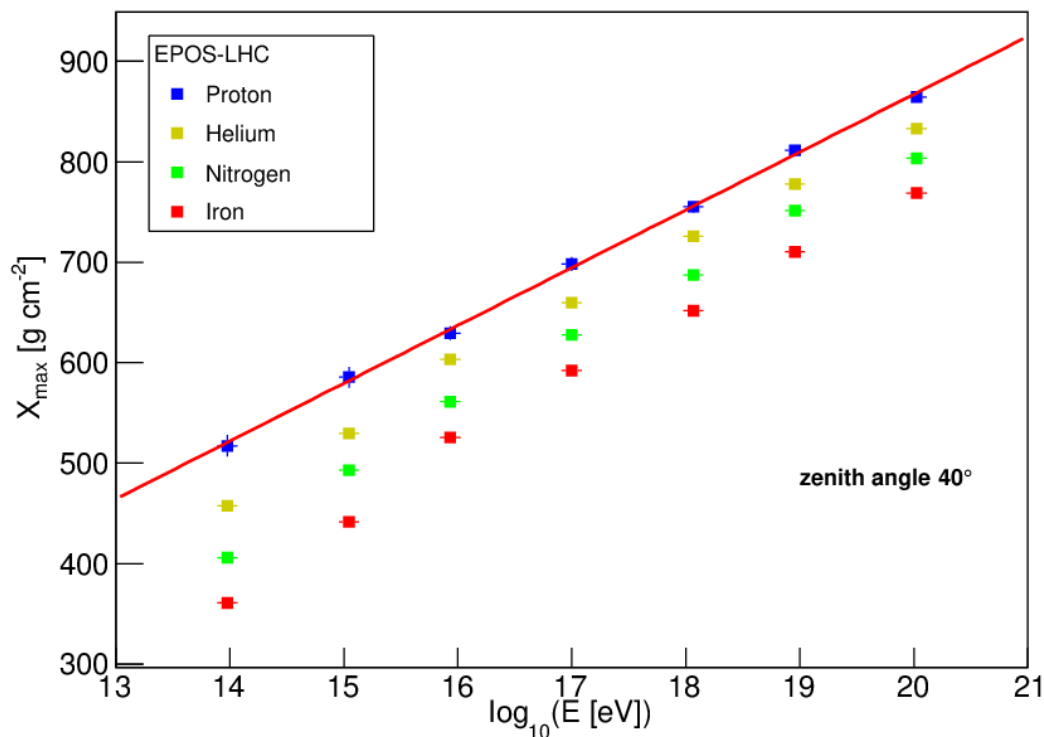
- Kombinuje Monte Carlo simulace vysokoenergetických interakcí a numerická řešení kaskádových rovnic
- Volba parametrů spršky – typ primární částice, počet spršek, energie, zenitový úhel, simulační model ...
- Modely hadronických interakcí: EPOS LHC, QGSJet II – 04, QGSJet 01, SIBYLL 2.1.
- Simulované spršky
 - EPOS-LHC, QGSJet II-04
 - $10^{14} - 10^{20}$ eV
 - proton, jádro He, jádro N, jádro Fe,
 - foton
 - zenitové úhly $\theta = 0^\circ, 40^\circ, 60^\circ$



Energetický vývoj hloubky maxima spršky

- Heitlerův model předpokládá hodnotu elongation rate $\Lambda = 85 \text{ g} \cdot \text{cm}^{-2}$

	$\Lambda(\text{foton}) [\text{g}/\text{cm}^2]$		$\Lambda(\text{foton}) [\text{g}/\text{cm}^2]$
EPOS-LHC 0°	87,1±1,5	QGSJet II-04 0°	86,7±1,6
EPOS-LHC 40°	86,9±1,6	QGSJet II-04 40°	87,2±1,4
EPOS-LHC 60°	87,6±1,4	QGSJet II-04 60°	87,8±1,5



Energetický vývoj hloubky maxima spršky

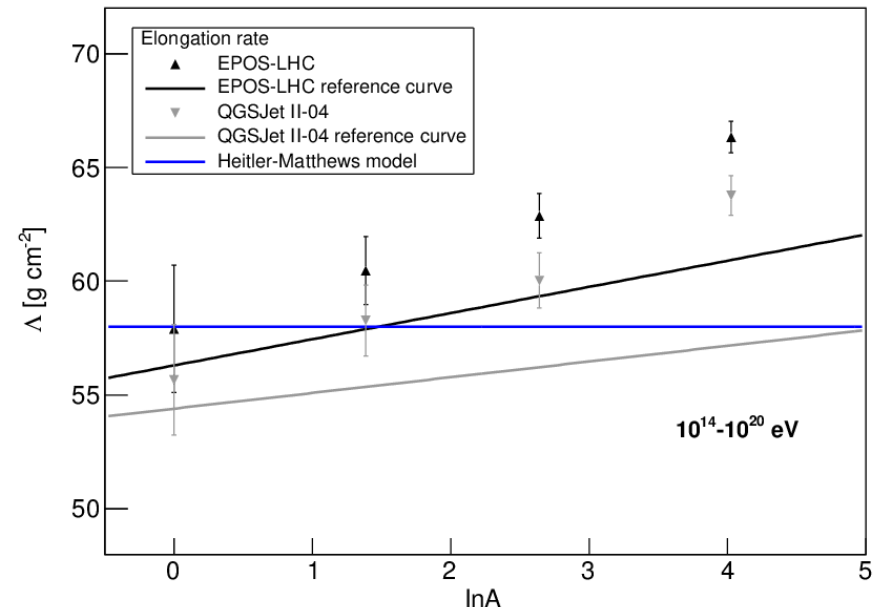
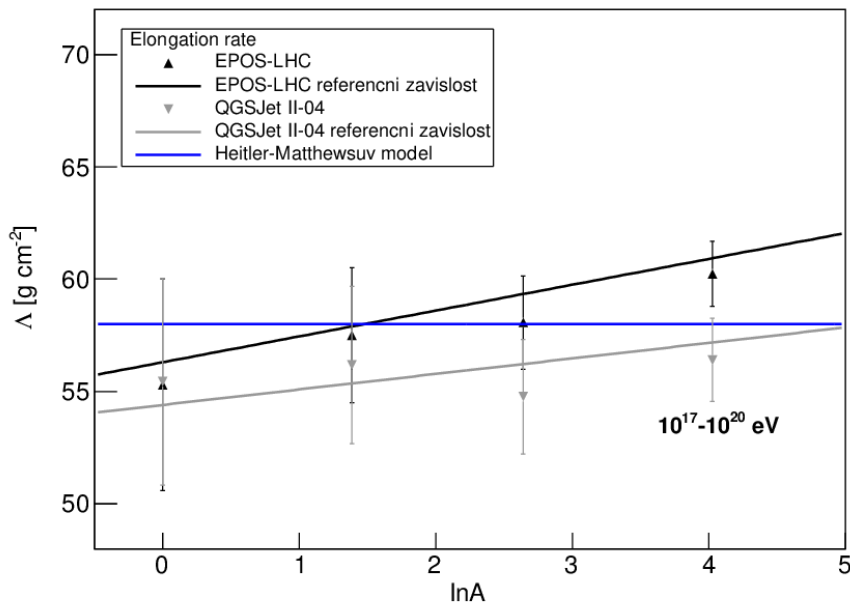
- Zjištění hodnoty elongation rate z nasimulovaných spršek fitováním závislosti maxima spršky na logaritmu energie primární částice
- Předpovědi z modelů:

Heitler-Matthews

$$\Lambda = 58,0 \text{ g} \cdot \text{cm}^{-2}$$

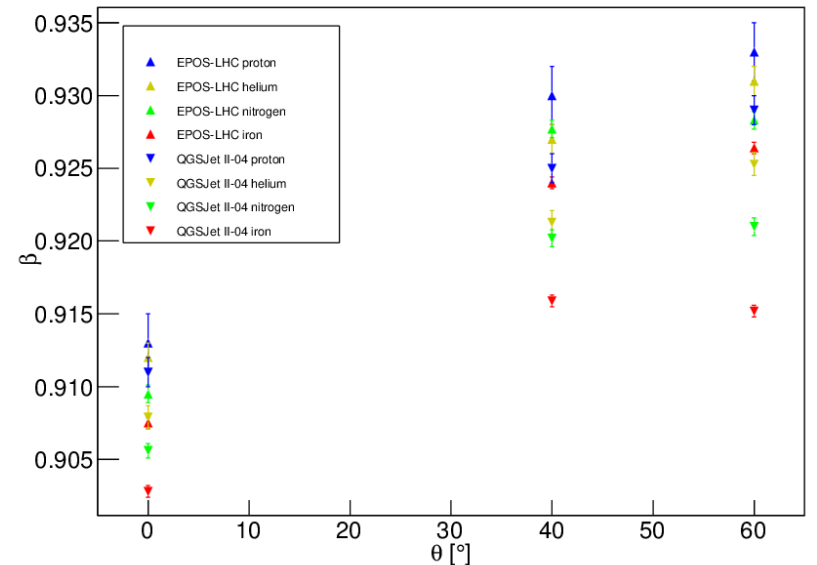
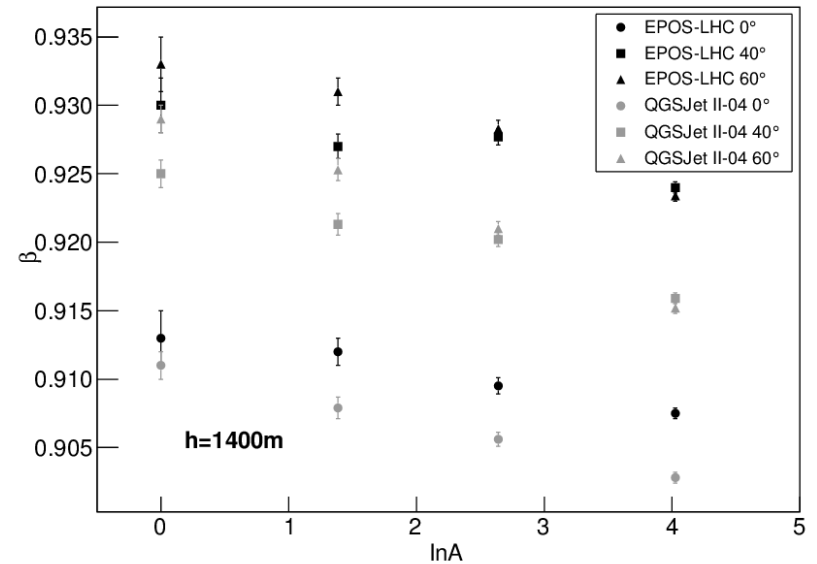
Superpoziční model

$$\Lambda^A = \Lambda + \delta \ln A$$



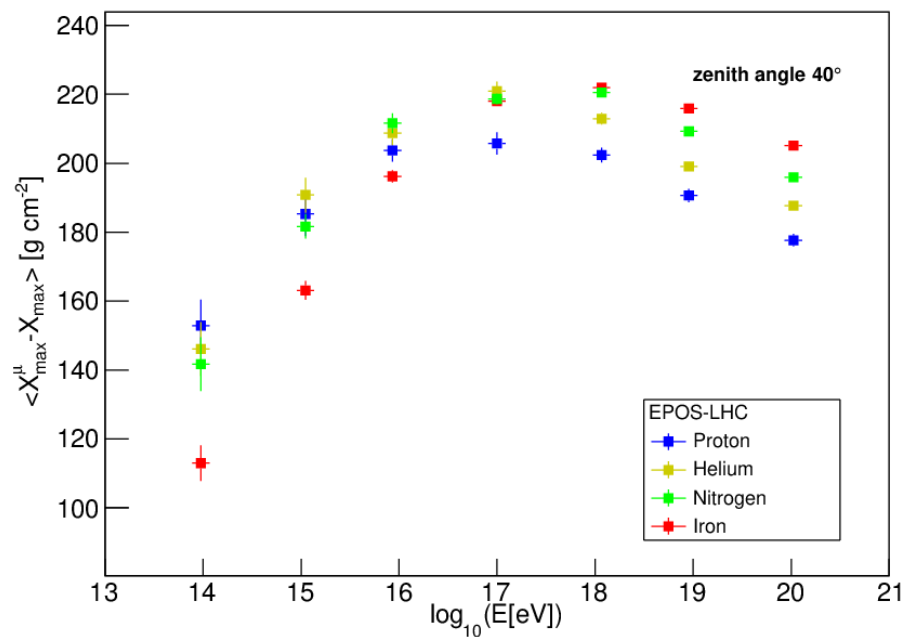
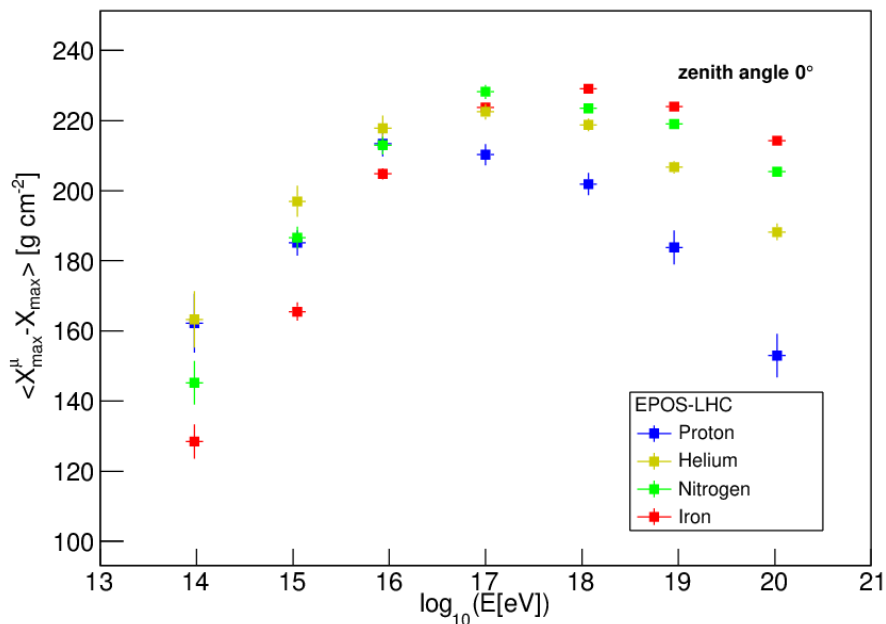
Energetický vývoj počtu mionů ve spršce

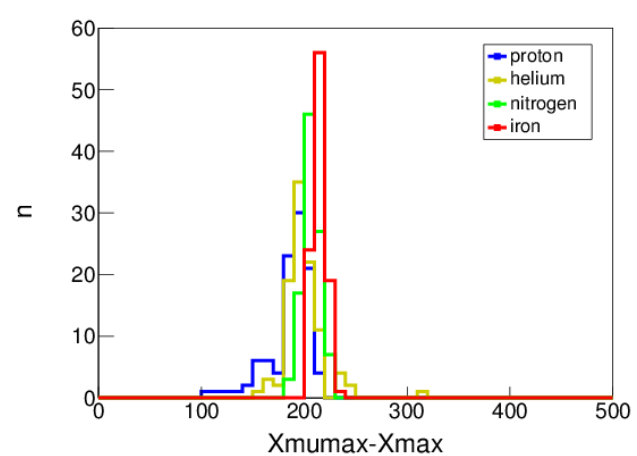
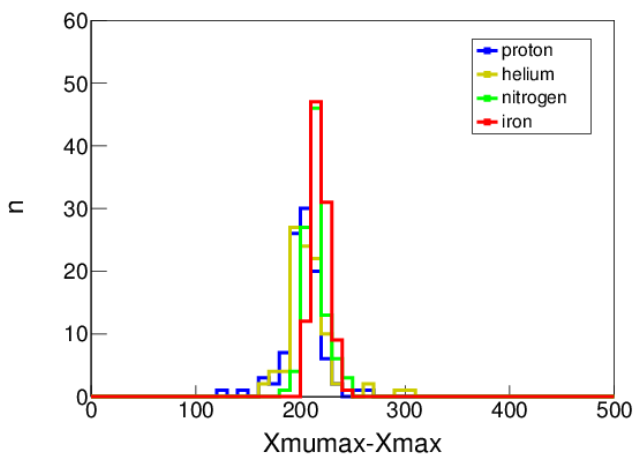
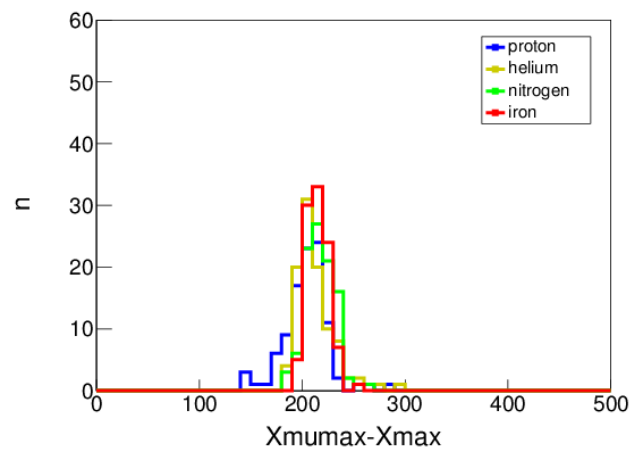
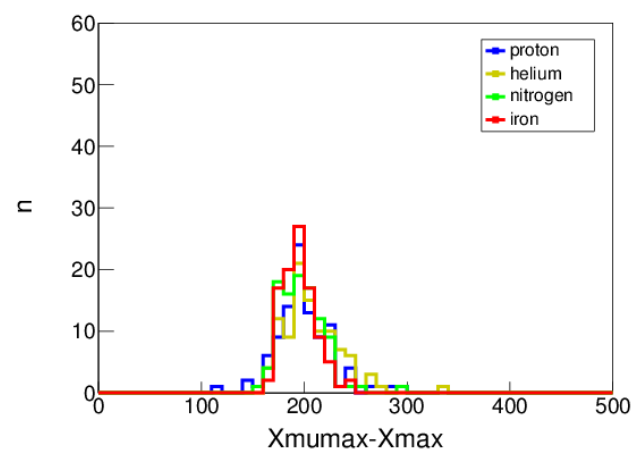
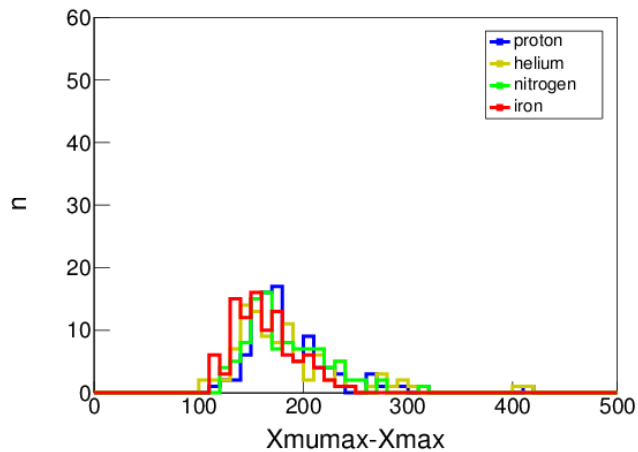
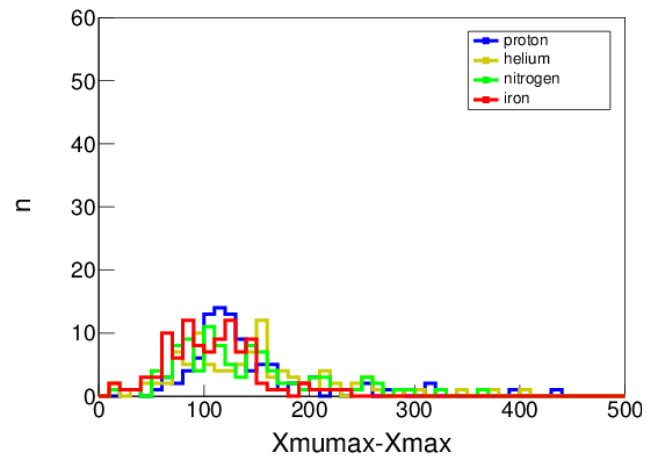
- Určení parametru β z nasimulovaných spršek
 - 3 atmosférické hloubky (maximum spršky, mionové maximum spršky, nadmořská výška 1400m.n.m)
- Klesá s nukleonovým číslem
- Roste se zenitovým úhlem
- Zjištěné hodnoty $\beta \approx 0,900 - 0,935$
- Modelová předpověď $\beta = 0,85$
- Pro fotonové spršky $\beta \approx 1,01 - 1,10$



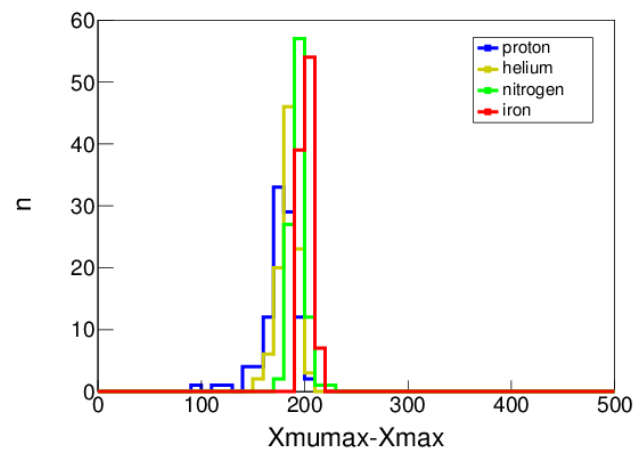
Rozdíl hloubky mionového maxima a maxima spršky

- Při nižších energiích $X_{\max}^{\mu} - X_{\max}$ nižší pro těžší jádra, při nejvyšších energiích opačná závislost
- Zatím nemáme vysvětlení





■ Proton
■ Hélium
■ Dusík
■ Železo



Závěr

- Elongation rate pro fotony a protony v rámci chyby odpovídá předpokládaným hodnotám z Heitlerova a Heitler-Matthewsova modelu.
- Pro prvky s vyšším atomovým číslem hodnota elongation rate roste.
- Parametr β vychází vyšší než předpokládaná hodnota $\beta = 0,85$
$$\beta \approx 0,900 - 0,935$$
- Plány do budoucna: vysvětlení zjištěných efektů a aplikace výsledků na pozorovaná data z Observatoře Pierre Auger

Děkuji za pozornost

Použitá literatura

- [1] J. Matthews, A Heitler model of extensive air showers. *Astroparticle Physics* 22, 387 (2004)
- [2] T. Bergmann, et al., One-dimensional hybrid approach to extensive air shower simulation. *Astropart. Phys.* 26, 420 (2007)
- [3] T. Pierog, et al., First Results of Fast One-dimensional Hybrid Simulation of EAS Using CONEX. *Nucl. Phys., Proc. Suppl.* 151, 159(2006)
- [4] Pierre Auger Collaboration, Interpretation of the Depths of Maximum of Extensive Air Showers Measured by the Pierre Auger Observatory, *Journal of Cosmology and Astroparticle Physics* 2, 026 (2013)
- [5] S. Petrera, Update of the parameterisations given in "Interpretation of the Depths of Maximum..." in the energy range 10^{17} - 10^{20} eV, *GAP* 083 (2014)