

Systematická nepřesnost složení kosmického záření interpretovaného z měření hloubek maxim spršek různými Monte Carlo generátory

Karolína Syrokvaš

Zimní škola EJČF
Fakulta jaderná a fyzikálně inženýrská
Fyzikální ústav Akademie věd České republiky

syrokkar@jfifi.cvut.cz

14. ledna 2020

Obsah prezentace

- 1 Vztah simulací s kosmickým zářením
- 2 Plán útoku na nepřesnosti
- 3 Hadronové modely
 - Sibyll 2.3c
 - EPOS LHC
 - QGSJET-II 04
- 4 Simulační programy
 - CONEX
 - CORSIKA

Proč používáme simulace?

- Chceme zjistit hmotnostní složení spršek [1]
- Jak toho dosáhnout: porovnání s daty ze simulací
- Ověření přesnosti na nižších energiích je možné porovnáním dat z urychlovačů
- ALE tím jsme omezeni na energie a oblast pseudorapidit dosažených na urychlovačích

⇒ Musíme extrapolovat urychlovačová data pro energie nad 10^{17} eV

- Tyto extrapolace jsou zatížené nepřesnostmi
- Už samotné simulace jsou jen přiblížením, protože přesně nevíme, co se děje při nejvyšších energiích
- Místo hadronových interakcí se používají různé **hadronové modely**

Jak se těmi nepřesnostmi zabývám?

- Výzkum v rámci FZÚ AV ČR pod vedením Ing. Jakuba Víchy, Ph.D. a Dr. Eva Maria Martins dos Santos

Provádím simulace 5000 spršek pro:

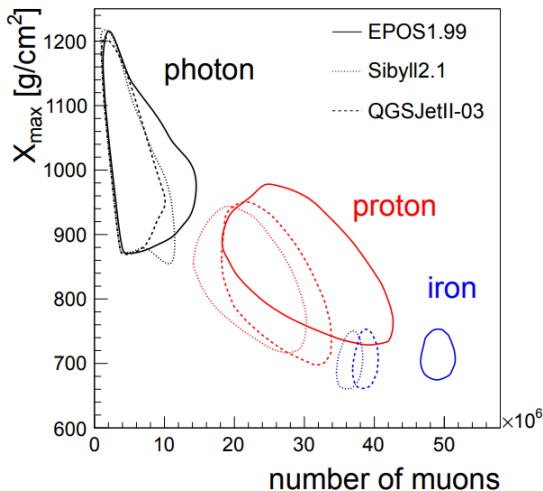
- Jednotlivé primární inicializátory spršky: jádra vodíku (tj. protony), helia (tj. alfa částice), kyslíku a železa
- Jednotlivé hadronové modely: EPOS LHC, QGSJET-II 04 a Sibyll 2.3c
- Energie primárních inicializátorů je v rozsahu $10^{18.5} - 10^{19}$ eV

v simulačním programu CORSIKA na počítačové farmě Goliáš.

Potom budu:

- Fitovat distribuce hloubek maxima spršek naměřených na PAO pomocí nagenovaných distribucí pro různé částice
 - s použitím již existujících nedávno produkovaných simulací v CONEXu
- **Určovat systematickou nepřesnost nafitovaného složení**

Jak moc záleží na modelu?



Obr. 1 : Převzato z [1]

Hadronový model Sibyll 2.3c

= jeden z prvních simulačních programů vyvinutých speciálně pro interpretaci dat kosmického záření [2]

- Kombinuje simulaci hadronové produkce částic s předpověďmi kvantové chromodynamiky
- „Event generator“, jehož vývoj začal už v 80. letech
- Používá Hillas' splitting algorithm a má plně implementovaný tzv. minijet model – několik na sobě nezávislých partonových párů spolu interaguje během jedné srážky
- Byl použit během všech simulací použitých při navrhování PAO

... v porovnání s ostatními modely používá až moc velké zjednodušení, zato má nejkratší simulační dobu

Hadronový model EPOS LHC

= momentálně jeden z nejvyvinutějších modelů, zohledňuje i různé jaderné interakce během srážky [3]

- Většina simulací používá 10 let staré modely hadronových interakcí, což neodpovídá novým datům z RHICu
- EPOS LHC nejlépe odpovídá datům z urychlovačů jako RHIC i CERN (např. SPS), ještě lépe než QGSJET-II 04
- Produkuje víc mionů na povrchu než QGSJET-II 04 a než Sibyll 2.1, ale méně než Sibyll 2.3c

... ale vzhledem ke své sofistikovanosti má velmi dlouhou simulační dobu, hlavně v CORSIKA

Hadronový model QGSJET-II 04

= model používající Quark-Gluon String model a enhanced Pomeron diagrams [4]

- Velmi dobře odpovídá urychlovačovým datům, tedy je i velmi populární
- Jeho vyvinutí je důsledek nového způsobu zpracovávání dat, hlavně na experimentu KASCADE
- Oproti QGSJET-01 má potlačenou produkci sekundárních částic
- Hlubší maxima spršek, ale neprodukuje tolik mionů jako EPOS

... ale pro svou složitost je často jeho princip nepochopen, může být náchylný na chyby při vývoji

CONEX

- Nejedná se o 100% Monte Carlo simulátor kvůli náročnosti výpočtu při vysokých energiích, ale o hybridní [5]
- Sprška se popíše numericky pomocí kaskádních rovnic
- Kombinace s Monte Carlo simulacemi na nejenergetičtější části spršky
- Vedlejší, méně energetické kaskády se řeší pomocí kaskádních rovnic
- Jednodimenzionální simulace

Přestože hlavní myšlenkou CONEXu je hybridní přístup, může také jet v 100% Monte Carlo módu

User interface

```

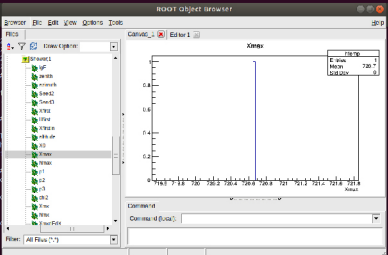
osboxes@virtuallko5:~$ cd soft/conex/conex2rs.40
osboxes@virtuallko5:~/soft/conex/conex2rs.40$ bin/conex2r -a 3 -e 18.5 -E 19 -l 0 -n 4 -n 1 -o 0 -O 0 -p 100 -s 0 -S 59 -x conex -z 30 -Z 30 -X
3
>> conex2r <<

prefix      : conex
random seed  : 410022756 (read from /dev/urandom)
alpha       : 3
lgE         : [18.5, 19]
theta       : [36, 36] deg
impact parameter : [0, 0] n
phi FWHM int : 3 deg
number of showers : 1
HE model    : 4 (FNOS IHC)
particle type : 100

File Edit View Search Terminal Help
[initialise] please cross sections ...
read from /home/osboxes/soft/conex/conex
read from /home/osboxes/soft/conex/conex
read from /home/osboxes/soft/conex/conex
read from /home/osboxes/soft/conex/conex
#####
##      UrQMD 1.3.1 University of Frankfurt
##      urqmd@th.physik.uni-
##
#####
##      please cite when using this mode
##      S.A.Bass et al. Prog.Part.Nucl.Ph
##      H.Blotcher et al. J.Phys. G25 (
##
#####
read LE model table from /home/osboxes/s
cross section tables
read HE model table from /home/osboxes/s
cross section tables
--[Conex]--> opening output file
              /home/osboxes/soft/conex/
#####
--[Conex]--> generating shower number 1
lg(E[GeV]) = 18.53, zenith =
impact parameter = 0.00 km
random seeds: (410022756, 0, 0)
FNOS used with FUSTON option
shower finished: Xmax(GeEDi)-720.47 g/cm^2 (cpuTime=23.49 sec)
--[Conex]--> successfully processed 1 shower
in 43.52 sec, 43.52 sec/showers, with 73.24k cpu usage.

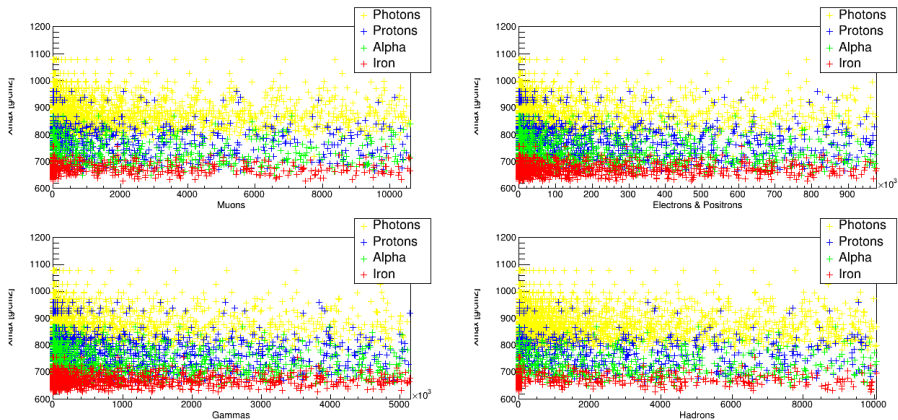
osboxes@virtuallko5:~/soft/conex/conex2rs.40$ root
root [0] new TBrowser;

```



Obř. 2 : Nasimulování jedné protonové spršky v CONEXu a následné nahlédnutí na výsledky v ROOTu.

Zpracovávání dat



Obr. 3 : Příklad zpracování čtyř CONEX spršek v ROOTu.

COsmic Ray SIMulations for KASCADE

- Jedná se o Monte Carlo simulátor pro vysoké energie [6]
- Pro nižší energie využívá semi-integrovaný interakční model FLUKA
- Třidimenzionální simulace
- Monte Carlo simulace jsou o to náročnější na výpočetní dobu, čím je vyšší energie primární částice
- Kvůli tomu je zavedená energie E_{thin} , od které CORSIKA provádí tzv. Thin Sampling, čímž se liší od CONEXu
- „Thinning“ metoda – explicitně se věnuje pouze malé části všech částic a přiřadí jim váhový faktor
 - Když sprška dosáhne fáze velkého počtu částic, jedna z nich se vybere za reprezentativní a zbytek se zahodí

Metodou Thin Sampling se sice sníží výpočetní doba, zato se ale zvýší nepřesnosti u pozorovaných veličin.

Optimální velikosti E_{thin} je možné zvolit k individuálním účelům simulace.

User interface

```
> ./coconut
```

```
-----
Compile in 32 or 64bit mode ?
```

- 1 - Force 32bit mode
- 2 - Use compiler default ('-m64' on a 64bit machine) [CACHED]

```
-----
High energy hadronic interaction models:
```

- 1 - DPMJET-III (2017.1) with PHOJET 1.20.0
- 2 - EPOS LHC
- 3 - NEXUS 3.97
- 4 - QGSJET 01C (enlarged commons)
- 5 - QGSJETII-04
- 6 - SIBYLL 2.3c
- 7 - VENUS 4.12

```
-----
Which low energy hadronic interaction model do you want to use ?
```

- 1 - GHEISHA 2002d (double precision)
- 2 - FLUKA
- 3 - URQMD 1.3cr

```
-----
Which additional CORSIKA program options do you need ?
```

- 1a - Cherenkov version
- 1b - Cherenkov version using Bernlohr IACT routines (for telescopes)
- 1c - apply atm. absorption, mirror reflectivity & quantum eff.
- 1d - Auger Cherenkov longitudinal distribution
- 1e - TRAJECTory version to follow motion of source on the sky
- 2 - LPM-effect without thinning
- 2a - THINning version (includes LPM)
- 2b - MULTIPLE THINning version (includes LPM)
- 3 - PRESHOWER version for EeV gammas
- 4 - NEUTRINO version
- 4a - NUPRIM primary neutrino version with HERWIG
- 4b - ICECUBE1 FIFO version
- 4c - ICECUBE2 gzip/pipe output
- 5 - STACK INput of secondaries, no primary particle
- 6 - CHARMed particle/tau lepton version with PYTHIA
- 6a - TAU LEPTon version with PYTHIA
- 7 - SLANT depth instead of vertical depth for longi-distribution
- 7a - CURVED atmosphere version
- 7b - UPWARD particles version
- 7c - VIEWCONE version

Obr. 4 : Před použitím CORSIKA je zapotřebí ji zkompileovat.

Zpracovávání dat

```

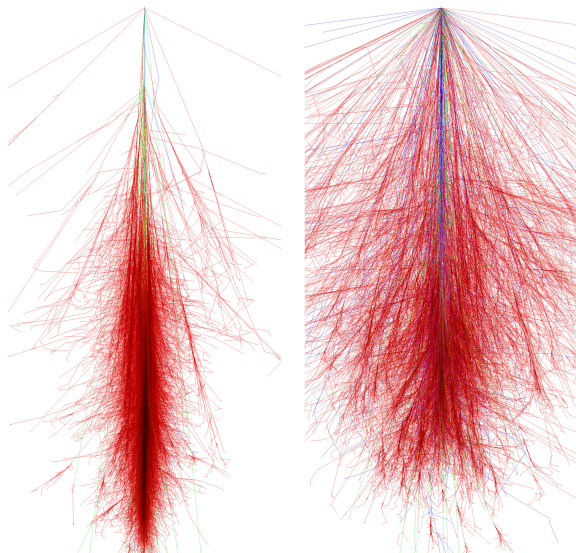
..... GNU nano 2.3.1 File: DAT091247.long
Running instructions:
./CORSIKA_Napoli_Extension_submit.sh NJOBS NSHOW PRIMID HADMOD LOGEBIN ATMCODE

List of required input parameters:
*****
* [NJOBS] - number of jobs to submit *
* [NSHOW] - number of showers per job *
* [PRIMID] - primary particle ID [gamma=1;p=14;He=402;O=1608;N=1407;Fe=5626] *
* [HADMOD] - hadronic model [Q - QGSJetII-04;E - EPOS LHC; S - SIBYLL 2.3c] *
* [LOGEBIN] - log10E bin *
* 1 - log10E [16.5, 17.0[ *
* 2 - log10E [17.0, 17.5[ *
* 3 - log10E [17.5, 18.0[ *
* 4 - log10E [18.0, 18.5[ *
* 5 - log10E [18.5, 19.0[ *
* [ATMCODE] - admitted atmosphere GDAS models: *
* 0 - US standard [CORSIKA default atmosphere] *
* 18 - Malargue January [Chosen as Summer Atmosphere] *
* 19 - Malargue February *
* 20 - Malargue March [Chosen as Autumn Atmosphere] *
* 21 - Malargue April *
* 22 - Malargue May *
* 23 - Malargue June *
* 24 - Malargue July *
* 25 - Malargue August [Chosen as Winter Atmosphere] *
* 26 - Malargue September [Chosen as Spring Atmosphere] *
* 27 - Malargue October *
* 28 - Malargue November *
* 29 - Malargue December *
*****
675. 0 2.36962E+10 1.42329E+09 2.30245E+09 2.41145E+07 2.40281E+07 2
680. 0 2.38859E+10 1.42905E+09 2.31468E+09 2.43422E+07 2.42259E+07 2
685. 0 2.40049E+10 1.43328E+09 2.32615E+09 2.45064E+07 2.43887E+07 2
690. 0 2.42121E+10 1.43555E+09 2.33229E+09 2.46847E+07 2.45563E+07 2
695. 0 2.43514E+10 1.44063E+09 2.34491E+09 2.48458E+07 2.47173E+07 2
700. 0 2.44881E+10 1.44547E+09 2.34973E+09 2.50278E+07 2.48649E+07 2
705. 0 2.46161E+10 1.44987E+09 2.35222E+09 2.52079E+07 2.49935E+07 2
710. 0 2.47325E+10 1.45162E+09 2.36011E+09 2.53943E+07 2.51360E+07 2
715. 0 2.48269E+10 1.45055E+09 2.36557E+09 2.55324E+07 2.52990E+07 2
720. 0 2.49037E+10 1.45098E+09 2.36152E+09 2.56339E+07 2.54283E+07 2
725. 0 2.49773E+10 1.45227E+09 2.36396E+09 2.57670E+07 2.55455E+07 2
730. 0 2.50426E+10 1.45107E+09 2.36277E+09 2.58732E+07 2.56750E+07 2
735. 0 2.50986E+10 1.44865E+09 2.36973E+09 2.59831E+07 2.57690E+07 2
740. 0 2.51317E+10 1.44416E+09 2.36405E+09 2.60786E+07 2.59015E+07 2
745. 0 2.51589E+10 1.44093E+09 2.35045E+09 2.61729E+07 2.60695E+07 2
750. 0 2.51677E+10 1.43779E+09 2.35518E+09 2.63017E+07 2.61935E+07 2
755. 0 2.51618E+10 1.43267E+09 2.34657E+09 2.64006E+07 2.62952E+07 2
760. 0 2.51580E+10 1.42455E+09 2.33778E+09 2.64898E+07 2.64174E+07 2
765. 0 2.51383E+10 1.41809E+09 2.33094E+09 2.65919E+07 2.65206E+07 2
770. 0 2.51028E+10 1.41296E+09 2.32111E+09 2.66843E+07 2.66083E+07 2
775. 0 2.50625E+10 1.40581E+09 2.31465E+09 2.67674E+07 2.66694E+07 2
780. 0 2.50141E+10 1.39764E+09 2.30326E+09 2.68349E+07 2.67412E+07 2
785. 0 2.49461E+10 1.38903E+09 2.28992E+09 2.68945E+07 2.68021E+07 2
790. 0 2.48644E+10 1.38100E+09 2.27824E+09 2.69683E+07 2.68759E+07 2
795. 0 2.47822E+10 1.37411E+09 2.26448E+09 2.69857E+07 2.69366E+07 2
800. 0 2.46860E+10 1.36442E+09 2.25152E+09 2.70596E+07 2.69979E+07 2
805. 0 2.45876E+10 1.35285E+09 2.24191E+09 2.71357E+07 2.70690E+07 2
810. 0 2.44767E+10 1.34385E+09 2.22726E+09 2.72106E+07 2.71280E+07 2
*****
FIT OF THE HILLAS CURVE N(T) = P1*(T-P2)/(P3-P2)**((P3-P2)/(P4+P5+P6)
TO LONGITUDINAL DISTRIBUTION OF ALL CHARGED PARTICLES
PARAMETERS = 3.8722E+09 -3.3039E+01 7.2357E+02 8.7540E+01 -1.692
CHI**2/DOF = 1.3079E+05
AV. DEVIATION IN % = 2.1018E+02
-bash-4.2$

```

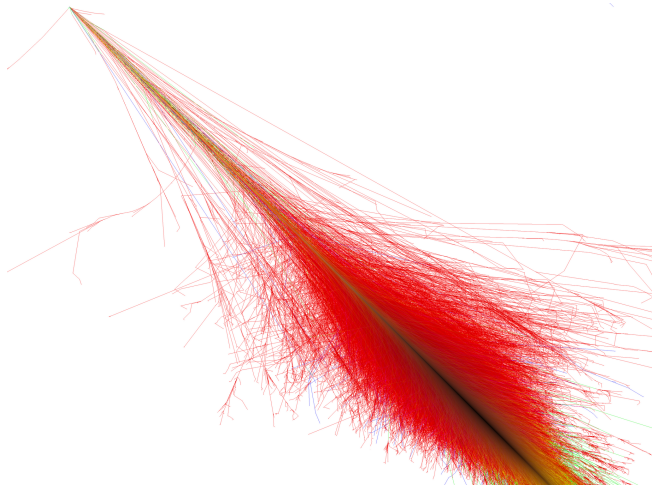
Obř. 5 : Vpravo: pro více sprřek je vřhodnř posřlat je vypracovat na pořitačovř farmř za pomoci vřtřřho bash programu. Vlevo: ukážka vřsledkř jednř ze sprřek na farmř.

Příklady propagace spršek v CORSIKA – zenitový úhel 0°



Obr. 6 : Simulace spršky na energii 10^{12} eV za nulového zenitového úhlu. Vlevo je primary proton, převzato z [1], vpravo železo, převzato z [2].

Příklady propagace spršek v CORSIKA – zenitový úhel 45°



Obr. 7 : Simulace spršky na energii 10^{15} eV s proton primary, převzato z [1].

Reference



K.-H. Kampert, M. Unger: *Measurements of the Cosmic Ray Composition with Air Shower Experiments* [Online]. [cit. 11. ledna 2020].

<https://arxiv.org/pdf/1201.0018.pdf>.



Engel, Ralph & Riehn, Felix & Fedynitch, Anatoli & Gaisser, Thomas & Stanev, Todor: *The hadronic interaction model Sibyll – past, present and future* [Online]. [cit. 11. ledna 2020].

https://www.researchgate.net/publication/317901448_The_hadronic_interaction_model_Sibyll_-_past_present_and_future.



T. Pierog, K. Werner: *EPOS Model and Ultra High Energy Cosmic Rays* [Online]. [cit. 11. ledna 2020].

<https://arxiv.org/pdf/0905.1198.pdf>.



S. Ostapchenko, D. Heck: *Hadronic Interactions in QGSJET-II: Physics and Results* [Online]. [cit. 11. ledna 2020].

<https://cds.cern.ch/record/965306/files/17135-ger-ostapchenko-S-abs1-he14-oral.pdf>.



T. Bergmann, R. Engel, D. Heck, N. N. Kalmykov, S. Ostapchenko, T. Pierog, T. Thouw, K. Werner: *One-dimensional Hybrid Approach to Extensive Air Shower Simulation* [Online]. [cit. 12. ledna 2020].

<https://arxiv.org/pdf/astro-ph/0606564.pdf>.



D. Heck, J. Knapp: *Upgrade to the Monte Carlo Code CORSIKA to Simulate Extensive Air Showers with Energies $> 10^{20}$ eV* [Online]. [cit. 12. ledna 2020].

<http://inspirehep.net/record/475981/files/FZKA6097.pdf>.

Reference obrázků



J. Knapp: *CORSIKA Shower Images: Proton Showers* [Online]. [cit. 12. ledna 2020].
<https://www.zeuthen.desy.de/~jknapp/fs/proton-showers.html>.



J. Knapp: *CORSIKA Shower Images: Iron Showers* [Online]. [cit. 12. ledna 2020].
<https://www.zeuthen.desy.de/~jknapp/fs/iron-showers.html>.