



# Unsichtbare Energie in hochenergetischen Luftschauern

R. Engel, T. Pierog und M. Unger  
Forschungszentrum Karlsruhe



## Motivation: Kalorimetrische Energiebestimmung mit Fluoreszenzteleskopen

- Fluoreszenzemission proportional zur Energieabgabe  $dE/dX$  in der Atmosphäre
- kalorimetrische Energie:

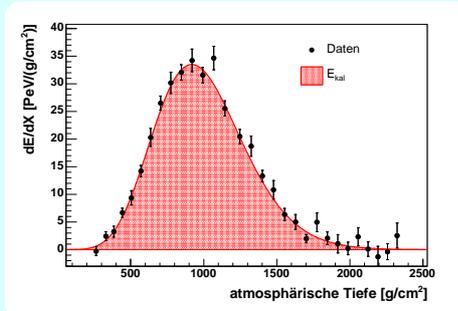
$$E_{\text{kal}} = \int_0^\infty dE/dX(X) dX$$

- Neutrinos/hochenergetische Myonen tragen nichts/kaum zu  $dE/dX$  bei

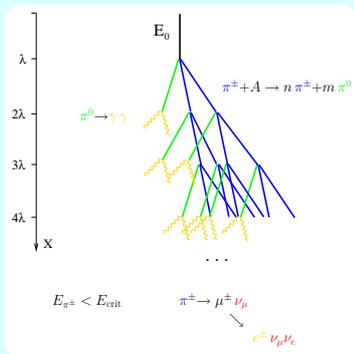
→ „unsichtbare“ Energie  $E_{\text{inv}}$

→ Primärenergie  $E_{\text{tot}} = E_{\text{kal}} + E_{\text{inv}}$

Beispiel: Auger Ereignis



## Abschätzung mit Heitlers Modell



- Transfer der Primärenergie in elektromagnetische Schauerkomponente
- $\pi$ -Produktion bis Zerfallslänge  $>$  WW-länge  $\leftrightarrow E_{\pi^\pm} < E_{\text{crit}}$

Analytische Rechnung:

- Superposition:  $E_0 \rightarrow A \cdot E_0/A$
- konstante  $\pi$ -Multiplizität  $n_\pm$
- konstante kritische Energie  $E_{\text{crit}}$
- $\pi^\pm$ -Energieanteil  $f_\pm$
- $\nu$ -Energieanteil  $f_\nu$  in  $\pi-\mu-e$

→ Anzahl der WW bis  $\pi^\pm$ -Zerfall:

$$k = \frac{\ln(E_{\text{crit}}/E_0 \cdot A)}{\ln(f_\pm/n_\pm)}$$

→ Anteil der unsichtbaren Energie:

$$\frac{E_{\text{inv}}}{E_0} = f_\nu \cdot \left( \frac{1}{A} \frac{E_0}{E_{\text{crit}}} \right)^{-\alpha}$$

wobei  $\alpha = \frac{\ln(f_\pm)}{\ln(f_\pm/n_\pm)} > 0$

→ Schlussfolgerungen:

- Energieverhalten:  
mehr WW bis zum Zerfall bei hohem  $E_0$   
→ mehr Energietransfer nach  $\pi^0 \rightarrow \gamma\gamma$   
→ Anteil von  $E_{\text{inv}}$  wird kleiner  $\propto E_0^{-\alpha}$
- hadronische Primärteilchen:  
 $A$  Kaskaden mit  $E = E_0/A$   
→ tiefere Eindringtiefe für leichtere Kerne  
→ mehr  $E_{\text{inv}}$  für schwere Kerne
- Photonen:  
kaum Myonproduktion  
→  $E_{\text{inv}} \approx 0$
- theoretische Unsicherheiten aus  $n_\pm$

## Luftschauersimulation mit CONEX

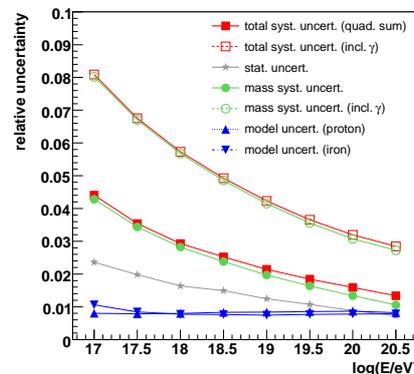
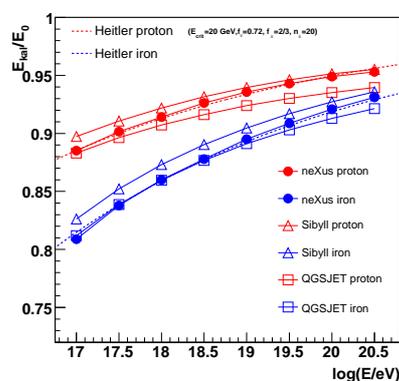
Hybridsimulation [1] mit den hadronischen WW-Modellen neXus3.97 [2], QGSJET01 [3] und Sibyll2.1 [4] (siehe [5] für Details).

→ Korrekturfaktoren für kalorimetrische Energiemessungen:

$$E_0^{\text{rec}} = E_{\text{kal}}^{\text{rec}} \cdot \left( \frac{E_{\text{kal}}}{E_0} \right)_{\text{theo}}^{-1}$$

→ stat. und syst. Unsicherheiten:

- Schauerfluktuationen
- Modellunterschiede
- Art des Primärteilchens



## Zusammenfassung

- qualitatives Verständnis der Energie- und Massenabhängigkeit der unsichtbaren Energie in hochenergetischen Schauern mit dem einfachen Heitler-Modell
- Korrekturfaktoren für die Energiebestimmung mit Fluoreszenzteleskopen
- größte Unsicherheit durch Möglichkeit primärer Photonen
- primäre Nukleonen: Gesamtunsicherheit  $\leq 3\%$  für  $E_0 > 10^{19}$  eV

## Literatur

- M. Alekseeva et al., *Proc. 29<sup>th</sup> ICRC Pune* (2005) and T. Pierog et al., astro-ph/0411260.
- H. J. Drescher et al., *Phys. Rep.* **350** (2001) 93 and hep-ph/0007198.
- N. N. Kalmykov, S. Ostapchenko and A. I. Pavlov, *Nucl. Phys. B (Proc. Suppl.)* **52B** (1997) 17 and *Phys. At. Nucl.* **56** (1993) (3) 346.
- R. Engel, T. K. Gaisser, P. Lipari and T. Stanev, *Proc. 26<sup>th</sup> ICRC Salt Lake City 1* (1999) 415; R. S. Fletcher, T. K. Gaisser, P. Lipari and T. Stanev, *Phys. Rev.* **D50** (1994) 5710.
- T. Pierog et al., *Proc. 29<sup>th</sup> ICRC Pune* (2005).