

---

# Masterarbeit - Aktueller Stand

---

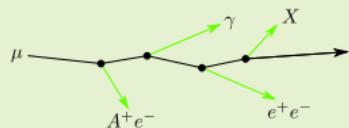
Jean-Marco Alameddine

**15.11.2019**

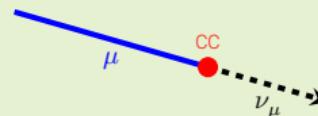
Technische Universität Dortmund

## Inhalt

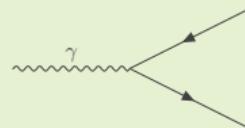
### 1. Einführung in PROPOSAL



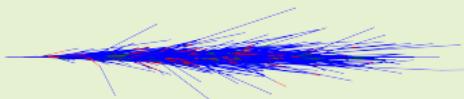
### 2. Seltene Prozesse



### 3. Schauerpropagation

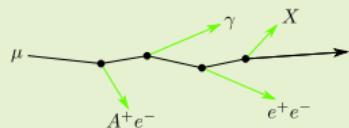


### 4. Ergebnisse

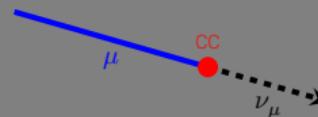


## Inhalt

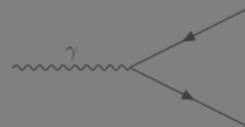
### 1. Einführung in PROPOSAL



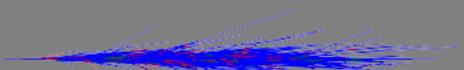
### 2. Seltene Prozesse



### 3. Schauerpropagation



### 4. Ergebnisse



Ziel ist es ein Monte-Carlo Programm zu entwickeln, welches einerseits die bei der Propagation von Leptonen auftauchende **große Anzahl** an Wechselwirkungen (einige tausend) mit **großer Genauigkeit** beschreibt und andererseits den algorithmischen Fehler so gering wie möglich hält.

"Der Leptonpropagator PROPOSAL" - Dissertation von Jan-Hendrik Köhne

- **PROPOSAL:** C++ -Bibliothek mit Python Bindings
- Simulation der Wechselwirkungen von hochenergetischen Teilchen
  - Energieverluste
  - Vielfachstreuung
  - Zerfall
- Verschiedene Wechselwirkungsparametrisierungen verfügbar
  - Untersuche Auswirkungen auf Simulationen
- Nutzung von Interpolationstabellen

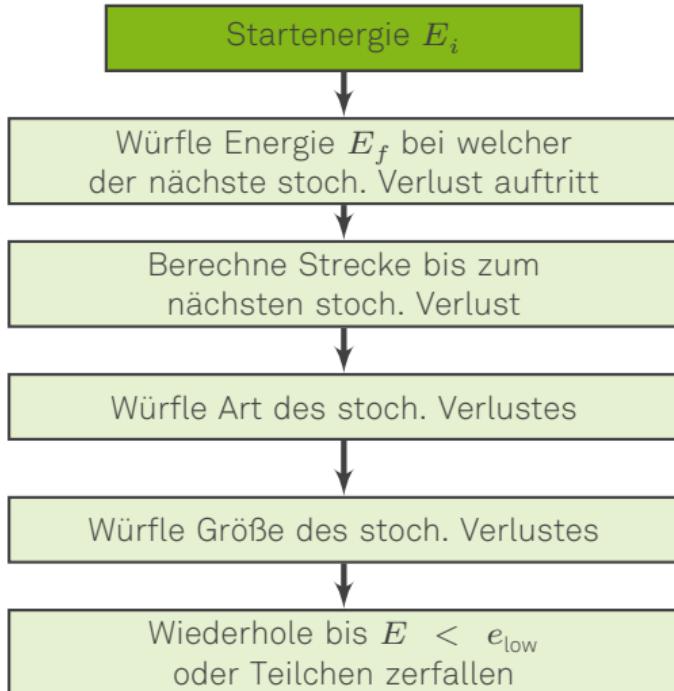
$$\frac{d\sigma}{dv} \xrightarrow{?} \text{Energieverluste}$$

mit  $v$  dem relativen Energieverlust eines Primärteilchens

$v > v_{\text{cut}}$   
stochastische Verluste

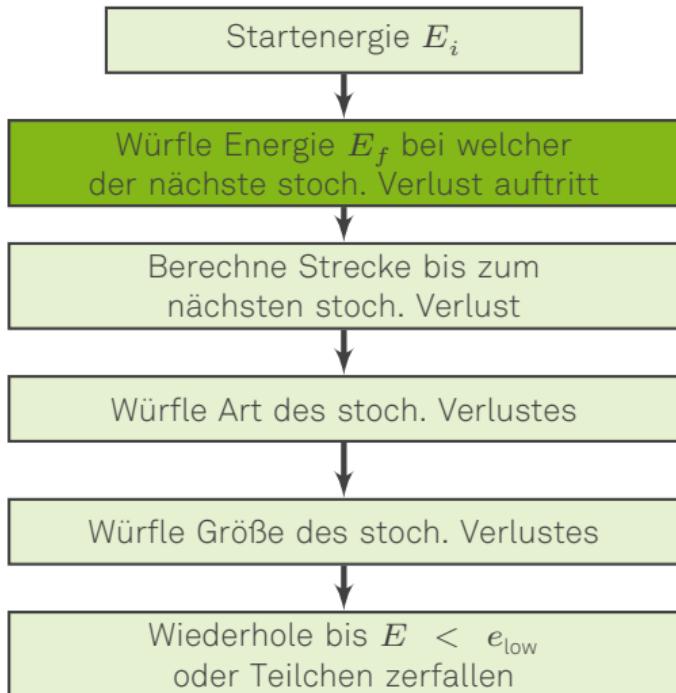
$v < v_{\text{cut}}$   
kontinuierliche Verluste

mit  $v_{\text{cut}} = \min [e_{\text{cut}}/E, v'_{\text{cut}}]$



## Initialisierung

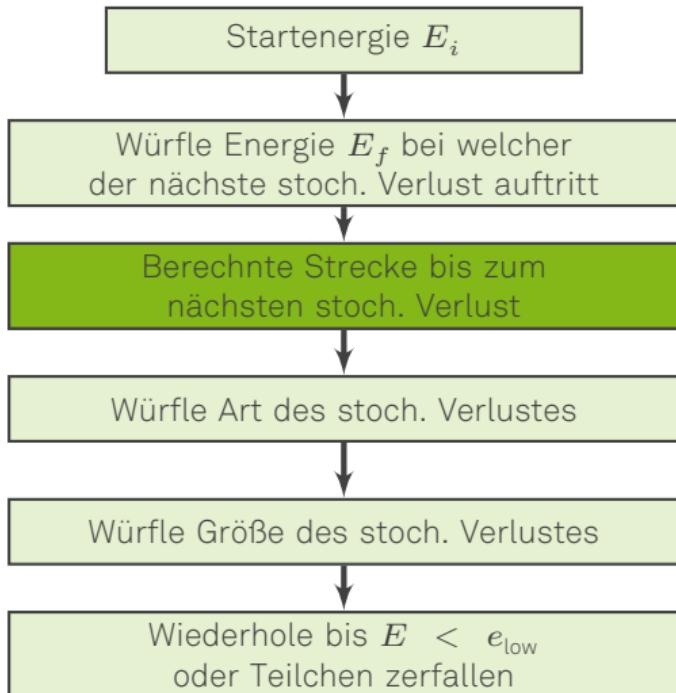
Setze  $E_i, \vec{r}_i, \vec{d}_i, \dots$  für zu propagierendes Teilchen



## Energieintegral

$$\int_{E_i}^{E_f} \frac{\sigma(E)}{-f(E)} \cdot dE = -\log(\xi)$$

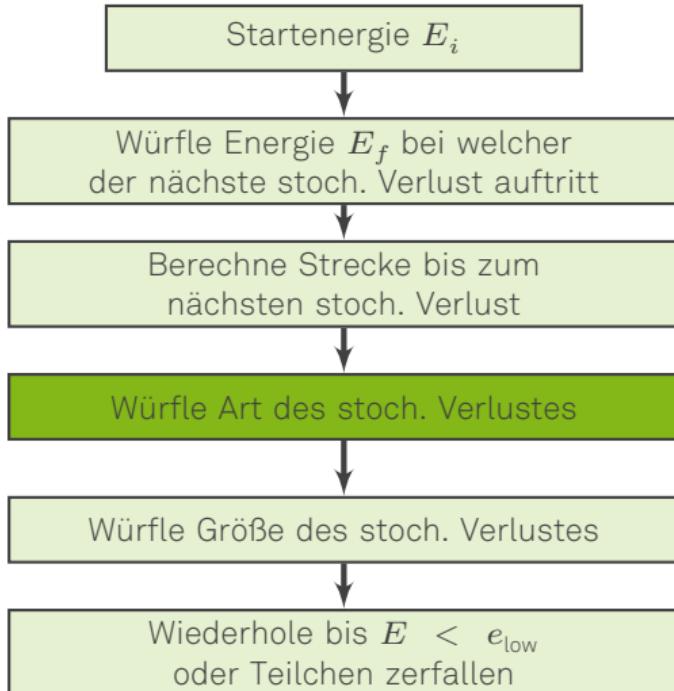
- $\sigma(E) = \sigma_{\text{tot, stoch}}$
- $f(E) = \frac{dE}{dx} \Big|_{\text{kont.}} \propto E \int_{v_{\min}}^{v_{\text{cut}}} v \frac{d\sigma}{dv} dv$
- $\xi \in [0, 1)$



## Spurintegral

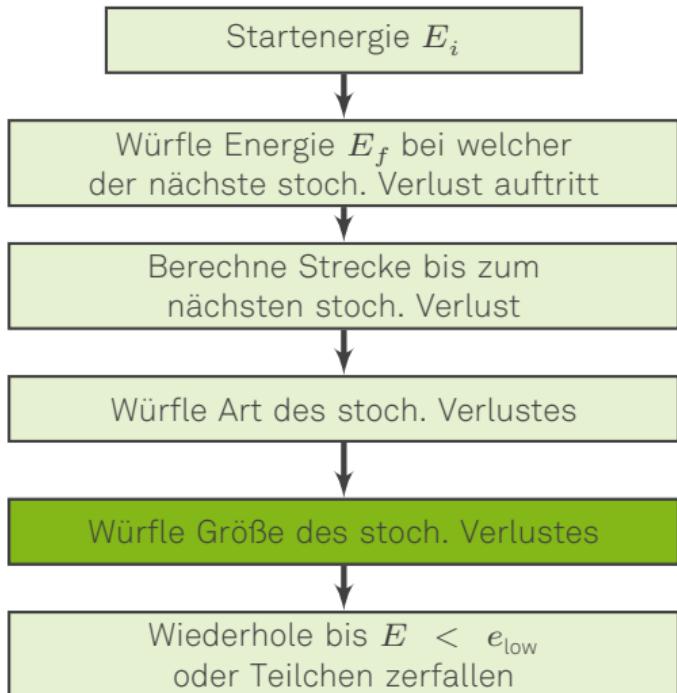
$$x_f = x_i - \int_{E_i}^{E_f} \frac{dE}{f(E)}$$

$$\blacksquare f(E) = \left. \frac{dE}{dx} \right|_{\text{kont.}} \propto E \int_{v_{\min}}^{v_{\text{cut}}} v \frac{d\sigma}{dv} dv$$



### Stochastischer Verlust

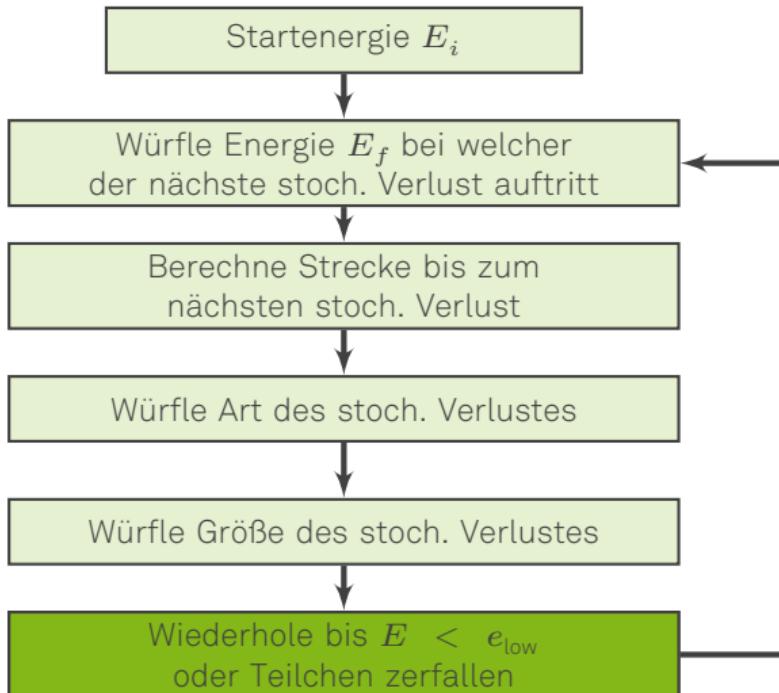
Vergleiche  $\sigma_{\text{tot, stoch}}$  der verschiedenen Wechselwirkungen.

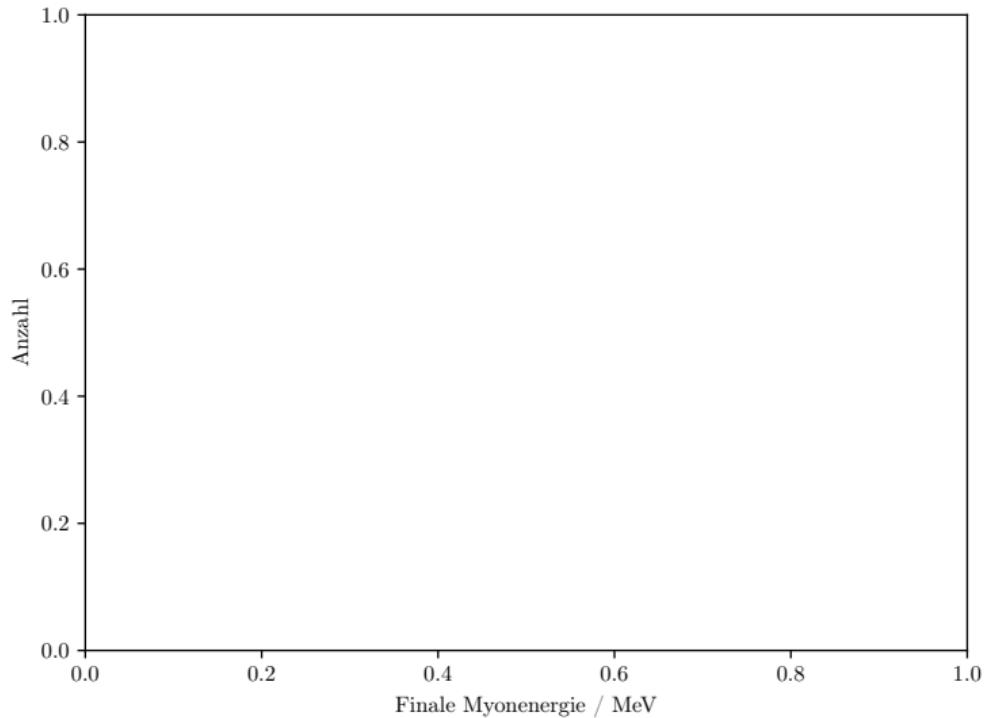


## Stochastischer Verlust

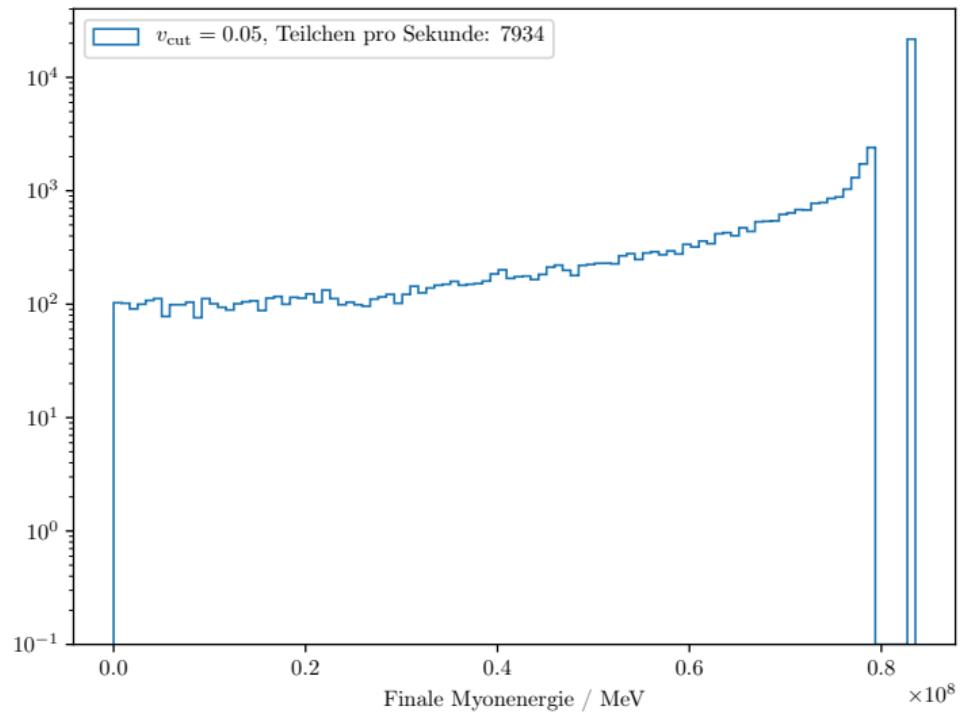
$$\frac{1}{\sigma_{i,\text{tot}}} \int_{v_{\text{cut}}}^v \frac{d\sigma_i}{dv} = \xi$$

- $i \hat{=}$  zuvor bestimmte Wechselwirkung
- $\xi \in [0, 1)$

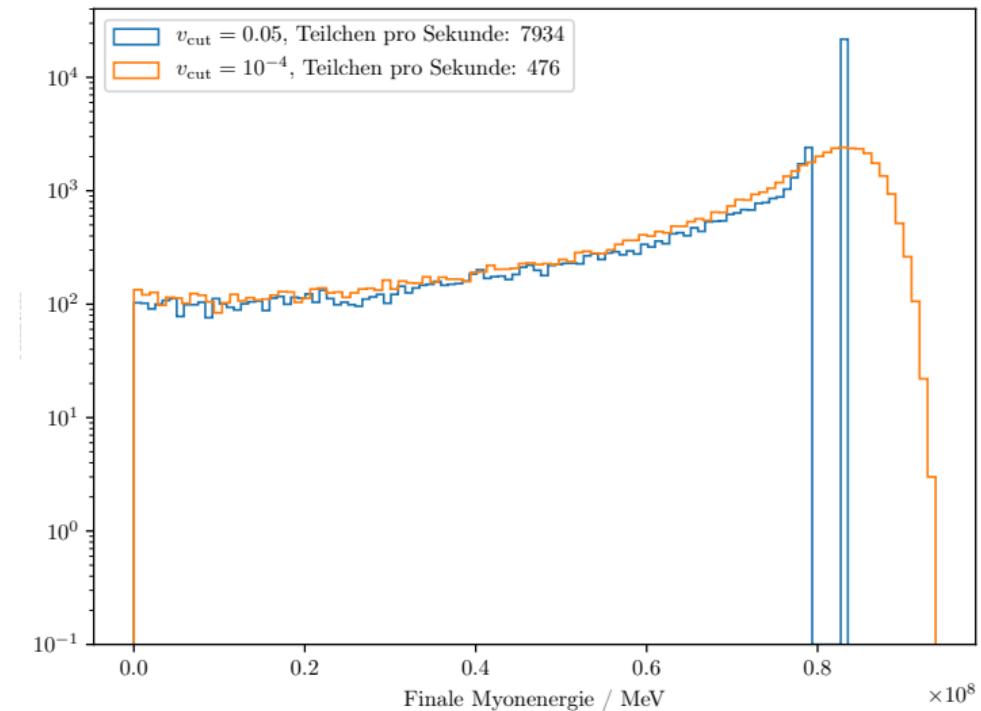




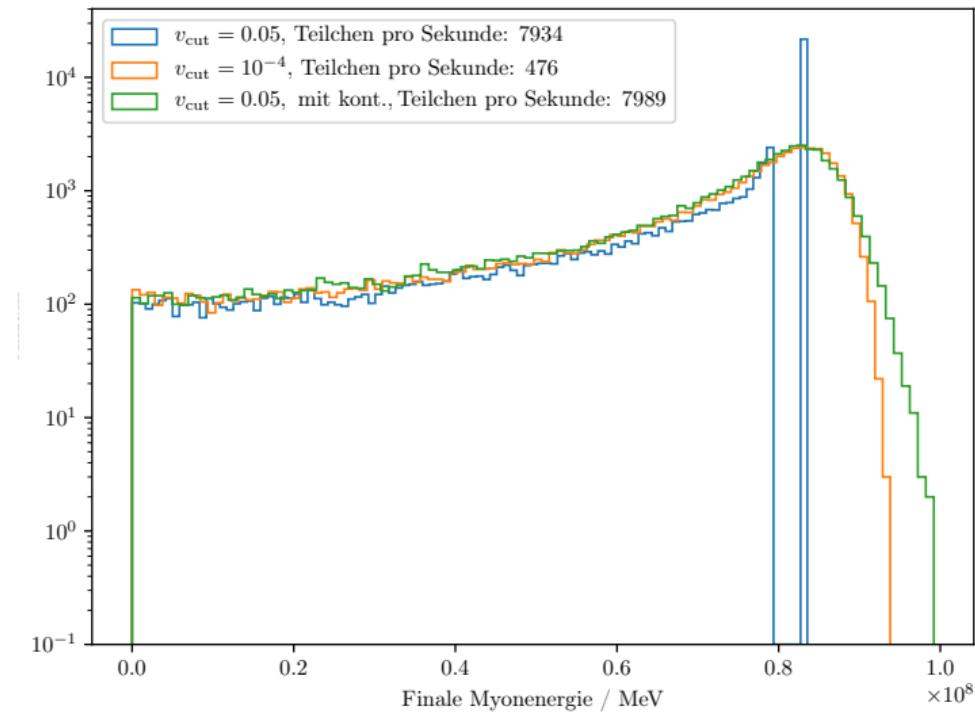
Propagation von  $5 \cdot 10^4$  Myonen einer Startenergie von  $10^8$  MeV durch 300 m Stein.



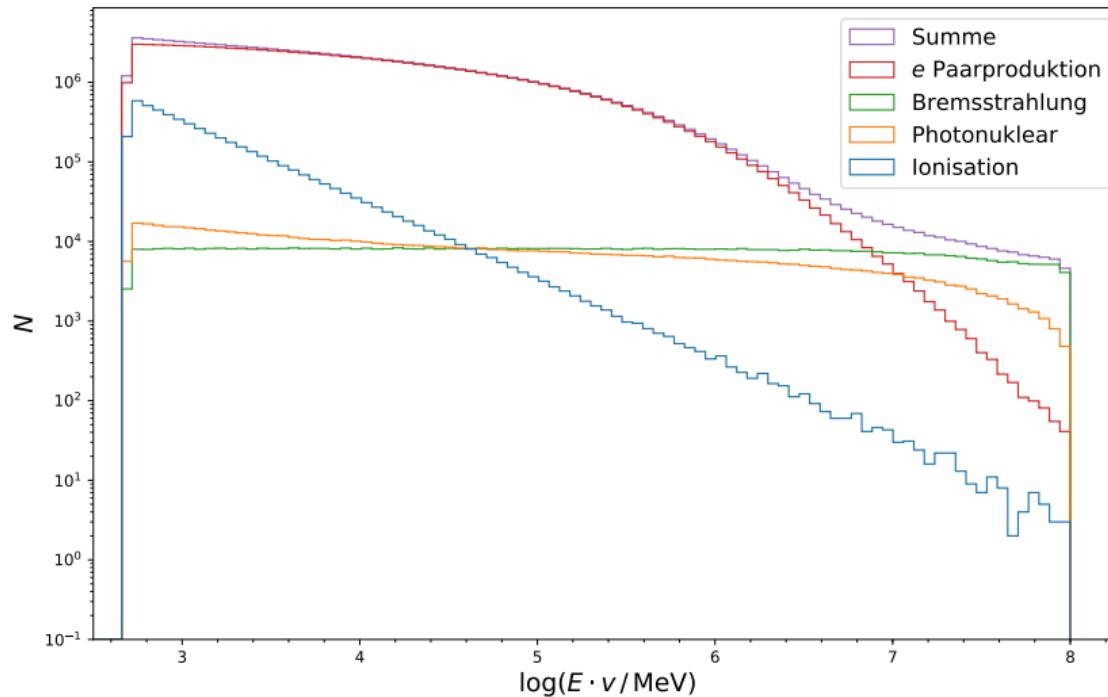
Propagation von  $5 \cdot 10^4$  Myonen einer Startenergie von  $10^8$  MeV durch 300 m Stein.



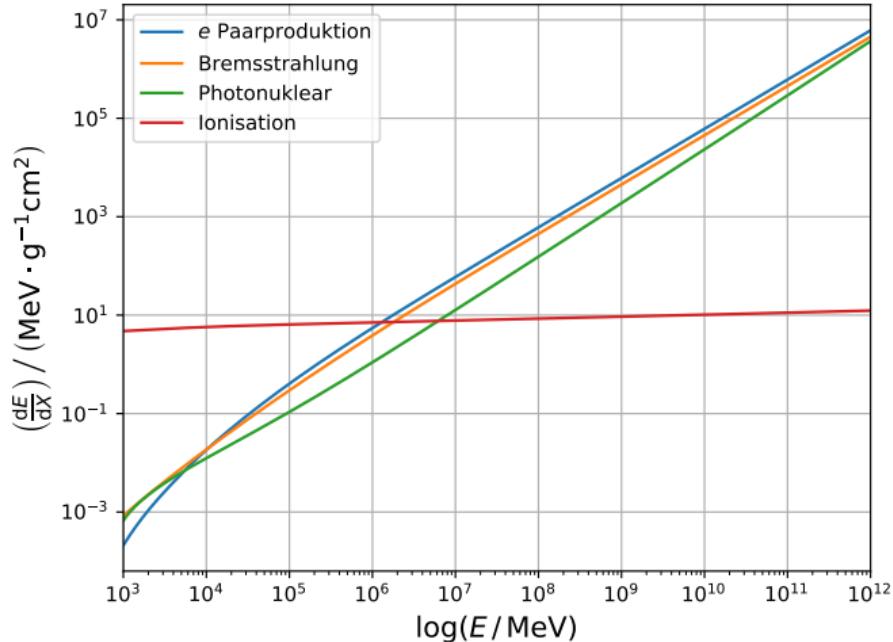
Propagation von  $5 \cdot 10^4$  Myonen einer Startenergie von  $10^8$  MeV durch 300 m Stein.



Propagation von  $5 \cdot 10^4$  Myonen einer Startenergie von  $10^8$  MeV durch 300 m Stein.



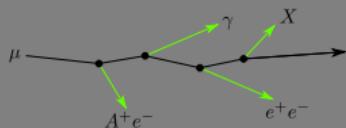
Energieverluste von  $10^6$  Myonen einer Startenergie von  $10^8$  MeV durch  $100\text{ m}$  Stein.



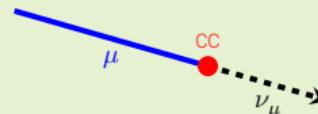
Kontinuierliche Energieverluste von Myonen in Stein.

## Inhalt

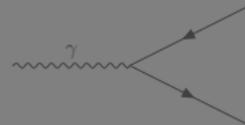
### 1. Einführung in PROPOSAL



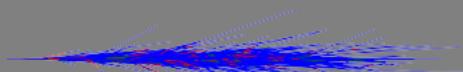
### 2. Seltene Prozesse



### 3. Schauerpropagation

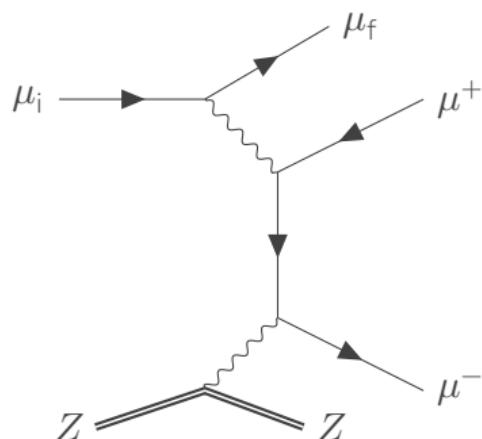


### 4. Ergebnisse



## Myonpaarproduktion

Mit dem auf das Myonpaar übertragenen Energieanteil:



$$v = \frac{(\epsilon_+ + \epsilon_-)}{E}$$

Mit dem Asymmetrieparameter:

$$\rho = \frac{(\epsilon_+ - \epsilon_-)}{(\epsilon_+ + \epsilon_-)}$$

$E$ : Initialenergie des eingehenden Myons  $\mu_i$   
 $\epsilon_{\pm}$ : Energie des erzeugten (Anti)myon  
 $Z$ : Atom(kern) im Medium

## Differentieller Wirkungsquerschnitt

Analytische, approximative Formel für die Myonpaarproduktion<sup>1</sup>:

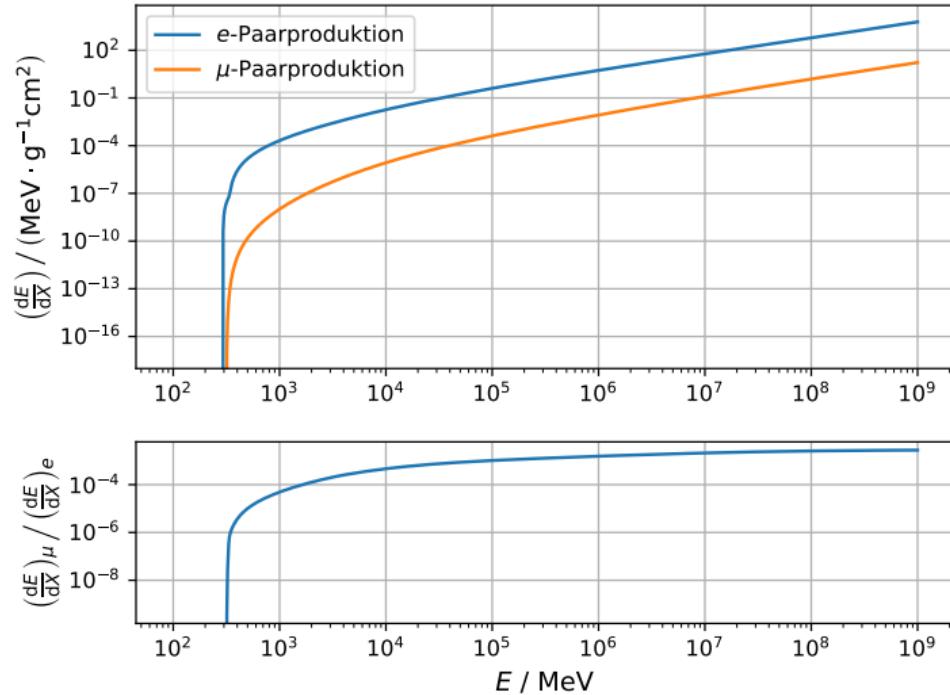
$$\frac{d\sigma}{dv d\rho} = \frac{2}{3\pi} (Z\alpha r_\mu)^2 \frac{1-v}{v} \Phi(v, \rho) \ln(X(E, v, \rho))$$

Abweichungen  $\epsilon$  zur exakten Formel:

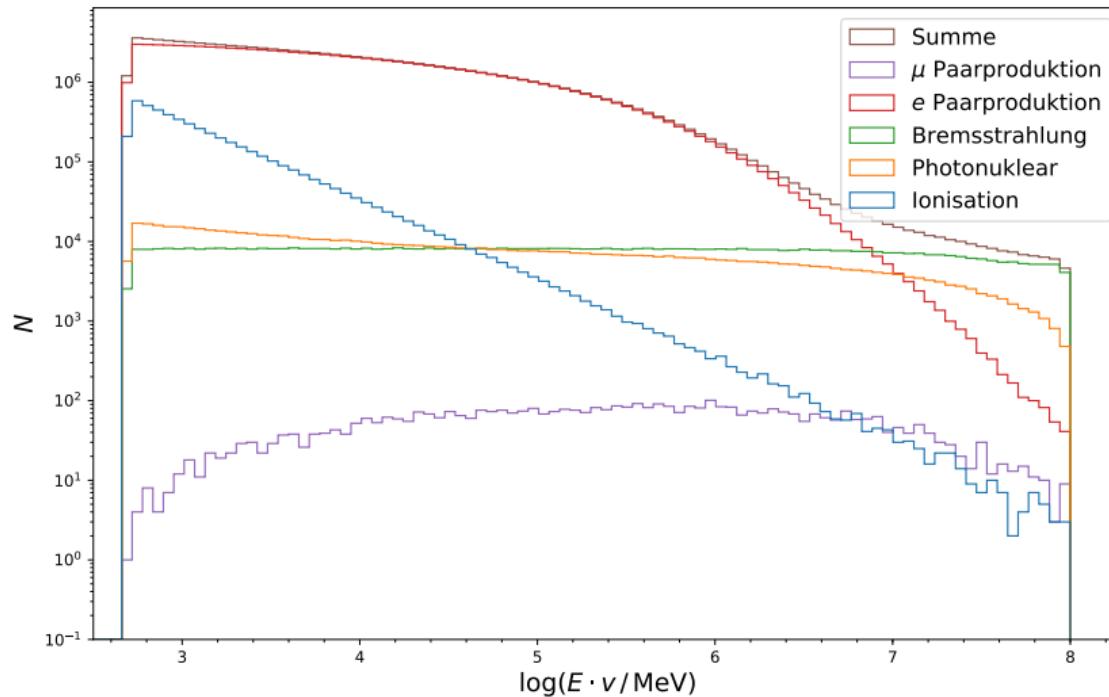
- $\epsilon < 2\text{--}3\%$  für  $E > 30 \text{ GeV}$
- $\epsilon < 10\%$  für  $E < 10 \text{ GeV}$

---

<sup>1</sup>Kelner, Kokoulin, Petrukhin: Phys. of Atomic Nuclei, Vol. 63, No. 9, 2000, pp. 1603-1611



Vergleich der kontinuierlichen Energieverluste (d.h.  $v_{\text{cut}} = v_{\text{max}}$ ) in Stein.



Energieverluste von  $10^6$  Myonen einer Startenergie von  $10^8$  MeV durch 100 m Stein.

## Relevanz

### **IceCube-Ereignisse**

- "Energieverluste" aufgrund von Myonpaarproduktion vernachlässigbar
- Myon-Bündel und einzelne Myonen mit unterschiedlichen Signaturen

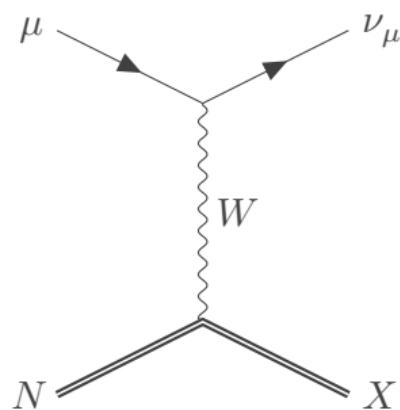
### **Luftschauer<sup>2</sup>**

- Zwei mögliche Quellen für Myon-Bündel in Untergrundexperimenten:
  - Hardronische Komponente in Luftschauern
  - Myonpaarproduktion in Stein/Wasser
- Messe Anzahl und Eigenschaften von Myon-Bündeln
  - Informationen über hadronische Wechselwirkungsmodelle
  - Informationen über Schauerkomposition

---

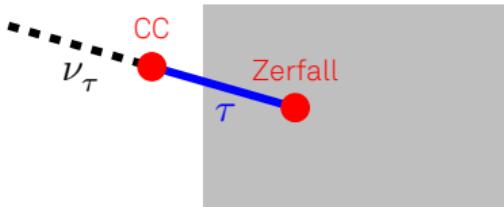
<sup>2</sup>Kudryavtsev, Korolkova, Spooner: Physical Letter B 471, 1999, pp. 251-256

## Schwache Wechselwirkung

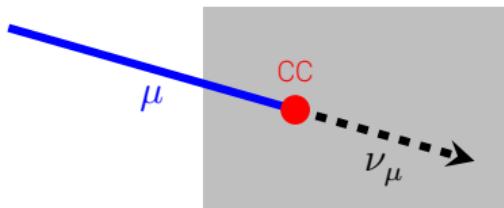


- Stark unterdrückter Prozess
- Rein stochastische Wechselwirkung (d.h.  $v_{\text{cut}} = v_{\min}$ , kein Beitrag zu kontinuierlichen Verlusten)
- Erhalte Wirkungsquerschnitt aus Crossing-Symmetrie:

$$d\sigma(\mu N \rightarrow \nu_\mu X) = \frac{1}{2} d\sigma(\nu_\mu X \rightarrow \mu N)$$



Lollipop-Signatur von  $\tau$ -Neutrinos



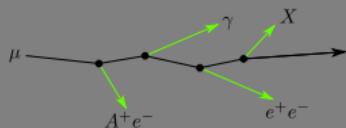
Schwache Wechselwirkung von Myonen

- Ähnlichkeiten mit hochenergetischen  $\tau$ -Events ("Lollipop-Signatur")
- Möglicher Untergrund von bis zu 10 % bei Suchen nach  $\tau$ -Lollipop-Events in IceCube<sup>3</sup>

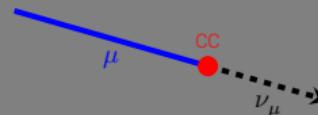
<sup>3</sup>Sandrock, Alexander: Higher-order corrections to the energy loss cross sections of high-energy muons, 2018, pp. 38-40

## Inhalt

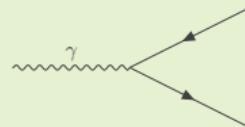
### 1. Einführung in PROPOSAL



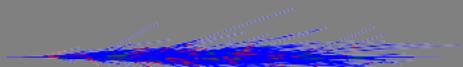
### 2. Seltene Prozesse

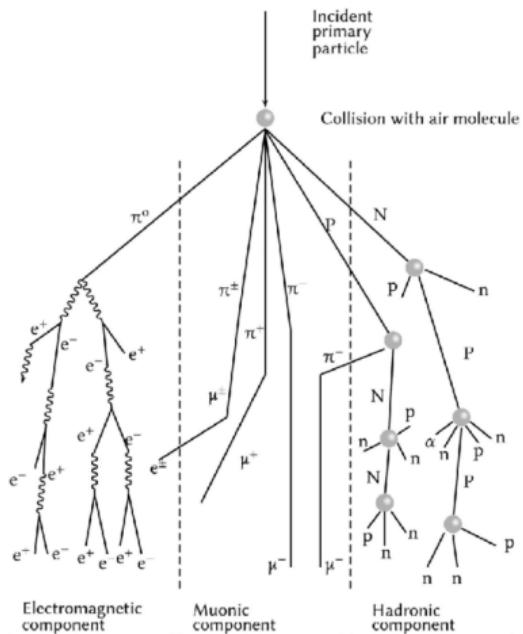


### 3. Schauerpropagation



### 4. Ergebnisse

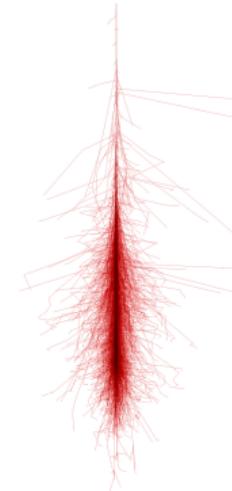




Skizze der Komponenten eines Luftschauers<sup>4</sup>.

<sup>4</sup>Geofísica Internacional 57(4):253-275, October 2018

- **CORSIKA:** Programm zur Simulation von Teilchenschauern
- Verschiedene Modelle zur Beschreibung der hadronischen Wechselwirkungen
- Beschreibung der elektromagnetischen Wechselwirkungen durch **EGS4**
  - Ziel: Ermögliche Nutzung von **PROPOSAL** in **CORSIKA 8**
  - Aufgabe: Propagation von  $e^+$ ,  $e^-$  und  $\gamma$  in **PROPOSAL**



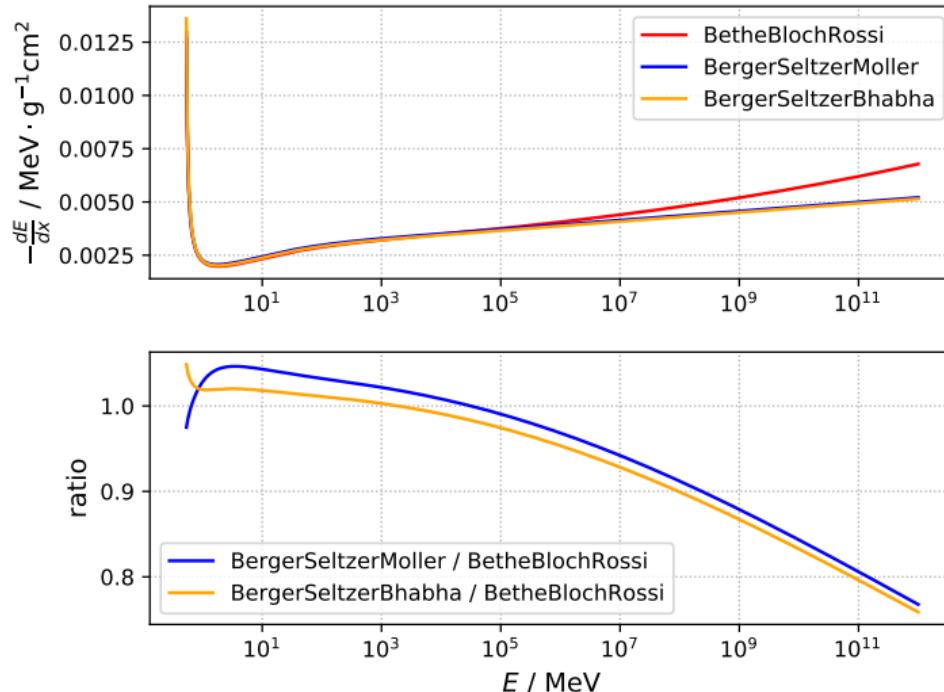
Projektion eines Luftschauers,  
initiiert durch ein 100 GeV Photon<sup>5</sup>.

<sup>5</sup>F. Schmidt, J. Knapp, <https://www-zeuthen.desy.de/jknapp/fs/showerimages.html>

## Ionisation

- Energieverlust durch inelastische Stöße mit Hüllenelektronen
- **Bethe-Formel:** Beschreibt Ionisationsverluste schwerer geladener Teilchen
  - Modifizierte Formel für  $\mu$  und  $\tau$  in PROPOSAL
- Bethe-Formel nicht direkt für  $e^-/e^+$  anwendbar:
  - Ununterscheidbarkeit der beteiligten Teilchen
  - Identische Massen der beteiligten Teilchen

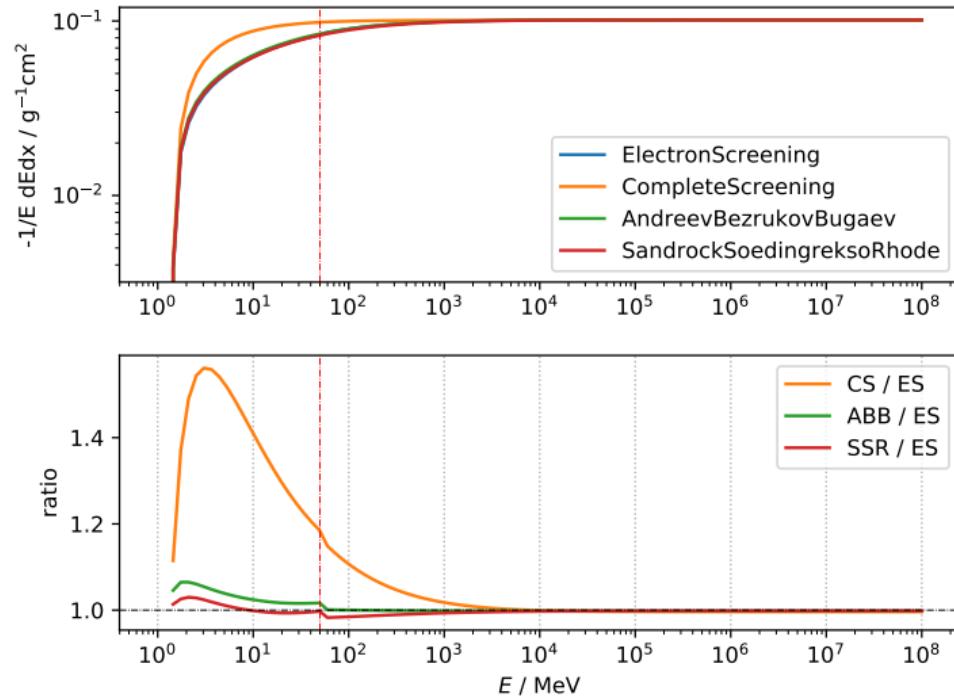
- Für ausreichend *hohe Energieüberträge* können atomare Elektronen als frei betrachtet werden
    - Ionisation als Bhabha-Streuung ( $e^+ + e^- \rightarrow e^+ + e^-$ )
    - Ionisation als Møller-Streuung ( $e^- + e^- \rightarrow e^- + e^-$ )
  - Für *kleine Energieüberträge* muss explizit über die atomaren Anregungswahrscheinlichkeiten summiert werden
- ⇒ Erhalte **Berger-Seltzer Formel**



Vergleiche Ionisationsverluste für  $e^-$  und  $e^+$  mit verschiedenen Parametrisierungen.

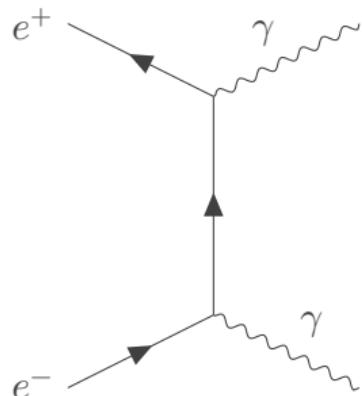
## Bremsstrahlung

- Bremsstrahlung dominierende Wechselwirkung für Elektronen und Positronen
- **PROPOSAL** stellt *Complete Screening* als Wirkungsquerschnitt für hochenergetische Elektronen zur Verfügung
- **EGS4** benutzt energieabhängige Wirkungsquerschnitte:
  - $E > 50 \text{ MeV}$ : Vergleichbar mit *Complete Screening*
  - $E < 50 \text{ MeV}$ : Empirische Korrekturfaktoren für niedrige Energien
- ⇒ Vergleiche verschiedene Implementationen

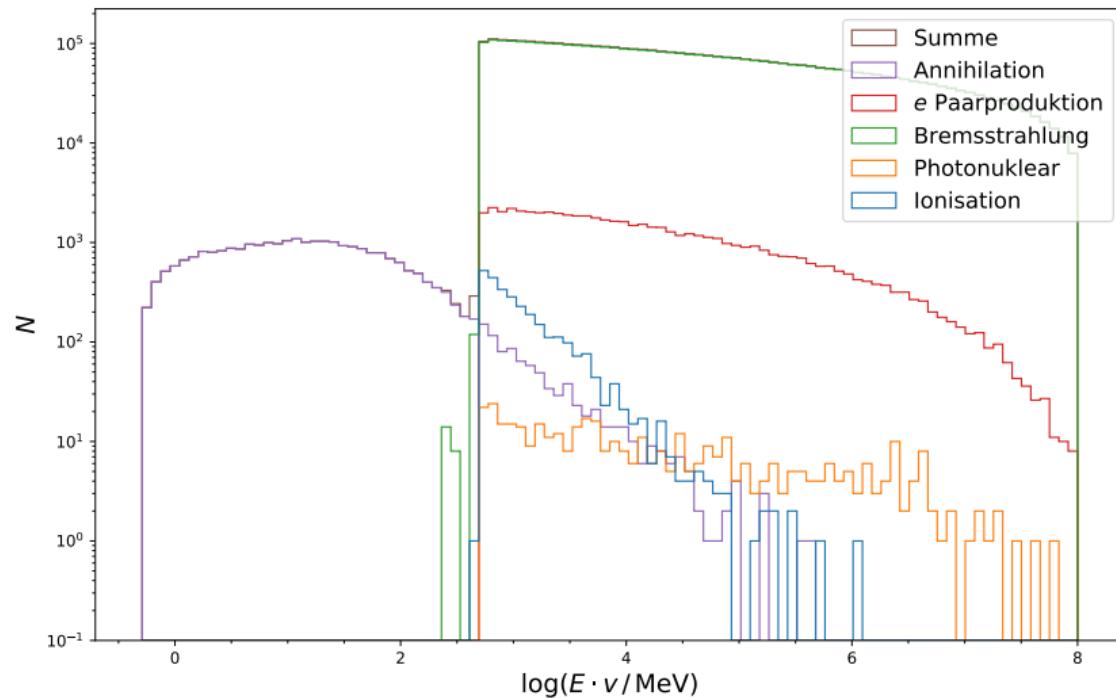


Vergleiche Bremsstrahlungsverluste für Elektronen für verschiedene Parametrisierungen.

## Annihilation

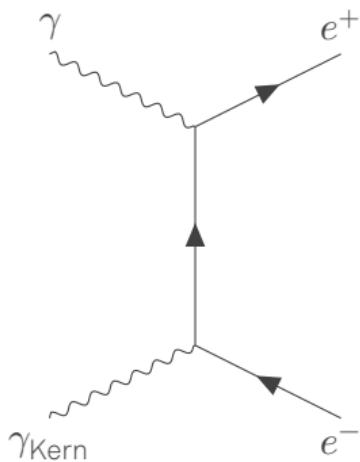


- Annihilation eines Positrons mit einem atomaren Elektron
- Annahme: Atomares Elektron frei und in Ruhe
- Rein stochastische Wechselwirkung
- (Polar)-Winkel vollständig kinematisch bestimmt ( $2 \rightarrow 2$  Prozess)



Energieverluste von  $10^5$   $e^+$  einer Startenergie von  $10^8$  MeV durch Gestein,  $E_{\text{cut}} = 500$  MeV.

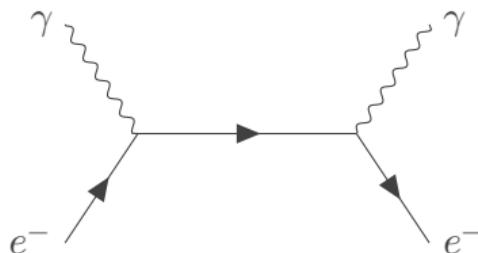
## Paarbildung



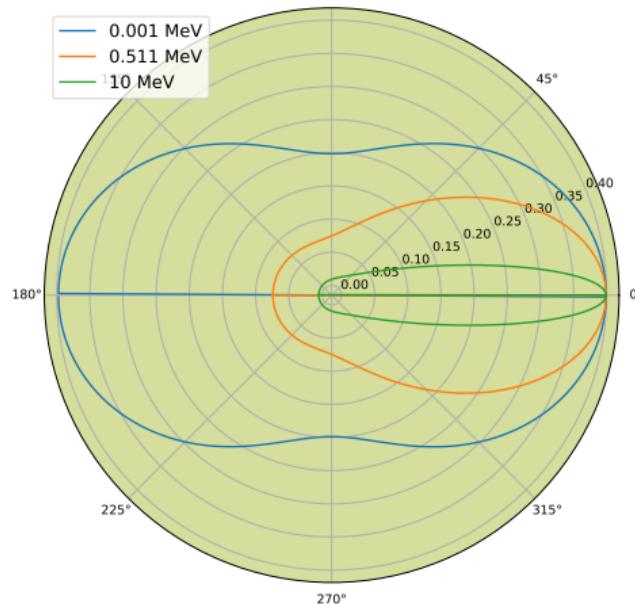
- Dominierender Prozess für hohe Energien
- Rein stochastische Wechselwirkung
- Analytische, approximative Formel für Wirkungsquerschnitt<sup>6</sup>
- Verschiedene Modelle zur Bestimmung der Ablenkungswinkel der erzeugten Leptonen
  - Effekte durch Ablenkung meist vernachlässigbar

<sup>6</sup>Yung-Su Tsai, Pair production and bremsstrahlung of charged leptons

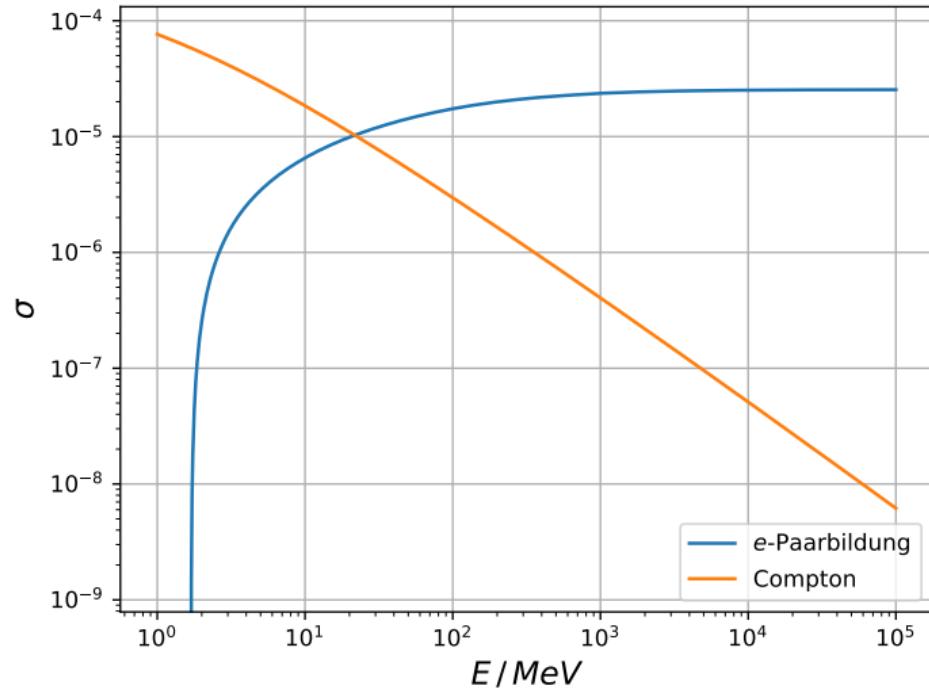
## Comptonstreuung



- Dominierender Prozess für niedrige Energien
- Wirkungsquerschnitt durch Klein-Nishina-Formel gegeben
- Ablenkungswinkel eindeutig durch Energien bestimmt



Klein-Nishina-Formel, differentiell in  $\cos(\theta)$ . Die radiale Achse zeigt den differentiellen Wirkungsquerschnitt in arbiträren Einheiten.

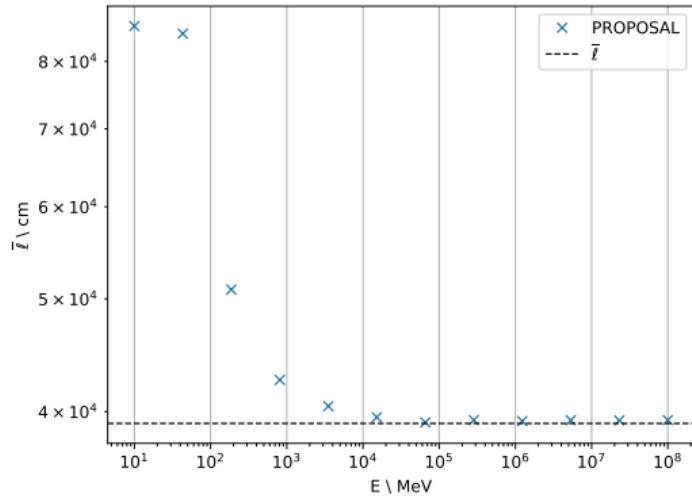


Vergleich der totalen Wirkungsquerschnitte für Photonen in Luft.

Mittlere freie Weglänge  $\bar{l}$  für hochenergetische Photonen gegeben durch

$$\bar{l} \approx \frac{9}{7} X_0$$

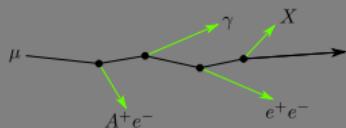
mit der Strahlungslänge in Luft:  
 $X_0 \approx 36,62 \text{ g cm}^{-2}$



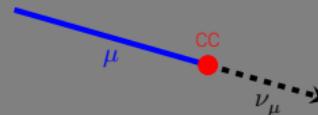
Reichweite von Photonen in Luft

## Inhalt

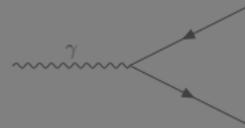
### 1. Einführung in PROPOSAL



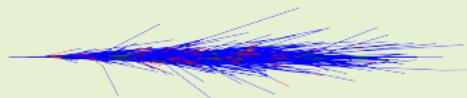
### 2. Seltene Prozesse



### 3. Schauerpropagation



### 4. Ergebnisse



## Erstellung eines Teilchenschauers

Teilchenliste = [Primärteilchen]

**solange** Teilchenliste nicht leer **tue**

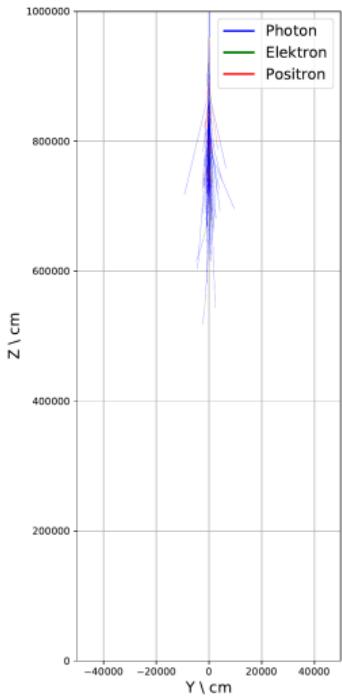
  | Entnehme erstes Teilchen aus Teilchenliste

  | Propagiere Teilchen

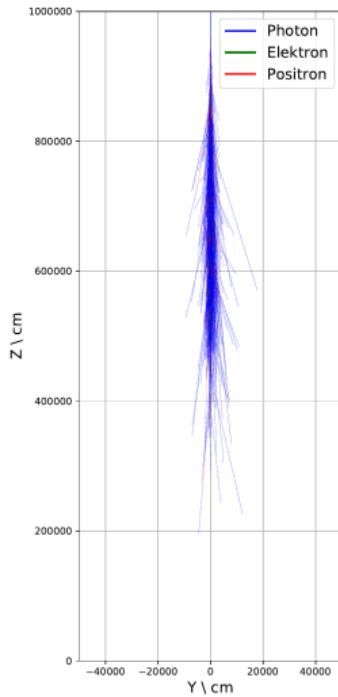
  | Füge alle Sekundärteilchen der Teilchenliste hinzu

**Ende**

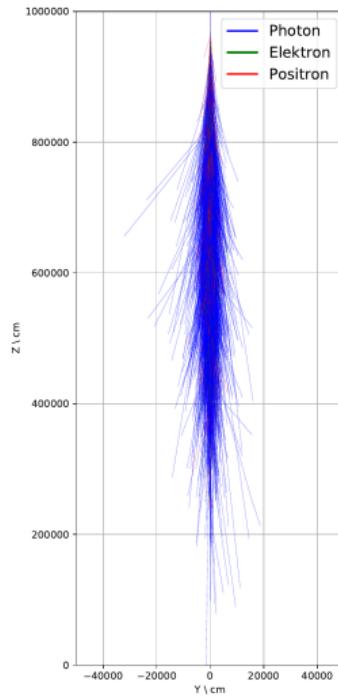
Vereinfachter Algorithmus zur Schauerpropagation in **PROPOSAL**.



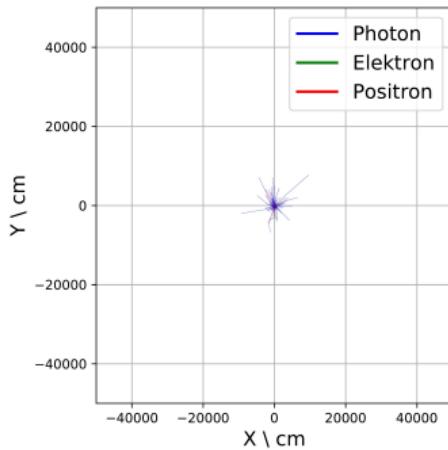
$$E = 10^5 \text{ MeV}$$



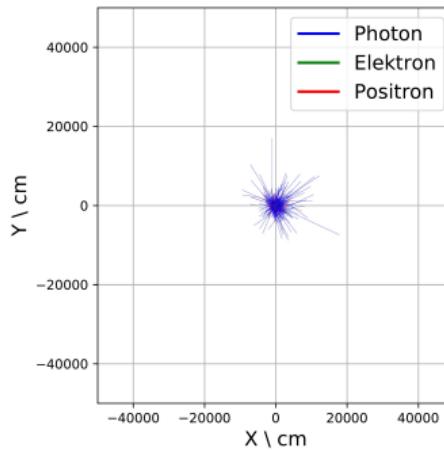
$$E = 10^6 \text{ MeV}$$



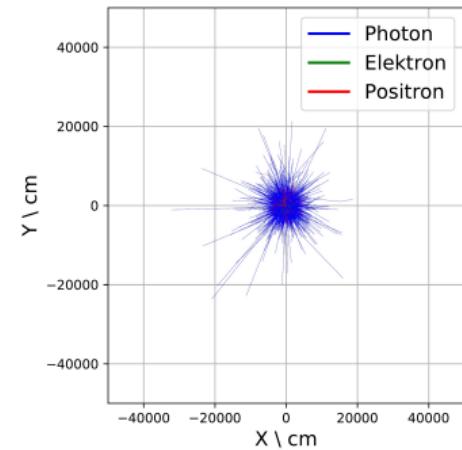
$$E = 10^7 \text{ MeV}$$



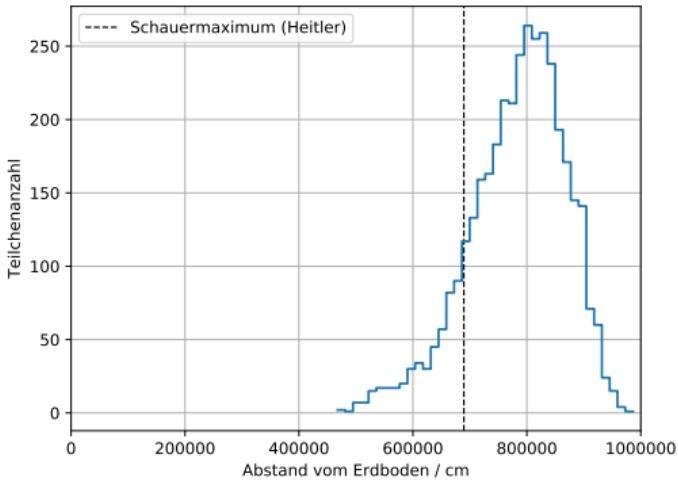
$$E = 10^5 \text{ MeV}$$



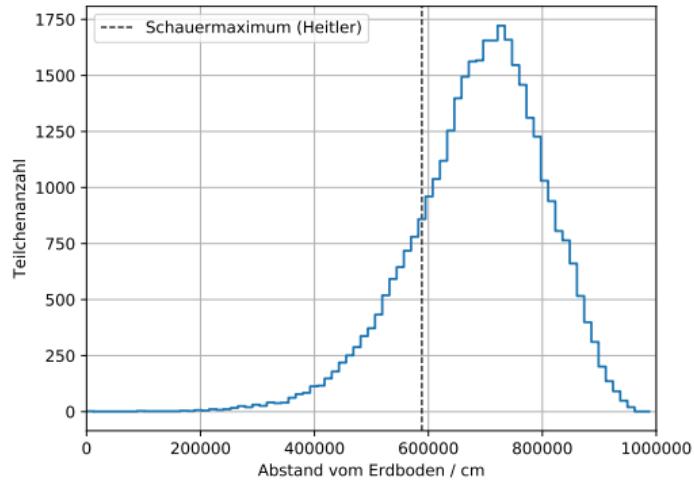
$$E = 10^6 \text{ MeV}$$



$$E = 10^7 \text{ MeV}$$



$$E = 10^6 \text{ MeV}$$



$$E = 10^7 \text{ MeV}$$

Teilchenanzahl gegen die Schauertiefe, verglichen mit dem erwarteten Schauermaximum im Heitler-Schauer-Modell.

## Zusammenfassung

### Seltene Prozesse

- Myonpaarproduktion als neuer Prozess verfügbar
- Schwache Wechselwirkung als neuer Prozess verfügbar

### Schauerpropagation

- Überarbeitete Wechselwirkungen für  $e^+ / e^-$
  - Annihilation als neuer Prozess für  $e^+$
  - Paarbildung und Comptonstreuung als Prozesse für Photonen
- ⇒ Propagation von Teilchen in elektromagnetischen Schauern mit PROPOSAL möglich

## Ausblick

### Seltene Prozesse

- Explizite Simulationen nötig um die Relevanz der neuen Prozesse überprüfen zu können

### Schauerpropagation

- Untersuche Schauerpropagation in inhomogenen Medien (realistische Atmosphäre)
- Einbindung von **PROPOSAL** in **CORSIKA**
  - Komplette Schauerpropagation
  - Vergleiche mit anderen physikalischen Modellen (z.B. EGS5, EmCa)



[https://github.com/tudo-  
astroparticlephysics/PROPOSAL](https://github.com/tudo-astroparticlephysics/PROPOSAL)



<https://arxiv.org/abs/1809.07740>

PROPOSAL may be modified and distributed under terms of a modified LGPL license.  
More information on our GitHub page.