

Soft Photons

Martin Völkl

Universität Heidelberg
2020-09-10



**UNIVERSITÄT
HEIDELBERG**
ZUKUNFT
SEIT 1386

$$\frac{d^3N}{d^3k} = \frac{\alpha}{(2\pi)^2 E_\gamma} \int d^3\vec{p}_1 \dots d^3\vec{p}_N \sum_{i,j} \eta_i \eta_j q_i q_j \frac{-P_i P_j}{(P_i K)(P_j K)} \frac{dN}{d^3\vec{p}_1 \dots d^3\vec{p}_N}$$

Umgeformt für schnellere Berechnung:

$$\frac{d^3N}{d^3k} = \frac{\alpha}{(2\pi)^2 E_\gamma} \int d^3\vec{p}_1 \dots d^3\vec{p}_N - \left(\sum_i \eta_i q_i \frac{P_i}{P_i K} \right)^2 \frac{dN}{d^3\vec{p}_1 \dots d^3\vec{p}_N}$$

Für Photonen: $|\vec{p}| = E$, also kann das vorgezogen werden:

$$\frac{d^3N}{d^3k} = \frac{\alpha}{(2\pi)^2 E_\gamma^3} \dots - \left(\sum_i \eta_i q_i \frac{P_i}{E_i - |\vec{p}_i| \cos \theta_{i,\gamma}} \right)^2 \dots$$

In Kugekoordinaten ergibt sich ein Faktor $E_\gamma^2 \sin \vartheta$:

$$\frac{d^3N}{d|k|d\vartheta d\phi} \sim \frac{-\sin \vartheta}{E_\gamma} \left(\sum_i \eta_i q_i \frac{P_i}{E_i - |\vec{p}_i| \cos \theta_{i,\gamma}} \right)^2$$

Egal wo der Detektor steht, es ergibt sich immer das gleiche $1/E_\gamma$ Spektrum

Beispiel: $p + \bar{p} \rightarrow \text{neutrals}$



$$\frac{d^3N}{d^3k} = \frac{\alpha}{(2\pi)^2 E_\gamma} \int d^3\vec{p}_1 \dots d^3\vec{p}_N - \left(\sum_i \eta_i q_i \frac{P_i}{P_i K} \right)^2 \frac{dN}{d^3\vec{p}_1 \dots d^3\vec{p}_N}$$

Berechne Summe:

$$\begin{aligned} \frac{d^3N}{d|k|d\vartheta d\phi} &\sim \frac{-\sin\vartheta}{E_\gamma} \left(\frac{(E, \vec{p})}{E - |\vec{p}| \cos\vartheta} - \frac{(E, -\vec{p})}{E + |\vec{p}| \cos\vartheta} \right)^2 = \frac{-\sin\vartheta}{E_\gamma} \left(\frac{2(E, \vec{p})|\vec{p}| \cos\vartheta}{E^2 - |\vec{p}|^2 \cos^2\vartheta} \right)^2 \\ &= \frac{-\sin\vartheta}{E_\gamma} \left(\frac{2(E|\vec{p}| \cos\vartheta, E\vec{p})}{E^2 - |\vec{p}|^2 \cos^2\vartheta} \right)^2 = \frac{-4\sin\vartheta}{E_\gamma} \frac{2(E^2 p^2 \cos^2\vartheta - E^2 p^2)}{(E^2 - |\vec{p}|^2 \cos^2\vartheta)^2} \\ &= \frac{4}{E_\gamma} \frac{p^2}{E^2} \frac{\sin^3\vartheta}{(1 - \frac{p^2}{E^2} \cos^2\vartheta)^2} \approx \frac{4}{E_\gamma} \frac{1}{\sin\vartheta} \end{aligned}$$

Integration über ϑ ergibt: $N_\gamma \sim 6 \ln(4\gamma) + \gamma^2$, aber es ist leicht, sich zu verrechnen;
skalierung der Photonen mit E^2

Zwei parallele relativistische Teilchen in einem Event

$$\frac{d^3N}{d^3k} = \frac{\alpha}{(2\pi)^2 E_\gamma} \int d^3\vec{p}_1 \dots d^3\vec{p}_N - \left(\sum_i \eta_i q_i \frac{P_i}{P_i K} \right)^2 \frac{dN}{d^3\vec{p}_1 \dots d^3\vec{p}_N}$$

Term $P_i/(P_i K)$, umgeschrieben:

$$\frac{P_i}{P_i K} = \frac{1}{E_\gamma} \frac{(E, \vec{p})}{E - p \cos \theta_\gamma} = \frac{1}{E_\gamma} \frac{(1, \frac{\vec{p}}{E})}{1 - \frac{p}{E} \cos \theta_\gamma} \approx \frac{1}{E_\gamma} \frac{(1, \vec{n})}{1 - \cos \theta_\gamma}$$

Abseits der Achse strahlen also alle relativistischen Teilchen gleich ab ($E = |p|$)

Summe aus zwei Teilchen mit ähnlichem $\vec{n}$:

$$\frac{\eta_i q_i P_i}{P_i K} + \frac{\eta_j q_j P_j}{P_j K} \approx \frac{1}{E_\gamma} \frac{(\eta_i q_i + \eta_j q_j)(1, \vec{n})}{1 - \cos \theta_\gamma}$$

Abseits der $\vec{n}$ -Achse sehen sie also aus wie ein Teilchen mit Gesamtladung $q_i + q_j$, selbst wenn die Energie unterschiedlich ist (volle Interferenz)

Beispiel: $p + p \rightarrow \text{neutrals}$

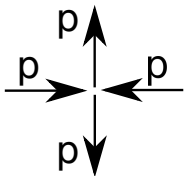


Ladung nicht erhalten, was passiert? Berechne Summe:

$$\begin{aligned} \frac{d^3N}{d|k|d\vartheta d\phi} &\sim \frac{-\sin \vartheta}{E_\gamma} \left(\frac{(E, \vec{p})}{E - |\vec{p}| \cos \vartheta} + \frac{(E, -\vec{p})}{E + |\vec{p}| \cos \vartheta} \right)^2 = \frac{-\sin \vartheta}{E_\gamma} \left(\frac{2 (E^2, \vec{p}|\vec{p}| \cos \vartheta)}{E^2 - |\vec{p}|^2 \cos^2 \vartheta} \right)^2 \\ &= \frac{-4 \sin \vartheta}{E_\gamma} \frac{2 (E^4 - p^4 \cos^2 \vartheta)}{(E^2 - |\vec{p}|^2 \cos^2 \vartheta)^2} \approx -\frac{4}{E_\gamma} \frac{1}{\sin \vartheta} < 0(!) \end{aligned}$$

Es ergäbe sich ein negativer Wirkungsquerschnitt. Problem: Dieser negative Term tritt in pp Kollisionen auf, und divergiert nahe der Strahlachse. Würde das bei Ladungserhaltung ausgeglichen? $\rightarrow$ Test mit $p + p \rightarrow p + p$

Beispiel: $p + p \rightarrow p + p$



Resultierendes Paar in 90° Winkel, berechne Summe nahe Strahlachse ($\cos \vartheta_{\uparrow\downarrow} \approx 1$)

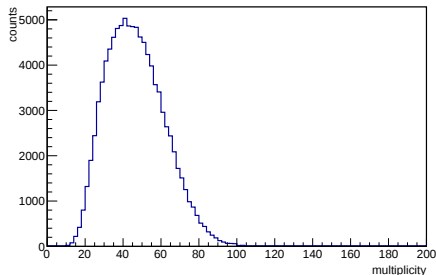
$$\begin{aligned}
 \frac{d^3N}{d|k|d\vartheta d\phi} &\sim \frac{-\sin \vartheta}{E_\gamma} \left(\frac{(E, \vec{p})}{E - |\vec{p}| \cos \vartheta} + \frac{(E, -\vec{p})}{E + |\vec{p}| \cos \vartheta} + \frac{(E, \vec{p}_\uparrow)}{E + |\vec{p}| \cos \vartheta_\uparrow} + \frac{(E, -\vec{p}_\uparrow)}{E + |\vec{p}| \cos \vartheta_\downarrow} \right)^2 \\
 &\approx \frac{-\sin \vartheta}{E_\gamma} \left(\frac{2(E^2, \vec{p}|\vec{p}| \cos \vartheta)}{E^2 - |\vec{p}|^2 \cos^2 \vartheta} + \frac{2(E, \vec{0})}{E} \right)^2 \\
 &= \frac{-4 \sin \vartheta}{E_\gamma} \left(\frac{(-p^2 \cos^2 \vartheta, \vec{p}|\vec{p}| \cos \vartheta)}{E^2 - |\vec{p}|^2 \cos^2 \vartheta} \right)^2 = \frac{4 \sin \vartheta}{E_\gamma} \frac{p^4 \cos^2 \vartheta (1 - \cos^2 \vartheta)}{(E^2 - |\vec{p}|^2 \cos^2 \vartheta)^2} \geq 0(!) \\
 &\approx + \frac{4 \cos^2 \vartheta}{E_\gamma \sin \vartheta}
 \end{aligned}$$

Bei Ladungserhaltung ist der Wirkungsquerschnitt wieder positiv, divergiert aber immer noch

Selbes Ergebnis für Fall $\rightarrow$ ruhende Protonen + neutrale Teilchen

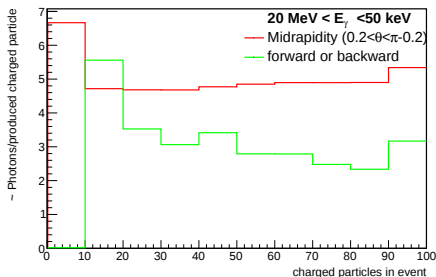
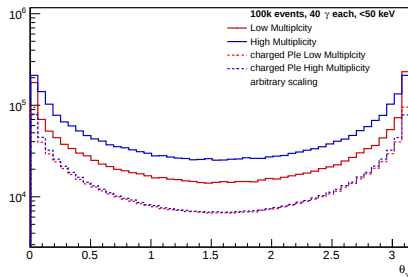
- Basierend auf PYTHIA8
- Für jedes Event: Sample Photon aus flacher 3d $\vec{p}$ distribution
- Gewichtung nach Low-Formel
- Gewichte variieren stark, was Fluktuationen erzeugt, nutze generelles $1/E$ Spektrum
- Photonen nur in bestimmtem Impulsbereich $|\vec{p}|$ gesampelt - repräsentativ für vollen Phasenraum
- Korrekturfaktor für Sampling fehlt
- Wie viele Photonen in einem potenziellen Messbereich gibt es?
- Wie ist das Verhältnis zu Zerfallsphotonen?
- Kann man durch Wahl von Pseudorapidität und Multiplizität Messungen mit deutlich unterschiedlichen Verhältnissen erhalten?
- → was für einen Detektor braucht man und wo muss er stehen?

- Multiplizität über Anzahl geladener primärer Teilchen
- Sollte Skalierung mit beitragenden Teilchen geben
- Sollte zwischen konstant und quadratisch mit Teilchenzahl sein



Multiplizität und Winkelabhängigkeit

- Verhältnis zu geladenen Teilchen etwas besser bei mid-Rapidity
- Skalierung mit Multiplizität primären Teilchen nahe Proportionalität
- Positiv: Wahrscheinlich keine starke Abhängigkeit von Generator
- Negativ: Keine guten Cross-Checks in verschiedenen Regionen (z.B. unterschiedliche Einflüsse von Zerfalls- und Bremsstrahlungsphotonen)



- Ladungserhaltung wichtig für Berechnung → Probleme wenn Spektrum aus emessenen Teilchen berechnet werden soll
- Etwas mehr Bremsstrahlung relativ zu Untergrund bei Midrapidität
- Keine offensichtliche Nützlichkeit der Multiplinität