

Flavour Mixing Effects in the Direct Detection of Dark Matter

Anja Beck

Lehrstuhl für Theoretische Physik IV
Fakultät Physik
Technische Universität Dortmund

1. August 2017

2017-07-25

Flavour Mixing Effects in the Direct Detection of Dark Matter

Flavour Mixing Effects in the Direct Detection of Dark Matter

Anja Beck

Lehrstuhl für Theoretische Physik IV
Fakultät Physik
Technische Universität Dortmund

1. August 2017

Dunkle Materie

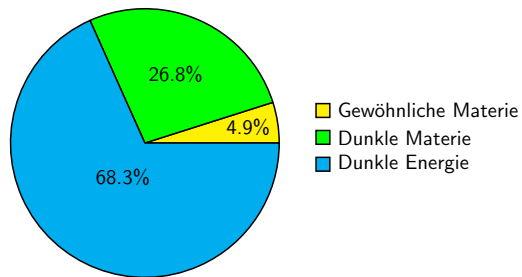


Abbildung: Energieverteilung im Universum (ESA, Planck Colaboration 2013)

2017-07-25

Flavour Mixing Effects in the Direct Detection of Dark Matter

└ Einführung

└ Dunkle Materie

Menschen schauen schon immer in den Himmel.
Dunkle Materie als Lösung für zu schnelle Galaxien.
Großteil dessen was das Universums ausmacht ist unbekannt.



Abbildung: Energieverteilung im Universum (ESA, Planck Colaboration 2013)

Direct Detection

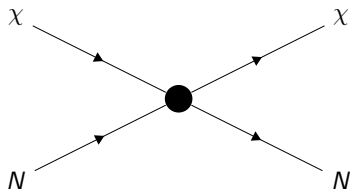


Abbildung: Direct Detection: Streuung eines DM-Teilchens am Atomkern.

2017-07-25

Flavour Mixing Effects in the Direct Detection of Dark Matter

└ Einführung

└ Direct Detection



Abbildung: Direct Detection: Streuung eines DM-Teilchens am Atomkern.

- 1 Einführung
- 2 Flavour-Mischung
- 3 Verwendeter Formalismus
- 4 Neue Wechselwirkung
- 5 Ergebnisse

Die Massen-Eigenzustände sind nicht gleich den Flavour-Eigenzuständen.

$$\mathcal{L}^{(\text{mass})} = -\frac{v}{\sqrt{2}} \left[\bar{E}_L \lambda^e E_R + \bar{D}_L \lambda^d D_R + \bar{U}_L \lambda^u U_R + \text{h.c.} \right]$$

- Massenterme werden durch unitäre Rotation der Teilchen-Multipletts diagonalisiert:

$$E_L \rightarrow S_e E_L \quad E_R \rightarrow R_e E_R$$

$$\bar{E}_L \lambda^e E_R \rightarrow \bar{E}_L S_e^\dagger \lambda^e R_e E_R$$

- Dadurch verändert sich der Strom

$$\bar{U}_L \gamma^\mu D_L \rightarrow \bar{U}_L \gamma^\mu S_u^\dagger S_d D_L$$

2017-07-25

Flavour Mixing Effects in the Direct Detection of Dark Matter

└ Flavour-Mischung

└ Flavour-Mischung

Die Massen-Eigenzustände sind nicht gleich den Flavour-Eigenzuständen.

$$\mathcal{L}^{(\text{mass})} = -\frac{v}{\sqrt{2}} \left[\bar{E}_L \lambda^e E_R + \bar{D}_L \lambda^d D_R + \bar{U}_L \lambda^u U_R + \text{h.c.} \right]$$

- Massenterme werden durch unitäre Rotation der Teilchen-Multipletts diagonalisiert:

$$E_L \rightarrow S_e E_L \quad E_R \rightarrow R_e E_R$$

$$\bar{E}_L \lambda^e E_R \rightarrow \bar{E}_L S_e^\dagger \lambda^e R_e E_R$$

- Dadurch verändert sich der Strom

$$\bar{U}_L \gamma^\mu D_L \rightarrow \bar{U}_L \gamma^\mu S_u^\dagger S_d D_L$$

Flavour-Mischung

CKM-Matrix

Beträge der Matrix-Elemente:

$$V_{\text{CKM}} = \begin{pmatrix} 0.974 & 0.225 & 0.004 \\ 0.220 & 0.995 & 0.041 \\ 0.008 & 0.040 & 1.009 \end{pmatrix}$$

- Hinweis, dass die Mischung häufig vernachlässigt wird.

2017-07-25

Flavour Mixing Effects in the Direct Detection of Dark Matter

└ Flavour-Mischung

└ Flavour-Mischung

Beträge der Matrix-Elemente:

$$V_{\text{CKM}} = \begin{pmatrix} 0.974 & 0.225 & 0.004 \\ 0.220 & 0.995 & 0.041 \\ 0.008 & 0.040 & 1.009 \end{pmatrix}$$

- Hinweis, dass die Mischung häufig vernachlässigt wird.

Formalismus

Operatoren

Unchirale Operatoren:

$$R_{1,q} = (\bar{\chi}\gamma_{\mu}\chi)(\bar{q}\gamma^{\mu}q)$$

$$R_{3,q} = (\bar{\chi}\gamma_{\mu}\chi)(\bar{q}\gamma^{\mu}\gamma_5q)$$

$$R_{2,q} = (\bar{\chi}\gamma_{\mu}\gamma_5\chi)(\bar{q}\gamma^{\mu}q)$$

$$R_{4,q} = (\bar{\chi}\gamma_{\mu}\gamma_5\chi)(\bar{q}\gamma^{\mu}\gamma_5q)$$

Chirale Operatoren:

$$Q_{1ij} = (\bar{\chi}\gamma_{\mu}\tilde{\tau}^3\chi)(\bar{Q}_L^i\gamma^{\mu}\tau^3Q_L^j)$$

$$Q_{5ij} = (\bar{\chi}\gamma_{\mu}\gamma_5\tilde{\tau}^3\chi)(\bar{Q}_L^i\gamma^{\mu}\tau^3Q_L^j)$$

$$Q_{2ij} = (\bar{\chi}\gamma_{\mu}\chi)(\bar{Q}_L^i\gamma^{\mu}Q_L^j)$$

$$Q_{6ij} = (\bar{\chi}\gamma_{\mu}\gamma_5\chi)(\bar{Q}_L^i\gamma^{\mu}Q_L^j)$$

$$Q_{3ij} = (\bar{\chi}\gamma_{\mu}\chi)(\bar{U}_R^i\gamma^{\mu}U_R^j)$$

$$Q_{7ij} = (\bar{\chi}\gamma_{\mu}\gamma_5\chi)(\bar{U}_R^i\gamma^{\mu}U_R^j)$$

$$Q_{4ij} = (\bar{\chi}\gamma_{\mu}\chi)(\bar{D}_R^i\gamma^{\mu}D_R^j)$$

$$Q_{8ij} = (\bar{\chi}\gamma_{\mu}\gamma_5\chi)(\bar{D}_R^i\gamma^{\mu}D_R^j)$$

Ziel: Drücke die Koeffizienten der unchiralen Operatoren in Abhängigkeit der Koeffizienten der chiralen Operatoren aus.

2017-07-25

Flavour Mixing Effects in the Direct Detection of Dark Matter

Verwendeter Formalismus

Formalismus

Unchirale Operatoren:

$$R_{1,q} = (\bar{\chi}\gamma_{\mu}\chi)(\bar{q}\gamma^{\mu}q)$$

$$R_{2,q} = (\bar{\chi}\gamma_{\mu}\gamma_5\chi)(\bar{q}\gamma^{\mu}q)$$

$$R_{3,q} = (\bar{\chi}\gamma_{\mu}\chi)(\bar{q}\gamma^{\mu}\gamma_5q)$$

$$R_{4,q} = (\bar{\chi}\gamma_{\mu}\gamma_5\chi)(\bar{q}\gamma^{\mu}\gamma_5q)$$

Chirale Operatoren:

$$Q_{1ij} = (\bar{\chi}\gamma_{\mu}\tau^3\chi)(\bar{Q}_L^i\gamma^{\mu}\tau^3Q_L^j)$$

$$Q_{2ij} = (\bar{\chi}\gamma_{\mu}\chi)(\bar{Q}_L^i\gamma^{\mu}Q_L^j)$$

$$Q_{3ij} = (\bar{\chi}\gamma_{\mu}\chi)(\bar{U}_R^i\gamma^{\mu}U_R^j)$$

$$Q_{4ij} = (\bar{\chi}\gamma_{\mu}\chi)(\bar{D}_R^i\gamma^{\mu}D_R^j)$$

$$Q_{5ij} = (\bar{\chi}\gamma_{\mu}\tau^3\chi)(\bar{Q}_L^i\gamma^{\mu}\tau^3Q_L^j)$$

$$Q_{6ij} = (\bar{\chi}\gamma_{\mu}\gamma_5\chi)(\bar{Q}_L^i\gamma^{\mu}Q_L^j)$$

$$Q_{7ij} = (\bar{\chi}\gamma_{\mu}\gamma_5\chi)(\bar{U}_R^i\gamma^{\mu}U_R^j)$$

$$Q_{8ij} = (\bar{\chi}\gamma_{\mu}\gamma_5\chi)(\bar{D}_R^i\gamma^{\mu}D_R^j)$$

Ziel: Drücke die Koeffizienten der unchiralen Operatoren in Abhängigkeit der Koeffizienten der chiralen Operatoren aus.

Formalismus

Rechnung: Schritt 1

Einfügen der CKM-Matrix:

$$\begin{aligned}\bar{Q}_L^i \gamma^\mu Q_L^j &= \bar{U}_L^i \gamma^\mu U_L^j + \bar{D}_L^i \gamma^\mu D_L^j \\ &= \bar{U}_L^i \gamma^\mu U_L^j \\ &+ (V_{id}^* \bar{d}_L + V_{is}^* \bar{s}_L + V_{ib}^* \bar{b}_L) \gamma^\mu (V_{jd} d_L + V_{js} s_L + V_{jb} b_L) \\ &= \bar{u}_L \gamma^\mu u_L \delta_{ij} \delta_{iu} + V_{id}^* V_{jd} \bar{d}_L \gamma^\mu d_L + V_{is}^* V_{js} \bar{s}_L \gamma^\mu s_L\end{aligned}$$

2017-07-25

Flavour Mixing Effects in the Direct Detection of Dark Matter

└ Verwendeter Formalismus

└ Formalismus

Einfügen der CKM-Matrix:

$$\begin{aligned}\bar{Q}_L^i \gamma^\mu Q_L^j &= \bar{U}_L^i \gamma^\mu U_L^j + \bar{D}_L^i \gamma^\mu D_L^j \\ &= \bar{U}_L^i \gamma^\mu U_L^j \\ &+ (V_{id}^* \bar{d}_L + V_{is}^* \bar{s}_L + V_{ib}^* \bar{b}_L) \gamma^\mu (V_{jd} d_L + V_{js} s_L + V_{jb} b_L) \\ &= \bar{u}_L \gamma^\mu u_L \delta_{ij} \delta_{iu} + V_{id}^* V_{jd} \bar{d}_L \gamma^\mu d_L + V_{is}^* V_{js} \bar{s}_L \gamma^\mu s_L\end{aligned}$$

Formalismus

Rechnung: Schritt 2

Umschreiben der chiralen Teilchen-Multipletts mit den links- und rechtshändigen Projektoren:

$$\begin{aligned}\bar{Q}_L^i \gamma^\mu Q_L^j &= \frac{1}{2} (\bar{u} \gamma^\mu u \delta_{iu} \delta_{ij} + V_{id}^* V_{jd} \bar{d} \gamma^\mu d + V_{is}^* V_{js} \bar{s} \gamma^\mu s) \\ &\quad - \frac{1}{2} (\bar{u} \gamma^\mu \gamma_5 u \delta_{iu} \delta_{ij} + V_{id}^* V_{jd} \bar{d} \gamma^\mu \gamma_5 d + V_{is}^* V_{js} \bar{s} \gamma^\mu \gamma_5 s)\end{aligned}$$

Identifikation der nicht-chiralen Operatoren:

$$\begin{aligned}Q_{2ij} &= \frac{1}{2} (R_{1u} \delta_{iu} \delta_{ij} + V_{id}^* V_{jd} R_{1d} + V_{is}^* V_{js} R_{1s}) \\ &\quad - \frac{1}{2} (R_{3u} \delta_{iu} \delta_{ij} + V_{id}^* V_{jd} R_{3d} + V_{is}^* V_{js} R_{3s})\end{aligned}$$

2017-07-25

Flavour Mixing Effects in the Direct Detection of Dark Matter

└ Verwendeter Formalismus

└ Formalismus

Umschreiben der chiralen Teilchen-Multipletts mit den links- und rechtshändigen Projektoren:

$$\begin{aligned}\bar{Q}_L^i \gamma^\mu Q_L^j &= \frac{1}{2} (\bar{u} \gamma^\mu u \delta_{iu} \delta_{ij} + V_{id}^* V_{jd} \bar{d} \gamma^\mu d + V_{is}^* V_{js} \bar{s} \gamma^\mu s) \\ &\quad - \frac{1}{2} (\bar{u} \gamma^\mu \gamma_5 u \delta_{iu} \delta_{ij} + V_{id}^* V_{jd} \bar{d} \gamma^\mu \gamma_5 d + V_{is}^* V_{js} \bar{s} \gamma^\mu \gamma_5 s)\end{aligned}$$

Identifikation der nicht-chiralen Operatoren:

$$\begin{aligned}Q_{2ij} &= \frac{1}{2} (R_{1u} \delta_{iu} \delta_{ij} + V_{id}^* V_{jd} R_{1d} + V_{is}^* V_{js} R_{1s}) \\ &\quad - \frac{1}{2} (R_{3u} \delta_{iu} \delta_{ij} + V_{id}^* V_{jd} R_{3d} + V_{is}^* V_{js} R_{3s})\end{aligned}$$

Formalismus

Rechnung: Schritt 3

Aufstellen des Lagrangian:

$$\sum_{l,q} K_{l,q} R_{l,q} \stackrel{!}{=} \sum_{m,i,j} C_{mij} Q_{mij}$$

Nach dem Umsortieren der rechten Seite nach $R_{l,q}$ liefert ein Koeffizienten-Vergleich die Abhängigkeiten $K_{l,q}(C_{mij})$.

2017-07-25

Flavour Mixing Effects in the Direct Detection of Dark Matter

└ Verwendeter Formalismus

└ Formalismus

Warum ist die Abhängigkeit interessant?

Aufstellen des Lagrangian:

$$\sum_{l,q} K_{l,q} R_{l,q} \stackrel{!}{=} \sum_{m,i,j} C_{mij} Q_{mij}$$

Nach dem Umsortieren der rechten Seite nach $R_{l,q}$ liefert ein Koeffizienten-Vergleich die Abhängigkeiten $K_{l,q}(C_{mij})$.

Neue Wechselwirkung

- Neue $U(1)$ -Symmetrie mit Eichboson Z' [1]
- Unter der neuen Wechselwirkung geladene Teilchen:
 - Leptonen der zweiten und dritten Generation
 - Neue Quarks
 - Dunkle Materie [2]
- Ein paar Worte zu $L_\mu - L_\tau$.

2017-07-25

Flavour Mixing Effects in the Direct Detection of Dark Matter

└─ Neue Wechselwirkung

└─ Neue Wechselwirkung

- Neue $U(1)$ -Symmetrie mit Eichboson Z' [1]
- Unter der neuen Wechselwirkung geladene Teilchen:
 - Leptonen der zweiten und dritten Generation
 - Neue Quarks
 - Dunkle Materie [2]
- Ein paar Worte zu $L_\mu - L_\tau$.

Neue Wechselwirkung

Kopplung der neuen Quarks an die SM-Quarks

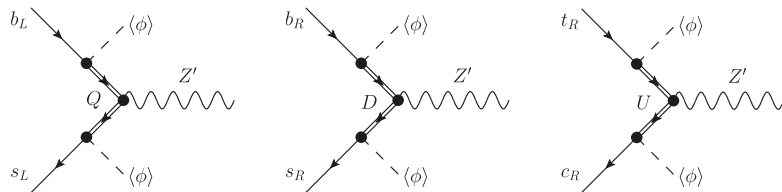


Abbildung: Wechselwirkung von SM-Quarks mit dem Eichboson Z' (aus [1])

2017-07-25

Flavour Mixing Effects in the Direct Detection of Dark Matter

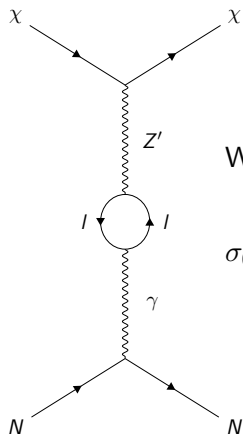
└ Neue Wechselwirkung

└ Neue Wechselwirkung



Neue Wechselwirkung

Loop-Diagramm zur Streuung am Atomkern



Wirkungsquerschnitt ohne Impulsübertrag:

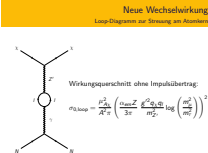
$$\sigma_{0,\text{loop}} = \frac{\mu_{A\chi}^2}{A^2\pi} \left(\frac{\alpha_{em}Z}{3\pi} \frac{g'^2 q_\chi q_l}{m_{Z'}^2} \log \left(\frac{m_\mu^2}{m_\tau^2} \right) \right)^2$$

2017-07-25

Flavour Mixing Effects in the Direct Detection of Dark Matter

└─ Neue Wechselwirkung

└─ Neue Wechselwirkung



Neue Wechselwirkung

Beschränkung der Parameter

Seltene B -Zerfälle:

$$540 \text{ GeV} \lesssim \frac{m_{Z'}}{g'} \lesssim 4.9 \text{ TeV}$$

Relic Density:

$$m_{Z'} \approx 2m_\chi$$

Direct Detection ($q_\chi = q_l$):

$$10 \text{ GeV} \lesssim m_{Z'} \lesssim 46 \text{ GeV}$$

$$2 \cdot 10^{-3} \lesssim g' \lesssim 10^{-2}$$

2017-07-25

Flavour Mixing Effects in the Direct Detection of Dark Matter

- └ Neue Wechselwirkung

- └ Neue Wechselwirkung

Seltene B -Zerfälle:

$$540 \text{ GeV} \lesssim \frac{m_{Z'}}{g'} \lesssim 4.9 \text{ TeV}$$

Relic Density:

$$m_{Z'} \approx 2m_\chi$$

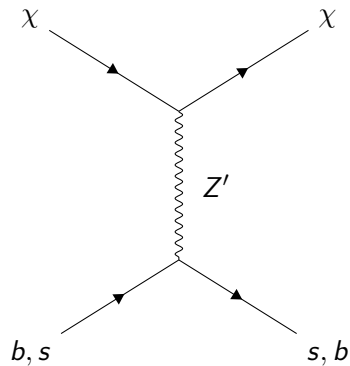
Direct Detection ($q_\chi = q_l$):

$$10 \text{ GeV} \lesssim m_{Z'} \lesssim 46 \text{ GeV}$$

$$2 \cdot 10^{-3} \lesssim g' \lesssim 10^{-2}$$

Direct Detection mit Flavour-Mischung

Annahmen: DM koppelt ausschließlich an Z' . Von den Quarks wechselwirken nur s, b mit Z' .



2017-07-25

Flavour Mixing Effects in the Direct Detection of Dark Matter

└ Ergebnisse

└ Direct Detection mit Flavour-Mischung

Annahmen: DM koppelt ausschließlich an Z' . Von den Quarks wechselwirken nur s, b mit Z' .



Schranken aus dem B -Zerfall 1

Real- und Imaginärteil variabel

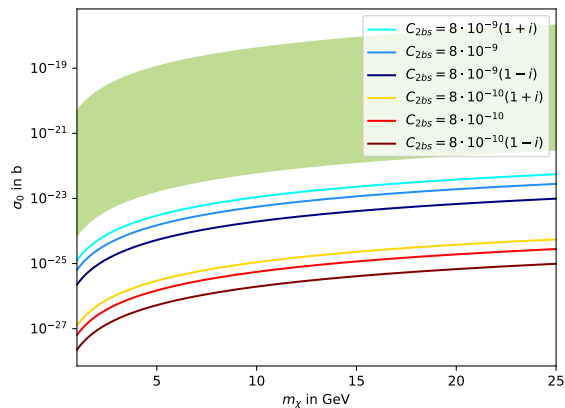


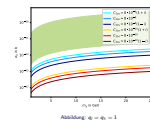
Abbildung: $q_I = q_\chi = 1$

2017-07-25

Flavour Mixing Effects in the Direct Detection of Dark Matter

Ergebnisse

Schranken aus dem B -Zerfall 1



Schranken aus dem B -Zerfall 1

Real- und Imaginärteil variabel

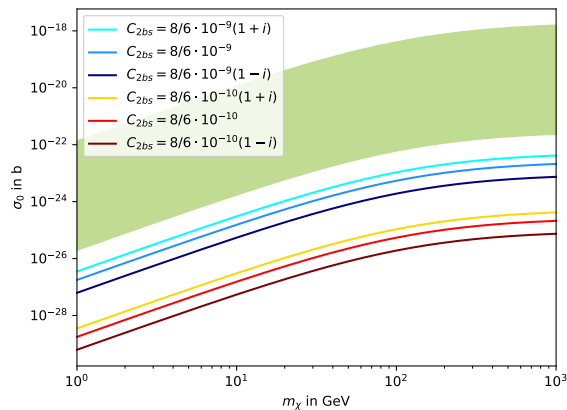


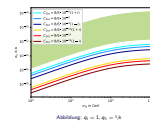
Abbildung: $q_I = 1, q_\chi = 1/6$

2017-07-25

Flavour Mixing Effects in the Direct Detection of Dark Matter

Ergebnisse

Schranken aus dem B -Zerfall 1



Schranken aus dem B -Zerfall 2

Fester Realteil, variabler Imaginärteil

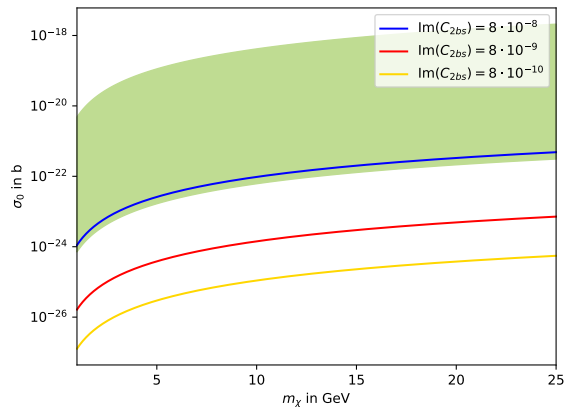


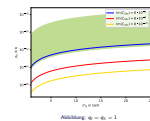
Abbildung: $q_I = q_\chi = 1$

2017-07-25

Flavour Mixing Effects in the Direct Detection of Dark Matter

Ergebnisse

Schranken aus dem B -Zerfall 2



Schranken aus dem B -Zerfall 2

Fester Realteil, variabler Imaginärteil

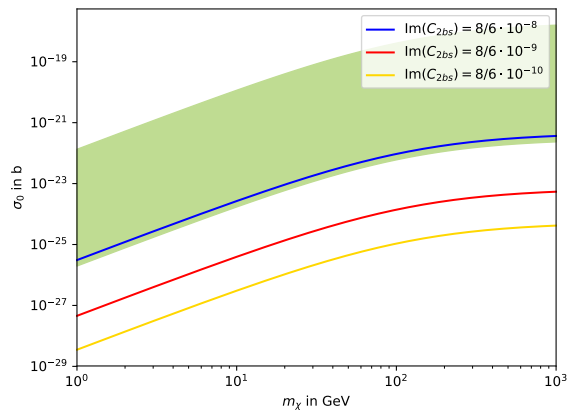


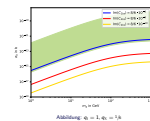
Abbildung: $q_I = 1, q_\chi = 1/6$

2017-07-25

Flavour Mixing Effects in the Direct Detection of Dark Matter

Ergebnisse

Schranken aus dem B -Zerfall 2



Schranken aus der Relic Density

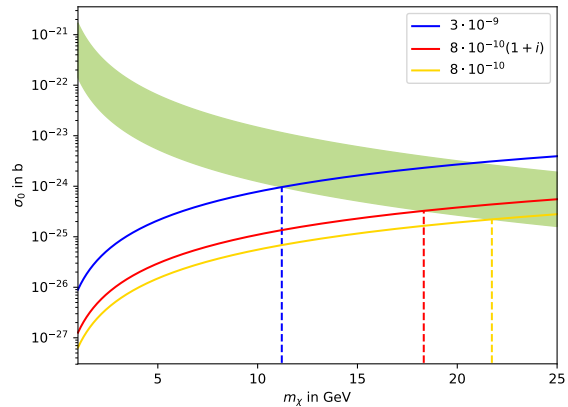


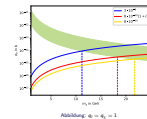
Abbildung: $q_I = q_\chi = 1$

2017-07-25

Flavour Mixing Effects in the Direct Detection of Dark Matter

Ergebnisse

Schranken aus der Relic Density



Schranken aus der Relic Density

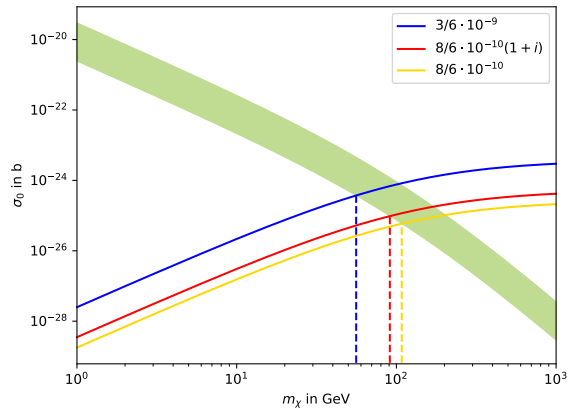


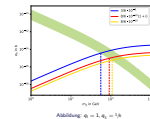
Abbildung: $q_I = 1, q_\chi = 1/6$

2017-07-25

Flavour Mixing Effects in the Direct Detection of Dark Matter

Ergebnisse

Schranken aus der Relic Density



Bibliographie



W. Altmannshofer, S. Gori, M. Pospelov und I. Yavin.
Dressing $L_\mu - L_\tau$ in Color. 2016. arXiv: 1403.1269v3
[hep-ph].



W. Altmannshofer, S. Gori, S. Profumo und F. S. Queiroz.
*Explaining Dark Matter and B Decay Anomalies with an
 $L_\mu - L_\tau$ Model.* 2017. arXiv: 1609.04026v2 [hep-ph].

2017-07-25

Flavour Mixing Effects in the Direct Detection of Dark
Matter
└ Ergebnisse

└ Bibliographie

W. Altmannshofer, S. Gori, M. Pospelov und I. Yavin.
Dressing $L_\mu - L_\tau$ in Color. 2016. arXiv: 1403.1269v3
[hep-ph].
W. Altmannshofer, S. Gori, S. Profumo und F. S. Queiroz.
*Explaining Dark Matter and B Decay Anomalies with an
 $L_\mu - L_\tau$ Model.* 2017. arXiv: 1609.04026v2 [hep-ph].