

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

2017-07-29

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

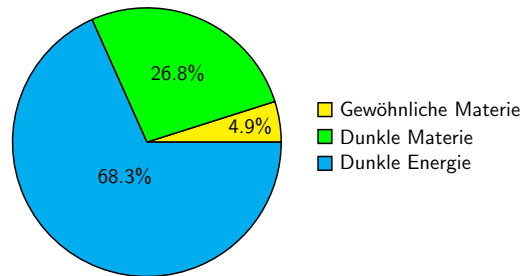


Abbildung: Energieverteilung im Universum (ESA, Planck Collaboration 2013)

2017-07-29

Flavour Mixing Effects in the Direct Detection of Dark Matter

└ Einführung

└ Einführung

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 Collaboration 2013)

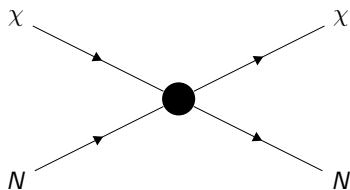


Abbildung: Streuung eines DM-Teilchens am Atomkern.

2017-07-29



Abbildung: Streuung eines DM-Teilchens am Atomkern.

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

Flavour-Mischung

Ursprung

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

Flavour Mixing Effects in the Direct Detection of Dark Matter

└─ Flavour-Mischung

└─ Flavour-Mischung

2017-07-29

Flavour-Mischung

Ursprung

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

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

Flavour Mixing Effects in the Direct Detection of Dark Matter

└ Flavour-Mischung

└ Flavour-Mischung

2017-07-29

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

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

Flavour-Mischung

Ursprung

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:

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

Flavour Mixing Effects in the Direct Detection of Dark Matter

└ Flavour-Mischung

└ Flavour-Mischung

2017-07-29

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:

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

Flavour-Mischung

Ursprung

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:

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

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

2017-07-29

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:

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

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

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

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

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:

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

2017-07-29

Flavour Mixing Effects in the Direct Detection of Dark
Matter

└ Flavour-Mischung

└ Flavour-Mischung

Beträge der Matrix-Elemente:

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

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.

2017-07-29

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:

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

2017-07-29

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:

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

2017-07-29

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 $K_{l,q}(C_{mij})$.

2017-07-29

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]

2017-07-29

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]

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]

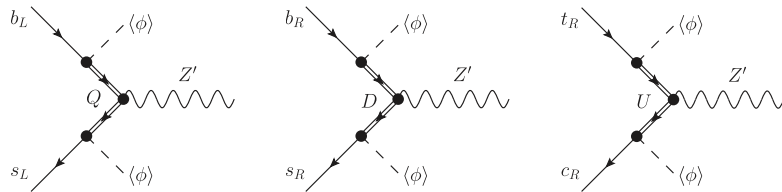


Abbildung: Wechselwirkung von SM-Quarks mit dem Eichboson Z' (aus [1])

Flavour Mixing Effects in the Direct Detection of Dark Matter

2017-07-29

└ 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]

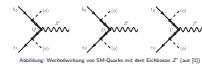


Abbildung: Wechselwirkung von SM-Quarks mit dem Eichboson Z' (aus [1])

Neue Wechselwirkung

Erklärung seltener B -Zerfälle

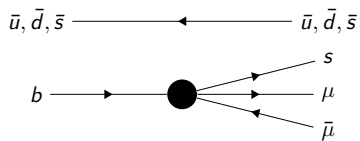


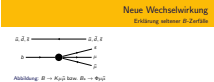
Abbildung: $B \rightarrow K\mu\bar{\mu}$ bzw. $B_s \rightarrow \Phi\mu\bar{\mu}$

2017-07-29

Flavour Mixing Effects in the Direct Detection of Dark Matter

Neue Wechselwirkung

Neue Wechselwirkung



Neue Wechselwirkung

Erklärung seltener B -Zerfälle

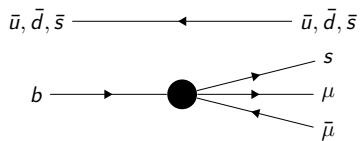


Abbildung: $B \rightarrow K \mu \bar{\mu}$ bzw. $B_s \rightarrow \Phi \mu \bar{\mu}$

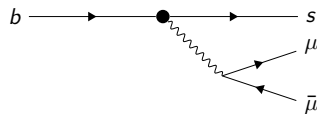


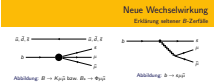
Abbildung: $b \rightarrow s \mu \bar{\mu}$

2017-07-29

Flavour Mixing Effects in the Direct Detection of Dark Matter

└ Neue Wechselwirkung

└ Neue Wechselwirkung



Neue Wechselwirkung

Erklärung seltener B -Zerfälle

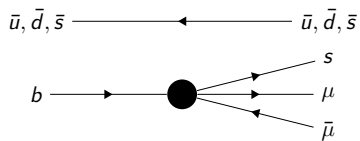


Abbildung: $B \rightarrow K \mu \bar{\mu}$ bzw. $B_s \rightarrow \Phi \mu \bar{\mu}$

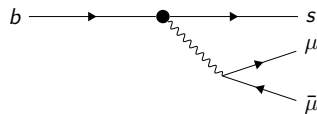


Abbildung: $b \rightarrow s \mu \bar{\mu}$

Beschreibung mit Z' -Austausch:

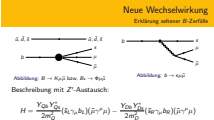
$$H = \frac{Y_{Qb} Y_{Qs}^*}{2m_Q^2} (\bar{s}_L \gamma_\mu b_L) (\bar{\mu} \gamma^\mu \mu) - \frac{Y_{Db} Y_{Ds}^*}{2m_D^2} (\bar{s}_R \gamma_\mu b_R) (\bar{\mu} \gamma^\mu \mu)$$

Flavour Mixing Effects in the Direct Detection of Dark Matter

└ Neue Wechselwirkung

└ Neue Wechselwirkung

2017-07-29



Neue Wechselwirkung

Erklärung seltener B -Zerfälle

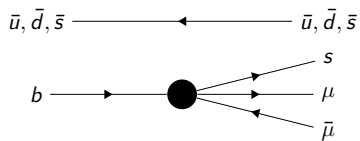


Abbildung: $B \rightarrow K \mu \bar{\mu}$ bzw. $B_s \rightarrow \Phi \mu \bar{\mu}$

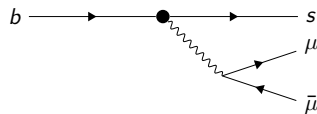


Abbildung: $b \rightarrow s \mu \bar{\mu}$

Beschreibung mit Z' -Austausch:

$$H = \frac{Y_{Qb} Y_{Qs}^*}{2m_{Q'}^2} (\bar{s}_L \gamma_\mu b_L) (\bar{\mu} \gamma^\mu \mu) - \frac{Y_{Db} Y_{Ds}^*}{2m_D^2} (\bar{s}_R \gamma_\mu b_R) (\bar{\mu} \gamma^\mu \mu)$$

Beschränkung der Masse auf:

$$m_{Q,D} \approx 25 \text{ TeV} \sqrt{\text{Re} (Y_{(Q,D)b} Y_{(Q,D)s})}$$

Flavour Mixing Effects in the Direct Detection of Dark Matter

Neue Wechselwirkung

Neue Wechselwirkung

2017-07-29

Neue Wechselwirkung
Erklärung seltener B -Zerfälle

Abbildung: $B \rightarrow K \mu \bar{\mu}$ bzw. $B_s \rightarrow \Phi \mu \bar{\mu}$

Abbildung: $b \rightarrow s \mu \bar{\mu}$

Beschreibung mit Z' -Austausch:

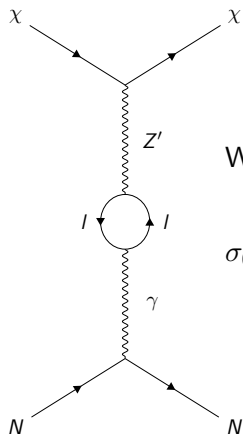
$$H = \frac{Y_{Qb} Y_{Qs}^*}{2m_{Q'}^2} (\bar{s}_L \gamma_\mu b_L) (\bar{\mu} \gamma^\mu \mu) - \frac{Y_{Db} Y_{Ds}^*}{2m_D^2} (\bar{s}_R \gamma_\mu b_R) (\bar{\mu} \gamma^\mu \mu)$$

Beschränkung der Masse auf:

$$m_{Q,D} \approx 25 \text{ TeV} \sqrt{\text{Re} (Y_{(Q,D)b} Y_{(Q,D)s})}$$

Neue Wechselwirkung

Loop-Diagramm zur Streuung am Atomkern



Wirkungsquerschnitt ohne Impulsübertrag:

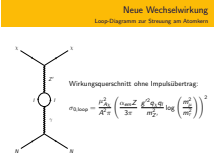
$$\sigma_{0,\text{loop}} = \frac{\mu_{A\chi}^2}{A^2\pi} \left(\frac{\alpha_{em}Z}{3\pi} \frac{g'^2 q_\chi q_I}{m_{Z'}^2} \log \left(\frac{m_\mu^2}{m_\tau^2} \right) \right)^2$$

2017-07-29

Flavour Mixing Effects in the Direct Detection of Dark Matter

└─ Neue Wechselwirkung

└─ Neue Wechselwirkung



Neue Wechselwirkung

Beschränkung der Parameter

Weitere B -Zerfälle:

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

Relic Density:

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

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

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

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

Flavour Mixing Effects in the Direct Detection of Dark Matter

Neue Wechselwirkung

Neue Wechselwirkung

2017-07-29

Neue Wechselwirkung	
Beschränkung der Parameter	
Weitere 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

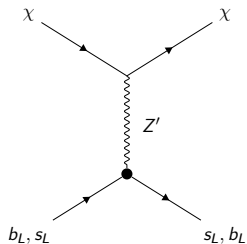


Abbildung:
Tree-Wechselwirkung zur
Streuung DM am Atomkern.

Flavour Mixing Effects in the Direct Detection of Dark Matter

Ergebnisse

Direct Detection mit Flavour-Mischung



Abbildung:
Tree-Wechselwirkung zur
Streuung DM am Atomkern.

Direct Detection mit Flavour-Mischung

Mögliche chirale Wechselwirkungen

$$(C = q_\chi \frac{Y_{Qb} Y_{Qs}^*}{2m_Q^2}):$$

$$Q_{2sb} = C(\bar{\chi}\gamma_\mu\chi)(\bar{Q}_L^2\gamma^\mu Q_L^3)$$

$$Q_{6sb} = C(\bar{\chi}\gamma_\mu\gamma_5\chi)(\bar{Q}_L^2\gamma^\mu Q_L^3)$$

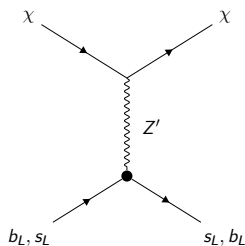
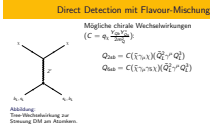


Abbildung:
Tree-Wechselwirkung zur
Streuung DM am Atomkern.

2017-07-29

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

└ Direct Detection mit Flavour-Mischung



Direct Detection mit Flavour-Mischung

Mögliche chirale Wechselwirkungen

$$(C = q_\chi \frac{Y_{Qb} Y_{Qs}^*}{2m_Q^2}):$$

$$Q_{2sb} = C(\bar{\chi}\gamma_\mu\chi)(\bar{Q}_L^2\gamma^\mu Q_L^3)$$

$$Q_{6sb} = C(\bar{\chi}\gamma_\mu\gamma_5\chi)(\bar{Q}_L^2\gamma^\mu Q_L^3)$$

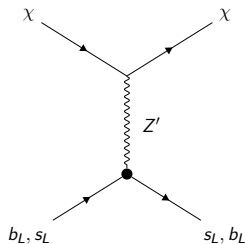
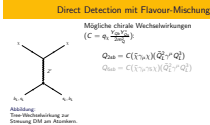


Abbildung:
Tree-Wechselwirkung zur
Streuung DM am Atomkern.

2017-07-29

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

└ Direct Detection mit Flavour-Mischung



Direct Detection mit Flavour-Mischung

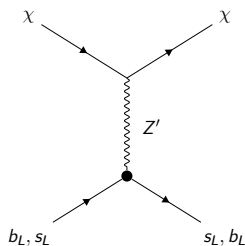


Abbildung:
Tree-Wechselwirkung zur
Streuung DM am Atomkern.

Mögliche chirale Wechselwirkungen

$$(C = q_\chi \frac{Y_{Qb} Y_{Qs}^*}{2m_Q^2}):$$

$$Q_{2sb} = C(\bar{\chi}\gamma_\mu\chi)(\bar{Q}_L^2\gamma^\mu Q_L^3)$$

$$Q_{6sb} = C(\bar{\chi}\gamma_\mu\gamma_5\chi)(\bar{Q}_L^2\gamma^\mu Q_L^3)$$

Nicht-chirale Wechselwirkungen:

$$+\text{Re}(V_{cd}^* V_{td} C) \quad (\bar{\chi}\gamma_\mu\chi)(\bar{d}\gamma^\mu d)$$

$$+\text{Re}(V_{cs}^* V_{ts} C) \quad (\bar{\chi}\gamma_\mu\chi)(\bar{s}\gamma^\mu s)$$

$$-\text{Re}(V_{cd}^* V_{td} C) \quad (\bar{\chi}\gamma_\mu\chi)(\bar{d}\gamma^\mu\gamma_5 d)$$

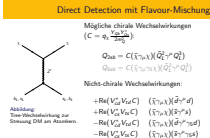
$$-\text{Re}(V_{cs}^* V_{ts} C) \quad (\bar{\chi}\gamma_\mu\chi)(\bar{s}\gamma^\mu\gamma_5 s)$$

2017-07-29

Flavour Mixing Effects in the Direct Detection of Dark Matter

└ Ergebnisse

└ Direct Detection mit Flavour-Mischung



Direct Detection mit Flavour-Mischung

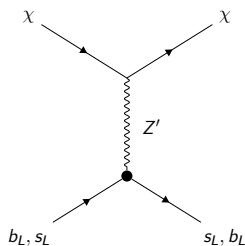


Abbildung:
Tree-Wechselwirkung zur
Streuung DM am Atomkern.

Mögliche chirale Wechselwirkungen

$$(C = q_\chi \frac{Y_{Qb} Y_{Qs}^*}{2m_Q^2}):$$

$$Q_{2sb} = C(\bar{\chi}\gamma_\mu\chi)(\bar{Q}_L^2\gamma^\mu Q_L^3)$$

$$Q_{6sb} = C(\bar{\chi}\gamma_\mu\gamma_5\chi)(\bar{Q}_L^2\gamma^\mu Q_L^3)$$

Nicht-chirale Wechselwirkungen:

$$+\text{Re}(V_{cd}^* V_{td} C) \quad (\bar{\chi}\gamma_\mu\chi)(\bar{d}\gamma^\mu d)$$

$$+\text{Re}(V_{cs}^* V_{ts} C) \quad (\bar{\chi}\gamma_\mu\chi)(\bar{s}\gamma^\mu s)$$

$$-\text{Re}(V_{cd}^* V_{td} C) \quad (\bar{\chi}\gamma_\mu\chi)(\bar{d}\gamma^\mu\gamma_5 d)$$

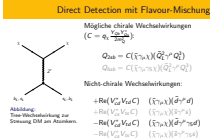
$$-\text{Re}(V_{cs}^* V_{ts} C) \quad (\bar{\chi}\gamma_\mu\chi)(\bar{s}\gamma^\mu\gamma_5 s)$$

2017-07-29

Flavour Mixing Effects in the Direct Detection of Dark Matter

Ergebnisse

Direct Detection mit Flavour-Mischung



Direct Detection mit Flavour-Mischung

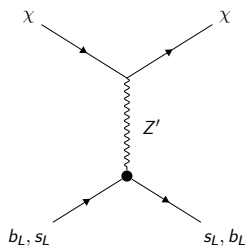


Abbildung:
Tree-Wechselwirkung zur
Streuung DM am Atomkern.

Mögliche chirale Wechselwirkungen

$$(C = q_\chi \frac{Y_{Qb} Y_{Qs}^*}{2m_Q^2}):$$

$$Q_{2sb} = C(\bar{\chi}\gamma_\mu\chi)(\bar{Q}_L^2\gamma^\mu Q_L^3)$$

$$Q_{6sb} = C(\bar{\chi}\gamma_\mu\gamma_5\chi)(\bar{Q}_L^2\gamma^\mu Q_L^3)$$

Nicht-chirale Wechselwirkungen:

$$+\text{Re}(V_{cd}^* V_{td} C) \quad (\bar{\chi}\gamma_\mu\chi)(\bar{d}\gamma^\mu d)$$

$$+\text{Re}(V_{cs}^* V_{ts} C) \quad (\bar{\chi}\gamma_\mu\chi)(\bar{s}\gamma^\mu s)$$

$$-\text{Re}(V_{cd}^* V_{td} C) \quad (\bar{\chi}\gamma_\mu\chi)(\bar{d}\gamma^\mu\gamma_5 d)$$

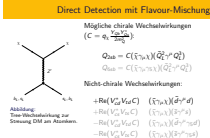
$$-\text{Re}(V_{cs}^* V_{ts} C) \quad (\bar{\chi}\gamma_\mu\chi)(\bar{s}\gamma^\mu\gamma_5 s)$$

2017-07-29

Flavour Mixing Effects in the Direct Detection of Dark Matter

Ergebnisse

Direct Detection mit Flavour-Mischung



Direct Detection mit Flavour-Mischung

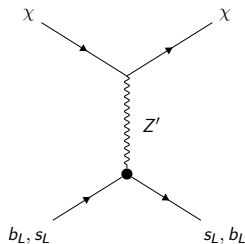


Abbildung:
Tree-Wechselwirkung zur
Streuung DM am Atomkern.

Mögliche chirale Wechselwirkungen

$$(C = q_\chi \frac{Y_{Qb} Y_{Qs}^*}{2m_Q^2}):$$

$$Q_{2sb} = C(\bar{\chi}\gamma_\mu\chi)(\bar{Q}_L^2\gamma^\mu Q_L^3)$$

$$Q_{6sb} = C(\bar{\chi}\gamma_\mu\gamma_5\chi)(\bar{Q}_L^2\gamma^\mu Q_L^3)$$

Nicht-chirale Wechselwirkungen:

$$+\text{Re}(V_{cd}^* V_{td} C) \quad (\bar{\chi}\gamma_\mu\chi)(\bar{d}\gamma^\mu d)$$

$$+\text{Re}(V_{cs}^* V_{ts} C) \quad (\bar{\chi}\gamma_\mu\chi)(\bar{s}\gamma^\mu s)$$

$$-\text{Re}(V_{cd}^* V_{td} C) \quad (\bar{\chi}\gamma_\mu\chi)(\bar{d}\gamma^\mu\gamma_5 d)$$

$$-\text{Re}(V_{cs}^* V_{ts} C) \quad (\bar{\chi}\gamma_\mu\chi)(\bar{s}\gamma^\mu\gamma_5 s)$$

$$\sigma_{0,\text{tree}} = \frac{\mu_{A\chi}^2}{A^2\pi} \left| Z \cdot \text{Re}(V_{cd}^* V_{td} C) + (A - Z) \cdot 2 \cdot \text{Re}(V_{cd}^* V_{td} C) \right|^2$$

Flavour Mixing Effects in the Direct Detection of Dark Matter

2017-07-29

Ergebnisse

Direct Detection mit Flavour-Mischung

Direct Detection mit Flavour-Mischung

Mögliche chirale Wechselwirkungen
($C = q_\chi \frac{Y_{Qb} Y_{Qs}^*}{2m_Q^2}$):

$$Q_{2sb} = C(\bar{\chi}\gamma_\mu\chi)(\bar{Q}_L^2\gamma^\mu Q_L^3)$$

$$Q_{6sb} = C(\bar{\chi}\gamma_\mu\gamma_5\chi)(\bar{Q}_L^2\gamma^\mu Q_L^3)$$

Nicht-chirale Wechselwirkungen:

$$+\text{Re}(V_{cd}^* V_{td} C) \quad (\bar{\chi}\gamma_\mu\chi)(\bar{d}\gamma^\mu d)$$

$$+\text{Re}(V_{cs}^* V_{ts} C) \quad (\bar{\chi}\gamma_\mu\chi)(\bar{s}\gamma^\mu s)$$

$$-\text{Re}(V_{cd}^* V_{td} C) \quad (\bar{\chi}\gamma_\mu\chi)(\bar{d}\gamma^\mu\gamma_5 d)$$

$$-\text{Re}(V_{cs}^* V_{ts} C) \quad (\bar{\chi}\gamma_\mu\chi)(\bar{s}\gamma^\mu\gamma_5 s)$$

Abbildung:
Tree-Wechselwirkung zur
Streuung DM am Atomkern.

$$\sigma_{0,\text{tree}} = \frac{\mu_{A\chi}^2}{A^2\pi} \left| Z \cdot \text{Re}(V_{cd}^* V_{td} C) + (A - Z) \cdot 2 \cdot \text{Re}(V_{cd}^* V_{td} C) \right|^2$$

Tree-Wechselwirkung:

$$\sigma_{0,\text{tree}} \propto \left| \text{Re}(V_{cd}^* V_{td} C) \right|^2$$

- $\text{Re}\left(\frac{C}{q_\chi}\right) = \text{Re}\left(\frac{Y_{Qb} Y_{Qs}^*}{2m_Q^2}\right) \approx 8 \cdot 10^{-10} \text{ GeV}^{-2}$

Loop-Wechselwirkung:

$$\sigma_{0,\text{loop}} \propto \left(\frac{g'^2 q_\chi q_l}{m_{Z'}^2} \right)^2$$

- B -Zerfälle: Einschränkung von $m_{Z'}/g'$
- Relic Density: $m_{Z'} \approx 2m_\chi$
- Direct Detection mit $q_\chi = q_l$: Einschränkung von $m_{Z'}, m_\chi, g'$

2017-07-29

Flavour Mixing Effects in the Direct Detection of Dark Matter

└ Ergebnisse

└ Vergleich

Tree-Wechselwirkung:

$$\sigma_{0,\text{tree}} \propto \left| \text{Re}(V_{cd}^* V_{td} C) \right|^2$$

- $\text{Re}\left(\frac{C}{q_\chi}\right) = \text{Re}\left(\frac{Y_{Qb} Y_{Qs}^*}{2m_Q^2}\right) \approx 8 \cdot 10^{-10} \text{ GeV}^{-2}$

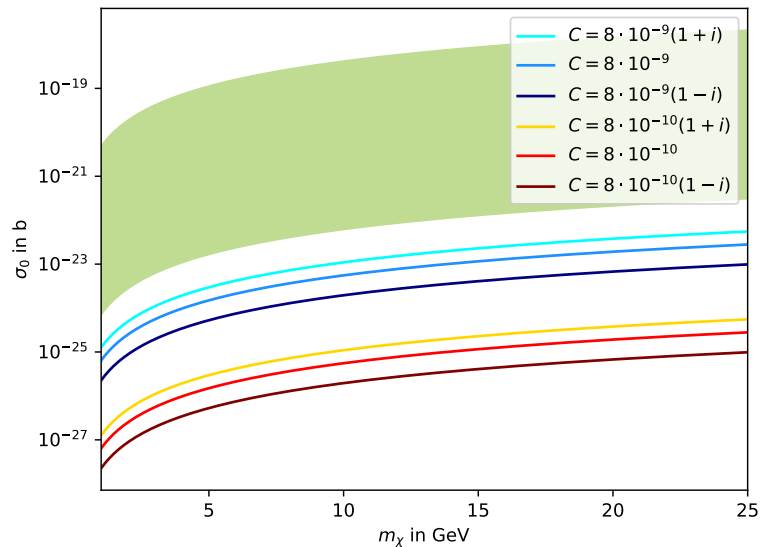
Loop-Wechselwirkung:

$$\sigma_{0,\text{loop}} \propto \left(\frac{g'^2 q_\chi q_l}{m_{Z'}^2} \right)^2$$

- B -Zerfälle: Einschränkung von $m_{Z'}/g'$
- Relic Density: $m_{Z'} \approx 2m_\chi$
- Direct Detection mit $q_\chi = q_l$: Einschränkung von $m_{Z'}, m_\chi, g'$

Einschränkung aus den B -Zerfällen 1

Real- und Imaginärteil von C variabel

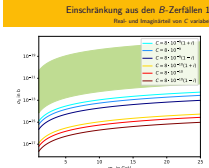


Flavour Mixing Effects in the Direct Detection of Dark Matter

2017-07-29

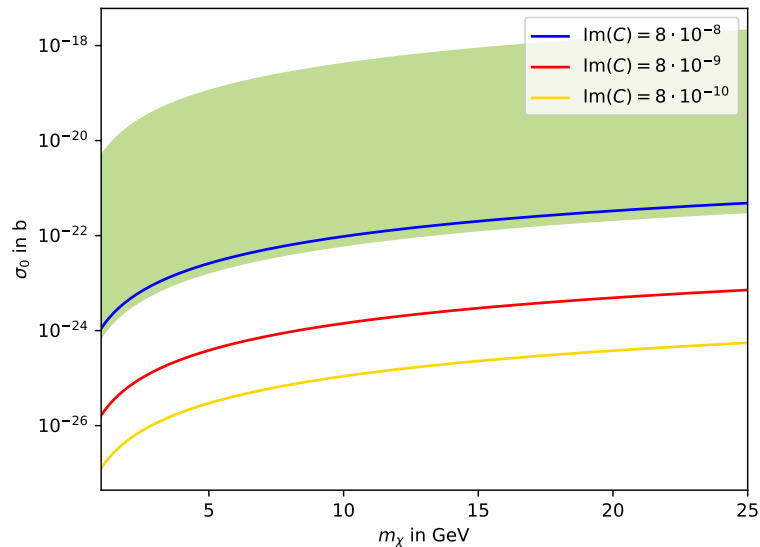
Ergebnisse

Einschränkung aus den B -Zerfällen 1



Einschränkung aus den B -Zerfällen 2

Fester Realteil, variabler Imaginärteil

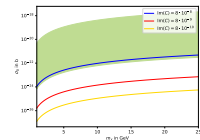


Flavour Mixing Effects in the Direct Detection of Dark Matter

Ergebnisse

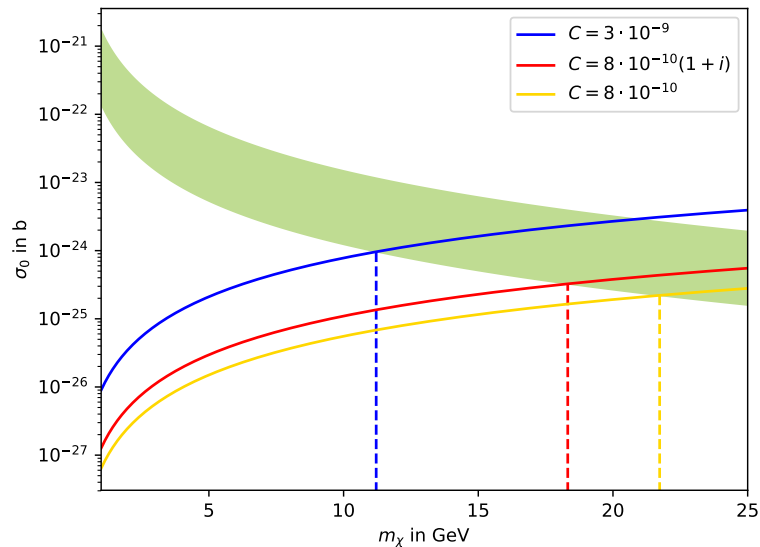
Einschränkung aus den B -Zerfällen 2

2017-07-29



Einschränkung aus der Relic Density

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

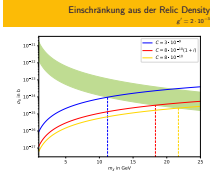


2017-07-29

Flavour Mixing Effects in the Direct Detection of Dark Matter

Ergebnisse

Einschränkung 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 $L_\mu -$
2017. arXiv: 1609.04026v2 [hep-ph].

2017-07-29

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 $L_\mu -$
2017. arXiv: 1609.04026v2 [hep-ph].