

Produktion von Anti-Helium in Wechselwirkungen kosmischer Strahlung mit interstellarer Materie

von

David Bach

Bachelorarbeit Physik

vorgelegt der

Fakultät für Mathematik und Naturwissenschaften
der RWTH Aachen

im Juli 2016

angefertigt im

1. Physikalischen Insitut B

bei

Prof. Dr. Stefan Schael

Inhaltsverzeichnis

1	Einleitung	3
2	Entstehung und Transport sekundärer kosmischer Strahlung	5
2.1	Primäre kosmische Strahlung	5
2.2	Koaleszenz Model	5
2.3	Wirkungsquerschnitt und Produktionsterm	6
2.4	Propagation	7
2.5	Berechnung des Flusses und solare Modulation	8
3	Implementierung in Pythia	10
4	Lösung der Propagation	11
5	Verifizierung und Gegenprobe der Vorgehensweise	14
5.1	Anti-Protonen	14
5.1.1	Wirkungsquerschnitt	14
5.1.2	Produktionsterm	15
5.1.3	Fluss	16
5.1.4	Fazit	18
5.2	Anti-Deuterium	19
6	Ergebnisse	21
6.1	Bestimmung des Koaleszenz Parameters	21
6.2	Überprüfung der Skalierung	21
6.3	Darstellung der Ergebnisse	23
7	Fazit	26
8	Anhang	27
	Literatur	28

1 Einleitung

Antimaterie wird seit ihrer Vorhersage und Entdeckung in weiten Bereichen der Physik untersucht. In der Astrophysik stellt sich dabei die zentrale Frage, warum es eine Asymmetrie zwischen herkömmlicher Materie und Antimaterie gibt. In Prozessen des Urknalls schien ein kleines Ungleichgewicht zwischen Materie und Antimaterie vorzuliegen, der für unser heutiges, beobachtbares Universum sorgt. Wie aber diese Ungleichgewicht zustande kommt ist nicht vollständig erklärt. Eine andere Herangehensweise an diese Problemstellung ist die Postulierung von Anti-Galaxien, Galaxien welche rein aus Antimaterie bestehen, um so die Asymmetrie aufzuheben. Diese Objekte würde Signaturen in der kosmischen Strahlung hinterlassen. Eine solche Spur wäre zum Beispiel das Vorhandensein von primärer kosmischer Strahlung bestehende aus Antimaterie. Primäre kosmische Strahlung beschreibt Teilchen, bestehend aus Materie der Galaxie, welche durch Phänomene wie Supernovae stark beschleunigt sind und eine diffuse Bewegung durchführen. Dagegen ist sekundäre kosmische Strahlung ein Produkt der Interaktion primärer kosmischer Strahlung mit interstellarer Materie.

Weiterhin kann die Untersuchung von Antimaterie innerhalb der kosmischen Strahlung möglicherweise indirekte, experimentelle Evidenz für Theorien von Dunkler Materie liefern. Zerfalls- bzw. Annihilationsprozesse hypothetischer dunkler Materie Teilchen könnten eine Signatur in der kosmischen Strahlung hinterlassen. Ein Konzept der Dunklen Materie geht von massereichen, schwach wechselwirkenden Teilchen aus, die für die gravitativ beobachtbare Galaxiebewegung verantwortlich sind. Denn nur aufgrund von normaler Materie kann diese nicht beschrieben werden. Zerfallen oder annihilieren sich diese Teilchen, kann auch dort Antimaterie entstehen und für einen in den Messdaten erkennbaren Überschuss sorgen. Aktuelle Experimente suchen nach einen Überschuss an Anti-Nukleonen verschiedener Spezies. Kandidaten für die Suche nach Anti-Galaxien sind Anti-Helium, Anti-Beryllium sowie Anti-Kohlenstoff. Ihre regulären Pendants aus normaler Materie sind bekannte, primäre Strahlung. Für die indirekte Suche nach Dunklere Materie werden dagegen leichte Anti-Nuklei wie Anti-Protonen, Anti-Deuterium und auch Anti-Helium verwendet.

In beiden Fällen ist es notwendig, dass der astrophysikalische Hintergrund bekannt ist. Dieser beschreibt alle in der Galaxie vorkommenden Prozesse, die für die Erzeugung von Antimaterie durch bekannte Mechanismen sorgt. Aus diesem Grund wird in dieser Arbeit der sekundäre Anteil des Flusses leichter Anti-Nuklei, \bar{p} , \bar{D} sowie ${}^3\bar{He}$, hervorgerufen durch Interaktion primärer kosmischer Strahlung mit interstellarer Materie auf Basis einer Monte-Carlo Simulation berechnet.

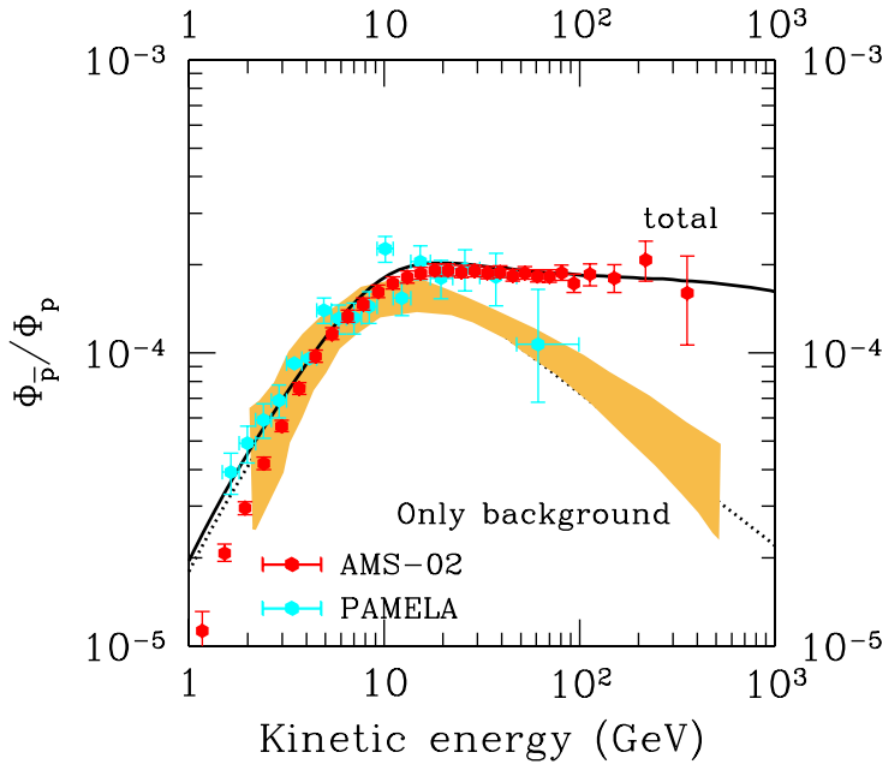


Abbildung 1: Antiproton/Proton Verhältnis, Vergleich aktueller Daten mit berechneten Erwartungen

Aktuelle Messungen des Positronen/Elektronen Verhältnisses oder selbiges für Anti-Protonen/Protonen zeigen eine mögliche Diskrepanz zu den Erwartungen des astrophysikalischen Hintergrunds. Abbildung (1) zeigt das Anti-Protonen/Protonen Verhältnis [1]. Dargestellt ist der erwartete Hintergrund in gelb, sowie Daten des AMS-02 Experimentes. So scheint ab einer kinetischen Energie von mehr als 10 GeV zwischen Messdaten und einer Prognose des Hintergrunds ein deutlicher Unterschied vorzuliegen.

Um diese Modelle und Theorien zu verifizieren, müssen zum einen konkrete Messdaten vorliegen und zum anderen muss der astrophysikalische Hintergrund bekannt sein. Vor allem im AMS-02 Experiment wird aktuell nach Antimaterie gesucht. Nach momentanem Stand gibt noch keine Messdaten bezüglich des Anti-Deuterium sowie Anti-Helium Flusses, dafür zumindest Abschätzungen über eine obere Grenze. Dagegen ist der Anti-Protonen Fluss mit hoher Präzision und über einen weiten Energiebereich vermessen. Der Hintergrund wird dabei mittels verschiedener astronomischer Parameter und Modelle, welche im Folgenden vorgestellt werden, berechnet.

2 Entstehung und Transport sekundärer kosmischer Strahlung

2.1 Primäre kosmische Strahlung

In den folgenden Abschnitten wird kurz auf die physikalischen Hintergründe der Entstehung von Antimaterie in Prozessen kosmischer Strahlung eingegangen. Der grundlegende Prozess ist die Kollision von hoch energetischer, primärer kosmischer Strahlung mit interstellarer Materie. Dies kann dabei in verschiedenen Kanälen geschehen, absteigend nach Anteilen sortiert : $p_{CR} + p_{ISM}$, $p_{CR} + He_{ISM}$, $He_{CR} + p_{ISM}$, $He_{CR} + He_{ISM}$. CR bezeichnet dabei die primären Teilchen und ISM die der interstellaren Materie. Dabei sind die Anteile an der gesamten Antimaterie Produktion Schätzungsweise: 56%, 24%, 12% und 6% [3]. In diesen Kollisionen sind folgende Prozesse von Interesse: $p + p = p + p + \bar{p} + p$ sowie $p + p = n + \bar{n} + p + p$ also die Produktion von Anti-Protonen und Anti-Neutronen unter Beachtung von Ladungserhaltung und Baryonenzahlerhaltung. In den folgenden Berechnungen wird nur der $p + p$ Kanal explizit betrachtet. Die Beachtung der anderen wird im Bereich der Ergebnisse diskutiert. Um Anti-Nuklei, vor allem mit höherer Massezahl, aus Wechselwirkungen kosmischer Strahlung mit interstellare Materie zu erzeugen müssen viele weitere Teilchen entstehen, was dafür sorgt, dass der daraus resultierende Fluss erwartungsgemäß gering ist.

2.2 Koaleszenz Model

Das Modell welches in dieser Arbeit benutzt wird um die Formation von leichten Anti-Nuklei zu berechnen ist das sogenannte Koaleszenz Modell [3]. Dieses Modell geht davon aus, dass mehrere Anti-Nukleonen, die bei einem beliebigen Prozess entstehen, verschmelzen wenn die Differenz ihrer Impulse ein maximalen Wert, im weiter Koaleszenz Impuls p_0 genannt, nicht überschreiten. Für Anti-Helium sieht die Bedingung folgendermaßen aus:

$$|\vec{K}_1 - \vec{K}_2| < p_0, |\vec{K}_1 - \vec{K}_3| < p_0, |\vec{K}_2 - \vec{K}_3| < p_0 \quad (1)$$

Wobei \vec{K}_i der jeweilige Impuls des Anti-Nukleonen im Schwerpunktsystem ist. Die Bildung von Anti-Deuterium erfordert diese Bedingung entsprechend nur für zwei beteiligte Teilchen.

Formal wird das Koaleszenz Modell auch folgendermaßen beschrieben[3]:

$$\gamma \frac{d^3 N_A}{d^3 \vec{p}_A} = \left(\frac{4\pi}{3} p_0^3\right)^{A-1} \left(\gamma \frac{d^3 N_p}{d^3 \vec{p}_p}\right)^A \quad (2)$$

Diese Gleichung sagt aus, dass die differentielle Häufigkeit im Phasenraum eines Kernes mit der Massenzahl A über die Häufigkeit der in der Bildung beteiligten Protonen beziehungsweise Neutronen und des Koaleszenz Parameters beschreibbar ist. γ ist dabei der relativistische Gammafaktor. Der Koaleszenz Impuls ist ein freier Parameter dieses Modelles. Aus Gleichung (1) und (2) folgt, warum in dieser Arbeit ${}^3\overline{He}$ untersucht wird und nicht ${}^4\overline{He}$. Denn jedes weitere beteiligte Teilchen senkt die Wahrscheinlichkeit einer Formation. Wie schon vorher erwähnt ist der Prozess zur Bildung von ${}^3\overline{He}$ recht unwahrscheinlich. Darum wird die Formation von ${}^4\overline{He}$ via Koaleszenz nicht beachtet.

Dieses Verfahren wird für die Formation von Anti-Helium und Anti-Deuterium genutzt, dabei ist

Energie [GeV]	100	300	700	1600	11500	20000
<i>Pythia 8</i> [mb]	38.38	39.42	40.96	42.96	49.19	51.53
PDG	38.7	39.21	40.42	42.9	≈ 48	54

Tabelle 1: Berechnete totale Wirkungsquerschnitte

Folgendes anzumerken. Anti-Helium 3 besteht aus zwei Anti-Protonen und einem Anti-Neutron. Aufgrund der Repulsion des Coulomb Potential, welches nur sehr schwierig zu quantifizieren ist, wird in dieser Arbeit nur die direkte Bildung von Anti-Tritium simuliert. Auf den Zeitskalen der Propagation wird eines der Anti-Neutronen zerfallen und Anti-Helium 3 entsteht. Im Kapitel 6 wird näher auf die Folgen dieser Annahme eingegangen. Im Falle von Anti-Deuterium wird hingegen die direkte Bildung simuliert.

2.3 Wirkungsquerschnitt und Produktionsterm

Der Bildung von leichten Anit-Nuklei muss nun ein differentieller Wirkungsquerschnitt zugewiesen werde[5]:

$$\frac{d\sigma_{pp \rightarrow \bar{X}}}{dE}(T, E) = \sigma_{pp_{tot}}(E) \cdot \frac{dN}{dT}(T, E) \quad (3)$$

T stellt dabei die kinetische Energie des Anti-Nukleus pro Nukleon dar und E die Energie des einkommenden Protons. $\sigma_{pp_{tot}}(E)$ beschreibt den totalen Wirkungsquerschnitt von Proton, Proton Kollisionen. $\frac{dN}{dT}(T, E)$ ist die Häufigkeit der Anti-Nuklei gewichtet mit der absoluten Anzahl der generierten Kollisionen pro Energieeinheit.

$$\frac{dN}{dT} = \frac{N_{\bar{X}}}{N_{pp} dT} \quad (4)$$

$\frac{dN}{dT}(T, E)$ ist das histogrammierte Resultat des hier verwendeten Monte-Carlo Simulators, siehe Kapitel 3.

Die totalen Wirkungsquerschnitte werden intern mit *Pythia 8* [2] berechnet. Tabelle (1) zeigt eine Auswahl von Wirkungsquerschnitten und dazu der Vergleich mit Ergebnissen der PDG(Particle Data Group). Die dargestellte Energie ist die der einkommenden Protonen.

Aus Gründen der Konsistenz wurde die Berechnungen der Wirkungsquerschnitte von Pythia anstatt die der PDG für die differentiellen Wirkungsquerschnitte der Anti-Nuklei verwendet. Die geringen Unterschiede in diesen Wirkungsquerschnitten sind in Anbetracht anderer Unsicherheiten hervorgerufen durch Propagation zu vernachlässigen und werden im Weiteren nicht mehr erwähnt. Mittels dieses Wirkungsquerschnittes wird nun der sogenannte Produktionsterm berechnet[7]:

$$Q_{sec}(T) = \int_{E_{thr}}^{\infty} \frac{d\sigma_{pp \rightarrow \bar{X}}}{dE}(T, E) n_H 4\pi \Phi(E) dE \quad (5)$$

Wobei $n_H \approx 1/cm^3$ als mittlere Dichte der interstellaren Materie angenommen wird [5]. Dieses Materie besteht in der Realität in verschiedenen Anteilen aus atomaren Wasserstoff, 2H sowie ionisiertem Wasserstoff, in dieser Arbeit wird es aber als reines Wasserstoffgas genähert.

Die in der Gleichung (7) auftauchende Terme erklären sich folgendermaßen.

- $f(t, \vec{x}, T) = \frac{dN_{\bar{A}}}{dT}$ ist die Anzahl Anti-Nuklei pro Volumen und kinetischer Energie zu einer bestimmten Zeit an einem bestimmten Ort.
- $\kappa(T) = \kappa_0 \beta \left(\frac{p}{GeV}\right)^\delta$ ist der Koeffizient der Diffusion aufgrund der Inhomogenitäten des magnetischen Feldes.
- V_{conv} ist der Geschwindigkeit des Konvektions Windes, der Teilchen weg von der galaktischen Scheibe drückt.
- Q_{sec} ist der im vorigen Kapitel beschriebene Produktionsterm.
- h entspricht der Dicke der galaktischen Scheibe (≈ 0.1 kpc).
- Der letzte Term entspricht der Wechselwirkung der Nuklei mit Materie in der galaktischen Scheibe. $\Gamma_{ann} = (n_H + 4^{2/3} n_{He}) \sigma_{p\bar{A}}^{ann}$, wobei angenommen wird, dass der WW¹-Querschnitt für die Interaktion $p + \text{He}$ der von $p + p$ entspricht dabei aber über einen geometrischen Faktor modelliert wird. Der zweite Teil entspricht der WW ohne Annihilation, wobei die Nuklei dabei einen großen Teil ihrer Energie verlieren. Dieser Anteil wird aus Vereinfachung nicht in den finalen Fluss mit einbezogen. Das heißt : $\Gamma_{ann} + \Gamma_{non-ann} = (n_H + 4^{2/3} n_{He}) \sigma_{inel}$. Mit $\sigma_{ann} + \sigma_{non-ann} = \sigma_{inel}$.
- Diese Gleichung enthält keine *diffuse Wiederbeschleunigung* und keine tertiären Anti-Nuklei. Tertiäre Anti-Nuklei bezeichnet hier Anti-Nukleonen die durch WW sekundärer Anti-Nukleonen mit Materie der galaktischen Scheibe entstehen. Aus Gründen der einfacheren Berechnung werden diese beiden Aspekte nicht im endgültigen Fluss beachtet.

2.5 Berechnung des Flusses und solare Modulation

Die im vorigen Kapitel beschriebene Gleichung wird für ein zylindrisches Volumen mit Höhe L ,² welches die gesamte galaktische Scheibe umfasst, gelöst. Dabei werden Gleichgewichtsbedingungen angenommen, was de facto heißt, dass $\frac{\partial f}{\partial t}$ auf Null gesetzt wird. Daraus ergibt sich die Lösung für den Fluss einer Spezies sekundärer kosmischer Strahlung Φ [8].

$$\Phi = \frac{v_{\bar{A}}}{4\pi} R(T) Q_{sec} \quad (8)$$

Wobei $v_{\bar{A}}$ der Geschwindigkeit des Anti-Nukleus entspricht, $R(T)$ die nach dem Formalismus von [8] berechnete analytische Lösung aller Propagationprozesse ist, sowie Q_{sec} welcher der sekundäre Produktionsterm ist. Die Form und numerische Berechnung von $R(T)$ wird in Kapitel 4 durchgeführt.

Die Propagation bestimmt den Fluss einer Spezies von Hadronen, die zum Sonnensystem gelangen. Auf dem Weg zur Erde sind sie vor allem dem veränderlichen magnetischen Feld der Sonne ausgesetzt, was je nach kinetischer Energie des Kernes, zu einem Energieverlust führt. Da das Magnetfeld der Sonne einer komplizierten Zeit- und Ortsabhängigkeit folgt, wird hier nur der

¹Wechselwirkung

²Die genaue Wahl der Propagationsparameter und die Lösung wird in Kapitel 4 beschrieben

einfache Fall eines festen solaren, gemittelten Potentials betrachtet[4]. Diese Auswirkung wird in der Literatur solare Modulation genannt. Über folgende Gleichung kann der Fluss der an der Erde ankommt über den Interstellaren Fluss berechnet werden.

$$\frac{d\Phi_{\bar{A}\oplus}}{dT_{\oplus}} = \frac{T^2 - m^2}{(T + |Ze|\Phi_F)^2 - m^2} \frac{d\Phi_{\bar{A}}}{dT}, \quad T_{\oplus} = T - |Ze|\Phi_F \quad (9)$$

Wobei $\Phi_f = 500$ MV als solares Potential angenommen wird und T die gesamte kinetische Energie der Nukleonen ist. \oplus markiert die Erde. $\frac{d\Phi_{\bar{A}}}{dT}$ beschreibt den Fluss vor Erreichen des Sonnensystems. Die solare Modulation sorgt für einen Energieverlust von Nuklei mit geringer kinetischen Energie.

3 Implementierung in Pythia

Da die analytische Berechnung des Wirkungsquerschnittes $\frac{d\sigma_{pp \rightarrow \overline{He}}}{dT}(T, E)$ nicht möglich ist, wird auf die Verwendung einer Monte-Carlo Simulation zurück gegriffen. Um diese Entstehung via Koaleszenz zu simulieren wird in die Monte-Carlo Simulation Pythia 8 die Gleichung (1) implementiert:

Diese Koaleszenz Modell wird in der Literatur als einfaches Koaleszenz Modell beschrieben, da es nur die Informationen im Impulsraum nutzt und die eigentliche Position der Nuklei im Ortsraum vernachlässigt.

Pythia ist ein Monte-Carlo Event-by-Event Generator für Proton-Proton Kollisionen und verfügt über eine große Zahl an Methoden und Funktionen, um auch komplexe Probleme im Bereich der Hochenergiephysik zu lösen. Der folgende Arbeitsablauf findet statt:

Zu verschiedenen primären Proton Energien, 20 diskrete zwischen 100 GeV und 20 TeV in logarithmischer Aufteilung, wird eine feste Anzahl *Fixed Target* p,p Kollisionen simuliert. Obwohl die kleinste Energie für die Erzeugung von Anti-Helium bei $31 m_p$ liegt, wird erst ab 100 GeV simuliert, selbiges gilt für Anti-Deuterium, da sonst keine Statistik vorhanden ist. Für Anti-Protonen ist hingegen 10 GeV der Beginn. Für die Anti-Helium Analyse wurden p,p-Kollisionen in $\mathcal{O}(10^{11})$ generiert.

Jede dieser Kollisionen entspricht einem Event und es wird das Koaleszenz Modell auf die in Frage kommenden Anti-Nuklei angewendet. Als physikalische Grundlage dient das innerhalb von Pythia *SoftQCD* genannte Paket. Dieses versucht auf Basis der QCD³ die Gluon-Gluon Wechselwirkung zu berechnen und errechnet dann die Hadronisation. Weiterhin ist zu erwähnen das der Zerfall aller meta-stabilen Teilchen verhindert wird. Dies liegt daran, dass das Koaleszenz Modell rein auf Basis der relativen Impulse zu einer Formation führt. Sind zwei Anti-Nuklei im Ortsraum zu weit von einander entfernt, können sie nicht mehr fusionieren.

Da in dem hier verwendeten simplen Koaleszenz Modell die räumliche Distanz nicht beachtet wird könnte es dazu kommen, dass ein Anti-Nukleus aus dem primären Vertex mit einem aus dem Zerfall meta-stabiler Teilchen fusioniert. Dies ist extrem unwahrscheinlich.

Nun beachtet dieses einfache Koaleszenz Modell keine räumlichen Informationen. Da aber nur Kerne des primären Vertex auf Erfüllung der obigen Bedingung geprüft werden, und somit eine schon hohe räumliche Nähe vorliegt, wird auf die Implementierung eines mikroskopischen Koaleszenz Modells verzichtet. In diesem Modell wird auch auf eine exakte räumliche Nähe der Anti-Nuklei geprüft. Ein solches Modell hätte zu wesentlich längeren Berechnungszeiten geführt was den Mehrgewinn an Genauigkeit nicht rechtfertigt.

³Quantenchromodynamik

Modell	δ	$\kappa_0[kpc^2/Myr]$	$V_{conv}[km/s]$	L [kpc]
MIN	0.85	0.0016	13.5	1
MED	0.70	0.0112	12	4
MAX	0.46	0.0765	5	15

Tabelle 2: Modelle der Propagation

4 Lösung der Propagation

Für diese Arbeit ist die Propagation von Anti-Protonen, Anti-Deuterium sowie Anti-Helium von Interesse. Erstere beiden dienen teils zur Verifikation des genutzten Verfahrens, da für Anti-Protonen konkrete Messdaten vorliegen sind aber auch von sich aus interessant.

Die analytische Lösung der Gleichung (7) und (8) schreibt sich folgendermaßen [8].

$$R(T) = \sum_{n=1}^{\infty} J_0\left(\xi_n \frac{r_{\odot}}{R}\right) \exp\left[-\frac{V_{conv}L}{2\kappa(E)}\right] \frac{y_n(L)}{A_n \sinh(S_n L/2)} \quad (10)$$

mit

$$y_n(Z) = \frac{4}{J_1^2(\xi_n) R^2} \int_0^R dr r J_0(\xi_n r/R) \int_0^Z dz \exp\left[\frac{V_{conv}(Z-z)}{2\kappa(E)}\right] \sinh(S_n(Z-z)/2) \quad (11)$$

und

$$A_n = 2h\Gamma_{ann} + V_{conv} + \kappa(E)S_n \coth(S_n L/2), \quad S_n = (V_{conv}^2/\kappa(E)^2 + 4\xi_n^2/R^2)^{\frac{1}{2}} \quad (12)$$

Diese Gleichung wird mittels Mathematica numerisch gelöst. Korrespondenz mit Marco Cirelli, welcher an [5] mitgearbeitet hat, liefert die von ihnen verwendete Γ_{ann} und dient zum Vergleich der berechneten Propagationsmodelle für Anti-Helium. Es werden die in Tabelle 1 dargestellten Sätze von Parametern genutzt[8], diese sind mittels einer Vielzahl astrophysikalischer Daten bestimmt worden und sind assoziiert mit einem maximalen bzw. minimalen Fluss. Die Lösung wird nun an ein Polynom angepasst, mit einem Satz a von Parametern für jede Spezies und jedes Model.

$$\log_{10}[R(T/n)/Myr] = a_0 + a_1\kappa + a_2\kappa^2 + a_3\kappa^3 + a_4\kappa^4 + a_5\kappa^5 \quad (13)$$

Mit n der Anzahl an Nuklei, sowie $\kappa = \log_{10}(T)$.

Es wurde überprüft, dass die Anpassung und die Daten in den betrachteten Energieskalen nur sehr geringe Abweichungen haben. Im Anhang sind die bestimmten Parameter gegeben.

Damit erhält man die für \bar{p} , \bar{D} und $\bar{{}^3He}$ in den folgenden Abbildungen dargestellten berechneten Lösungen der Propagation, Abbildungen (3-5). Die Unterschiede in der Berechnung, neben natürlich Masse und Ladung, ist Γ_{ann} . Denn die Annihilationswahrscheinlichkeit nimmt mit größerer Masse zu. Es wurde auch hier [8] gefolgt, welche für die Anti-Protonen eine Parametrisierung von σ_{in} nutzen, für Anti-Deuterium diese mit einem Faktor von zwei multiplizieren. Für die Anti-Helium Kerne wird die Parametrisierung der Cirelli Kollaboration genutzt. Direkt fallen die geringen Unterschiede zwischen Anti-Deuterium und den Anti-Protonen auf, dies ist zu erwarten, da die Ladung identisch ist und die Funktion als Energie pro Nukleon gewählt ist. Aufgrund der höheren

Annihilationswahrscheinlichkeit ist die Funktion Funktion für Anti-Helium unterdrückt.

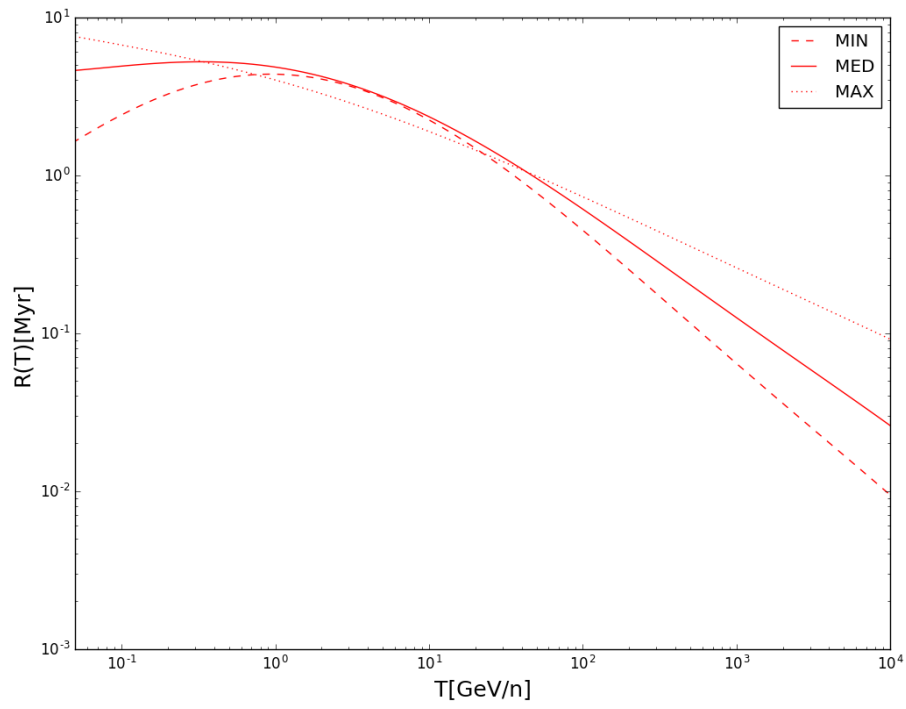


Abbildung 3: Anti-Proton Propagationsfunktion

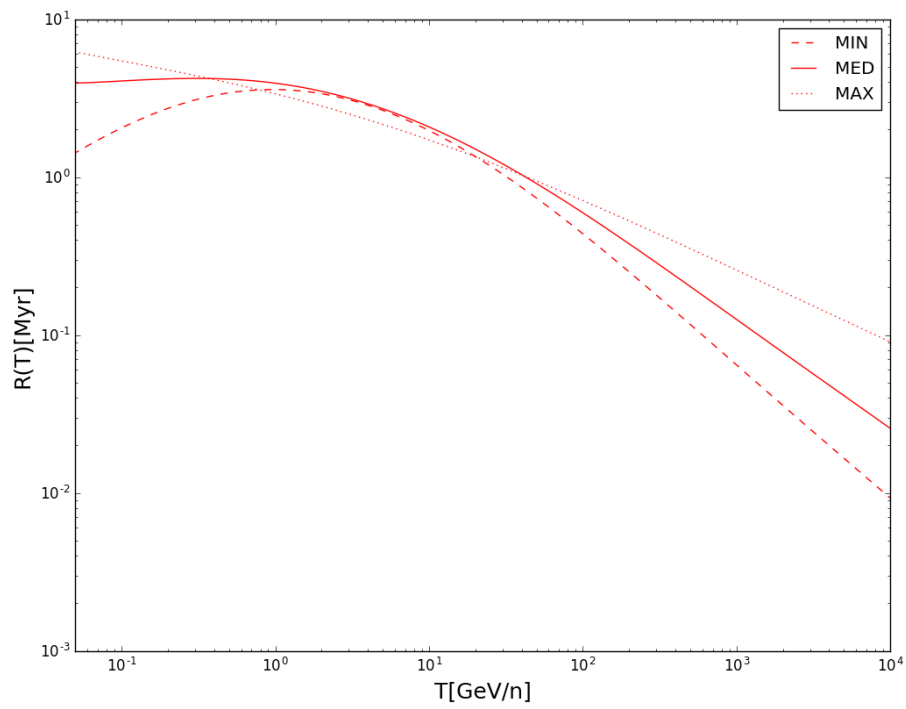


Abbildung 4: Anti-Deuterium Propagationsfunktion

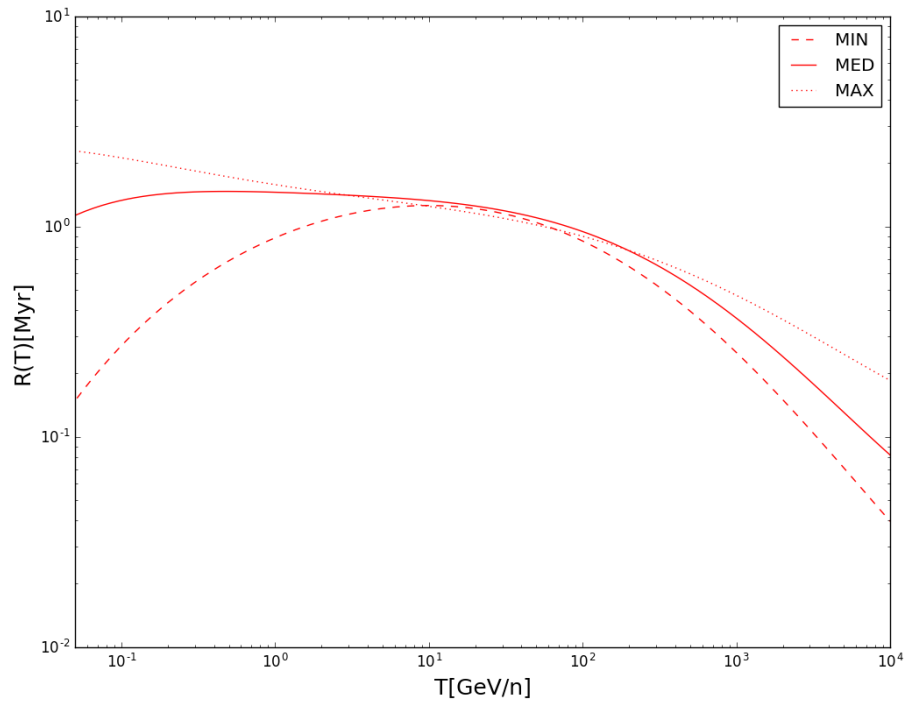


Abbildung 5: Anti-Helium Propagationsfunktion

5 Verifizierung und Gegenprobe der Vorgehensweise

Um die Ergebnisse die die Nutzung von Pythia liefern zu verifizieren müssen Ergebnisse produziert werden welche mit aktuellen Messungen und Experimenten vergleichbar sind. Da es keine Messdaten eines Anti-Helium Flusses gibt wird nun in den folgenden Kapiteln zu erst auf die Produktion von Anti-Protonen und Anti-Deuterium eingegangen.

Vor allem ersteres ist dabei von großer Interesse, da diese die Basis für die Anti-Helium-Nuklei bildet.

5.1 Anti-Protonen

Verglichen wird in verschiedenen Etappen der Fluss-Bildung. Grundlage dabei ist immer der differentielle Wirkungsquerschnitt in Gleichung (2).

5.1.1 Wirkungsquerschnitt

In [9] werden für verschiedene *Fixed Target* Proton-Energien $\{10, 30, 100, 300 [GeV]\}$ Wirkungsquerschnitte mittels verschiedener Parametrisierungen analytisch berechnet. Dass heißt an Messdaten wird ein funktioneller Zusammenhang angepasst. Diese dienen als Vergleichsgrundlage⁴. Abbildung (6) zeigt die Ergebnisse der Wirkungsquerschnitte. In schwarz die Berechnungen dieser Arbeit und in rot die Ergebnisse von Tan & Ng. Deutlich fällt die Überschätzung in allen Energie-Bereichen auf, aber auch ein Abnehmen zu höheren Energien. Die Form der Kurven stimmt qualitativ überein. Je nach betrachteter Energie liegt ein Normierungsfaktor von zwischen 4 und 1.5 vor. Tabelle (3), auf der nächsten Seite, stellt die Normierungen dar, dabei wurde Punktweise über den dargestellten Energiebereich das Verhältnis beider Kurven gemittelt. Es zeigt die vermutete Energieabhängigkeit.

Grundsätzlich sind dazu folgende Dinge zu beachten.

I Die Parametrisierungen wurden an Messdaten von Experimenten angepasst, diese Daten liegen im Bereich von ca. 10-400 GeV. In diesem Bereich funktionieren die Modelle gut und sind untereinander einigermaßen konsistent. Zu höheren und niedrigeren Energien trifft dies nicht zu. Die Energieskala der Simulation beginnt erst bei 100 GeV und erreicht wesentlich höhere Energien. Abbildung (7) verdeutlicht dabei die Unterschiede zweier Modelle⁵. Dabei sei gesagt, dass nicht notwendigerweise die gleiche Parametrisierung des primären Protonflusses genutzt wurde, bzw. [7] geben an je nach Möglichkeit Daten von AMS als primären Fluss zu nutzen. Aus diesem Grund ist nicht direkt nachzuvollziehen welcher Faktor für die Diskrepanz der beiden Modelle verantwortlich ist aber es zeigt, dass auch auf diesen Modellen größere Unsicherheiten liegen.

II Pythia ist ein Monte-Carlo Simulator welcher dafür konzipiert ist auf Energieskalen des LHC zu operieren. Für astrophysikalische Phänomen sind, aufgrund der Unterdrückung des

⁴Die Hauptautoren waren Tan & Ng, deshalb werden diese Wirkungsquerschnitte so referenziert

⁵Es handelt sich hierbei um den Produktionsterm Gleichung (5), welcher aus den Wirkungsquerschnitten berechnet wird

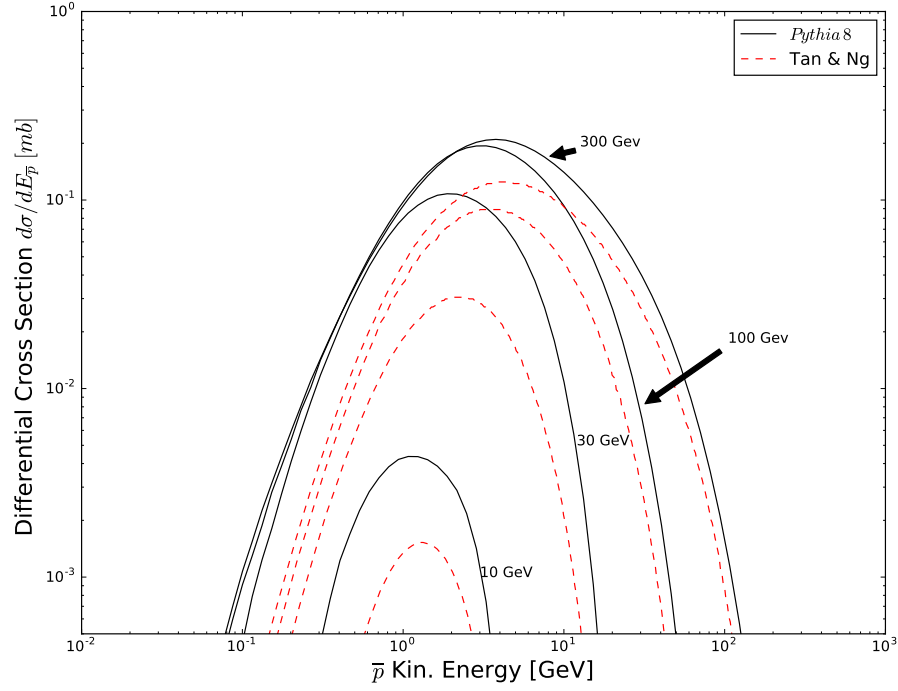


Abbildung 6: Vergleich differentieller Wirkungsquerschnitte, schwarz: Pythia, rot Tan und Ng

primären Spektrums, wesentlich kleinere Schwerpunktsenergien von Interesse. Aus diesem Grund sind gewisse Abweichungen zu erwarten.⁶

Energie [GeV]	10	30	100	300
Normierung	3.1 ± 0.3	4.2 ± 0.8	2.4 ± 0.5	1.8 ± 0.4

Tabelle 3: Normierungsfaktor

Die Pythia Simulation ist nicht auf einen solchen Energie-Bereich angepasst.

Da diese Problematik nicht innerhalb von Pythia gelöst werden konnte, kann dies nur zumindest als eine Unsicherheit in qualitativer Form auf den zu berechnenden Fluss angenommen werden.

5.1.2 Produktionsterm

Auf Basis von Gleichung (3) wird nun der Produktionsterm berechnet, siehe Abbildung (7). Selbiges Muster ist auch hier zu erkennen. In niederen Bereich wird die Anzahl an Anti-Nuklei überschätzt. Weiterhin ist eine aktuelleres Ergebniss von [7] dargestellt. Diese Arbeitsgruppe hat aufgrund aktueller Messdaten, vor allem des NA49 Experimentes, eine neue Parametrisierung des invarianten, differentiellen Wirkungsquerschnittes für Anti-Proton Produktion angepasst und damit einen Produktionsterm errechnet. Auffallend sind direkt die Unterschiede zu den Berechnungen von Tan & Ng, was noch einmal verdeutlicht welche Unsicherheiten noch auf diesen Modellen liegen.

⁶Rücksprache mit Andrea Vittion, Mitarbeiter bei [5], ergab, dass dort ähnliche Probleme mit der Anti-Proton Wirkungsquerschnitten mit Pythia auftraten und ohne Änderung der internen Hadronisation, keine korrekte Übereinstimmung erreicht wurde.

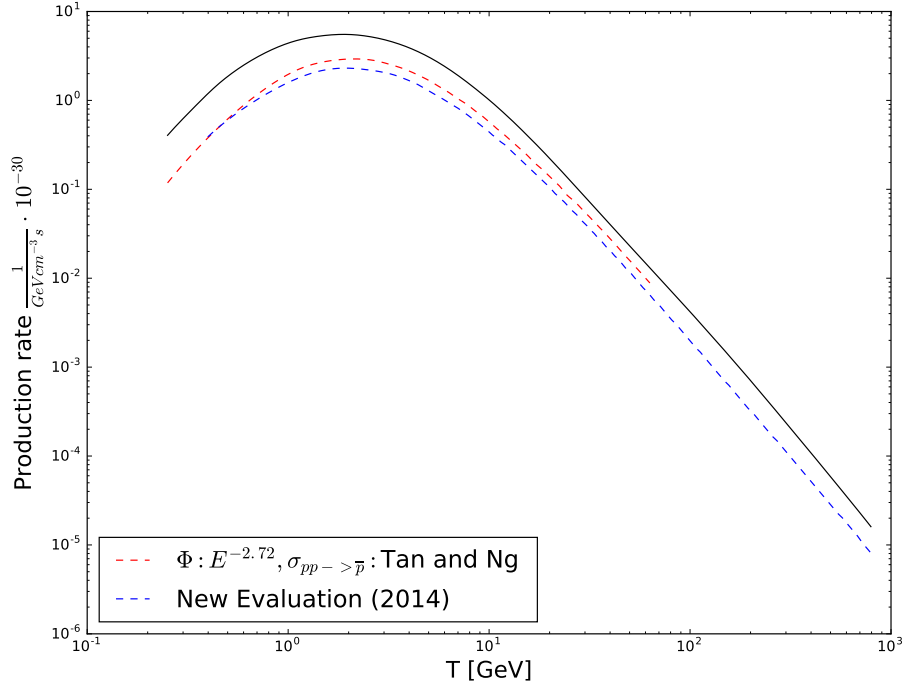


Abbildung 7: Berechnung des Produktionsterms, schwarz: Pythia, rot: Tan und Ng, blau: neue Parametrisierung [7]

5.1.3 Fluss

Abbildung (8) zeigt nun die Anti-Protonen/Protonen Verhältnis welche mittels der Propagation aus Kapitel 4 und Gleichung (6), einer solaren Modulation mit festen Potential von $\Phi_{sol} = 0.5$ GV , sowie Proton-Daten von AMS (2015) berechnet wird.

Der ausgefüllte Bereich stellt dabei die Unsicherheit bezüglich der Propagation dar, dh. das Min und Max Modell. Beide Kurven schneiden sich, was auch aus den Lösungen der Propagationsgleichungen zu erkennen ist. Im niederen Energiebereich ist die untere Kurve das Max Modell. Da bis jetzt nur die direkte Anti-Proton Produktion berechnet wurde, wird der Fluss mit einem Faktor zwei multipliziert um auch die Anti-Neutronen zu zählen welche aus Symmetrie Gründen im gleichen Maße produziert werden und während der Propagation zu Anti-Protonen zerfallen. Weiterhin wird entsprechend der Verhältnisse, die in Kapitel 2 Teil 2 dargestellt wurden, die anderen Produktionskanäle mit einbezogen. Der finale Fluss mit allen Kanälen sowie den Neutronen ergibt sich zu:

$$\Phi_{final} = \Phi_{p+p} \cdot (1 + 0.79) \cdot 2 \quad (14)$$

Der Wert von 0.79 ergibt sich als Division von 44 und 56 welche den Anteilen aus nicht p,p-Kanälen und dem p,p-Kanal entspricht. Im Vergleich dazu aktuelle AMS Daten bezüglich des Verhältnisses.

Der berechnete Fluss zeigt in Teilen der Energieskala eine Übereinstimmung innerhalb der Unsicherheit der Propagation. Aber zu niedrigeren Energien gibt es eine Diskrepanz. Als Erklärung kann eine nicht genaue solare Modulation angenommen werden. Denn vor allem diese sorgt für eine Änderung in diesem Energiebereich. Da es sich hierbei um ein Verhältnis handelt und die Protonen als Messdaten vorliegen, ist nicht direkt bekannt bei welchem mittleren solaren Potential

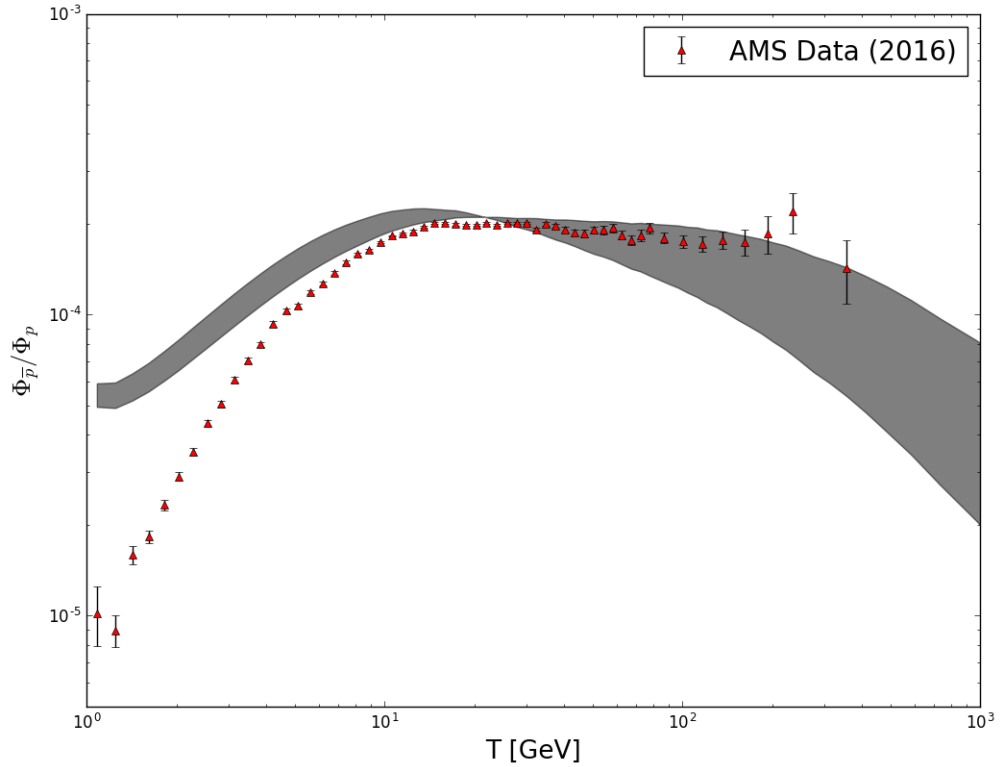


Abbildung 8: Berechnung des Anti-Protonen/Protonen Verhältnis in versch. Propagations Modellen

gemessen wurde. Der Anti-Protonen Fluss wird bei einem festen Potential von 500 MV berechnet. Weiterhin gibt es eine Unsicherheit innerhalb der Modulation, da diese Ladungsabhängig ist[13]. In den vorigen Kapitel wurde weiterhin gezeigt, dass der Monte-Carlo Output zu niedrigen Energien überschätzt wird. Dies trägt auch zu der Diskrepanz bei.

Abbildung (8) zeigt verschieden solare Potentiale zwischen 0 GV und 1 GV und deren Einfluss. Dargestellt ist das maximale Propagationsmodell. In der Tat liegt zwischen den verschiedenen Potentialen im kleinen Energiebereich eine größere Unsicherheit vor.

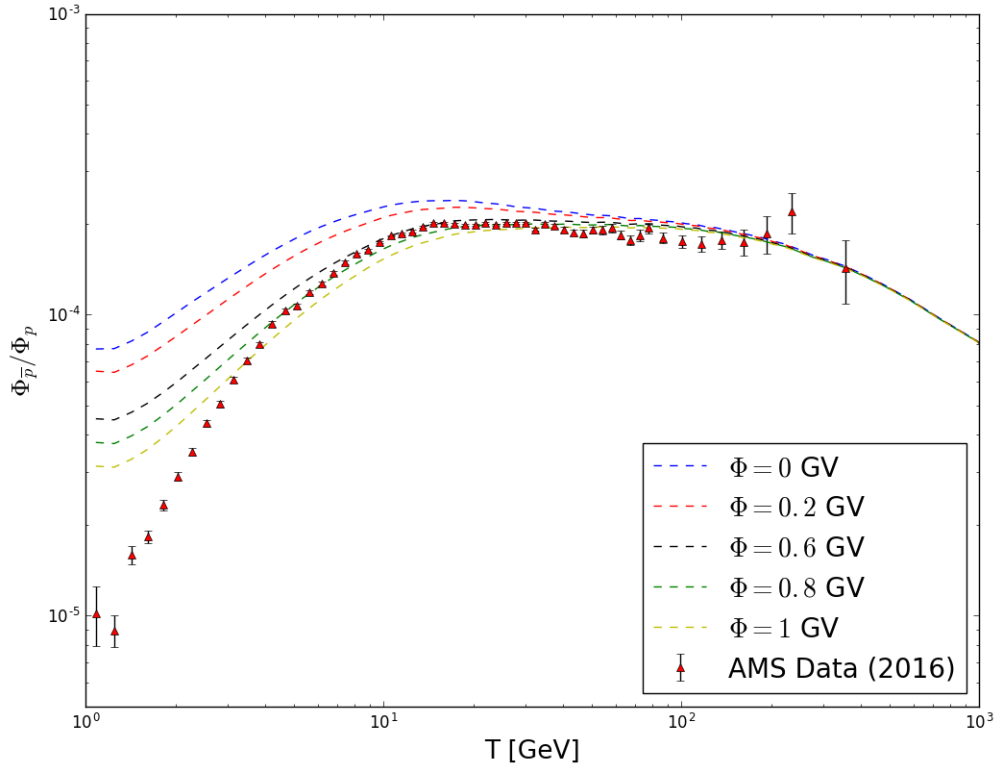


Abbildung 9: Einfluss der solaren Modulation auf das Anti-Proton/Proton Verhältnis

5.1.4 Fazit

Die experimentellen Messdaten können mit den hier verwendeten Berechnungen, innerhalb von Unsicherheiten, reproduziert werden. Dies steht im Gegensatz zu der anfangs gezeigten Abbildung. Betrachtet man die Ergebnisse so fällt es schwer einen möglichen Überschuss an Anti-Protonen, hervorgerufen durch Annihilation oder Zerfall von Dunklere Materie Teilchen, über den hier berechneten astrophysikalischen Hintergrund zu erkennen, zumindest wenn das maximale Propagationsmodell verwendet wird. Für das minimale Modell ist die Diskrepanz zu höheren Energien größer. Betrachtet man das minimale Modell so stimmt diese mit den Darstellungen des Hintergrundes zu Beginn der Arbeit Abbildung (1) grundsätzlich überein. Zusammenfassen lässt sich sagen, dass zum einen die verwendeten Methoden zur Bestimmung eines Flusses für die weiteren Auswertungen verifiziert wurden sowie gezeigt wurde das aktuelle Messdaten auch innerhalb eines reinen sekundären Flusses reproduzierbar sind. Dabei sind die Unsicherheiten hervorgerufen durch Wirkungsquerschnitte, Propagation sowie solare Modulation groß. Weiterhin liegt eine ungelöste Problematik mit dem hier verwendeten Monte-Carlo Simulator vor, welcher im Bereich der Wirkungsquerschnitte für Unsicherheiten sorgt.

Allgemein sind die Kenntnisse der hier verwendeten Wirkungsquerschnitten nicht mit ausreichender Präzision vorhanden um mit den Genauigkeiten der experimentellen Daten mitzuhalten. Aufgrund dieser Unsicherheiten kann man Anti-Protonen als Nachweisprinzip für aktuelle astrophysikalische Fragen weder ausschließen noch gänzlich akzeptieren.

5.2 Anti-Deuterium

Weiterhin soll nun die korrekte Implementierung des Koaleszenz Modells überprüft werden. Als Beispiel wird die Produktion von Anti-Deuterium genutzt. Dabei wird der Fluss oberhalb der Atmosphäre mit anderen Arbeiten selbigen Themas verglichen.

Berechnet wird dieser vollkommen analog zu den Anti-Protonen, mit Einbeziehung aller Produktionskanäle. Nur wird auf die entstandenen Anti-Protonen und Anti-Neutronen das Koaleszenz Modell angewandt. In diesem Fall auf ein Anti-Neutron und ein Anti-Proton. Verglichen werden die Ergebnisse mit einem Talk von 2014 [10] in einem Dark Matter Workshop auf Hawaii.

In dieser Arbeit wurde der sekundäre Anti-Deuterium Fluss mittels eines Monte-Carlo Simulators, DPMJET-III, berechnet. Analog zu dieser Arbeit wurde ein Event-by-Event Koaleszenz Model verwendet. Als Koaleszenz Parameter wurde $p_0 = 152$ MeV gewählt. Auf die Bestimmung diese Parameters wird im nächsten Kapitel näher eingegangen. Die Propagation enthält keine *diffusive reacceleration* und keine Energieverluste. Also identisch zu der hier verwendeten Propagation auch nicht.

Abbildung (10) zeigt die Ergebnisse, in rot die von [10] , mit einer Fehlerschätzung von ± 3 auf den Fluss, nach eigenen Angaben, und daneben in schwarz die Berechnung dieser Arbeit. Der schwarze Bereich stellt die Unsicherheit der Propagationsmodelle dar.

Es fallen größere Unterschiede auf, aber zumindest stimmt die Größenordnung sowie qualitativ die Form der Kurve. Da nicht weiter bekannt ist welchem genauen Formalismus in dieser gefolgt wurde und keine Messdaten zu einem Anti-Deuterium Fluss vorliegen kann keine gesicherte Aussage über die Richtigkeit getroffen werden. Scheinbar liefert die Implementierung des Koaleszenz Modell ähnliche Ergebnisse wie andere Algorithmen und ist damit verifiziert.

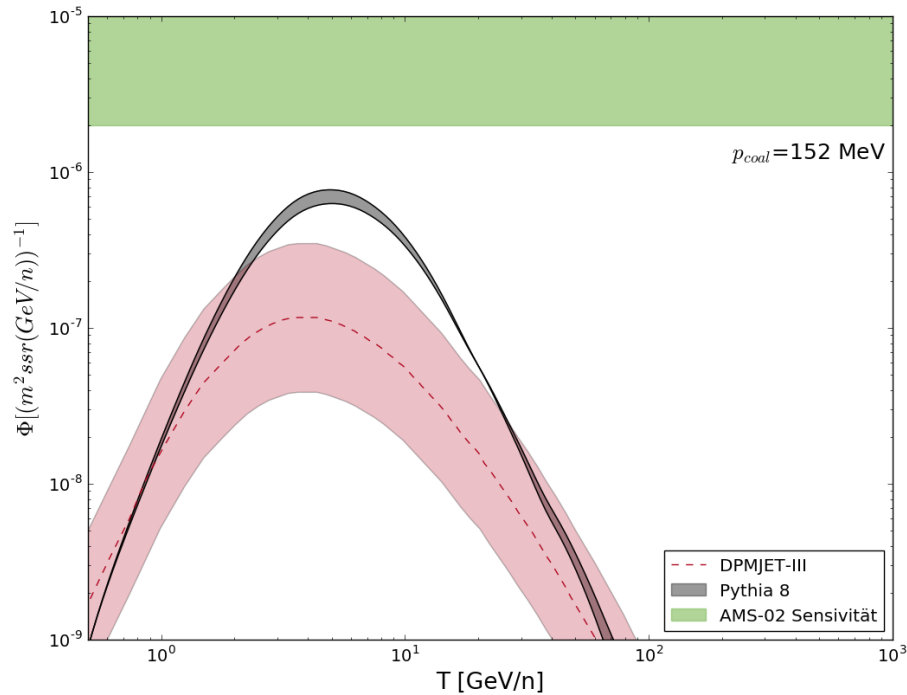


Abbildung 10: Berechnung des Anti-Deuterium Hintergrundes, Vergleich mit ähnlichen Arbeiten und AMS-02 Sensitivität

In [10] wird eine Abschätzung der Sensitivität von AMS-02 oder dem GAPS Experiment im

Bereich von $\mathcal{O}(10^6)$ gemacht. In diesem Falle liegt der berechnete Hintergrund, zumindest in seinem Maximum, nahe an diesem Wert.

6 Ergebnisse

6.1 Bestimmung des Koaleszenz Parameters

Als einziger freier Parameter ist der Koaleszenz Impuls zentral. Verwendet werden hier Parameter die in anderen Arbeiten genutzt beziehungsweise bestimmt werden. Das Verfahren, welches auch für den Koaleszenz Parameter des Anti-Deuterium Flusses genutzt wurde, ist das Anpassen des Monte Carlo Outputs an Messdaten für die Produktion von Anti-Deuterium des ISR Experimentes am CERN [11] [12]. Am ALICE Experiment wird zwar aktuell die Formation von Helium Kernen via Koaleszenz gemessen, die Ergebnisse werden hier aber nicht verwendet. Abbildung (11) zeigt den Vergleich zwischen Modell und Daten, aufgetragen bezüglich verschiedener Koaleszenz Parameter, durchgeführt von [5].

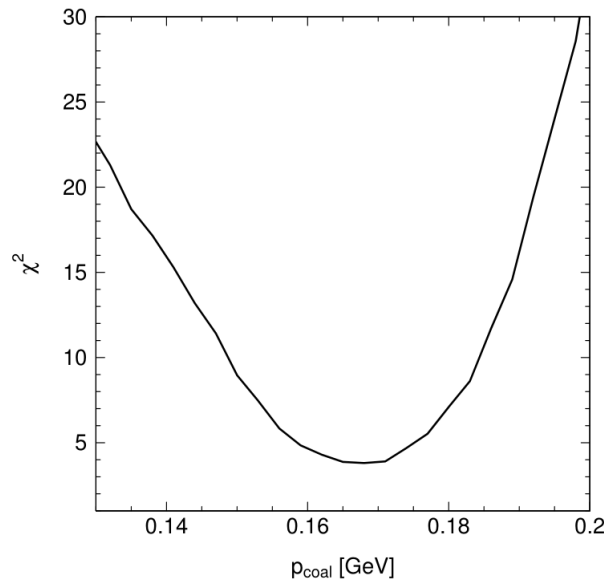


Abbildung 11: Anpassung des Koaleszenz Modells an Daten [5]

Es ist in diesem Fall nicht verwunderlich, dass verschiedene Monte-Carlo Simulatoren bei verschiedenen Koaleszenz Parametern ihr Optimum der Reproduktion haben. So ergibt die Optimierung von Pythia in den Arbeiten von [5] einen Wert von $p_{coal} = 167$ MeV, die im vorigen Kapitel verglichenen Anti-Deuterium Arbeit einen Wert von $p_{coal} = 152$ MeV, obwohl in den Anti-Deuterium Arbeiten keine direkte Angabe über die Vorgehensweise zur Findung des optimalen Parameters gemacht wurde.

6.2 Überprüfung der Skalierung

Im Falle von Anti-Helium ist die Wahrscheinlichkeit der Verschmelzung via Koaleszenz wesentlich kleiner als von Anti-Deuterium. Aus diesem Grund kann nicht bei beliebig kleinen Parametern simuliert werden, da sonst die erhaltenen Statistik nicht ausreicht. Aus diesem Grund wird für alle Ergebnisse bei einem Parameter von $p_{coal} = 300$ MeV simuliert und mittels der Gleichung (2) reskaliert. Um diese Vorgehensweise zu legitimieren werden nun Daten von 195 MeV und 300 MeV verglichen. Abbildung (12) zeigt den jeweiligen Fluss, welcher sich qualitativ nur um einen

$(\frac{\Phi_{300}}{\Phi_{195}})^6$	Simulation	$\chi^2/Ndof$
13.25	12.3 ± 0.7	0.4

Normierungsfaktor unterscheidet.

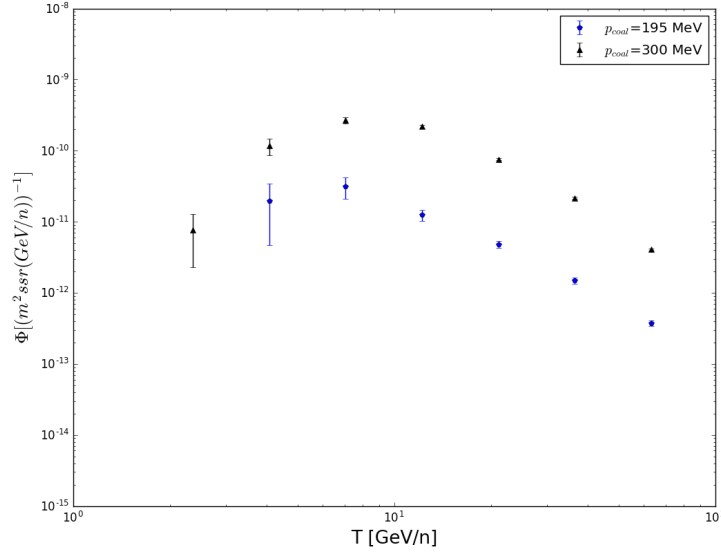


Abbildung 12: ${}^3\overline{He}$ -Fluss mit zwei Koaleszenz Parametern

Abbildung (13) zeigt das Verhältnis beider Flüsse. Für den Wert von 195 MeV liegt keine hohe Statistik vor, aus diesem Grund sind die Fehler in Bereichen geringer Energie groß. In Blau ist die Erwartung eingetragen, die sich aus Gleichung (2) berechnet. Für $A=3$ ergibt der Faktor des Koaleszenz Impulses einen Exponenten von 6. Ein großer Teil der Werte liegt zumindest innerhalb der Fehler nahe an der Erwartung. Für diese Messpunkte ergibt sich ein $\chi^2/Ndof$ von 0.4, was vor allem an den großen Fehlern liegt. Im Anbetracht der anderen wesentlich größeren Unsicherheiten, ist der Fehler durch das Skalieren des Koaleszenz Parameters vernachlässigbar und wird im weiteren nicht explizit erwähnt.

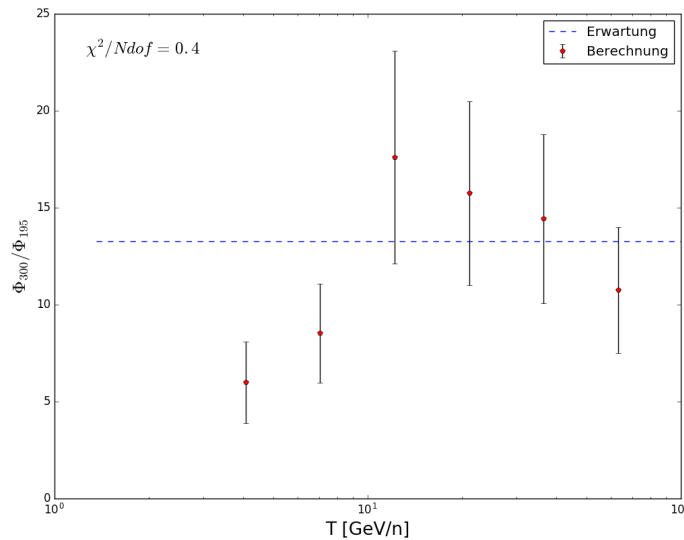


Abbildung 13: Verhältnis der Koaleszenz Parameter

6.3 Darstellung der Ergebnisse

Die vorigen Kapitel dienten dazu die theoretische Grundlage zu legen, sowie eine kritische Untersuchung des elementaren Bestandteils dieser Arbeit, der Monte-Carlo-Simulation, durchzuführen. Im Verlauf diese Abschnittes werden nun die Ergebnisse des ${}^3\overline{\text{He}}$ -Flusses, das Anti-Helium/Helium Verhältnis sowie weitere Diskussionen über Unsicherheiten sowie die Sensitivität des AMS-Detektors bezüglich dieser Messgrößen angestellt.

Zu Beginn der berechnete Anti-Helium-Fluss, alleine aus dem p+p-Kanal sowie ohne Beiträge durch die direkte Bildung von Helium in Abbildung (14).

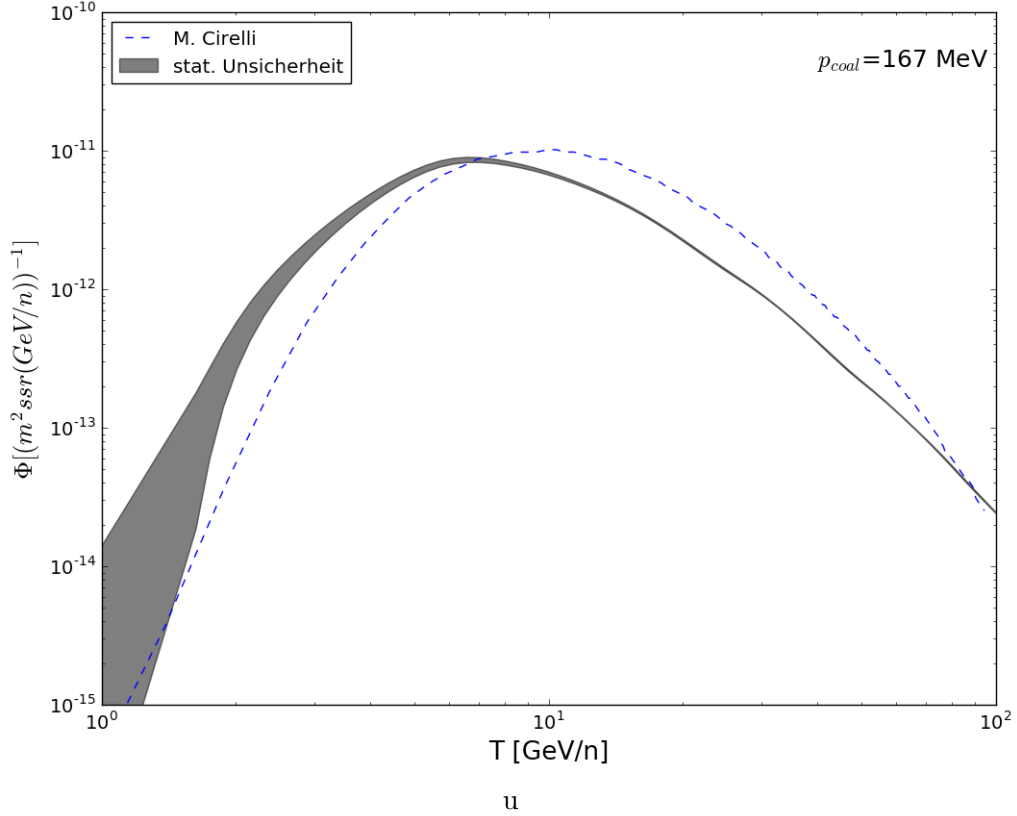


Abbildung 14: Berechnung des ${}^3\overline{\text{He}}$ -Flusses aus dem p,p-Kanal, ohne direkte Bildung von Anti-Helium

In blau, gestrichelte die Ergebnisse der Cirelli Kollaboration[5] sowie in schwarz die Ergebnisse dieser Arbeit, der Bereich stellt die statistische Unsicherheit dar. Die blaue Kurve wurde mit identischem Koaleszenz Parameter und reiner p,p-Kanal Tritium Bildung berechnet. Als Propagationsmodell wurde das MED-Modell gewählt. Zu den Ergebnissen in Blau sei gesagt, dass diese Kurve nicht identisch ist mit der innerhalb der Publikation.⁷ Dieser Fluss ist der aktuell, korrekt berechnete Fluss. Die Form und Größenordnung stimmen überein, kleinere Unsicherheiten sind vorhanden, zu größeren Energien und kleineren werden die Ergebnisse konsistenter. Wichtig ist dabei anzumerken, dass zu niedrigeren Energien ≤ 1 GeV kaum bis gar keine Events vorhanden sind. In den Darstellungen werden die Datenpunkte linear extrapoliert. Die verwendete Aufteilung des Histogramms entscheidet dabei über die Werte der Punkte bei niedrigen Energien und dadurch über die Extrapolation. Aus diesem Grund ist dieser Teil der Energieskala mit Vorbehalt zu

⁷Rücksprache mit Andrea Vittino ergab, dass nach eigener Aussage in der Publikation ein Fehler vorliegt

betrachten. Im gesamten kann man sagen, dass ein ähnlicher Fluss berechnet wurde. Wie schon zuvor erwähnt beinhaltet dieser Fluss die reine Bildung von Tritium aus dem alleinigen p,p-Kanal. Wie schon im Falle der Anti-Protonen werden nun, siehe Gleichung (13), alle Kanäle mit beachtet sowie die direkte Bildung von Anti-Helium. Dies sorgt für maximal einen Faktor von zwei im Fluss falls die Coulomb Repulsion keine Rolle spielen würde. Die Auswirkungen dieser Annahmen sind in Abbildung (15) dargestellt. In schwarz weiterhin die Statistische Unsicherheit, in Blau die der Propagation sowie in Gelb die Unsicherheit durch die direkte Bildung. Die obere Grenze stellt dabei einen sehr optimistischen Fluss dar. Dieser Darstellung beinhaltet nun alle hier betrachteten Unsicherheiten

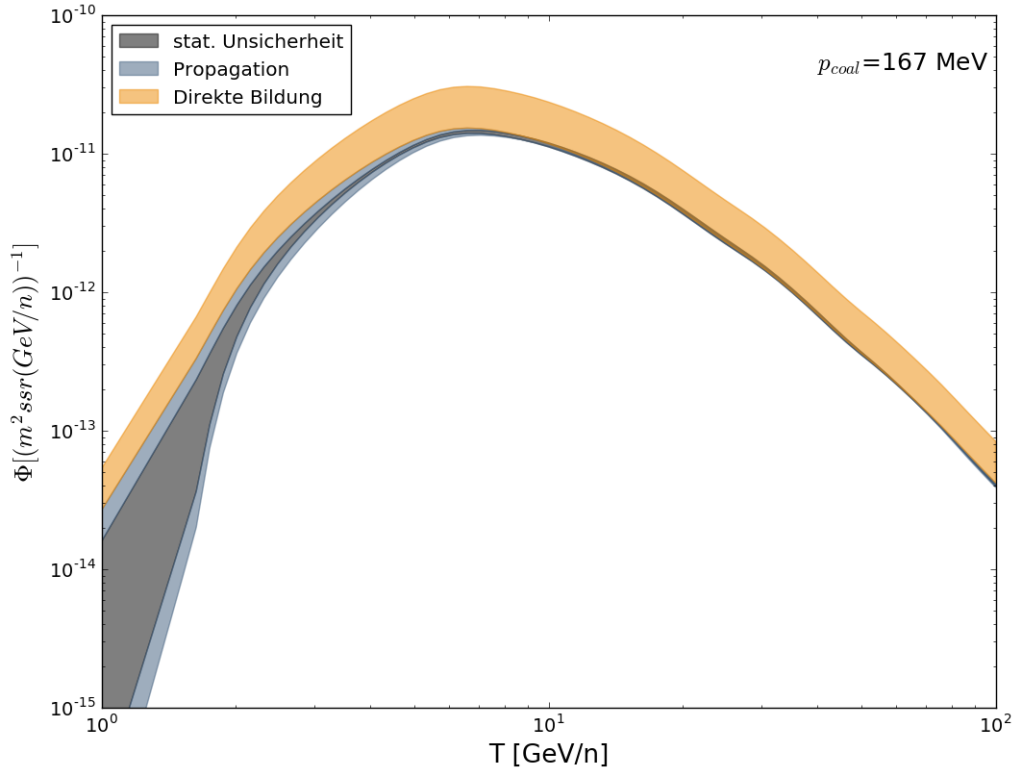


Abbildung 15: Berechnung des ${}^3\overline{He}$ -Flusses inklusive aller Kanäle und der direkten Bildung

Auf Basis dieser Ergebnisse kann nun auch das Anti-Helium/Helium Verhältnis berechnet werden. Dafür werden AMS Daten des Helium Flusses aus dem Jahre 2015 genutzt. Dargestellt in Abbildung (16). Es zeigt sich ein Abfallen zu niedrigeren Energien sowie für höhere Energien ein Abflachen. Dies deutet daraufhin, dass die spektralen Indizes beider Teilchen identisch sind. Dazu ist in grün eine grobe Abschätzung der Sensitivität des AMS-02 Experimentes bezüglich dieser Messgröße dargestellt. Selbst in dem Fall dass die direkte Bildung von Anti-Helium zum Fluss beiträgt gibt es kaum eine Chance dies experimentell nachzuweisen. Erst ein Koaleszenz Parameter von ≈ 1.4 GeV würde zu einem Nachweisbaren Fluss führen. Das ist natürlich abseits jeglicher Möglichkeiten. Ein realistischer Bereich der Koaleszenz Parameter liegt zwischen 100 MeV und 200 MeV. Des weiteren ist in rot ein hypothetischer Fluss aufgrund von Dunkler Materie Annihilation eingetragen [5]. Die Annihilation erzeugt b, \bar{b} welche durch Hadronisation Antimaterie bilden. In diesem Fall für ein Dunkle Materie Teilchen mit der Masse von 40 GeV. Über ein identisches Koaleszenz Modell formieren die \bar{p} und \bar{n} dann Anti-Helium 3.

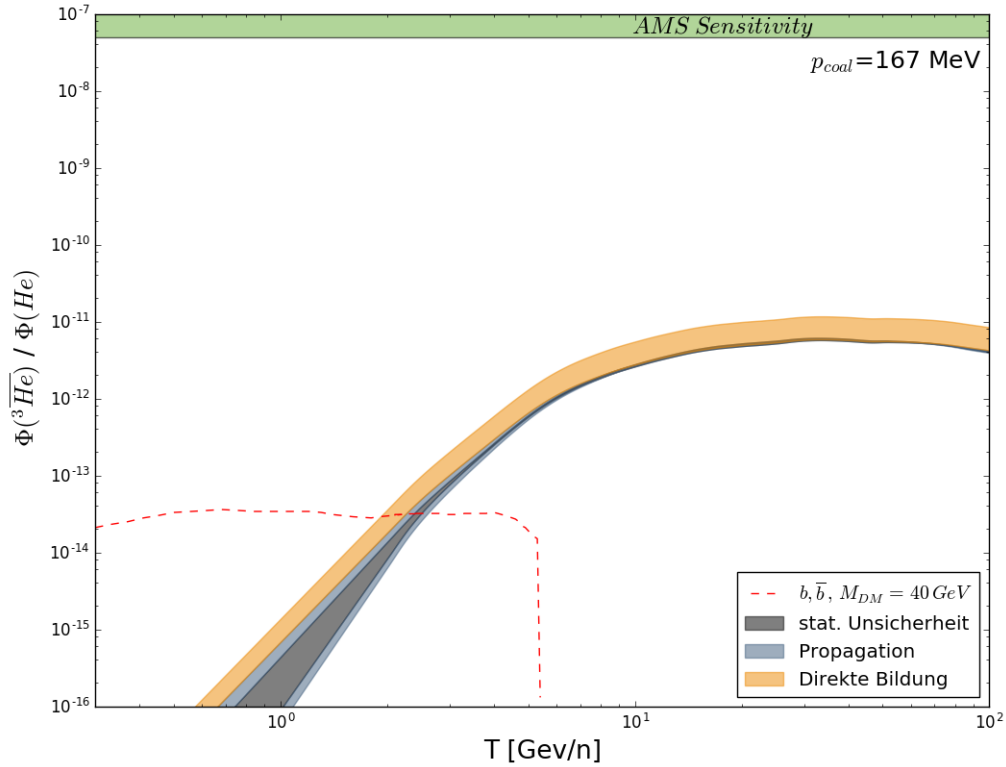


Abbildung 16: Anti-Helium/Helium Verhältnis

Das Abfallen zu niedrigen Energien ist aus der kinematischen Betrachtung der Bildung der Nuklei zu erklären. Da die einkommenden Protonen eine hohe kinetische Energie haben und die Ziele ruhen, ist das Schwerpunktsystem in Bewegungsrichtung des ersten Protons beschleunigt. Die meisten Anti-Helium-Nuklei werden nahe an der Energie von $31 m_p$, also in ihrem Bezugssystem in Ruhe, erzeugt. Im Laborsystem, in diesem Fall in unserem Sonnensystem, haben diese dann eine bestimmte kinetische Energie. Nur wenn die Anti-Nuklei in ihrem Bezugssystem einen Netto Impulsbeitrag anti-parallel zu der Bewegungsrichtung des einkommenden Protons haben, können sie eine geringere kinetische Energie bei der Detektion haben. Da aber dazu mehr Energie in der Kollision vorhanden sein muss, sind diese Fälle durch den primären Fluss unterdrückt.

Dies ist der grundsätzliche Unterschied zu Anti-Helium, beziehungsweise auch zu anderen leichten, sekundären Anti-Nuklei, welches aus dem Zerfall beziehungsweise der Annihilation von hypothetischen Dunkle Materie Teilchen entsteht. Dieser Fluss hätte den maximalen Wert bei niedrigeren Energien, was aus der kinematischen Betrachtung folgt. Genau dies kann man an Hand der roten Kurve erkennen. Denn diese Teilchen zerfallen in Ruhe, beziehungsweise wenn sie annihilieren ist der Schwerpunkt in Ruhe. Dadurch haben die entstehenden Anti-Teilchen eine kleine kinetische Energie in dem Laborsystem in dem sie detektiert werden. Das sorgt dafür, dass die Detektion von $^3\overline{He}$ in diesen Energiebereichen eine höhere Wahrscheinlichkeit hat von einem solchen, oben genannten Zerfall zu stammen.

7 Fazit

Im Anbetracht der Problematik mit Pythia und den ungenauen Kenntnissen der Wirkungsquerschnitte der anderen Produktionskanälen, ist es schwierig eine Unsicherheit auf den errechneten Fluss anzugeben. Der Vergleich mit ähnlichen Arbeiten zeigt eine zumindest grobe Übereinstimmung. Was aber mit sehr hoher Wahrscheinlichkeit gezeigt ist, dass der Anti-Helium Fluss kaum mit aktuellen Experimenten nachweisbar ist. Weder aus der Interaktion primärer kosmischer Strahlung mit interstellarer Materie als auch aus Dunkle Materie. Das Messen weniger Anti-Helium Nuklei ist dadurch ein starkes Indiz auf die erwähnte Existenz von Anti-Galaxien. Die Betrachtung der Anti-Protonen ergab dagegen Übereinstimmung mit aktuellen Messdaten, weshalb nicht direkt auf andere Ursachen abseits des astrophysikalischen Hintergrundes gewiesen wird. Aber auch in diesem Fall sind die Unsicherheiten groß. Der Anti-Deuterium Fluss birgt dabei im Gegensatz zu Anti-Helium größere Hoffnung auf eine Detektion in aktuellen Experimenten. Nimmt man auch in diesem Fall das gleiche Dunkle Materie Modell wie bei Anti-Helium an, so wird dieser Fluss im niederen Energiebereich dem Hintergrund überwiegen. Mit der in Kapitel 5.2 angenommenen Sensitivität besteht eine durchaus realistische Detektionswahrscheinlichkeit und dadurch ein mögliches, indirektes Indiz für dunkle Materie.

Um bessere und vor allem genauere Vorhersagen über den astrophysikalischen Hintergrund zu treffen müssten weitere essentielle Wirkungsquerschnitte bekannt sein sowie eine genauere Kenntnis der Propagation vorliegen. Noch gibt es zu große Unsicherheiten und zu viele freie Parameter um zum Beispiel im Falle der Anti-Protonen einen Überschuss und damit eine Signatur neuer physikalischer Modelle zu erkennen.

8 Anhang

Modell	a_0	a_1	a_2	a_3	a_4	a_5
MIN	0.64	-0.0173	-0.2887	0.0033	0.0147	-0.0019
MED	0.684	-0.1456	-0.1677	-0.0128	0.0135	-0.0016
MAX	0.602	-0.2710	-0.0559	-0.0022	0.0036	-0.0004

Tabelle 4: Anti-Proton Fit Parameter

Modell	a_0	a_1	a_2	a_3	a_4	a_5
MIN	0.5542	-0.0095	-0.2652	0.0027	0.0111	-0.0013
MED	0.5944	-0.1261	-0.1453	-0.0186	0.0121	-0.0012
MAX	0.5271	-0.2439	-0.0451	-0.0061	0.0032	-0.0003

Tabelle 5: Anti-Deuterium Fit Parameter

Modell	a_0	a_1	a_2	a_3	a_4	a_5
MIN	-0.0542	0.3104	-0.1687	0.0212	-0.0117	0.0017
MED	0.1622	-0.0219	-0.0208	0.0187	-0.0182	0.0025
MAX	0.1984	-0.1152	0.0211	-0.0014	-0.0077	0.0012

Tabelle 6: Anti-Helium Fit Parameter

Literatur

- [1] Kazunori Kohri. Can we explain AMS-02 antiproton and positron excesses simultaneously by nearby supernovae without pulsars nor dark matter? arXiv:1505.01236 [astro-ph.HE](2012).
- [2] Torbjörn Sjöstrand. An Introduction to PYTHIA 8.2. arXiv:1410.3012 (2012).
- [3] R. Duperray. Flux of light antimatter nuclei near earth, induced by Cosmic Rays in the Galaxy and in the atmosphere. Phys. Rev. D 71 083013 [astro-ph/0503544] (2005).
- [4] Gleeson, Axford. Solar Modulation of Galactic Cosmic Rays. The Astrophysical Journal, Vol. 154, (1968)
- [5] Marco Cirelli. Anti-helium from Dark Matter annihilations. arXiv:1401.4017 [hep-ph] (2014).
- [6] PDG Cosmic Ray, (2015), <http://pdg.lbl.gov/2015/reviews/rpp2015-rev-cosmic-rays.pdf>.
- [7] Mattia di Mauro. A new evaluation of the antiproton production cross section for cosmic ray studies. arXiv:1408.0288 [hep-ph] (2014).
- [8] M. Cirelli. A Poor Particle Physicist Cookbook for Dark Matter Indirect Detection. JCAP 1103 (2011) 051 [Erratum-ibid. 1210 (2012) E01] [arXiv:1012.4515 [hep-ph]] (2012).
- [9] L. C. Tan and L. K. Ng. New Calculation of Cosmic-Ray Antiproton and Positron Flux. Nucl. Phys. 9, 1289 (1983).
- [10] Indirect dark matter detection using cosmic antideuterons - status and prospects, Sebastian Wild, (2014).
- [11] B. Alper et al., Phys. Lett. B 46 (1973) 265-268.
- [12] W.M. Gibson et al., Lett. Nuovo Cim. 21 (1978) 189-194.
- [13] Rolf Kappl. Charge-sign dependent solar modulation for everyone. arXiv:1601.02832 [astro-ph.HE] (2016).