

HI-Beobachtungen zur Struktur und Verteilung kompakter Hochgeschwindigkeitswolken

Tobias Westmeier

Diplomarbeit in Physik

angefertigt im

Radioastronomischen Institut

vorgelegt der

Mathematisch-Naturwissenschaftlichen Fakultät

der

Rheinischen Friedrich-Wilhelms-Universität

Bonn

Juli 2003

Ich versichere, daß ich diese Arbeit selbständig verfaßt und keine anderen als die angegebenen Quellen und Hilfsmittel benutzt sowie die Zitate kenntlich gemacht habe.

Referent: Prof. Dr. Ulrich Mebold

Koreferent: Prof. Dr. Klaas S. de Boer

„Einst waren die Sterne Wegweiser auf den Meeren; laßt sie uns heute
als leuchtende Symbole einer größeren, höheren Weltanschauung betrachten.“

(Bruno H. Bürgel, Weltall und Weltgefühl, 1925)

Inhaltsverzeichnis

1	Kurzfassung	11
2	Einführung	13
2.1	Hochgeschwindigkeitswolken	13
2.1.1	Der Ursprung der HVCs	13
2.1.2	HVCs und Strukturbildung	15
2.2	Von HVCs zu CHVCs	16
2.3	Ziele und Gliederung der vorliegenden Arbeit	19
3	Physikalische Eigenschaften von CHVCs	23
3.1	Geschwindigkeiten von CHVCs	23
3.1.1	Referenzsysteme	23
3.1.2	Geschwindigkeitsgradienten	24
3.2	Entfernungsbestimmungen von CHVCs	26
3.2.1	Entfernungsbestimmung über die Dichte	27
3.2.2	Entfernungsbestimmung über den Virialsatz	27
3.2.3	Entfernungsbestimmung über den thermischen Druck	28
3.2.4	Entfernungsbestimmung über die Rotation	29
3.2.5	Entfernungsbestimmung über die Kinematik	30
3.2.6	Diskussion der vorgestellten Methoden	31
3.3	Wechselwirkung mit einem umgebenden Medium	32
4	Modellierung von CHVC-Populationen	33
4.1	Zirkumgalaktisches Modell	33
4.1.1	Resultate des zirkumgalaktischen Modells	34
4.1.2	Kinematische Eigenschaften des zirkumgalaktischen Modells	37
4.2	Intergalaktisches Modell	38
4.2.1	Resultate des intergalaktischen Modells	39
4.2.2	Kinematische Eigenschaften des intergalaktischen Modells	40
4.3	Vergleich der beiden Modelle	42
5	Effelsberg-Durchmusterung von CHVCs	45
5.1	Aufnahme der Daten	45
5.2	Reduktion der Daten	46
5.3	Auswertung der Spektren	49

6	Ergebnisse der Effelsberg-Durchmusterung	51
6.1	Allgemeine Bemerkungen	51
6.2	Kinematische Eigenschaften der CHVCs	57
6.3	Dynamische Eigenschaften und Stabilität der CHVCs	63
7	Auswahlkriterien für eine tiefere Kartierung	69
7.1	Festlegung der Auswahlkriterien	69
7.2	Auswahl von CHVCs für eine tiefere Kartierung	73
8	Tiefere Kartierung von CHVCs	77
8.1	Aufnahme der Daten	77
8.2	Reduktion und Auswertung der Daten	78
8.3	Interferenzprobleme	78
9	Die Eigenschaften der tiefer kartierten CHVCs	81
9.1	Kollektive Eigenschaften der tiefer kartierten CHVCs	81
9.2	CHVC 1	84
9.3	CHVC 5	88
9.4	CHVC 7	92
9.5	CHVC 9	95
9.6	CHVC 11	98
9.7	CHVC 24	104
9.8	CHVC 26	108
9.9	CHVC 29	110
9.10	CHVC 33	112
9.11	CHVC 47	117
9.12	CHVC 218+29+145	122
10	Zusammenfassung und Ausblick	127
10.1	Was gemacht wurde	127
10.2	Schlußfolgerungen	128
10.3	Ausblick	130
A	Die 21-cm-Linie des neutralen Wasserstoffs	133
A.1	Die Strahlungstransportgleichung	133
A.2	Linienbreiten	134

B Beobachtungsverfahren	135
B.1 <i>Frequency-Switch-Methode</i>	135
B.2 <i>Inband-Frequency-Switch-Methode</i>	135
Literaturverzeichnis	138

Abbildungsverzeichnis

1	Verteilung der HVC-Komplexe am Himmel	14
2	Karte aller bekannten CHVCs	17
3	Skizze zur Erläuterung des Projektionseffekts als Ursache für Geschwindigkeitsgradienten von CHVCs	25
4	Ansicht der zirkumgalaktischen Modellpopulation von CHVCs in der xy -Ebene .	35
5	Karte der zirkumgalaktischen Modell-CHVCs in galaktischen Koordinaten	35
6	Positions-Geschwindigkeits-Diagramm der zirkumgalaktischen Modell-CHVCs . .	37
7	Karte der intergalaktischen Modell-CHVCs in galaktischen Koordinaten	39
8	Positions-Geschwindigkeits-Diagramm der intergalaktischen Modell-CHVCs . . .	41
9	Positions-Geschwindigkeits-Diagramm der intergalaktischen Modell-CHVCs . . .	41
10	Karte der 41 beobachteten CHVCs in galaktischen Koordinaten	46
11	Beispiel für die Ergebnisse der S7-Kalibration	47
12	Skizzierter Weg zur Auswertung der Spektren mit class	49
13	Karten der 41 beobachteten CHVCs	52
14	Beispiel-Spektrum von CHVC 31	56
15	Histogramme der Radialgeschwindigkeiten der beobachteten CHVCs	57
16	Skizze zur Erläuterung des Auswahl effekts bei den Radialgeschwindigkeiten . . .	59
17	Positions-Geschwindigkeits-Diagramm der beobachteten CHVCs	60
18	Histogramme der Säulendichten und Intensitäten der beobachteten CHVCs . . .	64
19	Säulendichteverhältnisse der beobachteten CHVCs	71
20	Karten der 12 zur tieferen Beobachtung vorgesehenen CHVCs	74
21	Auswahl von Spektren mit starken Interferenzlinien	78
22	Karten aller tiefer kartierten CHVCs	82
23	Karten von CHVC 1	85
24	Gaußsche Zerlegung der Spektren entlang des Schnitts durch CHVC 1	86
25	Karten von CHVC 5	89
26	Ergebnisse des Schnitts durch CHVC 5	90
27	Karten von CHVC 7	92
28	Ergebnisse des Schnitts durch CHVC 7	93
29	Karten von CHVC 9	95
30	Ergebnisse des Schnitts durch CHVC 9	96
31	Karten von CHVC 11	98
32	Ergebnisse des Schnitts durch CHVC 11	99

33	Dynamische Masse und HI-Masse von CHVC 11	101
34	Gaußsche Zerlegung der Spektren entlang des Schnitts durch CHVC 11	102
35	Karten von CHVC 24	104
36	Ergebnisse des Schnitts durch CHVC 24	105
37	Dynamische Masse und HI-Masse von CHVC 24	107
38	Karten von CHVC 26	108
39	Ergebnisse des Schnitts durch CHVC 26	109
40	Karten von CHVC 29	110
41	Ergebnisse des Schnitts durch CHVC 29	111
42	Karten von CHVC 33	113
43	Ergebnisse des Schnitts durch CHVC 33	114
44	Gaußsche Zerlegung der Spektren entlang des Schnitts durch CHVC 33	115
45	Schwache Emission nahe CHVC 33	116
46	Karten von CHVC 47	118
47	Ergebnisse des Schnitts durch CHVC 47	119
48	IRAS- und DSS-Karten der Umgebung von CHVC 47	120
49	Dynamische Masse und HI-Masse von CHVC 47	121
50	Karten von CHVC 218+29+145	122
51	Gaußsche Zerlegung der Spektren entlang des Schnitts durch CHVC 218+29+145	123
52	Beispielspektrum im <i>Inband-Frequency-Switch</i> -Modus	136

Tabellenverzeichnis

1	Parameter der zirkumgalaktischen Modellpopulation von CHVCs	34
2	Parameter der intergalaktischen Modellpopulation von CHVCs	38
3	Physikalische Eigenschaften der 41 beobachteten CHVCs	54
4	Daten zur Stabilität der 39 nachgewiesenen CHVCs	66
5	Physikalische Eigenschaften der zur tieferen Beobachtung vorgesehenen CHVCs .	75
6	Physikalische Eigenschaften der 11 tiefer kartierten CHVCs	83

Verzeichnis häufig gebrachter Abkürzungen

CDM *Cold Dark Matter*, kalte Dunkle Materie.

CHVC *Compact High-Velocity Cloud*, kompakte Hochgeschwindigkeitswolke, 1999 von Braun & Burton [2] als Unterklasse der Hochgeschwindigkeitswolken (HVCs) definiert.

CNM *Cold Neutral Medium*, kaltes neutrales Medium, Komponente des neutralen, atomaren Wasserstoffs mit Temperaturen in der Größenordnung von einigen 100 K.

FWHM *Full-Width Half Maximum*, volle Halbwertsbreite einer Gaußverteilung.

GSR *Galactic Standard of Rest*, galaktisches Bezugssystem, bei dem die Radialgeschwindigkeiten der Himmelsobjekte auf das Schwerpunktssystem der Milchstraße bezogen werden.

HIPASS *HI Parkes All-Sky Survey*, HI-Durchmusterung des Südhimmels ($\delta < +2^\circ$), die mit dem 65-m-Teleskop in Parkes (Australien) durchgeführt wurde (Barnes, Staveley-Smith, de Blok et al. 2001 [1]).

HPBW *Half-Power Beam Width*, Halbwertsbreite der Antennenkeule eines Teleskops.

HVC *High-Velocity Cloud*, Hochgeschwindigkeitswolke, HI-Wolke, deren Radialgeschwindigkeit mit einer Teilnahme an der galaktischen Rotation unverträglich ist.

IRAS *Infrared Astronomical Satellite*, Infrarot-Satelliten-Teleskop, das 1983 für zehn Monate in Betrieb war und den gesamten Himmel zwischen 8 und 120 μm Wellenlänge durchmusterte.

LDS *Leiden/Dwingeloo Survey*, HI-Durchmusterung des Nordhimmels ($\delta > -30^\circ$), die mit dem 25-m-Teleskop in Dwingeloo (Niederlande) angefertigt wurde (Hartmann & Burton 1997 [13]).

LGSR *Local Group Standard of Rest*, Bezugssystem der Lokalen Gruppe, bei dem die Radialgeschwindigkeiten der Himmelsobjekte auf das Schwerpunktssystem der Lokalen Gruppe bezogen werden.

LSB-Galaxie *Low Surface Brightness*, Galaxie geringer Flächenhelligkeit.

LSR *Local Standard of Rest*, lokales Bezugssystem, bei dem die Radialgeschwindigkeiten der Himmelsobjekte auf das Ruhesystem der lokalen Sonnenumgebung bezogen werden.

rms *Root Mean Square*, Wurzel der mittleren quadratischen Abweichung vom Mittelwert.

WNM *Warm Neutral Medium*, warmes neutrales Medium, Komponente des neutralen, atomaren Wasserstoffs mit Temperaturen in der Größenordnung von 10^4 K.

WSRT *Westerbork Synthese Radiotelescoop*, Ost-West-Interferometer nahe Westerbork (Niederlande), das aus 14 Teleskopen mit je 25 m Durchmesser aufgebaut ist.

1 Kurzfassung

Die vorliegende Arbeit befaßt sich mit der Untersuchung kompakter Hochgeschwindigkeitswolken (CHVCs, *compact high-velocity clouds*). Diese in der 21-cm-Linie des neutralen, atomaren Wasserstoffs (HI) beobachtbaren Gaswolken wurden durch Braun & Burton 1999 [2] definiert und weisen Radialgeschwindigkeiten auf, die mit einer Teilnahme an der Rotation der Milchstraße unverträglich sind. In der Interpretation von Braun & Burton [2] handelt es sich bei den CHVCs um die fehlenden Dunkle-Materie-Minihalos, die von den gegenwärtigen kosmologischen Strukturentstehungsszenarien für die Lokale Gruppe prognostiziert werden (Klypin et al. 1999 [15], Moore et al. 1999 [19]) und die über die gesamte Lokale Gruppe hinweg verteilt sein sollen. Die Ergebnisse von Braun & Burton [2] basieren auf den Daten des Leiden/Dwingeloo-Surveys (LDS) von Hartmann & Burton 1997 [13], einer 21-cm-HI-Durchmusterung, die mit dem 25-m-Teleskop in Dwingeloo (Niederlande) angefertigt wurde. Die Auflösung des Dwingeloo-Teleskops beträgt 36' HPBW, so daß die meisten der CHVCs, die ja gerade über ihre Kompaktheit definiert wurden, mit dem LDS kaum aufgelöst werden.

Ausgangspunkt meiner Arbeit ist eine Durchmusterung von 41 CHVCs in der 21-cm-Linienemission mit dem 100-m-Teleskop des Max-Planck-Instituts für Radioastronomie in Effelsberg. Diese Durchmusterung erlaubt zum ersten Mal die systematische Untersuchung einer Vielzahl dieser Objekte mit der vergleichsweise hohen Winkelauflösung von 9' HPBW, was dem Vierfachen der Auflösung der Daten entspricht, die Braun & Burton 1999 [2] bei der Untersuchung der CHVCs zur Verfügung standen. Es stellt sich heraus, daß CHVCs nicht annähernd die sphärisch-symmetrischen Gaswolken sind, die man für eine über die Lokale Gruppe verteilte CHVC-Population erwarten würde. Eine Untersuchung der physikalischen Eigenschaften der 41 CHVCs zeigt darüber hinaus, daß ihre Masse unter der Annahme eines zu erwartenden Dunkle-Materie-Anteils für eine Stabilisierung durch Eigengravitation nicht ausreicht. Stattdessen müssen CHVCs in ein umgebendes Medium eingebettet sein, das eine zusätzliche Druckstabilisierung bewirkt.

Ich habe daraufhin 11 ausgewählte CHVCs mit dem Effelsberg-Teleskop tiefer kartiert, um nach Anzeichen für eine Wechselwirkung mit diesem hypothetischen Umgebungsmedium zu suchen. In der Tat zeigen 6 dieser Objekte in ihrer HI-Verteilung eine kometenähnliche oder bugwellenförmige Struktur, die eine Verformung der Wolke und ein Abstreifen von Gas durch den Einfluß eines umgebenden Mediums anzeigt. Nur ein Objekt besitzt ein sphärisch-symmetrisches Aussehen. Die übrigen 4 der tiefer kartierten CHVCs zeichnen sich durch eine komplexe Struktur aus, wobei eine davon große Ähnlichkeit mit einer Galaxie aufweist.

Die Beobachtungen legen nahe, daß es sich bei den kompakten Hochgeschwindigkeitswolken nicht um eine Population handelt, die über die gesamte Lokale Gruppe hinweg verteilt ist, sondern eher um eine zirkumgalaktische Population mit typischen Entfernungen in der Größenordnung von 100 kpc, die mit einem ausgedehnten Halogas der Milchstraße mit Elektronendichten um $n_e \lesssim 10^{-5} \dots 10^{-4} \text{ cm}^{-3}$ in Wechselwirkung steht. Möglicherweise sehen wir in den CHVCs die primordialen Dunkle-Materie-Minihalos, die gerade von der Milchstraße akkretiert und einverleibt werden.

2 Einführung

2.1 Hochgeschwindigkeitswolken

Im Jahr 1956 äußerte Oort die Vermutung, es könnten am Himmel Wolken neutralen, atomaren Wasserstoffs (HI) zu beobachten sein, die hohe Radialgeschwindigkeiten im Vergleich zum galaktischen HI-Gas aufweisen (nach Wakker & van Woerden 1997 [34]). Aber erst 1963 konnten schließlich Muller, Oort & Raimond [20] mit dem 25-m-Teleskop in Dwingeloo bei 21 cm Wellenlänge Linienemission des neutralen Wasserstoffs mit Geschwindigkeiten nachweisen, die mit einer Teilnahme des Gases an der regulären Rotation der Milchstraße nicht verträglich waren. Diese sogenannten Hochgeschwindigkeitswolken (HVCs, *high-velocity clouds*) wiesen nach der ursprünglichen, heuristischen Festlegung je nach Autor im lokalen Bezugssystem (LSR, *local standard of rest*) Radialgeschwindigkeiten von $|v_{\text{LSR}}| \gtrsim 70 \dots 100 \text{ km s}^{-1}$ auf. Diese Definition einer fixen Radialgeschwindigkeit zur Charakterisierung von Hochgeschwindigkeitswolken wirft allerdings Probleme auf. Zum einen gibt es keine physikalische Begründung, die eine Unterscheidung des Gases inner- und außerhalb dieses Geschwindigkeitsbereichs rechtfertigen würde. Außerdem sind in manche Richtungen des Himmels Radialgeschwindigkeiten jenseits von $\pm 100 \text{ km s}^{-1}$ durchaus noch mit einer Teilnahme des Gases an der galaktischen Rotation verträglich, denn die Rotationsgeschwindigkeit unserer Milchstraße beträgt am Ort der Sonne immerhin $|\vec{v}_{\text{rot}}| = 220 \text{ km s}^{-1}$. Dieses Problem konnte Wakker 1991 [32] umgehen, indem er in einer neuen Definition den Begriff der *deviation velocity* prägte. Demnach müssen Hochgeschwindigkeitswolken eine Radialgeschwindigkeit aufweisen, die um mindestens 50 km s^{-1} jenseits des maximalen Wertes liegt, der durch ein einfaches Modell der galaktischen Rotation noch erlaubt wäre. Über große Teile des Himmels korrespondiert diese Definition jedoch ungefähr mit der alten Festlegung, daß HVCs außerhalb des Geschwindigkeitsbereichs von $\pm 100 \text{ km s}^{-1}$ angesiedelt sind. Die Radialgeschwindigkeiten der derzeit bekannten HVCs erstrecken sich von -466 bis $+359 \text{ km s}^{-1}$ (de Heij, Braun & Burton 2002 [10]).

2.1.1 Der Ursprung der HVCs

Hochgeschwindigkeitswolken sind über den gesamten Himmel beobachtbar und bilden an einigen Stellen großflächige Komplexe, die Hunderte von Quadratgrad überdecken. Darüber hinaus finden wir zahlreiche kleinere, isolierte Wolken. Die Verteilung der bekannten Hochgeschwindigkeitswolken ist in Abbildung 1 dargestellt. Ein ausgedehnter HVC-Komplex, der Magellansche Strom (MS), konnte schon 1974 durch Mathewson et al. [18] mit den Magellanschen Wolken assoziiert werden. Hierbei handelt es sich um Gas, das durch die Gezeitenkräfte der Milchstraße oder der Magellanschen Wolken untereinander, möglicherweise auch über die Wechselwirkung mit dem intergalaktischen Medium, aus den Magellanschen Wolken herausgerissen wurde. Gleiches gilt für den sogenannten *Leading Arm* (LA). Der Ursprung aller anderen Hochgeschwindigkeitswolken wird hingegen bis heute kontrovers diskutiert.

Seit ihrer Entdeckung durch Muller et al. 1963 [20] hat es zahlreiche verschiedene Versuche gegeben, den Ursprung der Hochgeschwindigkeitswolken zu erklären. Einige der wichtigsten und interessantesten seien an dieser Stelle kurz skizziert. Vorschläge für eine Erzeugung der HVCs durch Supernovae wurden unter anderem von Meaburn 1965, Haslam 1971, Heiles 1979, Weaver

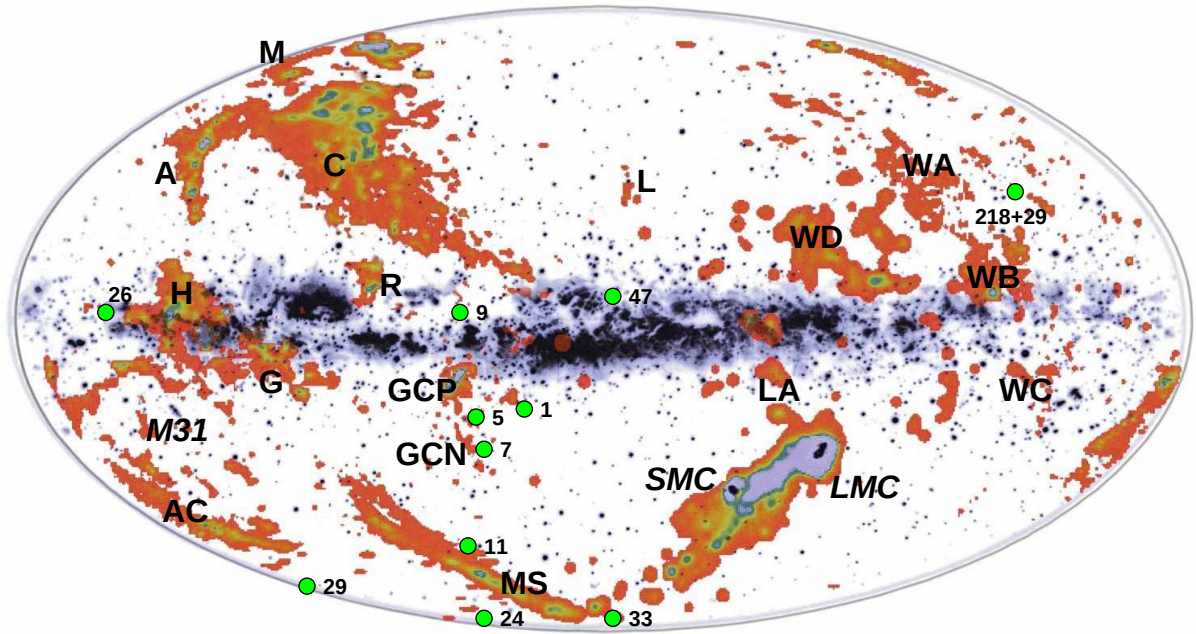


Abbildung 1: Die Abbildung zeigt die Verteilung der bekannten Hochgeschwindigkeitswolken (orange) über den Himmel in galaktischen Koordinaten. Zur Orientierung ist ein optisches Bild der Milchstraße (blauviolett) hinterlegt. Die hellgrünen Punkte markieren die von mir in der vorliegenden Arbeit tiefer beobachteten CHVCs. (Quelle der Bilddaten: NASA & B. Wakker, STScI-PRC99-46)

1979 und Shatsova 1993 geäußert. Diese Möglichkeit wurde jedoch bereits 1966 durch Oort verworfen, weil neben einer in diesem Fall erwarteten starken $H\alpha$ -Emission auch eine Konzentration der HVCs in der galaktischen Ebene zu erwarten wäre, die nicht beobachtet wird (Wakker & van Woerden 1997 [34]). Haud 1988 und Mathewson et al. 1987 schlugen eine Verteilung der HVCs entlang eines polaren Rings in 90 kpc Entfernung um die Milchstraße herum vor. Dieser Vorschlag ist jedoch unbefriedigend, weil er einige große HVC-Komplexe und viele HVCs mit positiver Radialgeschwindigkeit nicht reproduziert (Wakker & van Woerden 1997 [34]).

Ein vieldiskutierter Vorschlag zur Erklärung der Hochgeschwindigkeitswolken wurde unter anderem von Shapiro & Field 1976, Bregman 1980 und Kahn 1981 formuliert (siehe Wakker & van Woerden 1997 [34]). Demnach könnten HVCs die auf die Ebene der Milchstraße zurückfallenden, kondensierten Gaswolken sein, die im Rahmen der Vorstellung vom galaktischen Springbrunnen (*Galactic fountain*) durch Supernovae zuvor aus der galaktischen Scheibe ausgeworfen worden wären. Das ausgestoßene, zunächst heiße Gas würde sich hoch über der Scheibe abkühlen und zu Gasklumpen auskondensieren, die ballistisch auf die Scheibe zurückfielen. Nach diesem Modell wären auch die HVCs mit positiven Radialgeschwindigkeiten als noch im Aufstieg befindliches Gas verständlich. Zwar sagen die Vorstellungen vom galaktischen Springbrunnen vertikale Gasgeschwindigkeiten von nur $70 \dots 100 \text{ km s}^{-1}$ vorher, jedoch ließen sich die beobachteten hohen Radialgeschwindigkeiten der HVCs durch die Projektion der Geschwindigkeiten der galaktischen Rotation zwanglos erklären. Darüber hinaus sollten HVCs Metallizitäten aufweisen, die für galaktisches Gas normal sind. Allerdings sind die Metallizitäten von Hochgeschwindigkeitswolken derzeit nur ungenügend bekannt, um diese Hypothese zu überprüfen (Wakker & van

Woerden 1997 [34]). Nur für Komplex C konnten die relativen Häufigkeiten mehrerer Elemente an verschiedenen Positionen bestimmt werden. Eine Zusammenstellung dieser Messungen finden wir bei Wakker 2001 [33]. Für alle gemessenen Elemente Z liegt die relative Häufigkeit Z/H deutlich unterhalb des solaren Wertes, beispielsweise $S/H = 0.09 \pm 0.02$ in Richtung der Seyfert-Galaxie Mrk 290 oder $OI/HI = 0.11^{+0.13}_{-0.08}$ in Richtung des Quasars PG 1259+593, beides relativ zum solaren Wert. Diese Resultate sind mit den Vorhersagen des Modells vom galaktischen Springbrunnen nicht vereinbar.

Ein weiterer Vorschlag zum Ursprung der Hochgeschwindigkeitswolken wurde bereits 1966 durch Oort formuliert, der vorschlug, HVCs könnten durch primordiales Gas erzeugt werden, das aus der Galaxienentstehung in der Lokalen Gruppe übriggeblieben sei und derzeit von der Milchstraße akkretiert werde. Durch den Einfall würde galaktisches Gas beschleunigt und durch Schock geheizt werden, das dann nach seiner Abkühlung in Gestalt der Hochgeschwindigkeitswolken in Erscheinung trete (siehe Wakker & van Woerden 1997 [34]). Nach dieser Hypothese sollten HVCs Höhen von $z \approx 1$ kpc über der galaktischen Scheibe besitzen, während ihre Metallizitäten etwas unter denen des galaktischen Gases liegen sollten. Darüber hinaus sollten alle HVCs Anzeichen für Wechselwirkungsvorgänge aufweisen.

Ein großes Problem aller Versuche, den Ursprung der Hochgeschwindigkeitswolken zu erklären, stellt die große Unsicherheit in der räumlichen Verteilung der HVCs dar. Die einzige direkte Methode zur Entfernungsbestimmung macht sich zunutze, daß das Gas der HVCs Absorptionslinien in den Spektren von Sternen erzeugen kann, die jenseits der Wolken liegen. Sterne, die vor der HVC stehen, weisen hingegen keine Absorptionslinien auf. Daraus läßt sich im günstigsten Fall eine obere und untere Grenze für die Entfernung einer HVC angeben, da sich die Distanzen der Sterne hinreichend genau bestimmen lassen. Auf diesem Weg konnten Danly et al. 1993 [9] für Teile von HVC-Komplex M Entfernungsgrenzen von $1.7 \text{ kpc} < d < 5 \text{ kpc}$ bestimmen. Auch die Entfernung zu Komplex A konnte durch van Woerden et al. 1999 [29] auf $4 \text{ kpc} < d < 10 \text{ kpc}$ eingegrenzt werden. Darüber hinaus sind die Entfernungen anderer Hochgeschwindigkeitswolken nur über indirekte Abschätzungen bekannt, die mit großen Unsicherheiten behaftet sind.

2.1.2 HVCs und Strukturbildung

Der gegenwärtig meistdiskutierte, kosmologische Ansatz zur Erklärung des Ursprungs von Hochgeschwindigkeitswolken stammt von Blitz et al. 1999 [7]. Nach den gegenwärtigen sogenannten Λ CDM-Modellen der Kosmologie findet die Strukturbildung im Universum hierarchisch statt, indem sich die sogenannte kalte Dunkle Materie (CDM, *cold dark matter*) in gravitativ gebundenen Halos ansammelt, die wiederum zu größeren Halos fusionieren. In solchen Halos sammelt sich auch die sichtbare Materie an und bildet auf diesem Weg die Galaxien. Große Galaxien wiederum entstehen und wachsen durch die Akkretion kleinerer Galaxien. Auf diesem Weg hat sich auch die Strukturbildung in der Lokalen Gruppe vollzogen, die mit der Milchstraße und der Andromeda-Galaxie zwei größere Dunkle-Materie-Halos beinhaltet. Beide gruppieren je eine Ansammlung kleiner, sogenannter Minihalos um sich herum, die mit den zahlreichen Zwerggalaxien identifiziert werden. Verschiedene Autoren, darunter Klypin et al. 1999 [15] und Moore et al. 1999 [19], haben durch numerische Simulationen diese hierarchische Strukturbildung nachvollzogen und aus ihren Modellen die Anzahl der zu erwartenden Minihalos in der Lokalen Gruppe in der Größenordnung von 1000 angesiedelt. Dies steht in einem deutlichen Widerspruch zur Zahl

der bisher bekannten Zwerggalaxien in der Lokalen Gruppe, die bei nur etwa 30 liegt (Mateo 1998 [17]). Es scheint also in der Lokalen Gruppe ein großes Defizit an Mini-Halos zu geben! Diese Diskrepanz zwischen den Beobachtungen und den numerischen Simulationen wird in der Literatur auch unter dem Begriff „*missing satellite problem*“ diskutiert.

Blitz et al. 1999 [7] schlagen nun vor, daß die meisten der von den Modellen vorhergesagten Minihalos gar keine oder nur sehr wenig Sternentstehung in ihrem Innern erfahren haben und deshalb nicht als Zwerggalaxien beobachtet werden. Stattdessen hätten wir reine Gaswolken zu erwarten, und die beobachteten Hochgeschwindigkeitswolken seien die besten Kandidaten für die fehlenden Minihalos in der Lokalen Gruppe. Insbesondere wären die Hochgeschwindigkeitswolken nach diesem Szenario über die gesamte Lokale Gruppe verteilt mit typischen Entfernungen in der Größenordnung von 1 Mpc. Daraus würden ein typischer HVC-Durchmesser von 28 kpc und eine geschätzte Gesamtmasse von etwa $3 \cdot 10^8 M_\odot$ resultieren, die ungefähr mit den Massen von Zwerggalaxien vergleichbar ist. Durch ein einfaches, numerisches Vielteilchenmodell finden Blitz et al. 1999 [7], daß die beobachtete Verteilung der HVCs in Position und Geschwindigkeit mit einer Verteilung über die gesamte Lokale Gruppe in erster Näherung gut verträglich ist, wobei sie bei ihrem Vergleich die großen HVC-Komplexe A, C und M sowie den Magellanschen Strom ausnehmen. Als ein weiteres Indiz in diese Richtung werten sie, daß der Mittelwert und die Dispersion der Radialgeschwindigkeiten der HVC-Population beim Übergang vom Lokalen Referenzsystem (LSR, *local standard of rest*) über das galaktische Referenzsystem (GSR, *Galactic standard of rest*) zum Referenzsystem der Lokalen Gruppe (LGSR, *local group standard of rest*) abnehmen, so daß das Referenzsystem, bei dem das Baryzentrum der Lokalen Gruppe als Bezugspunkt angenommen wird, ein für die Beschreibung der Hochgeschwindigkeitswolken geeigneteres System sei. Konkret ergibt sich für die in Richtung des Baryzentrums der Lokalen Gruppe stehenden HVCs eine mittlere Radialgeschwindigkeit von -173 km s^{-1} im LSR, -88 km s^{-1} im GSR und nur noch -28 km s^{-1} im LGSR.

2.2 Von HVCs zu CHVCs

Der von Blitz et al. 1999 [7] angeführte Gedanke, die Hochgeschwindigkeitswolken seien möglicherweise die von den Λ CDM-Modellen prognostizierten, in der Lokalen Gruppe bislang nicht identifizierten Dunkle-Materie-Minihalos, wird von Braun & Burton 1999 [2] aufgegriffen. Ihre Idee ist, daß es sich bei den am Himmel beobachteten großen HVC-Komplexen um Gas handelt, das uns sehr nah steht und gerade im Begriff ist, von der Milchstraße akkretiert und in deren Gasverteilung einverleibt zu werden. Hingegen sollten die zahlreichen über die Lokale Gruppe verteilten Minihalos deutlich weiter entfernt sein und damit einen kleineren Winkeldurchmesser am Himmel aufweisen. Anhand dieser Motivation durchsuchen Braun & Burton 1999 [2] den Leiden/Dwingeloo-Survey (LDS) galaktischen, neutralen Wasserstoffs von Hartmann & Burton 1997 [13] von Hand nach Hochgeschwindigkeitswolken, die klein und isoliert erscheinen und deshalb eher mit der über die Lokale Gruppe verteilten Population von Minihalos identifiziert werden könnten.

Braun & Burton 1999 [2] extrahieren alle HI-Wolken aus dem LDS, die einen Winkeldurchmesser von $\varphi < 2^\circ$ FWHM aufweisen, eine Radialgeschwindigkeit größer als die von Wakker 1991 [32] definierte *deviation velocity* von 50 km s^{-1} besitzen und räumlich und kinematisch von benachbarter Emission separiert erscheinen. Anhand dieser Kriterien erstellen sie einen

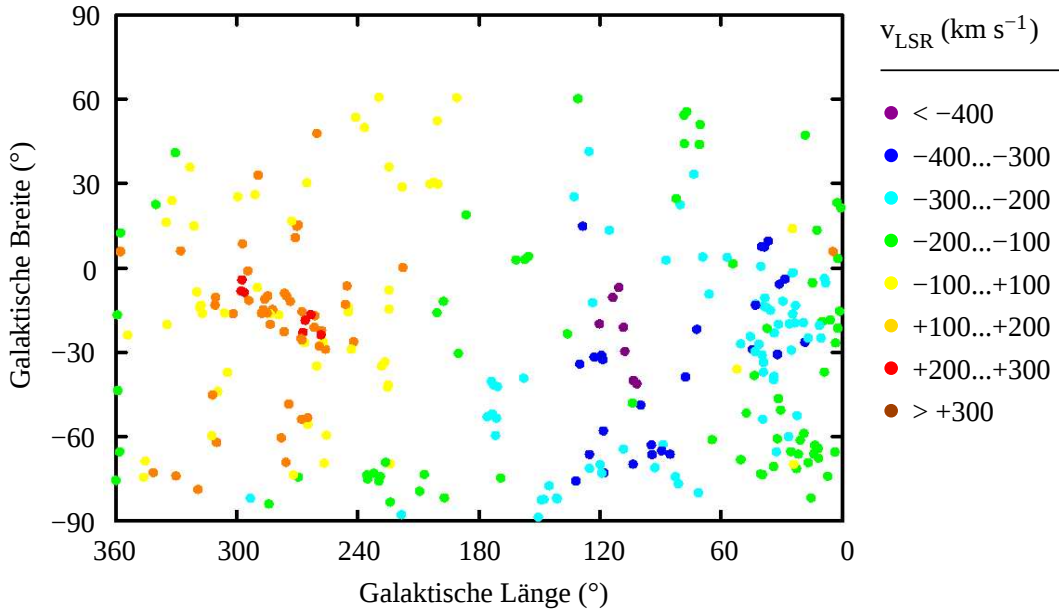


Abbildung 2: Karte aller CHVCs aus den Katalogen von de Heij, Braun & Burton 2002 und Putman et al. 2002 in galaktischen Koordinaten. Die Farben symbolisieren die Radialgeschwindigkeit im lokalen Bezugssystem (LSR) und reichen von $< -400 \text{ km s}^{-1}$ (violett) bis $> +300 \text{ km s}^{-1}$ (rotbraun).

Katalog von 66 Hochgeschwindigkeitswolken, für die sie den Begriff „kompakte Hochgeschwindigkeitswolken“ (CHVCs, *compact high-velocity clouds*) prägen. Qualität und Vollständigkeit dieses Katalogs sind durch die Eigenschaften des Leiden/Dwingeloo-Surveys bestimmt, der mit dem 25-m-Teleskop in Dwingeloo durchgeführt wurde, das eine Winkelauflösung von $36'$ HPBW aufweist. Der LDS wurde mit einem Raster von $\Delta\varphi \approx 0.5^\circ$ und einer hohen Geschwindigkeitsauflösung von etwa 1 km s^{-1} aufgenommen. Das dabei erreichte *rms*-Rauschen der Basislinie liegt bei ungefähr 70 mK . Aus diesen Daten folgt nach Einschätzung von Braun & Burton 1999 [2], daß Wolken mit einer Linienbreite von $\Delta v \lesssim 10 \text{ km s}^{-1}$ FWHM und einer Maximalintensität von $T_{\text{B}} \lesssim 0.2 \text{ K}$ in ihrem Katalog möglicherweise unterrepräsentiert sind. Darüber hinaus beinhaltet der LDS nur den Bereich des Himmels mit Deklinationen nördlich von $\delta = -30^\circ$, so daß ein großer Bereich des Südhimmels nicht in den CHVC-Katalog von Braun & Burton 1999 [2] einfließt.

Braun & Burton 1999 [2] vertreten die Ansicht, die von ihnen definierte Unterklasse der kompakten Hochgeschwindigkeitswolken sei auf Grund ihrer statistischen Eigenschaften möglicherweise mit den vorhergesagten Minihalos in der Lokalen Gruppe zu identifizieren. Ebenso wie Blitz et al. 1999 [7] stützen sie sich unter anderem auf die Dispersion der Radialgeschwindigkeiten der CHVCs, die im Lokalen Bezugssystem (LSR) 175 km s^{-1} beträgt, beim Übergang zum Bezugssystem der Lokalen Gruppe (LGSr) hingegen auf nur noch 88 km s^{-1} abfällt, was ihrer Ansicht nach darauf hinweist, daß die kompakten Hochgeschwindigkeitswolken kinematisch wie räumlich mit der Lokalen Gruppe als Ganzem assoziiert sind. Aus dieser Annahme ergeben sich typische CHVC-Entfernungen in der Größenordnung von 1 Mpc , woraus ein mittlerer Durchmesser der CHVCs von etwa 15 kpc und eine mittlere HI-Masse von ungefähr $10^7 M_\odot$ resultieren. Demnach wären CHVCs sehr ausgedehnte Objekte mit Massen, die denen kleiner Zwerggalaxien

entsprechen, und wären über die gesamte Lokale Gruppe verteilt.

Ein weiterer Schritt auf dem Weg zum Verständnis kompakter Hochgeschwindigkeitswolken stellt die Hinzunahme des fehlenden Teils des Südhimmels dar, der mit dem HI Parkes All-Sky Survey (HIPASS) in der 21-cm-Linienemission des neutralen, atomaren Wasserstoffs kartiert wurde. Die mit dem 64-m-Teleskop in Parkes durchgeführte Durchmusterung hat eine Geschwindigkeitsauflösung von 26.4 km s^{-1} und eine Abtastung von $\Delta\varphi = 4'$ bei einer Auflösung des Teleskops von $15.5'$ HPBW. Aus dem HIPASS extrahieren Putman et al. 2002 [22] einen Katalog von 179 CHVCs südlich einer Deklination von etwa $+2^\circ$. Zugleich erstellen de Heij, Braun & Burton 2002 [10] aus dem LDS einen verbesserten CHVC-Katalog mit 67 Objekten, die diesmal mit Hilfe einer optimierten, automatischen Suchroutine ausgewählt wurden. Beide Kataloge für den Nord- und Südhimmel werden von de Heij, Braun & Burton 2002b [11] zu einem repräsentativen Ganzhimmelskatalog zusammengefügt, der insgesamt 216 CHVCs beinhaltet. Die Verteilung der aus den beiden Katalogen entnommenen CHVCs am Himmel ist in Abbildung 2 in galaktischen Koordinaten dargestellt. Die Farben symbolisieren hierbei die Radialgeschwindigkeiten im lokalen Bezugssystem (LSR) zwischen $v_{\text{LSR}} < -400 \text{ km s}^{-1}$ (violett) und $v_{\text{LSR}} > +300 \text{ km s}^{-1}$ (rotbraun). Offensichtlich ist die Verteilung der CHVCs nicht homogen über den gesamten Himmel, sondern weist auffällige Konzentrationen einerseits sowie „Löcher“ andererseits auf.

Neben diesen generellen Untersuchungen der CHVC-Population wurden einige ausgesuchte Objekte in größerem Detail studiert. So konnten Burton, Braun & Chengalur 2001 [4] 10 CHVCs aus dem Katalog von Braun & Burton 1999 [2] in hoher Auflösung mit dem 305-m-Teleskop in Arecibo kartieren. Ihre wichtigste Entdeckung ist der Nachweis einer Zwei-Gaskomponenten-Struktur bei den meisten dieser Objekte, das heißt sie bestehen aus einem kompakten Kern kalten, neutralen Gases (CNM, *cold neutral medium*), der in eine Hülle warmen, neutralen Gases (WNM, *warm neutral medium*) eingebettet erscheint. Darüber hinaus versuchen Burton, Braun & Chengalur [4], über eine Abschätzung des thermischen Drucks die Entfernungen der von ihnen beobachteten CHVCs zu ermitteln. Sie erhalten Distanzen zwischen 150 und 850 kpc mit einem mittleren Wert von $400 \pm 280 \text{ kpc}$, was mit der Vorstellung einer Verteilung der CHVCs über die gesamte Lokale Gruppe hinweg konsistent ist. Allerdings sind diese Entfernungsabschätzungen mit Vorsicht zu bewerten, da sie auf einer Reihe von Annahmen beruhen, deren Gültigkeit bei einigen der Objekte fragwürdig ist.

Die Ergebnisse von Burton, Braun & Chengalur 2001 [4] werden von Sternberg, McKee & Wolfire 2002 [26] als Grundlage für hydrodynamische Simulationen von kompakten Hochgeschwindigkeitswolken unter Berücksichtigung eines stabilisierenden Außendrucks durch ein umgebendes Medium verwandt. Dieser zusätzliche Außendruck ist notwendig, weil CHVCs unter „vernünftigen“ Annahmen über ihren Dunkle-Materie-Anteil nicht allein durch ihre Eigengravitation stabilisiert werden können. Sternberg, McKee & Wolfire [26] simulieren CHVCs in Entfernungen von 150 kpc und 750 kpc von der Milchstraße, um die beiden möglichen Fälle einer zirkumgalaktischen und einer intergalaktischen Verteilung der Population zu behandeln. Sie stellen fest, daß die vorliegenden Beobachtungen mit den Ergebnissen ihres zirkumgalaktischen Modells am besten zu vereinbaren sind. Dieses Modell bestätigt nicht nur die tatsächlich beobachtete mittlere zentrale Säulendichte der CHVCs von etwa $N_{\text{HI}} = 5 \cdot 10^{19} \text{ cm}^{-2}$, sondern erklärt auch die Ausprägung der von Burton, Braun & Chengalur 2001 [4] nachgewiesenen Zwei-Phasen-Struktur der CHVCs. Damit bevorzugen Sternberg, McKee & Wolfire [26] eine zirkumgalaktische Verteilung der CHVCs mit typischen Entfernungen um 150 kpc im Gegensatz

zu Braun & Burton 1999 [2], die sich für eine Verteilung der CHVC-Population über die gesamte Lokale Gruppe hinweg ausgesprochen hatten mit typischen Entfernungen der beobachteten Objekte in der Größenordnung von 1 Mpc.

Neben der Untersuchung in der 21-cm-Linienstrahlung des neutralen, atomaren Wasserstoffs ist auch die Suche nach einer stellaren Komponente kompakter Hochgeschwindigkeitswolken interessant. Hopp, Schulte-Ladbeck & Kerp 2003 [14] durchsuchen zu diesem Zweck 5 ausgewählte CHVCs mit dem *Very Large Telescope* (VLT) im visuellen Spektralbereich. Sie finden jedoch keine Hinweise für eine sich von der Milchstraße abhebende Population von Sternen, die mit den CHVCs assoziiert sein könnte. Auch die Untersuchung von 4 Objekten im Nahinfraroten mit Hilfe der Daten des *2 Micron All-Sky Survey* (2MASS) führt zu einem negativen Ergebnis, so daß Hopp, Schulte-Ladbeck & Kerp [14] ihren Nichtnachweis als Indiz dafür werten, daß es sich bei CHVCs um reine Wasserstoffwolken (inklusive Heliumanteil und Dunkler Materie) handelt, in denen keine Sternentstehung stattgefunden hat.

Das Wissen über CHVCs als Grundlage meiner Arbeit läßt sich somit wie folgt zusammenfassen: Kompakte Hochgeschwindigkeitswolken können über den gesamten Himmel hinweg in der 21-cm-Strahlung beobachtet werden, wobei ihre Verteilung über den Himmel nicht gleichmäßig ist. Es handelt sich um vergleichsweise kompakte Wolken mit Winkeldurchmessern von $\varphi \lesssim 1^\circ$ und einer mittleren zentralen Säulendichte von etwa $N_{\text{HI}} \approx 5 \cdot 10^{19} \text{ cm}^{-2}$. Viele von ihnen weisen eine Zwei-Komponenten-Struktur auf, das heißt sie bestehen aus einem kompakten Kern kalten, neutralen Gases, der in eine diffuse Hülle warmen, neutralen Gases eingebettet ist. Es handelt sich bei CHVCs offenbar um reine Gaswolken mit einem unbekannten Anteil an Dunkler Materie, in denen es niemals zur Sternentstehung gekommen ist. Sie können unter „vernünftigen“ Annahmen nicht allein durch ihre Eigengravitation stabilisiert werden, sondern benötigen einen zusätzlichen Außendruck zur Stabilisierung, der durch ein umgebendes Medium ausgeübt wird.

Über den Ursprung und die Verteilung kompakter Hochgeschwindigkeitswolken ist nicht viel bekannt. Braun & Burton 1999 [2] betrachten CHVCs als die sichtbaren Pendants der primordialen Dunkle-Materie-Minihalos, die von den kosmologischen Modellen vorhergesagt werden, und vermuten, sie seien über die gesamte Lokale Gruppe hinweg verteilt mit typischen Entfernungen in der Größenordnung von 1 Mpc. Demgegenüber bevorzugen Sternberg, McKee & Wolfire 2002 [26] auf Grund ihrer hydrodynamischen Simulationen eine zirkumgalaktische Verteilung der CHVCs mit typischen Distanzen um 150 kpc.

2.3 Ziele und Gliederung der vorliegenden Arbeit

Grundlage meiner Arbeit ist die Nachbeobachtung von 41 kompakten Hochgeschwindigkeitswolken in der 21-cm-Linie des neutralen Wasserstoffs mit dem 100-m-Teleskop des Max-Planck-Instituts für Radioastronomie in Effelsberg in der Eifel. Diese Objekte waren ursprünglich aus dem CHVC-Katalog von Braun & Burton 1999 [2] ausgewählt worden, um genaue Positionen für eine Suche nach Sternen in CHVCs zu ermitteln (Hopp, Schulte-Ladbeck & Kerp 2003 [14]). Dafür ist ein großes, hochauflösendes Teleskop wie Effelsberg notwendig, da der Leiden/Dwingeloo-Survey [13], auf dessen Grundlage der CHVC-Katalog von Braun & Burton [2] entstanden war, durch das Raster von $30'$ und die Auflösung des Dwingeloo-Teleskops von $36'$ HPBW zu ungenau ist.

Die Effelsberg-Beobachtungen bieten darüber hinaus die Gelegenheit, in einer größeren Auswahl kompakter Hochgeschwindigkeitswolken mit der vergleichsweise hohen Auflösung eines 100-m-Teleskops von etwa $9'$ die Verteilung des neutralen, atomaren Wasserstoffs zu untersuchen. Insbesondere sollen dabei die von Braun & Burton 1999 [2] getroffenen Aussagen über die Verteilung und den Ursprung kompakter Hochgeschwindigkeitswolken untersucht werden. Die Annahme einer Verteilung der Objekte über die gesamte Lokale Gruppe hinweg mit typischen Entfernungen in der Größenordnung von 1 Mpc ist durch die Entdeckung einer auf Wechselwirkung mit einem Umgebungsgas beruhenden Kopf-Schweif-Struktur bei CHVC 125+41–207 durch Brüns, Kerp & Pagels 2001 [8] in Frage gestellt worden. Solche Wechselwirkungsvorgänge würden wir eher in der Umgebung der Milchstraße erwarten, wo ein ausgedehntes galaktisches Halogas die notwendigen Dichten aufweisen könnte. Zugleich ist durch die Entdeckung solcher Störungen von CHVCs durch Wechselwirkung auch die Annahme eines thermischen Gleichgewichts fragwürdig, auf deren Grundlage Burton, Braun & Chengalur 2001 [4] die Entfernungen einiger CHVCs bestimmt hatten.

Um diese Probleme näher zu untersuchen, habe ich außerdem von 11 ausgewählten CHVCs mit dem Effelsberg-Teleskop tiefere Beobachtungen durchgeführt. Diese Beobachtungen erreichen eine Sensitivität wie im Fall von CHVC 125+41–207, bei der durch Wechselwirkung mit einem umgebenden Medium von der Wolke abgestreiftes Gas sichtbar werden sollte. Darüber hinaus erlauben diese tiefen Beobachtungen die Untersuchung der räumlichen Verteilung physikalischer Parameter wie der Säulendichte oder der Radialgeschwindigkeit in großen Detail.

Durch die Untersuchung der 41 mit dem Effelsberg-Teleskop kartierten CHVCs und der 11 tiefer kartierten Objekte möchte ich insbesondere folgende Fragen behandeln:

- *Ist die bei CHVC 125+41–207 entdeckte Kopf-Schweif-Struktur eine Ausnahme oder zeigen auch andere CHVCs Anzeichen einer Wechselwirkung mit einem Umgebungsgas?*
- *Sind CHVCs tatsächlich über die gesamte Lokale Gruppe hinweg verteilt oder handelt es sich eher um eine zirkumgalaktische Population?*
- *Sind CHVCs die primordialen, gasreichen Dunkle-Materie-Halos, die von den kosmologischen Modellen vorhergesagt werden?*

Die Arbeit gliedert sich in folgende Abschnitte: *Kapitel 3* beinhaltet einige grundsätzliche Anmerkungen über die Bestimmung physikalischer Parameter kompakter Hochgeschwindigkeitswolken. *Kapitel 4* faßt die Eigenschaften von Modellverteilungen von CHVCs zusammen, die ich unter einfachen Annahmen im Rechner modelliert habe. Darüber hinaus vergleiche ich die aus den Modellen abgeleiteten Parameter mit den tatsächlich beobachteten Eigenschaften der CHVCs. In *Kapitel 5* diskutiere ich die bei der Aufnahme und Reduktion der Beobachtungen der 41 CHVCs durchgeführten Schritte. *Kapitel 6* behandelt die Auswertung dieser Beobachtungen und die daraus abgeleiteten Eigenschaften der 41 CHVCs. Außerdem diskutiere ich in *Kapitel 7* die Notwendigkeit tiefer Nachbeobachtungen ausgewählter Objekte und definiere die dafür angemessenen Auswahlkriterien. In *Kapitel 8* beschreibe ich die Durchführung und Reduktion der Effelsberg-Beobachtungen der 11 tiefer beobachteten CHVCs. In *Kapitel 9* stelle ich die aus diesen Daten gewonnenen Eigenschaften der 11 Objekte vor. Des weiteren bespreche ich dort die Eigenschaften jedes einzelnen Objekts im Detail. In *Kapitel 10* schließlich fasse ich die in meiner

Arbeit gewonnenen Erkenntnisse zusammen und geben einen Ausblick auf zukünftig notwendige Beobachtungsstrategien, die zu einem tieferen Verständnis des Phänomens der kompakten Hochgeschwindigkeitswolken führen können.

3 Physikalische Eigenschaften von CHVCs

In diesem Kapitel möchte ich einige grundlegende Vorbemerkungen zur Bestimmung physikalischer Parameter kompakter Hochgeschwindigkeitswolken machen. Zunächst soll in Kapitel 3.1 das Problem der Radialgeschwindigkeiten behandelt werden. Zum einen ist die Transformation der gemessenen Radialgeschwindigkeiten in ein der Natur des betreffenden Objekts angemessenes Referenzsystem für die Interpretation der Radialgeschwindigkeit von großer Bedeutung, worauf ich in Kapitel 3.1.1 eingehen werde. Zum anderen kann ein beobachteter Gradient in Radialgeschwindigkeit über eine Wolke hinweg (teilweise) mit einem geometrischen Projektionseffekt assoziiert sein, der bei der Interpretation des Gradienten berücksichtigt werden muß. Diesem Problem widmet sich Kapitel 3.1.2.

Danach stelle ich in Kapitel 3.2 einige Methoden vor, mit denen sich die Entfernungen kompakter Hochgeschwindigkeitswolken abschätzen lassen. Da eine direkte Entfernungsmessung bei CHVCs nicht möglich ist, müssen wir auf indirekte Methoden der Entfernungsbestimmung zurückgreifen. Diese Methoden erfordern aber eine Reihe von Annahmen, deren Erfüllung meist fragwürdig ist. Aus diesem Grund sind die indirekt bestimmten Entfernungen von kompakten Hochgeschwindigkeitswolken mit großer Vorsicht zu interpretieren.

Zuletzt stelle ich in Kapitel 3.3 die bisherigen Ergebnisse von Beobachtungen und Simulationen von Wechselwirkungsvorgängen zwischen kompakten Hochgeschwindigkeitswolken und einem umgebenden Medium kurz vor.

3.1 Geschwindigkeiten von CHVCs

Die Radialgeschwindigkeit des in der 21-cm-Linienstrahlung beobachteten Gases ist auf Grund der durch den Dopplereffekt verursachten Frequenzverschiebung unmittelbar aus den aufgenommenen Spektren abzulesen. Schließlich wurden die Hochgeschwindigkeitswolken auch über ihre außergewöhnlich hohen Radialgeschwindigkeiten definiert. Bei der Messung und der Interpretation der gemessenen Geschwindigkeiten sind indes eine Reihe von Dingen zu beachten.

3.1.1 *Referenzsysteme*

Zunächst läßt sich nur der radiale Anteil der Gesamtgeschwindigkeit einer Wolke messen, der der Projektion des Geschwindigkeitsvektors auf die Sichtlinie zum Beobachter entspricht. Um die wahre Raumgeschwindigkeit des Objekts zu bestimmen, müßte auch die tangentielle Komponente bekannt sein. Dies ist prinzipiell nur über Eigenbewegungsmessungen möglich, die aber bei diffusen, weit entfernten Gaswolken wegen der kurzen zur Verfügung stehenden Beobachtungszeiträume nicht möglich sind. Aus diesem Grund können wir über die wahren Raumgeschwindigkeiten der kompakten Hochgeschwindigkeitswolken auf direktem Weg keine Aussagen treffen.

Eine weitere Schwierigkeit ist die Wahl des geeigneten Referenzsystems. Durch eine große Zahl verschiedener Effekte erfährt das Teleskop eine fortwährende beschleunigte Bewegung relativ zur beobachteten Quelle. Dies hat zur Folge, daß stets nur die momentane relative Radialgeschwindigkeit einer Wolke meßbar ist. Die wichtigsten Bewegungskomponenten in dieser

Hinsicht sind die Rotation ($\lesssim 0.5 \text{ km s}^{-1}$) und die Revolution ($\approx 30 \text{ km s}^{-1}$) der Erde, die Pekuliarbewegung der Sonne in der lokalen Galaxis ($\approx 16.5 \text{ km s}^{-1}$ in Richtung $l = 53^\circ$ und $b = 25^\circ$), die galaktische Rotation am Ort der Sonne ($\approx 220 \text{ km s}^{-1}$ in Richtung $l = 90^\circ$ und $b = 0^\circ$) sowie die Relativbewegung der gesamten Galaxis relativ zum Ruhesystem der Lokalen Gruppe ($\approx 80 \text{ km s}^{-1}$ in Richtung $l = 147^\circ$ und $b = -25^\circ$). Es ist ersichtlich, daß auf Grund der Vielzahl der einfließenden Effekte die Wahl eines geeigneten Referenzsystems bei der Interpretation der gemessenen Radialgeschwindigkeiten von großer Bedeutung ist.

Bei der Aufnahme der Spektren am 100-m-Radioteleskop in Effelsberg werden die Geschwindigkeiten sofort in das sogenannte lokale Bezugssystem (*local standard of rest*, LSR) umgerechnet, bei dem der lokale Bereich der Galaxis als Referenzsystem angenommen und allen Bewegungen bis hin zur Eigenbewegung der Sonne innerhalb ihrer lokalen Umgebung Rechnung getragen wird. Dieses Bezugssystem ist für die Behandlung von Objekten innerhalb der Galaxis gut geeignet. Relativ zum heliozentrischen Bezugssystem transformieren sich die Geschwindigkeiten in der Einheit km s^{-1} über die Gleichung

$$v_{\text{LSR}} = v_{\text{hel}} + 9 \cos(l) \cos(b) + 12 \sin(l) \cos(b) + 7 \sin(b) \quad (1)$$

(nach Braun & Burton 1999 [2], dort allerdings mit einem Vorzeichenfehler), worin l und b die galaktische Länge und Breite und v_{hel} die Geschwindigkeit des Objekts relativ zum Ruhesystem der Sonne sind. Im Fall von zirkum- oder extragalaktischen Quellen wie den kompakten Hochgeschwindigkeitswolken wäre hingegen ein System, in dem die galaktische Rotation von 220 km s^{-1} herausgerechnet wäre, geeigneter. Dieses sogenannte galaktische Bezugssystem (*Galactic standard of rest*, GSR) ist für die Beschreibung einer zirkumgalaktischen CHVC-Population zu bevorzugen, da die Bewegung relativ zum galaktischen Ruhesystem der Kinematik eines solchen Systems gerecht würde. Die Transformation in den GSR in der Einheit km s^{-1} erfolgt nach Braun & Burton 1999 [2] über

$$v_{\text{GSR}} = v_{\text{LSR}} + 220 \sin(l) \cos(b). \quad (2)$$

Zuletzt läßt sich noch das Bezugssystem der Lokalen Gruppe (*Local Group standard of rest*, LGSR) definieren, bei dem die Bewegung der Milchstraße innerhalb der Lokalen Gruppe von Galaxien herausgerechnet und damit das Ruhesystem der Lokalen Gruppe für die Beschreibung der Radialgeschwindigkeiten zugrunde gelegt wird. Falls die CHVC-Population über die gesamte Lokale Gruppe verteilt sein sollte, wäre das LGSR-System als Bezugssystem geeignet. Man transformiert die Geschwindigkeiten vom GSR-System in das LGSR-System in der Einheit km s^{-1} über

$$v_{\text{LGSR}} = v_{\text{GSR}} - 62 \cos(l) \cos(b) + 40 \sin(l) \cos(b) - 35 \sin(b) \quad (3)$$

(nach Braun & Burton 1999 [2]). Die Umrechnung der Radialgeschwindigkeiten kompakter Hochgeschwindigkeitswolken in unterschiedliche Bezugssysteme wird besonders im Hinblick auf die Untersuchung des Ursprungs und der Verteilung der CHVCs im Verlauf dieser Arbeit von großer Bedeutung sein.

3.1.2 Geschwindigkeitsgradienten

Viele CHVCs weisen einen mehr oder weniger starken Gradienten der Radialgeschwindigkeit über die Ausdehnung der Wolke auf. Dieser Gradient kann real sein, kann aber zum Teil auch

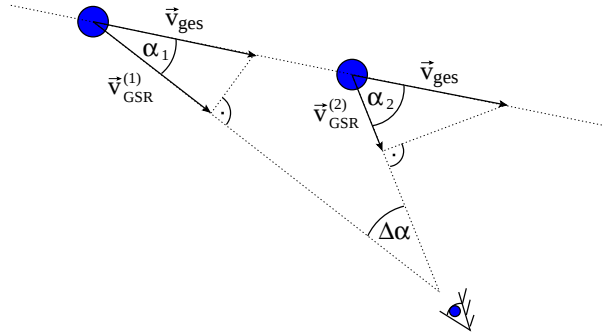


Abbildung 3: Skizze zur Erläuterung des Projektionseffekts als möglicher Ursache für einen Geschwindigkeitsgradienten entlang einer Wolke. Eine Erläuterung der Größen und Zusammenhänge erfolgt im Text.

auf einem Projektionseffekt beruhen, der dadurch entsteht, daß der Winkel zwischen der Bewegungsrichtung der Wolke und dem Sehstrahl über die Wolke hinweg variiert. Die Geometrie ist in Abbildung 3 skizziert. Die Grundannahme ist, alle Teilchen der Wolke bewegten sich mit derselben Geschwindigkeit v_{ges} in dieselbe Richtung. Dann ergibt sich für die beobachtete Radialgeschwindigkeit, beispielsweise im galaktischen Bezugssystem, gemäß der Skizze

$$v_{\text{GSR}}^{(i)} = v_{\text{ges}} \cos \alpha_i \quad (4)$$

für verschiedene Punkte i entlang einer Achse durch die Wolke. Dabei ist α_i der Winkel zwischen der Bewegungsrichtung der Wolke und dem Sehstrahl zum Beobachter. Wir betrachten nun zwei Punkte an den entgegengesetzten Enden der Wolke, deren Winkelabstand $\Delta\alpha$ sei. Wenn wir jetzt das Verhältnis der projizierten Geschwindigkeiten beider Punkte bilden, so erhalten wir mit

$$\frac{v_{\text{GSR}}^{(1)}}{v_{\text{GSR}}^{(2)}} = \frac{\cos \alpha_1}{\cos \alpha_2} = \frac{\cos \alpha_1}{\cos(\alpha_1 + \Delta\alpha)} \quad (5)$$

einen Ausdruck, dessen einzige Unbekannte α_1 ist, denn sowohl die Geschwindigkeiten $v_{\text{GSR}}^{(i)}$ als auch die Winkelausdehnung der Wolke $\Delta\alpha$ am Himmel lassen sich direkt messen. Unter der einzigen Annahme, der Geschwindigkeitsunterschied zwischen beiden Punkten sei allein durch den Projektionseffekt verursacht, ließe sich folglich der Projektionswinkel α_1 berechnen und damit die Raumgeschwindigkeit der Wolke. Diese Annahme allerdings läßt sich niemals überprüfen, da die Tangentialgeschwindigkeit nicht meßbar ist.

Umgekehrt läßt sich in den Fällen, in denen die Berechnung des Projektionswinkels eine unerwartet hohe Raumgeschwindigkeit liefert, die Annahme untermauern, der beobachtete Gradient in Geschwindigkeit sei großenteils real und durch dynamische Vorgänge in der Wolke bestimmt. Dies wird vor allem bei Wolken geringen Winkeldurchmessers von Bedeutung sein, die einen vergleichsweise großen Geschwindigkeitsgradienten aufweisen. Eine solche Konfiguration führt unter der Annahme eines reinen Projektionseffekts zu Projektionswinkeln nahe 90° und unrealistisch hohen Raumgeschwindigkeiten von mitunter mehreren tausend Kilometern in der Sekunde, die mit der beobachteten Verteilung der Radialgeschwindigkeiten der CHVCs nicht in Einklang stehen.

Ein Beispiel soll die Situation illustrieren. Angenommen, an den beiden entgegengesetzten Rändern einer Wolke mit einer für CHVCs typischen Ausdehnung von $40'$ würden Radialgeschwindigkeiten von $v_{\text{GSR}}^{(1)} = 250 \text{ km s}^{-1}$ beziehungsweise $v_{\text{GSR}}^{(2)} = 230 \text{ km s}^{-1}$ im galaktischen Bezugssystem beobachtet. Der damit verbundene Gradient von 20 km s^{-1} über die Ausdehnung der Wolke wäre durchaus nicht ungewöhnlich für die von mir beobachteten CHVCs. Anhand von Gleichung 5 erhielten wir daraus einen Winkel zwischen der Raumgeschwindigkeit der Wolke und der Sichtlinie zum Beobachter von knapp $\alpha_1 = 82^\circ$. Die Wolke würde sich somit beinahe senkrecht zur Sichtlinie des Beobachters bewegen, und wir erhielten eine wahre Raumgeschwindigkeit von $v_{\text{ges}} = v_{\text{GSR}}^{(1)} / \cos \alpha_1 \approx 1800 \text{ km s}^{-1}$ unter der Annahme eines reinen Projektionseffekts als Ursache für den beobachteten Gradienten der Radialgeschwindigkeit. Eine solche Geschwindigkeit wäre sehr unwahrscheinlich, wenn man berücksichtigt, daß die höchsten bislang gefundenen Radialgeschwindigkeiten von CHVCs um $\pm 400 \text{ km s}^{-1}$ liegen. Vielmehr würde ein solches Resultat die Annahme nahelegen, der über die Wolke beobachtete Geschwindigkeitsgradient sei zu einem großen Teil real und beruhe auf physikalischen Vorgängen in der Wolke anstelle eines (reinen) Projektionseffekts.

3.2 Entfernungsbestimmungen von CHVCs

In diesem Kapitel möchte ich die Möglichkeiten zur Bestimmung der Entfernungen von CHVCs vorstellen und diskutieren. Die Entfernung ist einer der wichtigsten und zugleich am wenigsten bekannten Parameter kompakter Hochgeschwindigkeitswolken. Ihre Bedeutung erwächst aus ihrem großen Einfluß auf die Bestimmung anderer wichtiger Eigenschaften wie dem Radius, der Masse oder der Dichte der Wolken. Konkret ergibt sich für eine Wolke der Entfernung d die Abhängigkeit des Radius' zu $R \sim d$, der Masse zu $M \sim d^2$ sowie der Dichte zu $\rho \sim d^{-1}$. Nicht zuletzt kann auch die räumliche Verteilung kompakter Hochgeschwindigkeitswolken nur festgelegt werden, wenn deren Entfernungen bekannt sind.

Darüber hinaus wird die Entfernung der kompakten Hochgeschwindigkeitswolken gegenwärtig kontrovers diskutiert, denn es fehlen die Möglichkeiten zur direkten Entfernungsbestimmung. Ein Ansatz, der im Fall einiger HVCs zum Erfolg führte, ist die Suche nach Absorptionslinien der Wolken in den Spektren von Sternen, die in Richtung der Wolke stehen und deren Entfernungen mitunter bestimmbar sind. Dadurch lassen sich im günstigsten Fall eine obere und untere Grenze des Abstands zur Wolke festlegen. Auf diesem Weg gelang es Danly, Albert & Kuntz 1993 [9], für den HVC-Komplex M eine obere Entfernungsgrenze von 4.4 kpc festzulegen. Auch die Entfernung zu Komplex A konnte 1999 durch van Woerden et al. [29] auf 4...10 kpc eingegrenzt werden. Jedoch deuten bisherige Erkenntnisse auf einen recht großen Abstand kompakter Hochgeschwindigkeitswolken von der Milchstraße hin, weshalb die genannte Methode der Entfernungsbestimmung wegen des Fehlens von geeigneten Sternen jenseits der CHVCs keine Anwendung finden kann.

Im folgenden möchte ich einige indirekte Methoden vorstellen, die eine Abschätzung der Entfernungen von CHVCs gestatten. Diese Methoden fußen jedoch auf einer Reihe von Annahmen, die mitunter sehr spekulativ sind, so daß den gewonnenen Entfernungen mit einiger Skepsis begegnet werden muß.

3.2.1 *Entfernungsbestimmung über die Dichte*

Eine sehr einfache Entfernungsabschätzung ist über die Dichte der Wolke möglich. Sie geht von der stark vereinfachten Annahme aus, die Wolke sei sphärisch-symmetrisch mit konstanter Teilchendichte n über das gesamte Volumen. Sei $\mathcal{N}$ die Gesamtzahl der Teilchen und R der Radius der Wolke. Dann läßt sich die Teilchendichte schreiben als

$$n = \frac{3}{4} \frac{\mathcal{N}}{\pi R^3}. \quad (6)$$

Durch Integration läßt sich daraus die maximale Säulendichte in Richtung des Zentrums berechnen:

$$N_{\text{HI}} = 2 \cdot \int_0^R n \, ds = 2Rn = \frac{3}{2} \frac{\mathcal{N}}{\pi R^2}. \quad (7)$$

Damit ergibt sich die Entfernung d der Wolke über das Verhältnis der maximal gemessenen Säulendichte und der als konstant angenommenen Teilchendichte zu

$$d \approx \frac{2R}{\varphi} = \frac{N_{\text{HI}}}{n\varphi}, \quad (8)$$

wobei φ der Winkeldurchmesser der Wolke am Himmel ist.

Diese Entfernungsbestimmung erfordert allerdings die Abschätzung der Teilchendichte. Zugleich läßt sich die Annahme einer sphärischen Wolke konstanter Dichte für ausgedehnte CHVCs nicht rechtfertigen, und es wird sich herausstellen, daß der Großteil der im Rahmen dieser Arbeit behandelten und beobachteten CHVCs eine deutlich komplexere Struktur aufweist. Mitunter ist die Methode jedoch auf kleine, kompakte Kerne innerhalb der Wolken anwendbar.

3.2.2 *Entfernungsbestimmung über den Virialsatz*

Unter der Annahme, eine Gaswolke sei virialisiert, läßt sich ihre Entfernung direkt ableiten. Der Virialsatz besagt, daß im Gleichgewicht die mittlere potentielle Energie gleich dem Zweifachen der mittleren kinetischen Energie entspricht. Daraus erhält man sogleich

$$2v_{3\text{D}}^2 = \frac{GM_{\text{HI}}}{fR}. \quad (9)$$

Es sind dabei G die Gravitationskonstante, M_{HI} die Gesamtmasse des neutralen Wasserstoffs in der Wolke, R der Radius der Wolke und f der Anteil der HI-Masse an der Gesamtmasse der Wolke. Weiter bezeichne $v_{3\text{D}}$ die sogenannte *dreidimensionale Geschwindigkeitsdispersion*, die mit der beobachteten Halbwertsbreite der HI-Linien Δv über die Beziehung

$$v_{3\text{D}}^2 = \frac{3}{8 \ln 2} \Delta v^2 \quad (10)$$

verknüpft ist. Gleichung (9) läßt sich unter Verwendung der Kleinwinkelnäherung für den Tangens nach der Entfernung d der Wolke umstellen:

$$d = \frac{GM_{\text{HI}}}{2fv_{3\text{D}}^2\vartheta}, \quad (11)$$

wobei ϑ den Winkelhalbmesser der Wolke bezeichne, also den Winkel, unter dem der Radius R dem Beobachter erscheint. Ferner fließe die Annahme ein, die Wolke sei sphärisch und habe eine homogene Massenverteilung. Dann läßt sich für die HI-Masse schreiben:

$$M_{\text{HI}} = \frac{2}{3} \pi R^2 N_{\text{HI}} m_{\text{H}}. \quad (12)$$

Dabei bezeichne N_{HI} die maximal gemessene Säulendichte im Zentrum der Wolke und m_{H} die Masse eines Wasserstoffatoms. Nach Einsetzen in Gleichung (11) erhält man schließlich

$$d = \frac{9}{8\pi G m_{\text{H}} \ln 2} \cdot \frac{f \Delta v^2}{N_{\text{HI}} \vartheta} \quad (13)$$

als Entfernung einer virialisierten, sphärischen Wolke mit konstanter Dichte. Als direkt meßbare Parameter fließen nur die Halbwertsbreite der HI-Linien, die zentrale Säulendichte sowie der Winkelhalbmesser der Wolke in die Berechnung ein, Größen also, deren Werte sich direkt aus den gemessenen HI-Spektren ergeben. Die einzige unbekannte Größe ist der Anteil f , den die Masse des neutralen Wasserstoffs an der Gesamtmasse der Wolke aufweist. Gängige Abschätzungen von $f \approx 0.1$ sind insofern kritisch, als die Entfernung der Wolke direkt proportional zu f ist, so daß ein Fehler in f sich linear auf die errechnete Entfernung überträgt. Darüber hinaus sind natürlich die Annahmen einer Virialisierung sowie einer sphärisch-symmetrischen, homogenen Massenverteilung nicht überprüfbar und stellen die bedeutendste Einschränkung der beschriebenen Methode dar.

3.2.3 Entfernungsbestimmung über den thermischen Druck

Eine Möglichkeit zur Bestimmung der Entfernung von CHVCs ist, neben weiteren Annahmen, durch die Abschätzung ihres thermischen Drucks möglich. Burton, Braun und Chengalur 2001 [4] verwenden diese Methode, um die Abstände zu ihren mit dem Arecibo-Teleskop kartierten CHVCs abzuschätzen. Ihr Modell beruht auf der Beobachtung, daß die Wolken bei kleinen Säulendichten relativ rund erscheinen, woraus auf eine im wesentlichen sphärische Symmetrie der WNM-Halos der CHVCs geschlossen wird. Darin begründet sich der Ansatz einer radialen, exponentiell abfallenden Verteilung der Volumendichte der Teilchen des Halos in der Gestalt

$$n(r) = n_0 e^{-r/h_{\text{B}}}. \quad (14)$$

Dabei ist n_0 die Dichte der Wasserstoffatome im Zentrum, r der radiale Abstand vom Wolkenzentrum, und die Größe h_{B} wird als *exponentielle Skalenhöhe* bezeichnet. Aus diesem Ansatz läßt sich nun die projizierte Verteilung der Säulendichte berechnen:

$$N_{\text{HI}}(r) = 2h_{\text{B}}n_0 \left[\frac{r}{h_{\text{B}}} K_1 \left(\frac{r}{h_{\text{B}}} \right) \right] \quad (15)$$

(siehe van der Kruit & Searle 1981 [31]). Es ist darin K_1 die sogenannte *modifizierte Besselfunktion* erster Ordnung. Daraus ergibt sich unmittelbar die maximale Säulendichte in Richtung des Zentrums der Wolke zu

$$N_{\text{HI}} = 2h_{\text{B}}n_0 \quad (16)$$

unter Ausnutzung der entsprechenden Eigenschaften der modifizierten Besselfunktion K_1 für den Fall $r \rightarrow 0$. Durch Überlagerung des theoretischen Verlaufs der Säulendichte mit der tatsächlich

gemessenen Verteilung können Burton, Braun & Chengalur 2001 [4] eine in vielen Fällen gute Übereinstimmung finden und sehen dadurch ihre Annahme einer radialen, exponentiell abfallenden Dichteverteilung bestätigt.

Die des weiteren notwendigen Abschätzungen sind indes kritischer. Burton, Braun & Chengalur 2001 [4] lassen die Annahme einfließen, eine stabile Zwei-Phasen-Struktur des Gases, das heißt die Koexistenz eines kalten und warmen neutralen Mediums, benötige (über einen großen Bereich verschiedener Metallizitäten, Staubanteile und Intensitäten des Strahlungsfeldes) einen thermischen Druck von $P/k = nT \approx 100 \text{ K cm}^{-3}$. Dieser thermische Druck wird ohne Berücksichtigung weiterer möglicher Druckkomponenten als Innendruck im Zentrum der CHVCs angenommen. Dann ließe sich die Distanz der Wolke zu

$$d \approx \frac{h_B}{\vartheta} = \frac{N_{\text{HI}}}{2\vartheta n_0} = \frac{N_{\text{HI}} T}{2\vartheta} \frac{k}{P}, \quad (17)$$

berechnen, wobei ϑ der Winkeldurchmesser ist, unter dem die Skalenhöhe h_B am Himmel in Projektion erscheint, und N_{HI} die maximale Säulendichte in Richtung des Zentrums der Wolke bezeichnet. Burton, Braun & Chengalur 2001 [4] schätzen anhand der gemessenen Linienbreiten eine Temperatur von $T = 10^4 \text{ K}$ und nehmen einen Druck von $P/k = 100 \text{ K cm}^{-3}$ an. Mit diesen Werten bestimmen sie die Entfernungen der von ihnen beobachteten CHVCs zu $150 \dots 850 \text{ kpc}$ mit einem mittleren Wert von $400 \pm 280 \text{ kpc}$. Ein solches Ergebnis würde die CHVC-Population eindeutig im intergalaktischen Raum zwischen den Galaxien der Lokalen Gruppe ansiedeln.

Die benutzte Methode ist jedoch kritisch zu beurteilen. Die Annahme einer im thermischen Gleichgewicht befindlichen Wolke mit rein thermischem Druck wird durch die Beobachtung möglicher Wechselwirkungen zwischen CHVC's und einem umgebenden Medium in Frage gestellt (Brüns, Kerp & Pagels 2001 [8]). Unter diesen Umständen sind die von Burton, Braun & Chengalur 2001 [4] ermittelten Entfernungen fragwürdig, zumal das Auftreten von Wechselwirkungen auf das Vorhandensein eines relativ dichten Mediums hinweist, das wir eher in der Nähe der Milchstraße anstatt im intergalaktischen Raum erwarten würden.

3.2.4 Entfernungsbestimmung über die Rotation

Viele kompakte Hochgeschwindigkeitswolken zeigen einen mehr oder weniger starken Gradienten in Radialgeschwindigkeit über die Ausdehnung der Wolke hinweg. Wenn sich ein solcher Gradient als Rotation interpretieren läßt, so kann man daraus eine untere Grenze der Entfernung des Objekts ableiten. Die Grundannahme ist wieder, die Wolke sei sphärisch symmetrisch mit konstanter Massendichte über das gesamte Volumen. Unter der Annahme kreisförmiger Umlaufbahnen muß für ein Probeteilchen am „Außenrand“ der Wolke die Zentrifugalkraft gleich der Gravitationskraft sein:

$$\frac{mv^2}{R} = G \frac{M_{\text{HI}} m}{f R^2}. \quad (18)$$

Dabei sind m die Masse des Probeteilchens, M_{HI} die gesamte HI-Masse der Wolke, f der Anteil der HI-Masse an der Gesamtmasse, R der Wolkenradius und v der Betrag der Rotationsgeschwindigkeit am Außenrand. Umstellen der Gleichung nach dem Wolkenradius ergibt

$$R = \frac{GM_{\text{HI}}}{fv^2} \Rightarrow R = \frac{3fv^2}{2G\pi N_{\text{HI}} m_{\text{H}}} \quad (19)$$

unter Verwendung von $M_{\text{HI}} = V \cdot \varrho = (4/3)\pi R^3 \cdot N_{\text{HI}} m_{\text{H}} / (2R)$. Es sind dabei N_{HI} die maximale Säulendichte in Richtung des Zentrums der Wolke und m_{H} die Masse eines Wasserstoffatoms. Unter Benutzung der Kleinwinkelnäherung für den Tangens folgt hieraus die Entfernung d der Wolke zu

$$d = \frac{2R}{\varphi} = \frac{3fv^2}{G\pi N_{\text{HI}} m_{\text{H}} \varphi}, \quad (20)$$

worin φ der Winkeldurchmesser der Wolke am Himmel ist. Die so erhaltene Entfernung stellt allerdings nur eine untere Grenze dar, da die Inklination der Rotationsachse der Wolke unbekannt ist und hier zu 90° angenommen wurde. Darüber hinaus beruht die Entfernungsabschätzung auf der kaum überprüfbaren Annahme, der beobachtete Gradient in Radialgeschwindigkeit sei ausschließlich durch die Eigenrotation hervorgerufen.

3.2.5 Entfernungsbestimmung über die Kinematik

Eine Möglichkeit zur Bestimmung der Entfernungen kompakter Hochgeschwindigkeitswolken ist mitunter auch durch ihre Kinematik gegeben. Nach Benjamin und Danly 1997 [6] läßt sich der Stoßdruck (*ram pressure*), der durch ein umgebendes Medium auf eine bewegte Wolke ausgeübt wird, durch folgenden Zusammenhang ausdrücken:

$$M_c \frac{dv_c}{dt} = M_c g(x) - \frac{1}{2} C_D \varrho_h(x) A_c (v_c - v_h(x))^2. \quad (21)$$

Es sei hierbei nur die radiale Komponente der Bewegung berücksichtigt, das heißt die Komponente in Richtung des galaktischen Zentrums. Dabei sind M_c , v_c und A_c die Wolkenmasse, die Geschwindigkeit der Wolke und die Fläche, die die Wolke dem umgebenden Medium in Bewegungsrichtung entgegenstellt, $\varrho_h(x)$ und $v_h(x)$ sind die Dichte und die Geschwindigkeit des umgebenden Mediums in Abhängigkeit vom Ort x . C_D ist der sogenannte *drag coefficient*, der die Effektivität des Impulsaustausches zwischen Wolke und Medium beschreibt. Er wird im allgemeinen zu 1 gesetzt. $g(x)$ schließlich ist die galaktische Gravitationsbeschleunigung am Ort x .

Die Geschwindigkeit einer Wolke wird nach obiger Gleichung also festgelegt durch die abbremsende Wirkung des umgebenden Mediums zum einen und die beschleunigende Wirkung des Gravitationspotentials der Milchstraße zum anderen. Dadurch kann sich bezüglich der Geschwindigkeitskomponente in Richtung der Anziehung der Galaxis ein Gleichgewichtszustand einstellen, in welchem die Wolke sich mit konstanter Geschwindigkeit bewegt. Diese Geschwindigkeit heißt *terminal velocity* v_t und wird durch die Bedingung $dv_c/dt = 0$ festgelegt. Löst man die so erhaltene Bedingung nach der Dichte auf, so erhält man

$$\varrho_h(x) = \frac{2M_c g(x)}{A_c v_t^2}. \quad (22)$$

Dabei wurde angenommen, daß $C_D = 1$ und $v_h(x) \equiv 0$. Unter der Annahme, es handle sich um eine sphärische Wolke mit konstanter Dichte, erhält man mit Hilfe der Ersetzungen $A_c = \pi R_c^2$, $M_c = (4/3)\pi R_c^3 \varrho_c$ sowie $\varrho_c = m_{\text{H}} n_c = m_{\text{H}} N_{\text{HI}} / (2R_c)$ den Zusammenhang

$$\varrho_h(x) = \frac{4m_{\text{H}} N_{\text{HI}} g(x)}{3v_c^2}. \quad (23)$$

Dabei ist N_{H} die maximale Säulendichte der Wolke und m_{H} die Masse eines Wasserstoffatoms, wobei die Annahme einfließt, die Wolke bestehe rein aus atomarem Wasserstoff.

Obige Gleichung hatten wir unter der Annahme gewonnen, die Wolke habe ihre *terminal velocity* erreicht und werde nicht weiter beschleunigt. Unter dieser Voraussetzung läßt sich nun aber die Entfernung der Wolke festlegen, indem man den so erhaltenen Verlauf der Dichte mit dem tatsächlichen, modellierten Dichteverlauf vergleicht. Beide Dichteverläufe sollten sich an einem Punkt $x = x_c$ schneiden, welcher gerade der gesuchten Entfernung der Wolke vom Zentrum der Milchstraße entspricht. Für diese Entfernungsbestimmung ist allerdings die genaue Kenntnis des Verlaufs der Dichte des galaktischen und extragalaktischen Mediums sowie des Verlaufs des Gravitationspotentials der Milchstraße nötig. Weiter muß die Annahme gemacht werden, die Tangentialgeschwindigkeit der untersuchten Objekte in Bezug auf das galaktische Zentrum sei gegenüber den radialen Komponente vernachlässigbar klein. Außerdem muß die praktisch kaum überprüfbare Annahme, die Wolke habe ihre *terminal velocity* erreicht, erfüllt sein, weshalb diese Methode zur Entfernungsbestimmung vermutlich nicht angewandt werden kann.

3.2.6 Diskussion der vorgestellten Methoden

Die zuvor diskutierten Methoden gestatten es, die Entfernungen individueller CHVCs abzuschätzen. Gleichwohl sind alle diese Methoden mit großer Vorsicht anzuwenden, denn sie kommen nicht ohne eine Reihe von Annahmen aus, deren Gültigkeit sich nicht überprüfen läßt und die im allgemeinen auch nicht streng gültig sein werden. Die wichtigste Annahme in allen diskutierten Fällen ist die einer einfachen Geometrie dergestalt, daß eine sphärisch-symmetrische Wolke mit homogener oder zumindest radialsymmetrischer Teilchendichte vorliegt. Die von mir im Rahmen dieser Arbeit beobachteten CHVCs zeigen jedoch eine überwiegend komplexe Struktur, die mit einer auch nur näherungsweise Kugelsymmetrie in den meisten Fällen nicht vereinbar ist (vgl. Kapitel 6 und 9). Es lassen sich also die diskutierten Entfernungsabschätzungen auf die von mir kartierten CHVCs nicht sinnvoll anwenden. Die zahlreich beobachteten Anzeichen für eine starke Störung der Gasverteilung durch die Wechselwirkung mit einem umgebenden Medium zeigen darüber hinaus, daß die Annahme einer im thermischen Gleichgewicht befindlichen Wolke zweifelhaft ist, so daß die Entfernungsbestimmungen von Burton, Braun & Chengalur 2001 [4] anhand des thermischen Drucks fragwürdig sind. Die Unsicherheiten dieser Entfernungsabschätzungen dürften in der Größenordnung der berechneten Entfernungen liegen, so daß eine Platzierung der CHVCs über die Lokale Gruppe hinweg anhand der Ergebnisse fragwürdig erscheint. Die darüber hinaus getroffene Annahme eines zentralen Drucks von $P/k \approx 100 \text{ K cm}^{-3}$ ist gleichsam mit einer großen Unsicherheit behaftet. Sollte der Druck des umgebenden Mediums, wie an anderen Literaturstellen zu finden, den zweifachen Wert dessen annehmen, so wäre die CHVC-Population nur noch halb so weit entfernt, was eher einer zirkumgalaktischen Verteilung gleichkäme.

Die gegen die diskutierten Methoden zur Entfernungsabschätzung von CHVCs erhobenen Einwände zeigen, daß über die genaue Verteilung der CHVCs anhand der derzeit vorliegenden Daten nichts genaues bekannt ist. Es ist statt dessen notwendig, ausgewählte CHVCs im Detail zu studieren, um Aussagen über die physikalischen Bedingungen innerhalb und außerhalb der Wolken zu treffen. Dies kann in Kombination mit numerischen Simulationen eine Eingrenzung der Entfernungen der CHVCs von der Milchstraße ermöglichen.

3.3 Wechselwirkung mit einem umgebenden Medium

Die Auswertung von sensitiven Beobachtungen von CHVCs mit dem Effelsberg-Teleskop ermöglicht die Suche nach Hinweisen auf Wechselwirkungsprozesse mit einem umgebenden Medium. Der Nachweis solcher Wechselwirkungen kann einen Hinweis auf die Verteilung der CHVCs im galaktischen Halo oder über den intergalaktischen Raum hinweg liefern. Im ersten Fall wäre auf Grund der relativ hohen Materiedichten im galaktischen Halo eine sehr viel stärkere Wechselwirkung zu erwarten als im Fall einer Verteilung über die Lokale Gruppe.

Hinweise, wann es zu Abstreifprozessen durch Wechselwirkungsprozesse einer sich gegenüber dem umgebenden Medium bewegenden CHVC kommt, liefert unter anderem die Dissertation von Vieser 2001 [30], der durch hydrodynamische Simulationen unter Berücksichtigung von Eingengravitation, Heiz- und Kühlprozessen sowie Wärmeleitung durch Elektronen das Verhalten von Gaswolken in einem umgebenden Medium untersucht. Aus seinen Ergebnissen läßt sich abschätzen, daß erst unterhalb einer Säulendichte von grob 10^{19} cm^{-2} Abstreifprozesse sichtbar werden, wobei das umgebende Medium in seinen Simulationen eine vergleichsweise hohe Dichte von $n_{\text{ISM}} = 6.6 \cdot 10^{-4} \text{ cm}^{-3}$ aufweist, somit eher den Bedingungen im inneren Halo der Milchstraße entspricht als im intergalaktischen Medium. In größerer Entfernung vom Galaktischen Zentrum sollten demgemäß die Auswirkungen der Wechselwirkung schwächer ausfallen. Zu einem ähnlichen Ergebnis kommen auch Quilis und Moore 2001 [23] in ihren numerischen Simulationen.

Interessant im Hinblick auf die Bewertung der Entfernungsbestimmungen der CHVCs ist die Arbeit von Benjamin und Danly 1997 [6]. Darin untersuchen die Autoren, wie sich Staudruck (*ram pressure*) auf die Geschwindigkeit einer Gaswolke in einem umgebenden Medium auswirkt. Unter Vernachlässigung des Einflusses der Gravitation der Milchstraße läßt sich anhand der von Benjamin und Danly [6] angegebenen Gleichung abschätzen, daß in der Umgebung des inneren Halos eine Wolke im Verlauf weniger Hundertmillionen Jahre beinahe ihre gesamte Anfangsgeschwindigkeit eingebüßt hätte. Erst unterhalb einer Materiedichte von etwa $n_{\text{ISM}} = 10^{-5} \text{ cm}^{-3}$ kann die Wolke ihre hohe Geschwindigkeit über Jahrmilliarden erhalten. Die beobachteten hohen Geschwindigkeiten der CHVCs lassen demnach zwei Interpretationen zu. Zum einen könnte es sich um sehr junge Objekte handeln, die noch gar keine Zeit hatten, ihre Geschwindigkeit zu verlieren, zum anderen könnten die Wolken weiter von der Milchstraße entfernt im intergalaktischen Raum liegen, wo die Materiedichte so gering ist, daß es im Verlauf einiger Milliarden Jahre zu keinem starken Geschwindigkeitsverlust kommt.

Diese einfache Bewertung wird natürlich hinterfragt, wenn man zusätzlich die beschleunigende Wirkung des galaktischen Gravitationspotentials berücksichtigt. Darüber hinaus ist der Anteil an Dunkler Materie in CHVCs nicht bekannt, so daß die ihre Gesamtmasse mitunter deutlich größer anzusetzen wäre, was die Resultate der dynamischen Berechnungen stark beeinflussen würde. Dadurch wird eine Interpretation der beobachteten Geschwindigkeiten wiederum erschwert.

4 Modellierung von CHVC-Populationen

Um den Ursprung und die beobachteten Eigenschaften kompakter Hochgeschwindigkeitswolken besser verstehen zu können, ist es hilfreich, verschiedene CHVC-Populationen zu modellieren und die Ergebnisse der Modelle mit den Beobachtungen zu vergleichen. Sowohl aus der Projektion der räumlichen Verteilung der Wolken an den Himmel als auch aus den projizierten kinematischen Eigenschaften solcher Modellwolken lassen sich durch Vergleich mit den Beobachtungen möglicherweise Schlüsse auf die Natur und den Ursprung der CHVCs ziehen. Im diesem Kapitel möchte ich die Ergebnisse verschiedener Modelle vorstellen und die Unterschiede beziehungsweise Übereinstimmungen zwischen Modellen und Beobachtungen kommentieren und interpretieren.

Grundlage für die Beobachtungsdaten sind der auf dem Leiden/Dwingeloo-Survey (LDS) basierende CHVC-Katalog von de Heij, Braun & Burton 2002 [10] sowie der auf dem HI Parkes All-Sky Survey (HIPASS) fußende CHVC-Katalog von Putman et al. 2002 [22]. Der LDS wurde mit dem 25-m-Teleskop in Dwingeloo aufgenommen, das ein Winkelauflösungsvermögen von $36'$ HPBW besitzt. Das erreichte *rms*-Rauschen der Basislinie liegt im Mittel bei etwa 70 mK bei einer Geschwindigkeitsauflösung von 1.03 km s^{-1} . Der LDS erfaßt im wesentlichen den Himmel nördlich einer Deklination von etwa -30° . Der HIPASS hingegen wurde mit dem 65-m-Teleskop in Parkes aufgenommen, das ein Winkelauflösungsvermögen von etwa $14'$ aufweist. Die Geschwindigkeitsauflösung liegt hier aber nur bei 16 km s^{-1} . Der HIPASS erfaßt den Himmel südlich einer Deklination von etwa $+2^\circ$.

4.1 Zirkumgalaktisches Modell

Sternberg, McKee & Wolfire 2002 [26] bevorzugten anhand ihrer Simulationen eine zirkumgalaktische Population von CHVCs mit typischen Entfernungen in der Größenordnung von 150 kpc. Eine solche zirkumgalaktische Population sowie zusätzlich eine vergleichbare Population in der Umgebung der Andromeda-Galaxie (M31) habe ich im Rechner modelliert, um die sich aus dem Modell ergebenden Eigenschaften der Wolken mit denen der beobachteten Population zu vergleichen.

Grundlage des Modells ist eine sphärisch-symmetrische Verteilung der CHVCs um die Massenschwerpunkte beider Galaxien herum. Die Anzahl der Wolken pro Volumenelement nimmt dabei gemäß einer Gaußverteilung mit zunehmender Entfernung von der jeweiligen Galaxie ab, wobei die Halbwertsbreite der Gaußverteilung zu $r_h = 200 \text{ kpc}$ gewählt wurde (vgl. hierzu Sternberg, McKee & Wolfire 2002 [26], Maloney & Putman 2003 [16]). Jeder individuellen Wolke wird eine zufällige Geschwindigkeit zugewiesen. Die Beträge der Geschwindigkeiten sind um eine mittlere Raumgeschwindigkeit $v_0 = 150 \text{ km s}^{-1}$ gaußverteilt und die Richtungen über alle möglichen Richtungswinkel gleichverteilt. Die mittlere Geschwindigkeit von 150 km s^{-1} ist mit einer Gesamtmasse der Milchstraße in der Größenordnung von $M_{\text{MW}} \approx 10^{12} M_\odot$ in Einklang. In Tabelle 1 sind die Parameter des Modells und ihre Werte noch einmal zusammengefaßt. Eine Ansicht der Verteilung der Objekte in der *xy*-Ebene ist in Abbildung 4 wiedergegeben.

Im nächsten Schritt habe ich die räumlichen Positionen der Wolken auf die Sonne projiziert und in galaktische Länge und Breite sowie Entfernung umgerechnet, wobei ich für die Entfernung der Sonne vom galaktischen Zentrum einen Wert von 8.5 kpc angenommen habe,

Tabelle 1: Parameter des zirkumgalaktischen Modells. Es sind N die Anzahl der Wolken in der jeweiligen Population, $\vec{r}_0$ die Lage der Massezentren der Galaxien in einem galaktozentrischen, kartesischen Koordinatensystem, r_h die halbe radiale Halbwertsbreite der als gaußförmig angenommenen räumlichen Verteilung der CHVCs, v_0 der Betrag der mittleren Raumgeschwindigkeit der CHVCs relativ zum Schwerpunkt der jeweiligen Galaxie, v_h die halbe Halbwertsbreite der als gaußförmig angenommenen Geschwindigkeitsverteilung um den Mittelwert v_0 und $\vec{v}_{\text{rel}}$ der Geschwindigkeitsvektor des Schwerpunkts der jeweiligen Galaxie relativ zum local standard of rest.

	Milchstraße	Andromeda-Galaxie
N	1000	1000
$\vec{r}_0$ (kpc)	(0, 0, 0)	(−377, 624, −288)
$\vec{v}_{\text{rel}}$ (km s ^{−1})	(0, 220, 0)	unbekannt
r_h (kpc)	200	200
v_0 (km s ^{−1})	150	150
v_h (km s ^{−1})	60	60

was dem von der Internationalen Astronomischen Union (IAU) empfohlenen Standardwert entspricht. Außerdem habe ich die Raumgeschwindigkeiten der CHVCs in Radialgeschwindigkeiten im lokalen Bezugssystem (LSR) umgerechnet, die sich direkt mit den beobachteten Radialgeschwindigkeiten vergleichen lassen. Im Fall der M31-Population stellt sich dabei allerdings die Schwierigkeit, daß die wahre Raumgeschwindigkeit der Andromeda-Galaxie unbekannt ist und deshalb nicht von den Geschwindigkeiten der Wolken aus der M31-Population subtrahiert werden kann. Eine adäquate Lösung dieses Problems besteht darin, die Radialgeschwindigkeit der Andromeda-Galaxie als Korrekturwert für die CHVCs der M31-Population zu verwenden, was unter der Annahme einer kompakten Verteilung der CHVCs über eine geringe Winkelausdehnung am Himmel zumindest eine brauchbare Näherung darstellt.

In einem letzten Schritt wurden aus dem Modell alle Wolken entfernt, deren Radialgeschwindigkeiten im *local standard of rest* zwischen -100 km s^{-1} und $+100 \text{ km s}^{-1}$ lagen. Dies umfaßt in guter Näherung den Geschwindigkeitsbereich, in dem auf Grund der Obstruktion durch galaktisches HI-Gas kompakte Hochgeschwindigkeitswolken nicht nachgewiesen werden können. Man kann in diesem Zusammenhang von einer Art *zone of avoidance* in HI sprechen, die zwar im Gegensatz zu ihrem optischen Pendant über den gesamten Himmel reicht, jedoch nur einen stark eingeschränkten Frequenzbereich umfaßt, da es sich bei der 21-cm-Emission des neutralen, atomaren Wasserstoffs um Linienemission handelt.

4.1.1 Resultate des zirkumgalaktischen Modells

Abbildung 5 zeigt in galaktischen Koordinaten die Projektion des zirkumgalaktischen Modells (schwarze Punkte) an den Himmel im Vergleich zur tatsächlich beobachteten Verteilung der CHVCs (rote Punkte). Es fällt zunächst auf, daß das Modell eine Konzentration von CHVCs in Richtung der galaktischen Rotation ($l = 90^\circ$) und in entgegengesetzter Richtung ($l = 270^\circ$) vorhersagt. Die Ursache hierfür ist die zuvor erwähnte Obstruktion durch galaktisches Gas im Geschwindigkeitsbereich von -100 km s^{-1} bis $+100 \text{ km s}^{-1}$. In Richtung $l = 90^\circ$ und $l = 270^\circ$ werden die Geschwindigkeiten der Wolken durch den Beitrag der Rotationsgeschwindigkeit der

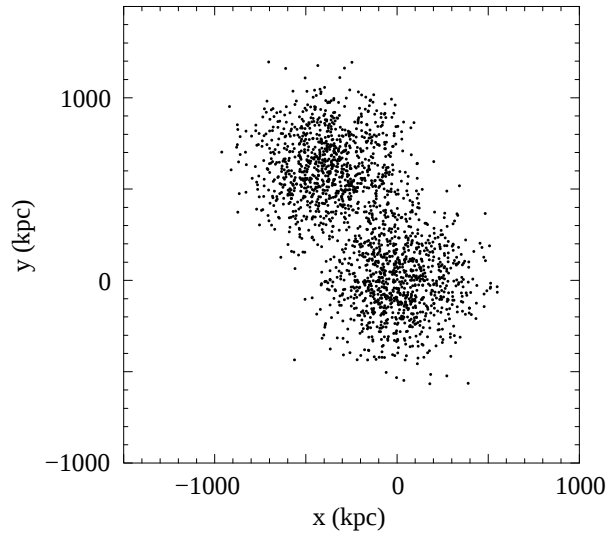


Abbildung 4: Ansicht des zirkumgalaktischen Modells in der xy -Ebene. Die Milchstraße liegt im Ursprung des Koordinatensystems, die Andromeda-Galaxie bei $(x, y) = (-377, 624)$.

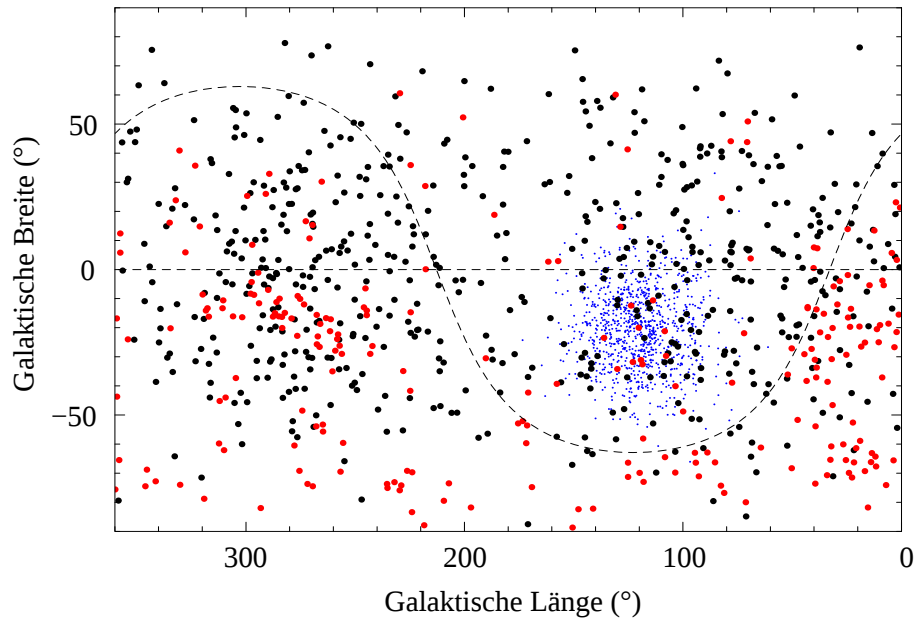


Abbildung 5: Karte der Verteilung der CHVCs in galaktischen Koordinaten. In Schwarz sind die zirkumgalaktischen Modell-CHVCs eingetragen, in Blau die M31-Modell-CHVCs und in Rot die tatsächlich beobachteten Objekte. Die geschwungene, gestrichelte Linie markiert den Himmelsäquator und damit die Grenze zwischen den LDS-Daten im Norden und den HIPASS-Daten im Süden.

Galaxis um $\pm 220 \text{ km s}^{-1}$ verschoben und geraten damit aus dem „kritischen“ Geschwindigkeitsbereich heraus. Sie sind somit am Himmel beobachtbar. In Richtung des galaktischen Zentrums ($l = 0^\circ$) und entgegengesetzt dazu ($l = 180^\circ$) gibt es hingegen keinen Beitrag durch die Rotationsgeschwindigkeit, so daß die CHVCs dort weiterhin um 0 km s^{-1} verteilt sind und deshalb zum größten Teil hinter dem galaktischen Gas verborgen bleiben.

Eine weitere Konzentration von Objekten wird vom Modell in Richtung der Andromeda-Galaxie bei $l = 121.2^\circ$ und $b = -21.6^\circ$ vorhergesagt. In dieser Richtung finden wir die Wolken aus der um M31 verteilten CHVC-Population und erwarten hier eine große Dichte von sehr kleinen und weit entfernten Objekten.

Eine Analyse der Verteilung der tatsächlich am Himmel gefundenen CHVCs zeigt nun, daß in Richtung $l = 270^\circ$ in der Tat eine Konzentration von CHVCs vorliegt, so wie vom Modell prognostiziert. Eine entsprechende Konzentration in Richtung der galaktischen Rotation bei $l = 90^\circ$ fehlt indes. Darüber hinaus findet man eine starke Konzentration von CHVCs in der Nähe des galaktischen Zentrums bei $l = 0^\circ$, wo gemäß dem Modell eigentlich ein Defizit an Objekten zu erwarten wäre.

Eine weitere Diskrepanz ergibt sich aus der starken Nord-Süd-Asymmetrie in der Verteilung der beobachteten CHVCs. Während nördlich von $b = 60^\circ$ nicht eine einzige CHVC gefunden wurde, sieht man andererseits um den galaktischen Südpol herum eine starke Konzentration von Objekten in Gestalt zahlreicher Ansammlungen. Eine solche Asymmetrie zwischen der galaktischen Nord- und Südhemisphäre wird durch das einfache, zirkumgalaktische Modell nicht erklärt.

Um diesen Befund zu interpretieren, ist es notwendig, die unterschiedliche Auflösung und Sensitivität von LDS und HIPASS zu berücksichtigen. Alle am Himmel beobachteten Konzentrationen liegen in dem mit HIPASS abgedeckten Bereich des Himmels, der mit dem sensitiveren und höher auflösenden 65-m-Teleskop in Parkes (Australien) aufgenommen wurde, so daß am Südhimmel eine gegenüber dem Nordhimmel erhöhte Detektionsrate auch zu erwarten ist. Jedoch sind die am Himmel beobachteten Konzentrationen auch innerhalb des homogenen HIPASS-Bereichs gegenüber benachbarten Regionen auffällig, so daß die beobachteten Konzentrationen signifikant sind (de Heij, Braun & Burton 2002b [11]).

Etwas anders verhält es sich mit der in Richtung der Andromeda-Galaxie erwarteten Population. Die vom Modell vorhergesagte starke Konzentration von CHVCs in dieser Richtung spiegelt sich nicht in den Beobachtungsdaten wider. Dieser Befund läßt sich jedoch zwanglos erklären, wenn man berücksichtigt, daß der Bereich mit dem 25-m-Teleskop in Dwingeloo abgedeckt wurde, dessen Sensitivität und Auflösung nicht ausreicht, um CHVCs aus der Andromeda-Population nachzuweisen. Eine kurze Rechnung sei zur Verdeutlichung durchgeführt. Unter der Annahme, daß sich die von mir mit dem 100-m-Teleskop in Effelsberg studierten CHVCs in einer mittleren Entfernung von 150 kpc befinden (vgl. Brüns, Kerp & Pagels 2001 [8], Sternberg, McKee & Wolfire 2002 [26], de Heij, Braun & Burton 2002 [10], Maloney & Putman 2003 [16]), eine mittlere Intensität von 1 K aufweisen und einen typischen Winkeldurchmesser von $30'$ besitzen, muß man für eine CHVC in 750 kpc Entfernung einen Winkeldurchmesser von nur noch $6'$ annehmen. In Anbetracht des Winkelauflösungsvermögens des Dwingeloo-Teleskops von $36'$ HPBW kann man leicht abschätzen, daß ein solches Objekt mit dem LDS nicht mehr nachgewiesen werden kann. Es errechnet sich auf Grund des Winkelauflösungsvermögens und der Geschwindigkeitsauflösung des LDS eine mittlere, zu erwartende Intensität von nur noch 28 mK,

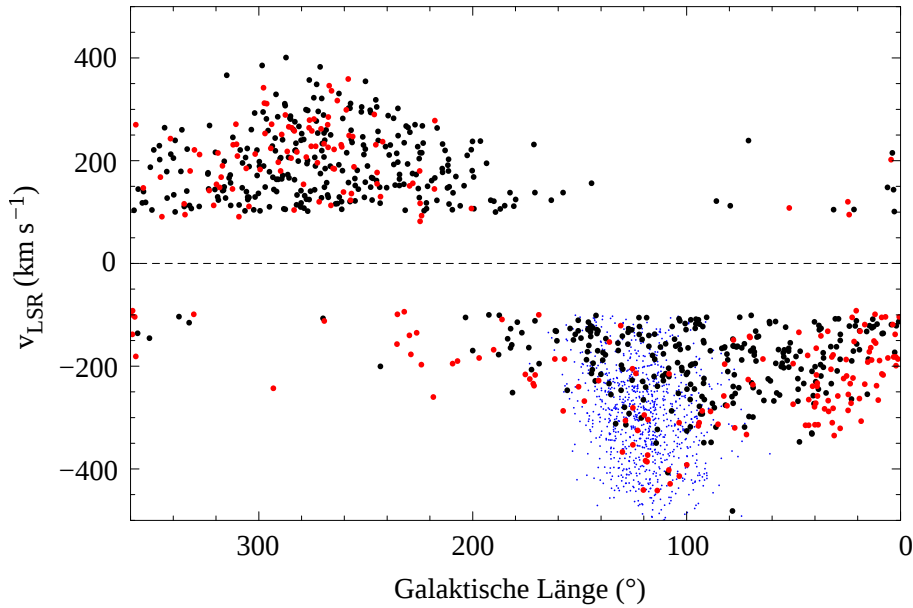


Abbildung 6: Radialgeschwindigkeit im lokalen Bezugssystem (LSR) aufgetragen gegen galaktische Länge. Die roten Punkte markieren die beobachteten CHVCs, die schwarzen Punkte die Wolken aus dem zirkumgalaktischen Modell und die kleinen, blauen Punkte jene aus der modellierten M31-Population.

was um einen Faktor 2.5 unterhalb des mittleren *rms*-Rauschens des LDS von 70 mK liegt! Um die Andromeda-Population von CHVCs beobachten zu können, ist folglich ein sensitiveres, höher auflösendes Teleskop notwendig.

4.1.2 Kinematische Eigenschaften des zirkumgalaktischen Modells

Es ist nun interessant, zu untersuchen, ob die aus dem Modell abgeleiteten, projizierten kinematischen Eigenschaften der CHVCs mit den Beobachtungen in Einklang stehen. Dazu ist in Abbildung 6 die Radialgeschwindigkeit der Wolken im lokalen Bezugssystem (LSR) gegen die galaktische Länge aufgetragen. Wiederum stellen die roten Punkte die Beobachtungsdaten dar. Die schwarzen Punkte geben die Milchstraßen-Population und die blauen Punkte die M31-Population aus dem zirkumgalaktischen Modell wieder.

Zunächst läßt sich eine grobe Übereinstimmung zwischen Modell und Beobachtungen feststellen. Beide Datensätze zeigen einen typischen, sinusförmigen Verlauf, der nichts anderes darstellt als die Projektion der Rotationsgeschwindigkeit der Galaxis in Richtung $l = 90^\circ$. Das zweite auffällige Merkmal ist das weitgehende Fehlen von Wolken mit Geschwindigkeiten zwischen -100 km s^{-1} und $+100 \text{ km s}^{-1}$. Wegen der Obstruktion können möglicherweise dort vorhandene CHVCs nicht gegenüber dem galaktischen HI-Gas diskriminiert werden, und im Modell wurden deshalb alle Wolken aus diesem Bereich entfernt.

Darüber hinaus finden sich in den Beobachtungen jedoch Strukturen, die durch das Modell nicht beschrieben werden. Insbesondere fallen in der am Himmel beobachteten Verteilung der CHVCs im Bereich zwischen 0° und 200° galaktischer Länge zahlreiche Objekte mit zu

Tabelle 2: Parameter des intergalaktischen Modells. Es sind N die Anzahl der Wolken in der Population, $\vec{r}_0$ die Lage des Baryzentrums der Lokalen Gruppe in einem galaktozentrischen, kartesischen Koordinatensystem, r_h der Radius der als sphärisch-symmetrisch angenommenen räumlichen Verteilung der CHVCs, v_0 der Betrag der mittleren Raumgeschwindigkeit der CHVCs relativ zum Baryzentrum der Lokalen Gruppe, v_h die halbe Halbwertsbreite der als gaußförmig angenommenen Geschwindigkeitsverteilung um den Mittelwert v_0 und $\vec{v}_{\text{rel}}$ der Geschwindigkeitsvektor des Baryzentrums der Lokalen Gruppe relativ zum local standard of rest.

intergalaktisches Modell	
N	1000
$\vec{r}_0$ (kpc)	(−189, 312, −144)
$\vec{v}_{\text{rel}}$ (km s ^{−1})	(−61, 260, −35)
r_h (kpc)	1500
v_0 (km s ^{−1})	150
v_h (km s ^{−1})	60

hohen negativen Geschwindigkeiten auf. Eine detailliertere Analyse zeigt, daß diese Objekte mit den beobachteten Konzentrationen um den galaktischen Südpol herum sowie in Richtung des galaktischen Zentrums identifiziert werden können. Diese Ansammlungen treten somit nicht nur räumlich, sondern auch kinematisch gegenüber den übrigen CHVCs hervor. Dies legt die Vermutung nahe, daß es sich hierbei um individuelle Phänomene handelt, die sich aus diesem Grund nicht in das zirkumgalaktische Modell fügen. Als möglicher Ursprung dieser am Himmel beobachteten aber vom Modell nicht vorhergesagten Objekte bietet sich in einigen Fällen der Magellansche Strom an, der in der Nähe des galaktischen Südpols verläuft und sowohl räumlich als auch auf Grund der Radialgeschwindigkeiten zu einigen beobachteten Wolken paßt. In anderen Fällen könnten individuelle Ereignisse zur Bildung der beobachteten Ansammlungen von CHVCs geführt haben. Denkbar wäre zum Beispiel, daß es sich dabei um Gas handelt, das durch die Gezeitenwechselwirkung der Milchstraße oder Staudruck-Prozesse (*ram pressure*) durch das Gas des galaktischen Halos aus nahen oder möglicherweise bereits akkretierten Zwerggalaxien herausgerissen wurde.

4.2 Intergalaktisches Modell

Ein von anderen Autoren diskutiertes und favorisiertes Modell plaziert die CHVCs nicht um die großen Galaxien herum, sondern über den gesamten intergalaktischen Raum der Lokalen Gruppe hinweg (Blitz et al. 1999 [7], Braun & Burton 1999 [2]). In diesem Fall wären CHVCs kinematisch an das Schwerpunktsystem der Lokalen Gruppe gebunden und sollten sich sowohl in ihrer räumlichen Verteilung als auch in ihrer Geschwindigkeitsverteilung signifikant von einer zirkumgalaktischen CHVC-Population unterscheiden lassen.

Eine solche intergalaktische CHVC-Population habe ich ebenfalls im Rechner modelliert, um ihre Eigenschaften mit denen der beobachteten CHVC-Population sowie des zuvor diskutierten zirkumgalaktischen Modells zu vergleichen. Dazu habe ich 1000 CHVCs in einer sphärischen Population mit $r_h = 1500$ kpc Radius um das Baryzentrum der Lokalen Gruppe herum verteilt, wobei die Objekte diesmal homogen über das Volumen verteilt sind. Da bezüglich der Massen der

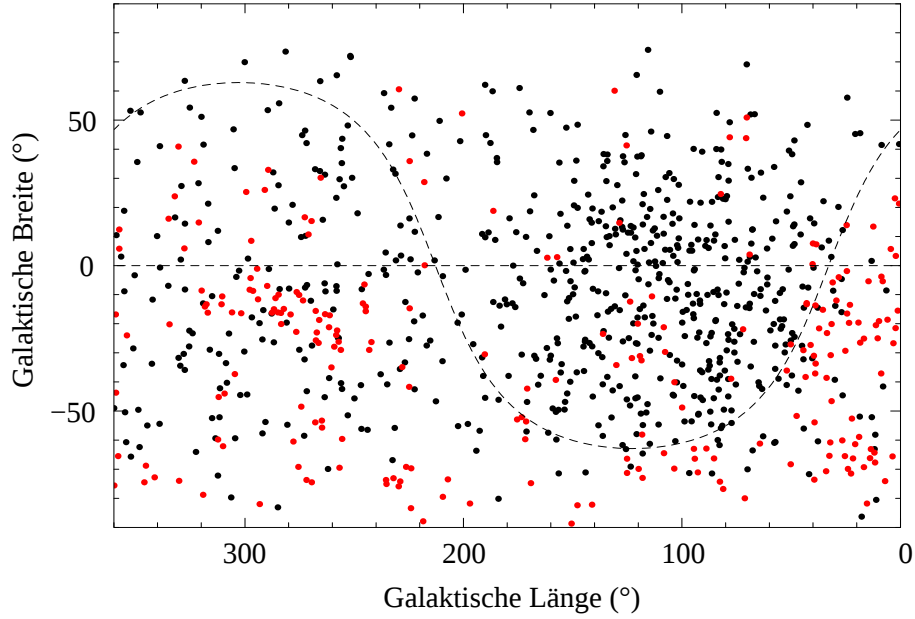


Abbildung 7: Karte der Verteilung der CHVCs in galaktischen Koordinaten nach dem intergalaktischen Modell. In Schwarz sind die Modell-CHVCs eingetragen, in Rot die tatsächlich beobachteten Objekte. Die geschwungene, gestrichelte Linie markiert den Himmelsäquator und damit die Grenze zwischen den LDS-Daten im Norden und den HIPASS-Daten im Süden.

Milchstraße und der Andromeda-Galaxie nur sehr uneinheitliche und widersprüchliche Angaben vorliegen, habe ich beiden Galaxien die gleiche Masse zugewiesen und die Massen aller anderen Objekte in der Lokalen Gruppe vernachlässigt. Unter dieser Annahme liegt der Schwerpunkt exakt auf halber Strecke zwischen der Milchstraße und M31, was für den hier angestrebten Zweck eine hinreichende Näherung darstellt.

Wiederum wurde jeder CHVC eine zufällige Geschwindigkeit zugewiesen, wobei die Richtungen gleichverteilt und die Beträge um einen Mittelwert $v_0 = 150 \text{ km s}^{-1}$ gaußförmig verteilt sind. Zur Umrechnung der Geschwindigkeiten in das lokale Bezugssystem (LSR) habe ich die Umrechnungsformel nach Braun & Burton 1999 [2] verwandt. Wie bereits beim zirkumgalaktischen Modell habe ich schlußendlich alle Wolken aus dem Modell entfernt, deren Geschwindigkeiten im lokalen Bezugssystem zwischen -100 und $+100 \text{ km s}^{-1}$ lagen, da diese auf Grund der Obstruktion durch galaktisches Gas nicht nachweisbar sind. In Tabelle 2 sind alle Parameter des Modells noch einmal zusammengestellt.

4.2.1 Resultate des intergalaktischen Modells

Abbildung 7 zeigt in galaktischen Koordinaten die Projektion des intergalaktischen Modells (schwarze Punkte) an den Himmel im Vergleich zur tatsächlich beobachteten Verteilung der CHVCs (rote Punkte). Auch bei diesem Modell fallen zunächst zwei Konzentrationen von CHVCs bei $l \approx 100^\circ$ und $l \approx 300^\circ$ auf, die ähnlich dem zirkumgalaktischen Modell durch das Entfernen aller Wolken mit Radialgeschwindigkeiten im Bereich von -100 bis $+100 \text{ km s}^{-1}$

entstehen. Auch hier ist maßgeblich die Geschwindigkeitskomponente der galaktischen Rotation für diesen Effekt verantwortlich, so daß die Konzentrationen in beinahe denselben Richtungen wie beim zirkumgalaktischen Modell auftreten.

Darüber hinaus sagt das Modell in Richtung des Baryzentrums der Lokalen Gruppe – die in diesem Fall mit der Richtung der Andromeda-Galaxie übereinstimmt – eine besonders starke Häufung von CHVCs vorher, da der Großteil der Objekte in dieser Richtung verteilt ist. Im Gegensatz zum zirkumgalaktischen Modell, in dem die CHVCs sich in der unmittelbaren Nähe von M31 aufhalten, sind die Objekte hier jedoch weit weniger stark konzentriert und über beinahe eine gesamte Hemisphäre verteilt, was in Bezug auf die räumliche Verteilung der CHVCs am Himmel den wesentlichen Unterschied zwischen dem zirkumgalaktischen und dem intergalaktischen Modell ausmacht.

Wiederum muß bemerkt werden, daß die tatsächliche Verteilung der am Himmel bislang gefundenen CHVCs (rote Punkte in Abbildung 7) den Vorhersagen auch des intergalaktischen Modells (schwarze Punkte) nicht entspricht. Es findet sich in den Beobachtungsdaten keine Konzentration in Richtung des Baryzentrums der Lokalen Gruppe, wobei aber an dieser Stelle erneut auf den Sachverhalt hingewiesen sei, daß diese Region des Himmels durch den Leiden/Dwingeloo-Survey abgedeckt wurde, der nicht die geeignete Winkelauflösung und Sensitivität besitzt, um weiter entfernte CHVCs nachzuweisen.

Auch die am Himmel beobachteten Ansammlungen von CHVCs in Richtung des galaktischen Zentrums und in der Umgebung des galaktischen Südpols werden vom intergalaktischen Modell nicht beschrieben. Dasselbe gilt für die in den Beobachtungsdaten vorliegende Nord-Süd-Asymmetrie, auf die zuvor bereits eingegangen wurde, so daß an dieser Stelle auf die vorangegangenen Ausführungen im Zusammenhang mit dem zirkumgalaktischen Modell verwiesen sei.

4.2.2 *Kinematische Eigenschaften des intergalaktischen Modells*

Wiederum möchte ich überprüfen, ob die aus dem Modell abgeleiteten, projizierten kinematischen Eigenschaften der CHVCs mit den Beobachtungen in Einklang stehen. Dazu ist in Abbildung 8 die Radialgeschwindigkeit der Wolken im lokalen Bezugssystem (LSR) gegen die galaktische Länge aufgetragen. Wiederum stellen die roten Punkte die Beobachtungsdaten dar, und die schwarzen Punkte geben die CHVCs aus dem intergalaktischen Modell wieder.

Es fällt zunächst wieder der in etwa sinusförmige Verlauf sowohl der Daten als auch der Modell-CHVCs auf, der die Projektion der Geschwindigkeiten der galaktischen Rotation und der Bewegung der Milchstraße relativ zum Baryzentrum der Lokalen Gruppe widerspiegelt. Da sich beide Effekte im wesentlichen konstruktiv überlagern, erreichen die vom intergalaktischen Modell prognostizierten Geschwindigkeiten etwas höhere Werte als im zirkumgalaktischen Modell, was zur Folge hat, daß die in Rot dargestellten, am Himmel beobachteten CHVCs mit relativ hohen negativen Geschwindigkeiten zwischen etwa 0° und 200° galaktischer Länge diesmal gut durch die in Schwarz eingetragenen Modell-CHVCs abgedeckt werden. Überhaupt ist die Übereinstimmung zwischen Modell und Beobachtung für die intergalaktische Population auf den ersten Blick deutlich besser als im zirkumgalaktischen Fall.

Doch der Schein trügt, denn die am Himmel beobachteten CHVCs auffallend hoher Geschwindigkeit befinden sich zum überwiegenden Teil in der Umgebung des galaktischen Südpols,

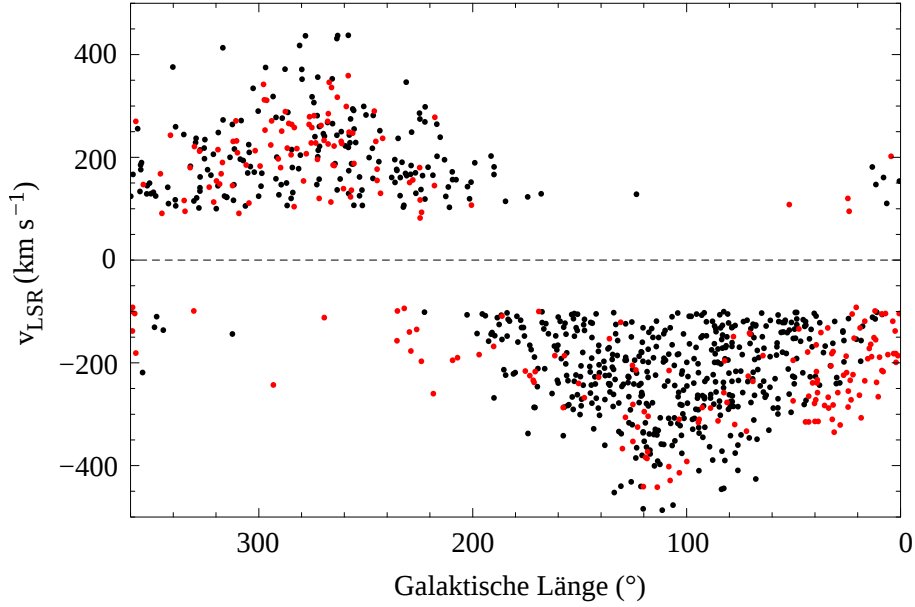


Abbildung 8: Radialgeschwindigkeit im lokalen Bezugssystem (LSR) aufgetragen gegen galaktische Länge. Die roten Punkte markieren die beobachteten CHVCs, die schwarzen Punkte die Wolken aus dem intergalaktischen Modell.

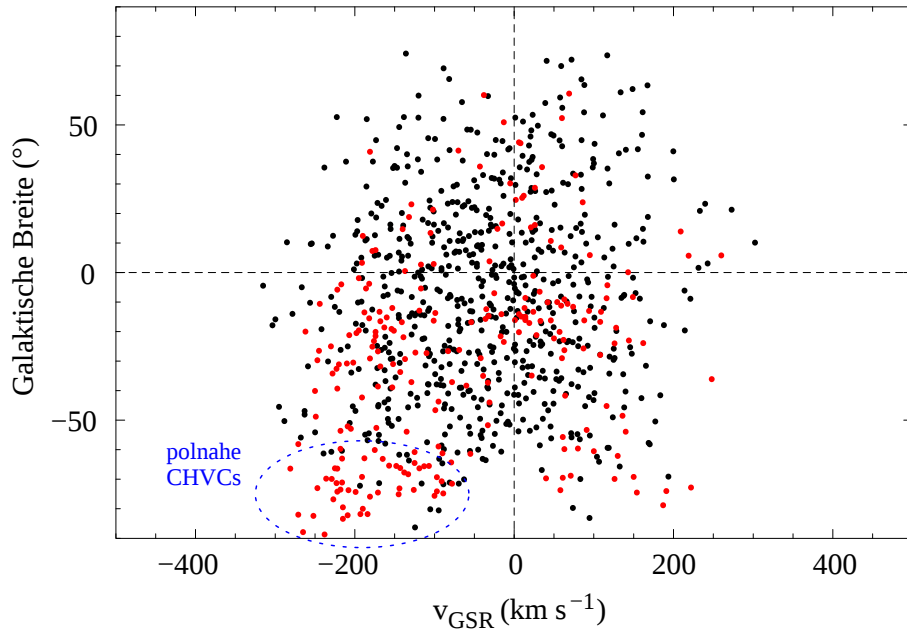


Abbildung 9: Radialgeschwindigkeit im galaktischen Bezugssystem (GSR) aufgetragen gegen die galaktische Breite. Die roten Punkte markieren die beobachteten CHVCs, die schwarzen Punkte die Wolken aus dem intergalaktischen Modell. Die punktierte Ellipse markiert den Bereich, in dem sich die polnahen CHVCs hoher, negativer Radialgeschwindigkeit aufhalten, die durch das Modell nicht erklärt werden können.

wo die Beiträge der galaktischen Rotation und der Relativbewegung der gesamten Milchstraße nahezu aufgehoben sind, so daß die besagten Ansammlungen sich kinematisch auch in das intergalaktische Modell nicht fügen. Die Situation ist in Abbildung 9 dargestellt, wo für die Objekte aus dem intergalaktischen Modell (schwarz) und die tatsächlich beobachteten CHVCs (rot) die Radialgeschwindigkeit im galaktischen Bezugssystem gegen die galaktische Breite aufgetragen ist. Gleiches gilt für die Konzentration in Richtung des galaktischen Zentrums, die in beiden diskutierten Modellen keine Entsprechung findet.

4.3 Vergleich der beiden Modelle

Im folgenden möchte ich die Eigenschaften des zirkumgalaktischen und des intergalaktischen Modells untereinander und mit den Beobachtungsdaten vergleichen, um möglicherweise aus den Modellen Rückschlüsse auf die wahre Verteilung der beobachteten CHVC-Population ziehen zu können.

Zunächst finden die von beiden Modellen prognostizierten Konzentrationen – ungefähr in Richtung der galaktischen Rotation und entgegengesetzt dazu – kein Pendant in den Daten. Allenfalls die am Himmel beobachtete Ansammlung in Richtung $l \approx 270^\circ$ würde mit einer dieser Konzentrationen korrespondieren, ist jedoch ungewöhnlich klein und kompakt. Die Nähe zur Großen Magellanschen Wolke läßt es stattdessen möglich erscheinen, daß diese beobachteten Objekte mit dem Magellanschen System assoziiert sind. Die andere Konzentration in den Modellen, die sowohl durch die Kinematik der Galaxis als auch durch die Verteilung der CHVCs im Raum hervorgerufen wird, findet in den Daten keine Entsprechung. Zwar gibt es eine schwache Ansammlung beobachteter CHVCs in ungefähr dieser Richtung, jedoch sind diese nach Beobachtungen von Christian Brüns (Dissertation 2003) sehr ausgedehnt und komplex strukturiert, so daß es sich nicht um die in Richtung der Andromeda-Galaxie oder des Baryzentriums erwarteten CHVCs handeln kann. Auf Grund der räumlichen und kinematischen Verteilung (die Geschwindigkeiten dieser Objekte liegen um -400 km s^{-1}) können diese CHVCs eher dem Magellanschen Strom zugeordnet werden, der ungefähr an dieser Stelle nach Norden hin ausläuft. Es sei jedoch noch einmal darauf verwiesen, daß dieser Bereich des Himmels durch den Leiden/Dwingeloo-Survey abgedeckt wurde, der eine geringe Auflösung und Sensitivität besitzt und weiter entfernte CHVCs unter Umständen nicht mehr detektieren kann.

Darüber hinaus werden die beobachteten Ansammlungen am galaktischen Südpol und in Richtung des galaktischen Zentrums von keinem der beiden Modelle erklärt. Möglicherweise handelt es sich hierbei um individuelle Phänomene, die durch ein allgemeines Modell nicht beschrieben werden können. Allen diesen in Richtung des Südpols und des galaktischen Zentrums beobachteten Ansammlungen gemein ist eine relativ hohe negative Radialgeschwindigkeit, die nicht als Projektion der galaktischen Rotationsgeschwindigkeit aufgefaßt werden kann, da sowohl in Richtung des galaktischen Zentrums als auch in Richtung des Südpols keine Komponente der galaktischen Rotation vorhanden ist. Die hohen Einfallgeschwindigkeiten sind in Bezug auf ein galaktozentrisches Bezugssystem also durchaus real, so daß das Vorhandensein dieser Strukturen durch ein einfaches Modell (sei es zirkum- oder intergalaktisch) sowohl räumlich als auch kinematisch grundsätzlich nicht zu erklären ist.

Im Zusammenhang mit dem Auffinden eines möglichen Ursprungs der am Himmel beobachteten Ansammlungen ist zu beachten, daß in der Umgebung des galaktischen Südpols prinzipiell

Konfusion mit dem Magellanschen Strom besteht, der in diesem Bereich zum Teil hohe negative Radialgeschwindigkeiten aufweist und nach den Untersuchungen von Christian Brüns (Dissertation 2003) besonders in den Außenbereichen stark fragmentiert sein kann. Aus diesem Grund wurden kleine, kompakte Fragmente des Magellanschen Stroms möglicherweise als kompakte Hochgeschwindigkeitswolken klassifiziert und fanden Einzug in den HIPASS-Katalog kompakter Hochgeschwindigkeitswolken von Putman et al. 2002 [22]. Darüber hinaus könnte auch die nahe Sculptor-Galaxiengruppe Ursprung einiger CHVCs in dieser Region sein. Dies wäre mit einigen der beobachteten, negativen Radialgeschwindigkeiten in dieser Richtung durchaus vereinbar.

Aus diesen Bemerkungen ist ersichtlich, daß die vorhandenen CHVC-Kataloge von de Heij, Braun & Burton 2002 [10] für den Nordhimmel und von Putman et al. 2002 [22] für den Südhimmel eine wahrscheinlich inhomogene Datenquelle darstellen, die es nicht gestattet, die Natur und den Ursprung der CHVCs ausschließlich anhand ihrer kollektiven räumlichen und kinematischen Eigenschaften zu erklären. Einen Ausweg aus diesem Dilemma bietet möglicherweise das Auffinden und Kartieren der in der Umgebung der Andromeda-Galaxie erwarteten Population kompakter Hochgeschwindigkeitswolken. Da die Entfernung der Andromeda-Galaxie gut bekannt ist, lassen sich hier auf statistischem Wege die physikalischen Eigenschaften der CHVCs sowie deren räumliche und kinematische Verteilung unmittelbar ableiten. Nicht zuletzt blicken wir von außen auf die CHVC-Population von M31 und sitzen nicht, wie im Fall der Milchstraßen-Population, inmitten der zu untersuchenden Objekte. Erst dadurch wird eine genaue Untersuchung der Verteilung der CHVCs um M31 herum überhaupt ermöglicht.

Insbesondere gestattet die genaue Untersuchung der M31-CHVC-Population eine direkte Verifikation der von den kosmologischen Λ CDM-Modellen vorhergesagten Eigenschaften der sogenannten Dunkle-Materie-Halos (*Dark-Matter halos*), mit denen die kompakten Hochgeschwindigkeitswolken in der Lokalen Gruppe identifiziert werden. Sowohl die Anzahl der Dunkle-Materie-Halos als auch ihre Verteilung und ihr Massenspektrum lassen sich aus der Beobachtung der M31-CHVCs ableiten, so daß uns hiermit ein mächtiges Werkzeug an die Hand gegeben ist, um die derzeitigen kosmologischen Modelle durch Beobachtungen zu stützen.

5 Effelsberg-Durchmusterung von CHVCs

Ausgangspunkt meiner Arbeit ist eine Durchmusterung von 41 kompakten Hochgeschwindigkeitswolken in der 21-cm-Linienemission des neutralen, atomaren Wasserstoffs mit dem 100-m-Teleskop des Max-Planck-Instituts für Radioastronomie in Effelsberg. Die Daten wurden im Rahmen des Projekts 164-01 von Januar bis April 2002 durch Jürgen Kerp aufgenommen. Die Positionen dieser 41 Objekte waren dem CHVC-Katalog entnommen worden, der durch Braun & Burton 1999 [2] auf der Grundlage des Leiden/Dwingeloo-Surveys von Hartmann & Burton 1997 [13] erstellt worden war. Ursprünglich waren diese Beobachtungen zur Festlegung der genauen Position (im Rahmen der Auflösung des Effelsberg-Teleskops von $9'$ HPBW) der CHVCs durchgeführt worden, um anschließend nach einer stellaren Population in ausgewählten CHVCs zu suchen (Hopp, Schulte-Ladbeck & Kerp 2003 [14]).

Durch die vergleichsweise hohe Winkelauflösung des Effelsberg-Teleskops war mit dieser Durchmusterung jedoch erstmals eine große Auswahl von CHVCs in weit größerem Detail beobachtet worden, als das bis dahin mit den vorhandenen Daten aus dem Leiden/Dwingeloo-Survey (Hartmann & Burton 1997 [13]) der Fall war, die mit dem 25-m-Dwingeloo-Teleskop ($36'$ HPBW) aufgenommen worden waren. Die von Braun & Burton 1999 [2] getroffenen Aussagen über die physikalischen Bedingungen in CHVCs beruhten auf diesen praktisch nicht aufgelösten Leiden/Dwingeloo-Daten, so daß mit den nun aufgelösten Effelsberg-Beobachtungen die bisherigen Erkenntnisse einer kritischen Überprüfung unterzogen werden konnten.

Meine Aufgabe sollte es sein, die aufgenommenen Rohdaten zunächst zu reduzieren und zu sichten, um dann in einem weiteren Schritt die physikalischen Eigenschaften der beobachteten Auswahl kompakter Hochgeschwindigkeitswolken zu extrahieren. In diesem Kapitel möchte ich die Schritte von der Aufnahme der Daten über die Datenreduktion bis hin zur Auswertung erläutern. Die Ergebnisse dieser Auswertung und die Schlußfolgerungen daraus werden dann im darauffolgenden Kapitel 6 vorgestellt.

5.1 Aufnahme der Daten

Für die meisten Objekte wurde eine Karte von 11×11 Punkten auf einem $9'$ -Raster gemessen, zentriert um die von Braun & Burton 1999 [2] angegebene Zentralposition. In wenigen Fällen stand nicht mehr genügend Beobachtungszeit zur Verfügung, um eine vollständige Kartierung durchzuführen, so daß in diesen Fällen ein kleinerer Bereich um die Wolke herum aufgenommen wurde. Die einzelnen Spektren wurden im sogenannten *Frequency-Switch*-Modus beobachtet, der in Anhang B beschrieben wird. Die Methode funktioniert in Effelsberg gut und liefert Spektren mit sehr glatten und einfach zu korrigierenden Basislinien. Jedes Spektrum wurde mit 30 s totaler Integrationszeit (also je 15 s für Signal- und Referenzmessung) und unter Verwendung des 1024-Kanal-Autokorrektors aufgenommen, der auf zwei spektrale Bereiche unterschiedlicher Polarisation mit je 512 Kanälen aufgeteilt wurde. Die zu rund 3 MHz gewählte Bandbreite ergab eine Geschwindigkeitsabdeckung von ungefähr 650 km s^{-1} bei einer aus der zur Verfügung stehenden Kanalzahl resultierenden Geschwindigkeitsauflösung von etwa 1.3 km s^{-1} .

Für einige interessante Objekte wurde zusätzlich eine weitere Karte mit denselben Einstellungen aufgenommen, die jedoch in Rektaszension und Deklination um je $4.5'$ um die zuvor gemessenen Positionen versetzt war, so daß eine bessere Abtastung des Objekts am Himmel

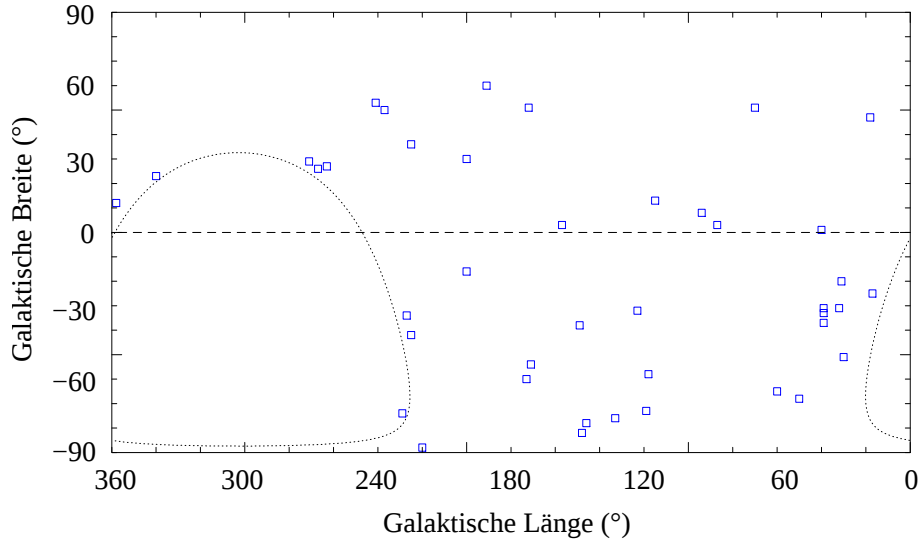


Abbildung 10: Positionen der 41 kartierten CHVCs in galaktischen Koordinaten. Man beachte den von Mitteleuropa aus nicht zugänglichen Bereich des Südhimmels im linken unteren Quadranten (gestrichelte Kurve: $\delta = -30^\circ$).

erzielt werden konnte. Eine detaillierte Auflistung der beobachteten Objekte und einiger ihrer extrahierten physikalischen Eigenschaften findet sich in Tabelle 3. Die Positionen der kartierten Wolken am Himmel in galaktischen Koordinaten sind in Abbildung 10 wiedergegeben.

5.2 Reduktion der Daten

Die erste Aufgabe war es, die Reduktion der HI-Spektren der 41 kartierten CHVCs vorzunehmen, um mit den Vorgängen und Problemen der Datenreduktion vertraut zu werden. Da die Daten aus Effelsberg im Sun-Format vorlagen, in Bonn aber auf Linux-Rechnern reduziert und ausgewertet werden mußten, war zunächst eine **Konvertierung der Daten** notwendig, die mit Hilfe des Programms **draw2** durchgeführt wurde.

Als nächstes mußten die einzelnen Spektren **in Intensität kalibriert** werden. Zu diesem Zweck waren zu Beginn und Ende einer Beobachtungsperiode 21-cm-Linienspektren der S7-Eichquelle aufgenommen worden, die sich für diesen Zweck anbietet, weil sie von Effelsberg aus gesehen zirkumpolar und somit ständig beobachtbar ist. Bei länger andauernden Beobachtungen war zusätzlich auch in der Mitte der Beobachtungsreihe noch eine S7-Beobachtung eingeschoben worden, um die Fehler bei der Kalibration gering zu halten.

Bei der S7-Quelle handelt es sich nicht um ein individuelles Objekt am Himmel, sondern um einen Bereich mit starker und über eine große Fläche am Himmel sehr homogener 21-cm-Emission der Milchstraße. Dadurch ist gewährleistet, daß die S7-Quelle für Teleskope verschiedener Größenordnung eine geeignete Eichquelle darstellt, die vergleichbare Intensitäten aufweist. Hilfreich bei der S7-Kalibration war das von Peter Kalberla entwickelte Programm **nautocal**, das die Daten zunächst nach S7-Messungen durchmusterte und aus den gefundenen Beobachtungen einen mittleren Korrekturfaktor für die Intensität der Spektren ermittelte. Das Programm

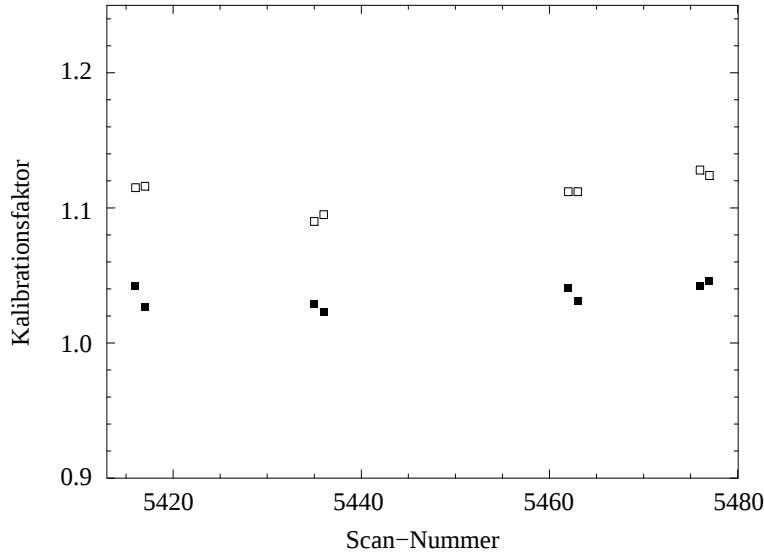


Abbildung 11: Die Kalibrationsergebnisse vom 23. 02. 2002 als Beispiel für die Qualität der S7-Kalibration. Jeder Datenpunkt stellt eine einzelne S7-Messung in der 21-cm-Linienstrahlung dar. Die offenen und gefüllten Quadrate repräsentieren die beiden gemessenen Polarisationen. Man erkennt, daß der Kalibrationsfaktor im Laufe der Zeit leicht schwankt, jedoch liegt der statistische Fehler der Kalibration in diesem Beispiel bei nur etwa 1%.

geht dabei dergestalt vor, daß es zunächst unter Berücksichtigung der bekannten Ausdehnung der Emission im Spektrum eine Korrektur der Basislinie durch Anpassung eines Polynoms dritter Ordnung vornimmt. Im Anschluß wird der integrierte Fluß einer bestimmten, auffälligen Gaskomponente des Spektrums ermittelt und daraus anhand des bekannten Profils der betrachteten Komponente deren Intensität abgeleitet. Der Vergleich der gefundenen Intensität mit dem im Programm gespeicherten Soll-Wert liefert schließlich einen Korrekturfaktor für die Intensität, mit dem alle Kanäle der zu eichenden Spektren multipliziert werden. Der typische statistische Fehler (Standardabweichung vom Mittelwert) der verschiedenen gefundenen Korrekturfaktoren während eines Beobachtungszyklus lag im übrigen bei etwa 1–3% ohne die Berücksichtigung möglicherweise noch vorhandener systematischer Fehlerquellen. In Abbildung 11 sind die Kalibrationsdaten vom 23. Februar 2002 als Beispiel dargestellt. Die erhaltenen Korrekturfaktoren wurden als nächstes dem von Peter Kalberla entwickelten Programm `calib` als Eingabeparameter übergeben, das daraufhin durch Multiplikation aller Kanäle mit dem aus den S7-Messungen ermittelten Korrekturwert die Kalibration aller Spektren des betreffenden Datensatzes auf Antennentemperatur durchführte.

Der nächste Schritt war die **Streustrahlungskorrektur**. Die sogenannte Streustrahlung tritt auf, wenn Radiostrahlung aus dem Weltall direkt oder nach Reflexion am Boden oder an Strukturen des Teleskops von den Nebenkeulen der Antenne aufgenommen und vom Empfänger registriert wird. In der Folge würde man aus der Richtung, in die das Teleskop schaut, scheinbar mehr Strahlung empfangen als tatsächlich aus dieser Richtung auf das Teleskop einfällt, so daß die gemessenen Intensitäten überschätzt würden. Das Streustrahlungsproblem ist vor allem bei Beobachtungen des Milchstraßengases in Richtung hoher galaktischer Breiten von Bedeutung, weil die von der Hauptkeule registrierte Emission hier vergleichsweise schwach ist,

während die Nebenkeulen mitunter die starke Strahlung aus Richtung der Milchstraßenebene einfangen. In solchen Fällen kann das durch Streustrahlung eingetragene Signal durchaus von derselben Größenordnung sein wie das eigentliche astronomische Signal. Falls die Streustrahlung nicht modelliert und von den gemessenen Spektren abgezogen werden könnte, wäre eine starke Überschätzung der gemessenen Säulendichten des Milchstraßengases die Folge.

Bei der Beobachtung kompakter Hochgeschwindigkeitswolken hingegen ist die Streustrahlung in den meisten Fällen bedeutungslos, da die Spektrallinien der CHVCs wegen der hohen Radialgeschwindigkeiten abseits der galaktischen HI-Emission liegen. Deshalb ist eine Kontamination des Signals durch den Eintrag galaktischer Strahlung, die Geschwindigkeiten um 0 km s^{-1} aufweist, nicht möglich. Allenfalls jene CHVCs in der vorliegenden Durchmusterung, die Radialgeschwindigkeiten von $|v_{\text{LSR}}| \lesssim 150 \text{ km s}^{-1}$ besitzen, könnten von Streustrahlung betroffen sein. Dennoch führte ich für alle Objekte eine Streustrahlungskorrektur mit Hilfe des von Peter Kalberla entwickelten Programms `nstrayof` durch, zumal damit gleichzeitig eine Normierung der Spektren bezüglich des Hauptkeulen-Wirkungsgrads (*main beam efficiency*) der Antenne erfolgte.

Im Anschluß waren alle Spektren auf die sogenannte *brightness temperature* T_{B} kalibriert und konnten der weiteren Auswertung zugeführt werden. Da dies mit Hilfe des Programms `class` aus dem GILDAS-Programmpaket (*Grenoble Image and Line Data Analysis Software*) erfolgen sollte, konvertierte ich schließlich die Spektren noch mit Hilfe des Programms `drawclass` vom `draw`-Format in das `class`-Format. Für die weitere Auswertung und Darstellung der fertig kalibrierten Spektren verwandte ich das Programm `class`, bei dem es sich um einen Bestandteil des GILDAS-Programmpakets handelt. Mit Hilfe von `class` lassen sich die einzelnen Spektren umfangreich bearbeiten, wobei die Fähigkeiten des Programms von der Auswertung der 21-cm-Linien über eine Gaußkurven-Anpassung bis hin zur Kombination verschiedener Spektren eines Objekts zu einer Gesamtkarte reichen.

Im nächsten Schritt faßte ich alle vorhandenen Spektren, die von einer CHVC vorlagen, in einer gemeinsamen Datei zusammen. An jeder Position der sich daraus ergebenden Gesamtkarte des Objekts lagen nun jedoch mehrere Spektren vor. Dies war zum einen dadurch gegeben, daß vom Teleskop für jede Position bereits zwei Spektren unterschiedlicher Polarisierung aufgenommen worden waren. Darüber hinaus waren einzelne Positionen mitunter mehrfach gemessen worden. So war zum Beispiel die Zentralposition der Karten zu Beginn jeder Messung einmal beobachtet worden, um den Pegel des Autokorrelators einzustellen. Deshalb lagen für alle Objekte von der Zentralposition mindestens 2 Beobachtungen und somit 4 Spektren vor. Da ich an der Polarisierung der Strahlung nicht interessiert war, konnte ich **alle Spektren an einer Position mitteln**, wodurch das *rms*-Rauschen der Basislinie deutlich reduziert werden konnte. Diese Mittelung wurde mit einem automatisierten `class`-Makro durchgeführt, das mir durch Jürgen Kerp zur Verfügung gestellt worden war. In der Folge erhielt ich zu jedem Objekt eine Karte von im allgemeinen 121 Spektren (11×11 Meßpunkte).

Diese Spektren lagen jedoch noch immer nicht in einer auswertbaren Form vor, da die Basislinien der Spektren auf Grund der Gestalt des Bandpasses des Empfängers noch nicht eben und richtig normiert waren. Um eine **Ebnung der Basislinien** zu erreichen, nimmt man an, ihre Form lasse sich durch ein einfaches Polynom niedriger Ordnung beschreiben. Indem man ein solches Polynom mit Hilfe der Methode der kleinsten Quadrate an die Spektren anpaßt und anschließend davon subtrahiert, erhält man die gewünschte ebene und auf null geeichte Basislinie. Für diesen Vorgang stellt `class` bereits umfangreiche Befehle bereit.

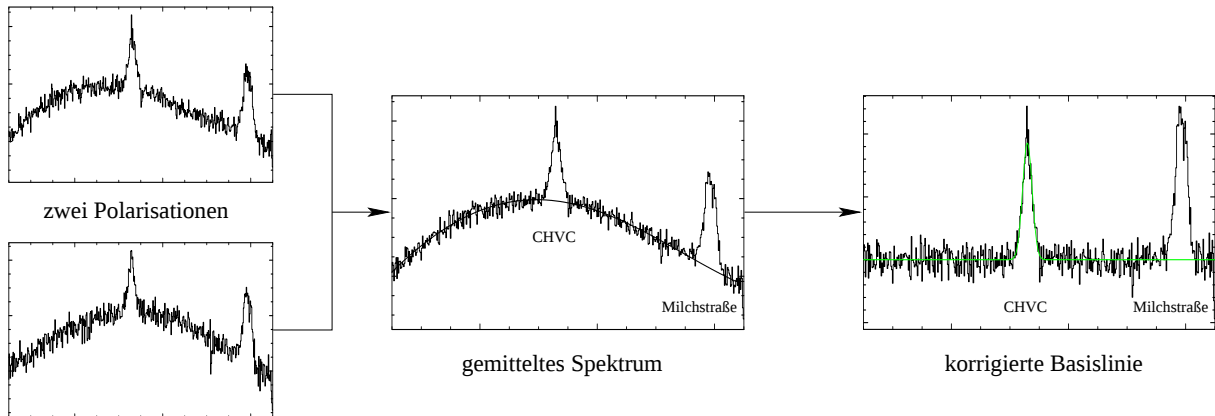


Abbildung 12: Skizze der weiteren Auswertung der kalibrierten Spektren mit `class` am Beispiel der CHVC 24. Zunächst werden beide Polarisationen einer Position gemittelt. An die Basislinie des gemittelten Spektrums wird dann ein Polynom (schwarz) angepaßt und abgezogen, so daß man eine ebene Basislinie erhält. Dann kann eine Gaußkurve (grün) an die Spektrallinie angepaßt werden, aus der die physikalischen Parameter der Wolke wie Radialgeschwindigkeit oder Säulendichte abgeleitet werden können.

5.3 Auswertung der Spektren

An die so korrigierten Spektren kann danach eine **Gaußkurve** an die Spektrallinie der CHVC angepaßt werden, aus deren Parametern sich anschließend die physikalischen Eigenschaften der Wolke ablesen lassen. Dazu zählt die Radialgeschwindigkeit im lokalen Bezugssystem (LSR), die sich unmittelbar aus der Position des Maximums der Gaußkurve ergibt, sowie die Säulendichte des neutralen, atomaren Wasserstoffs, die sich aus der Fläche unter der Gaußkurve ableiten läßt. In Abbildung 12 ist der gesamte Auswertungsvorgang mit `class` anhand eines Beispiels noch einmal zur Übersicht skizziert.

Natürlich ist die Annahme, das Linienprofil lasse sich durch eine einfache Gaußkurve beschreiben, nur eine Näherung, die von Fall zu Fall mehr oder weniger gut gilt. Oftmals zeigen Spektrallinien kompakter Hochgeschwindigkeitswolken ein komplexeres Profil, das durch Superposition verschiedener Komponenten entsteht. So kommt es vor, daß Gasanteile leicht unterschiedlicher Radialgeschwindigkeiten entlang der Sichtlinie auftreten, deren Superposition eine breiteres, komplexeres Linienprofil erzeugt. Andere CHVCs zeigen eine Zwei-Phasen-Struktur in ihrem Spektrum, indem das Linienprofil aus einer schmalen Gaußkomponente, die das Vorhandensein kalten Gases anzeigt, und einer breiten Gaußkomponente, die von einer warmen Gas-komponente herrührt, zusammengesetzt erscheint. In solchen Fällen ist zwar die Näherung der Linienprofile durch eine Gaußkurve nicht sehr exakt aber dennoch hinreichend, um die statistischen Parameter der Emission wie mittlere Position (und damit Geschwindigkeit) im Spektrum oder mittlere Breite aus den Eigenschaften der angepaßten Gaußfunktion zu ermitteln.

6 Ergebnisse der Effelsberg-Durchmusterung

Nachdem ich in Kapitel 5 die bei der Reduktion und Auswertung der Daten der 41 kartierten CHVCs notwendigen Schritte motiviert und erläutert habe, möchte ich in diesem Kapitel die Ergebnisse dieser Auswertung vorstellen. Nach allgemeinen Bemerkungen zu den Daten werde ich die generellen physikalischen Eigenschaften der beobachteten Objekte bestimmen und daraus Schlüsse bezüglich der Stabilität kompakter Hochgeschwindigkeitswolken ziehen können. Diese Ergebnisse werden einen indirekten Hinweis auf ein intergalaktisches Medium liefern, in das die CHVCs eingebettet sind. Ich werde daran anschließend erläutern, daß mit einer tieferen Nachbeobachtung ausgewählter CHVCs mit dem Effelsberg-Teleskop ein Nachweis dieses umgebenden Mediums gelingen kann, und Auswahlkriterien für zur Nachbeobachtung geeignete Wolken aufstellen.

Vorab noch eine Bemerkung zur Nomenklatur der Objekte: Aus dem Katalog von 66 CHVCs von Braun & Burton 1999 [2] wurden zunächst alle Objekte ausgewählt, die noch nicht detaillierter kartiert worden waren. Diese Wolken wurden dann der Reihe nach durchnummeriert, und es wurden mir die 41 Objekte davon zur Auswertung überlassen, die nicht bereits durch Christian Brüns mit dem Effelsberg-Teleskop beobachtet worden waren. Daraus erklärt sich die ungewöhnliche Numerierung der Wolken, die mit einigen Lücken von 1 bis 47 reicht.

6.1 Allgemeine Bemerkungen

Die Spektren aller 41 kartierten CHVCs wurden nach dem in Kapitel 5 beschriebenen Verfahren reduziert und ausgewertet. Karten aller Objekte sind in Abbildung 13 wiedergegeben. Hier ist in Farbe der über die Wolken integrierte Fluß in K km s^{-1} aufgetragen. Die überlagerten Konturlinien zeigen die zugehörige Säulendichte an und reichen im allgemeinen von $N_{\text{HI}} = 1 \cdot 10^{19} \text{ cm}^{-2}$ in Schritten von $1 \cdot 10^{19} \text{ cm}^{-2}$. Bei einigen Objekten treten besonders hohe Säulendichten auf, so daß hier eine größere Schrittweite gewählt wurde. Dies betrifft CHVC 15 und CHVC 43, bei denen die Konturlinien in Schritten von $3.6 \cdot 10^{19} \text{ cm}^{-2}$ beziehungsweise $1.8 \cdot 10^{19} \text{ cm}^{-2}$ laufen.

Von den 41 kartierten CHVCs konnten in zwei Fällen keine Linien nachgewiesen werden. Dabei handelt es sich bei CHVC 27 um ein Objekt, das nur unvollständig kartiert wurde, so daß sich meßbare Signale möglicherweise außerhalb des kartierten Bereichs befinden. Anstelle des für die meisten CHVCs gewählten $90' \times 90'$ großen Feldes wurde bei CHVC 27 aus Zeitgründen ein nur $90' \times 54'$ umfassendes Feld kartiert. Zwar findet sich am äußeren östlichen Rand des aufgenommenen Feldes ein schwaches Signal in zwei Spektren, dessen Intensität jedoch in beiden Fällen nur $1.3 \sigma_{\text{rms}}$ beträgt und deshalb nicht als signifikant bezeichnet werden kann. Um die Ursache für den Nichtnachweis herauszufinden, habe ich zunächst die Zentralposition der mit Effelsberg gemessenen Karte mit der von Braun & Burton 1999 [2] ermittelten Position des Objekts verglichen. In der Effelsberg-Durchmusterung wurde die Zentralposition in galaktischen Koordinaten zu $l = 169.0^\circ$ und $b = -52.4^\circ$ gewählt, ein Blick in den CHVC-Katalog von Braun & Burton 1999 [2] indes ergibt eine davon leicht abweichende Position von $l = 171.0^\circ$ und $b = -53.8^\circ$. Das bedeutet, daß für die Beobachtung mit dem Effelsberg-Teleskop eine Position gewählt wurde, die um ungefähr 2° von der Angabe im CHVC-Katalog von Braun & Burton abweicht. Eine daraufhin durchgeführte Sichtung der entsprechenden Spektren aus dem Leiden/Dwingeloo-Survey schließlich gibt die Gewißheit, daß CHVC 27 tatsächlich südlich der

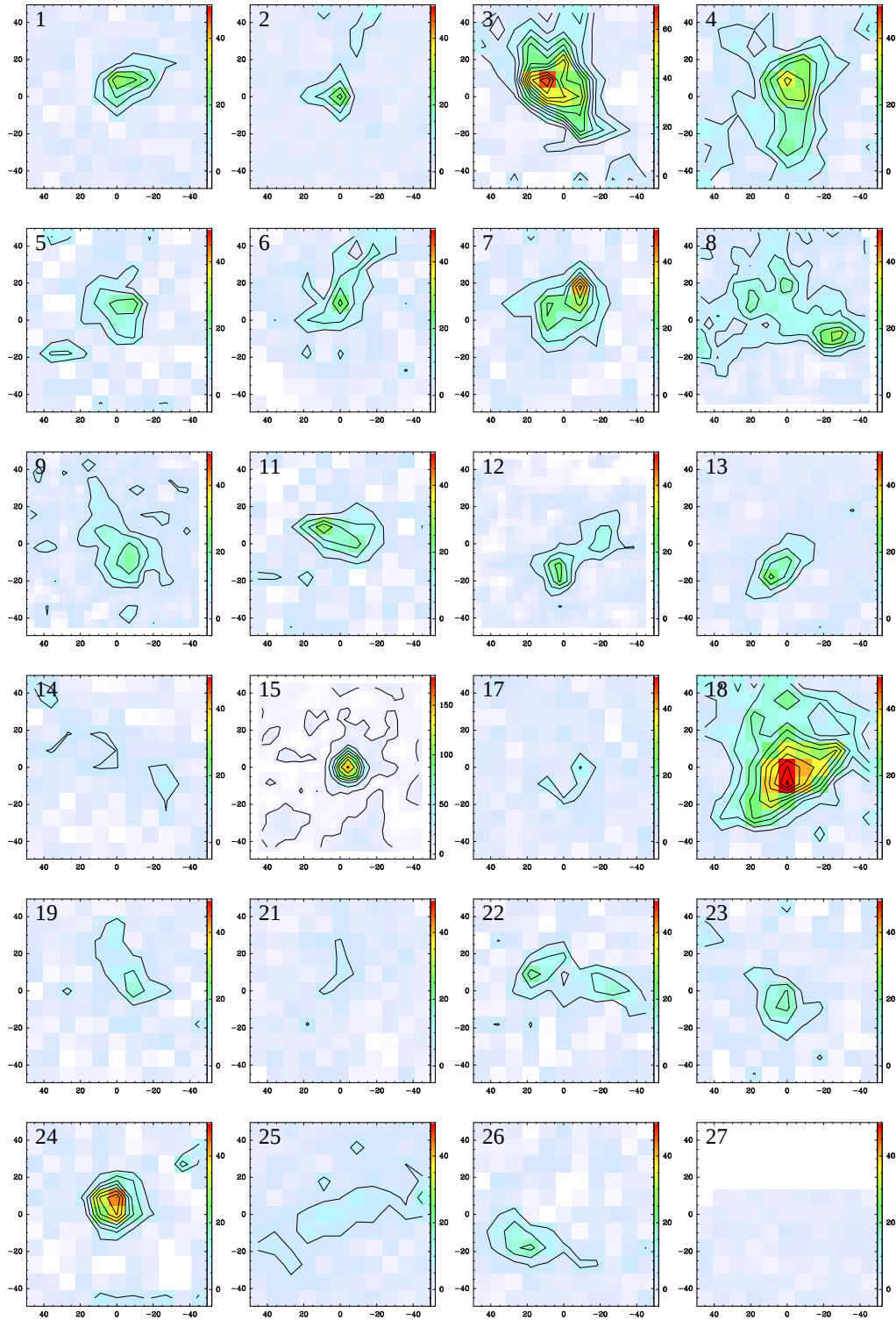


Abbildung 13: HI-Karten der 41 kartierten CHVCs. Aufgetragen gegen die relative Position in Bogenminuten ist der integrierte Fluß über die Wolken in K km s^{-1} . Die Konturlinien laufen von 10^{19} cm^{-2} in Schritten von 10^{19} cm^{-2} , bei CHVC 15 in Schritten von $3.6 \cdot 10^{19} \text{ cm}^{-2}$.

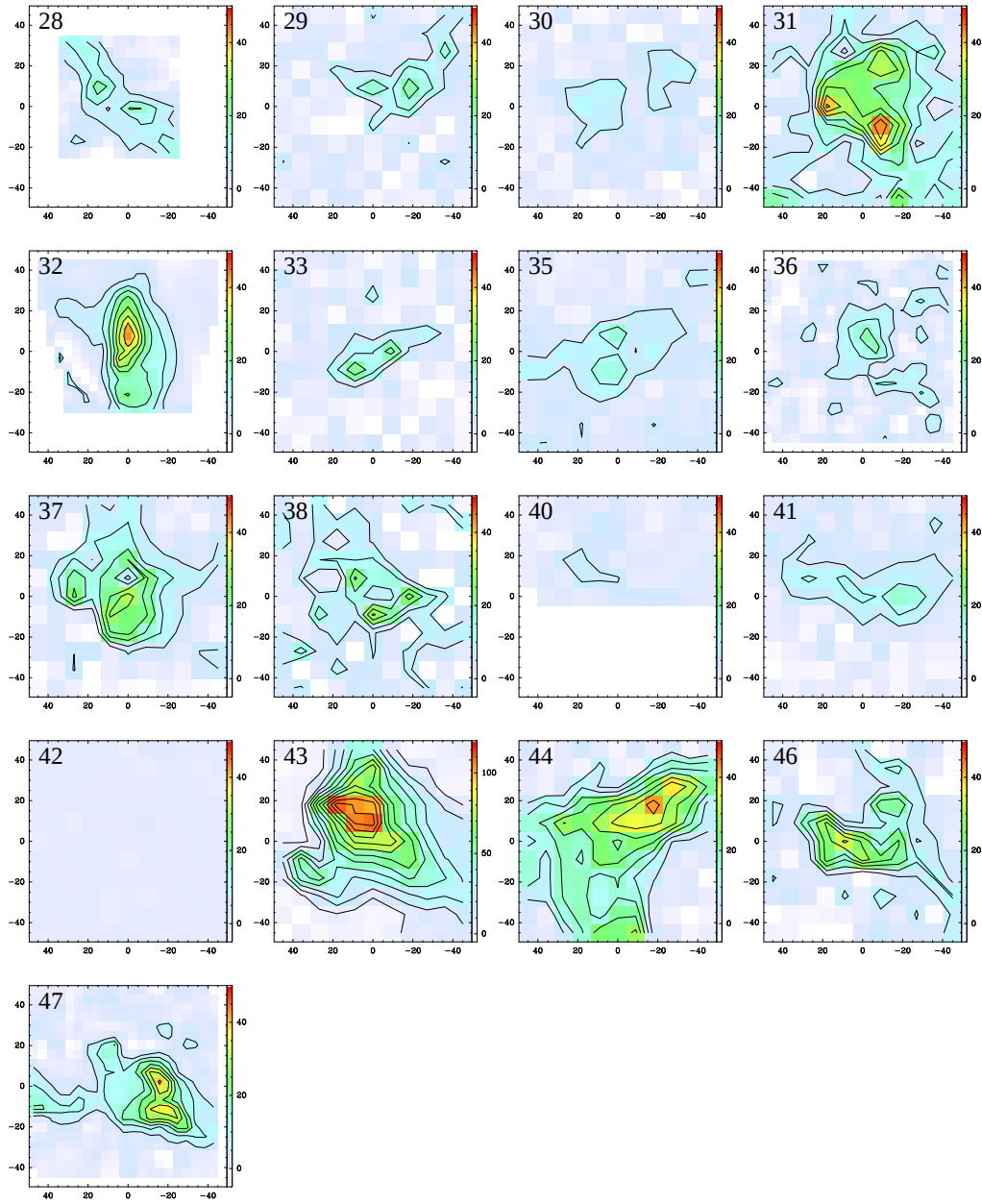


Abbildung 13 (Fortsetzung): HI-Karten der 41 kartierten CHVCs. Aufgetragen gegen die relative Position in Bogenminuten ist der integrierte Fluß über die Wolken in K km s^{-1} . Die Konturlinien laufen von 10^{19} cm^{-2} in Schritten von 10^{19} cm^{-2} , bei CHVC 43 in Schritten von $1.8 \cdot 10^{19} \text{ cm}^{-2}$.

Tabelle 3: Liste der 41 kartierten CHVCs und einiger ihrer physikalischen Parameter. Es bedeuten: α und δ die Rektaszension und Deklination der Zentralposition der Karte, v_{LSR} die nach der Säulendichte gewichtete, mittlere Radialgeschwindigkeit im lokalen Bezugssystem (LSR), σ_v die Standardabweichung der über die Wolke gemessenen Radialgeschwindigkeiten vom Mittelwert, Δv das arithmetische Mittel der Linienbreiten (FWHM), $\sigma_{\Delta v}$ die Standardabweichung der Linienbreiten vom Mittelwert, T_{max} die gemessene Maximalintensität und $T_{\text{max}}^{\text{LDS}}$ die Maximalintensität im Leiden/Dwingeloo-Survey nach Braun & Burton 1999 [2].

#	Name (HVC $l \pm b \pm v$)	$\alpha(2000)$ (h:m:s)	$\delta(2000)$ (°:′:″)	v_{LSR} (km s ⁻¹)	σ_v	Δv (km s ⁻¹)	$\sigma_{\Delta v}$	T_{max} (K)	$T_{\text{max}}^{\text{LDS}}$ (K)
1	HVC 017–25–218	19:59:06	–24:54:00	–228	3.3	11.1	4.0	2.8	0.5
2	HVC 018+47–145	15:39:42	10:18:00	–155	6.8	24.6	10.5	0.9	0.2
3	HVC 030–51–119	21:58:18	–22:42:00	–128	8.0	24.7	6.2	2.0	0.7
4	HVC 031–20–287	20:01:00	–10:18:00	–290	4.0	37.3	9.0	0.8	0.4
5	HVC 032–31–299	20:41:42	–14:18:00	–309	1.4	19.5	5.6	1.5	0.2
6	HVC 039–37–231	21:15:36	–11:57:00	–241	4.8	19.3	7.9	1.8	0.3
7	HVC 039–33–260	21:01:36	–10:09:00	–261	4.8	19.6	4.4	1.6	0.4
8	HVC 039–31–265	20:52:24	–8:24:00	–273	7.9	29.5	7.3	0.8	0.3
9	HVC 040+01–282	19:02:36	6:45:00	–287	6.6	26.4	6.4	0.7	0.1
11	HVC 050–68–187	23:23:24	–19:09:00	–199	7.5	21.2	6.6	1.1	0.2
12	HVC 060–65–206	23:18:36	–13:51:00	–208	3.2	22.6	2.4	0.8	0.1
13	HVC 070+51–146	15:48:48	43:54:00	–145	3.1	23.1	5.1	1.0	0.2
14	HVC 087+03–289	20:46:18	47:51:00	–291	12.3	53.7	24.2	0.4	0.2
15	HVC 094+08+080	20:51:42	56:54:00	95	12.8	45.8	7.8	1.5	0.3
17	HVC 115+13–275	22:56:54	74:33:00	–283	13.1	27.4	10.0	0.4	0.2
18	HVC 118–58–373	0:42:06	4:36:00	–373	7.2	33.6	7.1	2.1	0.7
19	HVC 119–73–301	0:46:12	–10:18:00	–302	3.8	27.0	1.6	0.4	0.1
21	HVC 123–32–324	0:51:18	30:39:00	–325	7.0	27.0	10.1	0.4	0.2
22	HVC 133–76–285	1:01:18	–13:12:00	–300	9.6	27.4	4.7	0.7	0.2
23	HVC 146–78–275	1:11:24	–15:42:00	–281	1.7	29.6	5.8	0.7	0.2
24	HVC 148–82–258	1:05:00	–20:15:00	–268	3.5	20.1	1.7	2.1	0.5
25	HVC 149–38–140	2:19:06	20:27:00	–141	3.4	16.4	3.4	0.4	0.3
26	HVC 157+03–185	4:46:24	49:36:00	–182	3.2	21.3	4.2	0.8	0.2
27	HVC 171–54–229	2:35:42	0:54:00	–	–	–	–	–	0.5
28	HVC 172+51–114	10:00:36	46:18:00	–126	3.3	21.4	4.1	0.8	0.3
29	HVC 173–60–236	2:23:06	–5:48:00	–234	3.5	22.8	8.0	0.9	0.2
30	HVC 191+60+093	10:36:54	34:09:00	89	3.8	21.2	7.5	0.4	0.4
31	HVC 200+30+080	8:22:12	23:21:00	57	12.5	33.0	10.4	1.5	0.5
32	HVC 200–16–091	5:32:54	3:30:00	–91	3.5	22.1	3.3	1.2	0.6
33	HVC 220–88–265	1:00:06	–27:21:00	–264	1.0	13.2	3.7	1.3	0.3
35	HVC 225+36+082	9:19:12	7:00:00	65	13.9	33.7	9.3	0.6	0.2
36	HVC 225–42+190	4:29:48	–26:09:00	180	6.3	21.7	6.8	0.8	0.2
37	HVC 227–34+114	5:06:00	–25:30:00	104	7.2	24.9	8.1	1.3	0.6
38	HVC 229–74–168	2:02:00	–30:21:00	–179	2.3	28.4	6.2	1.0	0.3
40	HVC 237+50+078	10:25:24	6:42:00	73	6.6	18.6	7.5	0.4	0.2
41	HVC 241+53+089	10:43:30	6:42:00	89	6.4	26.9	5.6	0.6	0.2
42	HVC 263+27+153	10:16:36	–23:42:00	–	–	–	–	–	1.1
43	HVC 267+26+216	10:28:06	–26:42:00	217	3.8	19.7	5.5	7.5	2.6
44	HVC 271+29+181	10:48:54	–26:24:00	180	5.7	24.5	4.5	1.8	0.9
46	HVC 340+23–108	15:29:36	–28:42:00	–108	13.4	14.3	6.6	1.0	0.4
47	HVC 358+12–137	16:55:36	–23:33:00	–155	22.9	23.3	13.5	1.8	0.6

Tabelle 3 (Fortsetzung): Liste der 41 kartierten CHVCs und einiger ihrer physikalischen Parameter. Es bedeuten: N_{HI} die maximal gemessene Säulendichte und $N_{\text{HI}}^{\text{LDS}}$ die gemessene Säulendichte im Leiden/Dwingeloo-Survey nach Braun & Burton 1999 [2].

#	Name (HVC $l \pm b \pm v$)	N_{HI} (10^{19} cm^{-2})	$N_{\text{HI}}^{\text{LDS}}$	$N_{\text{HI}}/N_{\text{HI}}^{\text{LDS}}$
1	HVC 017–25–218	5.0	1.2	4.2
2	HVC 018+47–145	4.4	1.2	3.7
3	HVC 030–51–119	0.3	5.1	1.8
4	HVC 031–20–287	6.6	2.9	2.3
5	HVC 032–31–299	5.6	1.4	4.0
6	HVC 039–37–231	3.9	1.1	3.5
7	HVC 039–33–260	7.0	2.2	3.2
8	HVC 039–31–265	6.2	2.3	2.7
9	HVC 040+01–282	3.2	1.0	3.2
11	HVC 050–68–187	4.8	1.1	4.4
12	HVC 060–65–206	3.6	0.9	4.0
13	HVC 070+51–146	4.0	1.3	3.1
14	HVC 087+03–289	6.0	1.1	5.5
15	HVC 094+08+080	12.6	–	–
17	HVC 115+13–275	2.1	3.0	0.7
18	HVC 118–58–373	10.0	3.9	2.6
19	HVC 119–73–301	2.2	0.8	2.8
21	HVC 123–32–324	2.6	1.0	2.6
22	HVC 133–76–285	4.3	1.1	3.9
23	HVC 146–78–275	3.3	0.7	4.7
24	HVC 148–82–258	7.6	1.8	4.2
25	HVC 149–38–140	1.6	1.5	1.1
26	HVC 157+03–185	3.0	0.7	4.3
27	HVC 171–54–229	–	2.3	–
28	HVC 172+51–114	2.9	2.0	1.5
29	HVC 173–60–236	4.0	0.7	5.7
30	HVC 191+60+093	2.1	2.2	1.0
31	HVC 200+30+080	9.5	2.8	3.4
32	HVC 200–16–091	5.6	2.9	1.9
33	HVC 220–88–265	3.3	0.8	4.1
35	HVC 225+36+082	3.4	1.6	2.1
36	HVC 225–42+190	3.2	1.5	2.1
37	HVC 227–34+114	6.0	3.8	1.6
38	HVC 229–74–168	4.5	1.6	2.8
40	HVC 237+50+078	2.1	1.4	1.5
41	HVC 241+53+089	3.2	1.8	1.8
42	HVC 263+27+153	–	4.8	–
43	HVC 267+26+216	18.7	9.6	1.9
44	HVC 271+29+181	7.3	4.3	1.7
46	HVC 340+23–108	3.0	2.3	1.3
47	HVC 358+12–137	7.5	2.1	3.6

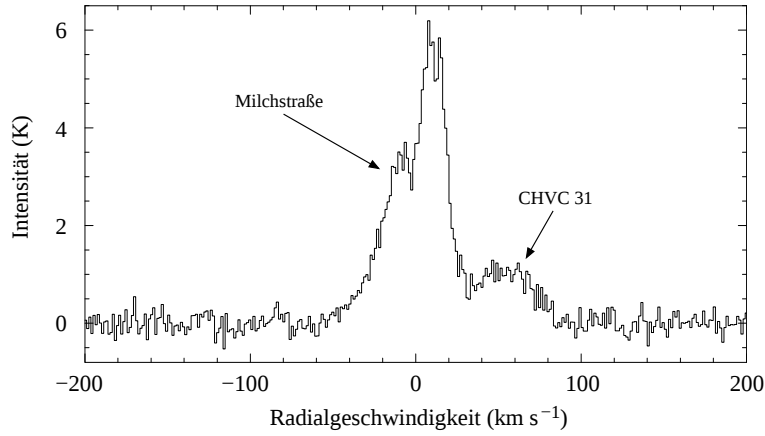


Abbildung 14: Beispiel-Spektrum von CHVC 31. Aufgetragen ist die Intensität in K gegen die Radialgeschwindigkeit im lokalen Bezugssystem (LSR) in km s^{-1} . Die Spektrallinie liegt hier auf der Flanke der galaktischen HI-Emission, was eine Trennung beider Komponenten und die Auswertung der Spektren erschwert.

mit dem Effelsberg-Teleskop kartierten Position liegt. Bei den bereits angesprochenen schwachen Signalen in zwei Spektren am östlichen Rand der Karte dürfte es sich um Ausläufer von CHVC 27 handeln, die gerade noch in den Kartenausschnitt hineinragen.

Somit ist der Nichtnachweis von CHVC 27 auf eine um etwa 2° falsche Positionsangabe bei der Durchführung der Beobachtungen in Effelsberg zurückzuführen. Interessant ist nun, daß die Positionen in Rektaszension und Deklination zwischen den Effelsberg-Daten und dem CHVC-Katalog von Braun & Burton 1999 [2] übereinstimmen! Das bedeutet weiter, daß die von Braun & Burton in ihrem Katalog angegebenen galaktischen Koordinaten inkonsistent mit ihrer äquatorialen Koordinatenangabe sein müssen, was durch eine Umrechnung zwischen beiden schnell bestätigt ist. Die Ursache ist rasch gefunden: Braun & Burton vergaßen bei der von ihnen angegebenen Deklination das Minuszeichen. Anstatt bei $\delta = 0^\circ 55'$ befindet sich das Objekt in Wahrheit bei $\delta = -0^\circ 55'$. Die Differenz beträgt gerade 2° . Damit ist das Zustandekommen der falschen Position durch einen Vorzeichenfehler geklärt und der Nichtnachweis von CHVC 27 nachvollziehbar.

Das andere nicht nachgewiesene Objekt ist CHVC 42. In diesem Fall wurde ebenfalls durch einen Vorzeichenfehler das Teleskop auf eine gegenüber der Angabe im CHVC-Katalog von Braun & Burton 1999 [2] falsche Deklination eingestellt, so daß ein in Bezug auf Hochgeschwindigkeitswolken emissionsfreier Bereich des Himmels kartiert wurde und deshalb der Nichtnachweis leicht erklärt werden kann. Alle anderen Objekte konnten spätestens nach einer Hanning-Glättung der Spektren auf 2.6 oder 5.1 km s^{-1} Geschwindigkeitsauflösung mit mindestens einem $3\sigma_{\text{rms}}$ -Signal detektiert werden. Es verbleiben somit 39 kompakte Hochgeschwindigkeitswolken, die mit der durchgeführten Effelsberg-Durchmusterung nachgewiesen werden konnten und auf die sich die in den folgenden Kapiteln getroffenen Aussagen und Erkenntnisse beziehen.

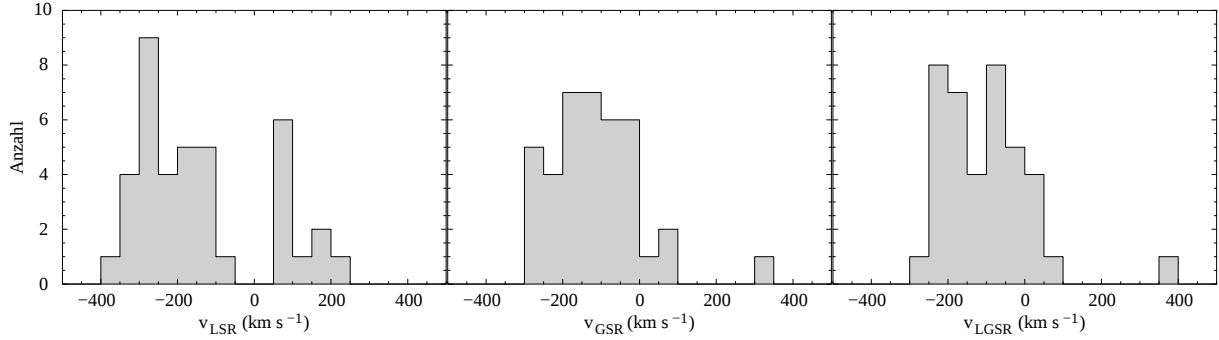


Abbildung 15: Histogramme der Verteilung der gemessenen Radialgeschwindigkeiten der 39 kartierten CHVCs im lokalen Bezugssystem LSR (links), im galaktischen Bezugssystem GSR (Mitte) und im Bezugssystem der Lokalen Gruppe LGSR (rechts).

6.2 Kinematische Eigenschaften der CHVCs

Tabelle 3 faßt einige der durch die Auswertung der Spektren gewonnenen physikalischen Parameter der kartierten CHVCs zusammen. Die Radialgeschwindigkeiten der untersuchten Objekte im lokalen Bezugssystem (LSR) decken den Bereich von etwa -370 bis -90 km s^{-1} beziehungsweise von $+60$ bis $+220 \text{ km s}^{-1}$ ab. In dem dazwischenliegenden Bereich mit Radialgeschwindigkeiten um 0 km s^{-1} können wegen der Konfusion mit der 21-cm-Linienemission des HI-Gases der Milchstraße keine CHVCs nachgewiesen werden. Die Zahlen deuten jedoch bereits an, daß bei einigen Objekten die beobachteten Radialgeschwindigkeiten nahe denen der galaktischen HI-Emission liegen. Dies hat zur Folge, daß in einigen Fällen die Spektrallinien der CHVCs auf den Flanken der galaktischen HI-Linien zu finden sind, was die Auswertung sehr erschwert. Zum einen muß in diesen Fällen durch das sich von Position zu Position zuweilen rasch ändernde Linienprofil des Milchstraßengases eine Auswertung der Spektren von Hand vorgenommen werden. Zum anderen wird ein Abziehen der Basislinie dadurch erschwert, daß das Profil der durch die Milchstraße verursachten HI-Emission im allgemeinen komplex sein wird und deshalb mitunter nur unzureichend durch ein einfaches Polynom angenähert werden kann, was zu größeren Fehlern in der Basislinienkorrektur und somit in den aus dem anschließenden Gaußfit gewonnen physikalischen Eigenschaften der betreffenden CHVC führt. Zur Illustration des Problems ist in Abbildung 14 ein Spektrum von CHVC 31 als Beispiel dargestellt, die mit nur $v_{\text{LSR}} = 57 \text{ km s}^{-1}$ die in Bezug auf den Betrag geringste Radialgeschwindigkeit aller 41 kartierten CHVCs aufweist. In solchen Fällen ist allerdings die Definition als kompakte Hochgeschwindigkeitswolke durch Braun & Burton 1999 [2] fragwürdig. Die Festlegung der *deviation velocity* durch Wakker 1991 [32] besagt, daß Hochgeschwindigkeitswolken eine um mindestens 50 km s^{-1} größere Radialgeschwindigkeit aufweisen müssen, als für galaktisches Gas in der jeweiligen Richtung nach einem einfachen Modell noch erlaubt wäre. Dieser kinematische Abstand zur galaktischen HI-Emission ist für Objekte wie CHVC 31 offenbar nicht erfüllt. In dem verbesserten CHVC-Katalog von de Heij, Braun & Burton 2002 [10] werden sie auch nicht mehr als CHVCs klassifiziert.

In Abbildung 15 habe ich die Verteilung der Radialgeschwindigkeiten der 39 nachgewiesenen CHVCs als Histogramm über die Radialgeschwindigkeiten im lokalen Bezugssystem (LSR, linkes Histogramm), im galaktischen Bezugssystem (GSR, mittleres Histogramm) und im Bezugssy-

stem der Lokalen Gruppe (LGSR, rechtes Histogramm) aufgetragen. Betrachten wir zunächst die Verteilung im lokalen Bezugssystem. Bereits Braun & Burton 1999 [2] weisen auf den Sachverhalt hin, daß der Schwerpunkt der Verteilung der Radialgeschwindigkeiten nicht nahe 0 km s^{-1} liegt, sondern zu deutlich negativen Geschwindigkeiten verschoben ist. Als arithmetischer Mittelwert der LSR-Geschwindigkeiten der 39 nachgewiesenen CHVCs ergibt sich $\langle v_{\text{LSR}} \rangle = -140 \text{ km s}^{-1}$ mit einer Standardabweichung von $\sigma_{v_{\text{LSR}}} = 167 \text{ km s}^{-1}$. Relativ zur lokalen Galaxis zeigt die CHVC-Population somit einen starken Einfall.

Dieser Eindruck wird aber künstlich durch einen Auswahleffekt hervorgerufen, der durch die Position des Effelsberg-Teleskops auf etwa 50° nördlicher Breite entsteht, so daß große Bereiche des Südhimmels nicht beobachtet werden können. Sehen wir uns hierzu die Skizze in Abbildung 16 an. Ich habe zunächst eine fiktive CHVC-Population angenommen, die von der Erde aus betrachtet gleichmäßig über alle Richtungen des Himmels verteilt erscheint. Darüber hinaus seien die Radialgeschwindigkeiten im galaktischen Bezugssystem gleichmäßig zwischen $v_{\text{GSR}} = -150 \dots 150 \text{ km s}^{-1}$ verteilt. Diese Situation ist im Diagramm (a) skizziert, wo die Radialgeschwindigkeiten aller CHVCs dieser fiktiven Population im galaktischen Bezugssystem gegen die galaktische Länge aufgetragen sind. Man erkennt sofort, daß die mittlere Radialgeschwindigkeit der Wolken null ist, daß heißt die Population bewegt sich weder auf die Milchstraße zu, noch von ihr fort. Zwar ist die in diesem einfachen Modell angenommene Gleichverteilung der Radialgeschwindigkeiten nicht unbedingt realistisch, aber sie genügt, um die angesprochenen Auswahleffekte zu illustrieren.

Wenn wir eine solche Population von unserem Standort in der lokalen Galaxis aus beobachten, so sehen wir aber eine andere Verteilung der Radialgeschwindigkeiten am Himmel. Und zwar rotiert unsere Milchstraße, wobei die angenommene CHVC-Population an dieser Rotation nicht teilnimmt. Am Ort unserer Sonne rotiert die Milchstraße in Richtung $l = 90^\circ$ mit einer Geschwindigkeit von $v_{\text{rot}} = 220 \text{ km s}^{-1}$. Das bedeutet, daß wir bei Objekten, die in Richtung der galaktischen Rotation stehen, eine um 220 km s^{-1} geringere Radialgeschwindigkeit beobachten, als diese in Bezug auf das galaktische Ruhesystem tatsächlich aufweisen. Umgekehrt erscheinen uns Objekte in der entgegengesetzten Richtung um denselben Betrag schneller. Diese Projektion der Milchstraßenrotation auf die Radialgeschwindigkeiten unserer gedachten CHVC-Population beim Übergang vom galaktischen zum lokalen Bezugssystem ist in Diagramm (b) in Abbildung 16 gezeigt. Der in etwa sinusförmige Verlauf der Radialgeschwindigkeit als Funktion der galaktischen Länge ist also nichts anderes als die Projektion der Rotationsgeschwindigkeit der Milchstraße auf die Radialgeschwindigkeiten der CHVCs, die als extragalaktische Objekte an dieser Rotation nicht teilhaben.

Nun kommen die eingangs erwähnten Auswahleffekte ins Spiel. Wir sind bei der Beobachtung sowohl im Hinblick auf die Positionen der Wolken am Himmel als auch bezüglich ihrer Radialgeschwindigkeiten Einschränkungen unterworfen. Zum einen liegt das 100-m-Teleskop in Effelsberg auf ungefähr 50° nördlicher Breite, was zur Folge hat, daß Objekte mit Deklinationen südlich von $\delta \approx -30^\circ$ nicht beobachtet werden können, weil sie selbst während ihrer Kulmination eine Elevation von etwa 10° nicht übersteigen. In Bezug auf die Radialgeschwindigkeiten besteht zum anderen eine Einschränkung darin, daß das galaktische HI-Gas, das an der Rotation der Milchstraße teilnimmt, sich ungefähr bei Radialgeschwindigkeiten von $v_{\text{LSR}} \approx -100 \dots +100 \text{ km s}^{-1}$ aufhält, so daß CHVCs, die in Bezug auf das lokale Referenzsystem Radialgeschwindigkeiten in diesem Bereich aufweisen, durch die Obstruktion des sehr viel stärker emittierenden galaktischen Gases nicht mehr nachgewiesen werden können. Man kann in dieser Hinsicht also von

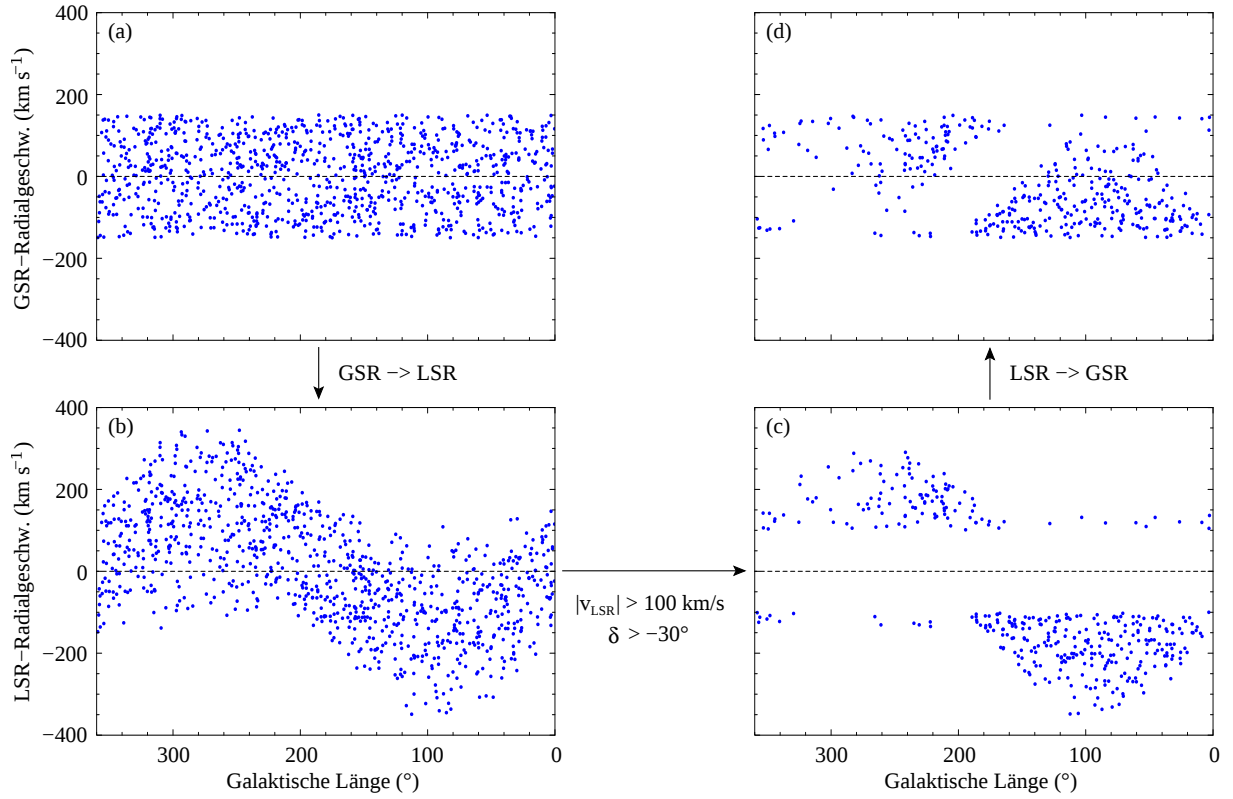


Abbildung 16: Die Skizze illustriert, wie es sowohl im lokalen als auch im galaktischen Bezugssystem durch verschiedene Auswahleffekte zum Eindruck eines scheinbaren Netto-Einfalls der CHVC-Population auf die Milchstraße kommt. Der Sachverhalt wird im Text im Detail beschrieben.

einer Art *zone of avoidance* in HI sprechen, die zwar über den gesamten Himmel reicht, jedoch nur Objekte mit Radialgeschwindigkeiten von $v_{\text{LSR}} \approx -100 \dots +100 \text{ km s}^{-1}$ erfaßt.

Die beschriebenen Auswahleffekte bewirken, daß wir einen großen Teil der Mitglieder der fiktiven, extragalaktischen Population von CHVCs mit dem 100-m-Teleskop in Effelsberg gar nicht mehr wahrnehmen können. Die Situation ist im Diagramm (c) in Abbildung 16 skizziert. Hier wurden alle CHVCs entfernt, deren Radialgeschwindigkeiten im Bereich von $-100 \dots +100 \text{ km s}^{-1}$ lagen. Wir finden nun einen breiten, weißen Streifen der Obstruktion durch galaktische HI-Emission, der durch das gesamte Diagramm verläuft und einen großen Teil der CHVCs hinter sich verbirgt. Zusätzlich habe ich aus diesem Diagramm alle Objekte entfernt, die am Südhimmel mit Deklinationen von $\delta < -30^\circ$ lagen. Dieser Bereich umfaßt vor allem die galaktischen Längen zwischen 240° und 360° , und man sieht in dem Diagramm deutlich, daß in diesem Längenintervall zahlreiche weitere CHVCs entfernt wurden, die dem 100-m-Teleskop in Effelsberg auf Grund ihrer stark südlichen Deklinationen nicht zugänglich sind.

Der Wegfall der CHVCs südlich von $\delta \approx -30^\circ$ bewirkt aber gerade den Eindruck eines Netto-Einfalls der CHVC-Population im lokalen Bezugssystem, denn wir sehen in Diagramm (c) deutlich das daraus resultierende Überwiegen von Objekten mit negativer Radialgeschwindigkeit im LSR-System. Natürlich ist bei dieser Interpretation Vorsicht geboten, denn einen stark

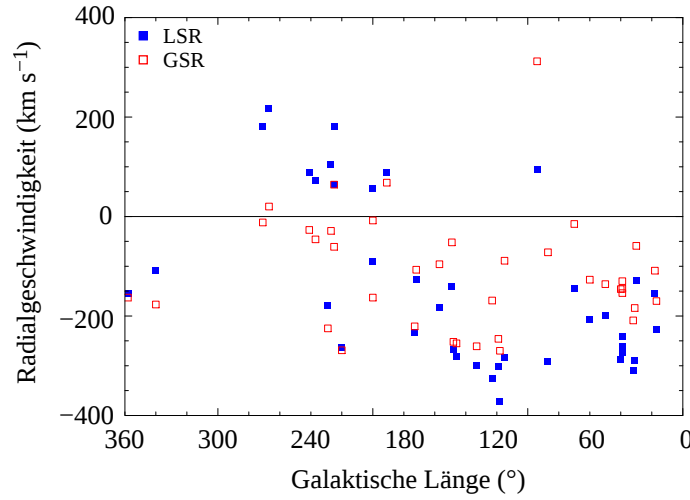


Abbildung 17: Radialgeschwindigkeiten der 39 beobachteten CHVCs im lokalen Bezugssystem (■) und im galaktischen Bezugssystem (□) aufgetragen gegen die galaktische Länge.

negativen Mittelwert der Radialgeschwindigkeiten der 39 mit dem 100-m-Teleskop in Effelsberg kartierten CHVCs könnten wir auch allein dadurch bewirkt haben, indem wir nur einen Teil der bekannten CHVCs beobachtet haben. Jedoch kommen Braun & Burton 1999 [2] anhand ihres aus dem Leiden/Dwingeloo-Survey abgeleiteten CHVC-Katalogs zu demselben Resultat eines starken Einfalls der CHVC-Population in Bezug auf das lokale Referenzsystem, und auf Grund ihrer systematischen Suche anhand des LDS sollte ihr Katalog im Rahmen der erreichten Sensitivität eine gewisse Vollständigkeit besitzen.

Wir gelangen somit zu der Erkenntnis, daß das starke Überwiegen negativer Radialgeschwindigkeiten in der untersuchten Auswahl kompakter Hochgeschwindigkeitswolken zwanglos dadurch erklärt werden kann, daß ausgerechnet diejenigen Objekte, die auf Grund der Projektion der galaktischen Rotationsgeschwindigkeit mit besonders positiven Radialgeschwindigkeiten im lokalen Bezugssystem in Erscheinung treten sollten, durch ihre Lage am Südhimmel nicht detektiert wurden. Deshalb können sie nicht zum Mittelwert der Radialgeschwindigkeiten der CHVCs beitragen, der somit stark negativ ausfallen muß. Zum Vergleich mit Diagramm (c) in Abbildung 16 habe ich in Abbildung 17 das tatsächliche Positions-Geschwindigkeits-Diagramm der 39 kartierten CHVCs aufgetragen. Der sinusförmige Verlauf der Verteilung der Radialgeschwindigkeiten im lokalen Bezugssystem (blaue, ausgefüllte Quadrate) ist hier gut wiederzufinden, ebenso das Fehlen von CHVCs im Himmelsbereich mit galaktischen Längen von $l \approx 240^\circ \dots 360^\circ$.

Die Situation läßt sich möglicherweise bereinigen, indem wir die Radialgeschwindigkeiten der CHVCs in das galaktische Bezugssystem transformieren. Hierbei wird der galaktischen Rotationsgeschwindigkeit Rechnung getragen, so daß wir im Anschluß die Radialgeschwindigkeiten in Bezug auf das Ruhesystem der Galaxis erhalten (vergleiche die Diskussion in Kapitel 3.1.1). Die Verteilung der GSR-Radialgeschwindigkeiten der 39 kartierten CHVCs ist im mittleren Histogramm in Abbildung 15 dargestellt. Es fällt zunächst auf, daß die Verteilung gegenüber dem lokalen Bezugssystem schmäler geworden ist. Hieran läßt sich erkennen, daß die künstliche Verbreiterung der Verteilung durch die Geschwindigkeitskomponente der galaktischen

Rotation beim Übergang zum galaktischen Bezugssystem nun bereinigt ist. Die Standardabweichung der Geschwindigkeiten vom Mittelwert bemißt im galaktischen Bezugssystem nur noch $\sigma_{v_{\text{GSR}}} = 116 \text{ km s}^{-1}$. Diese schon von Braun & Burton 1999 [2] hervorgehobene Verminderung der Geschwindigkeitsdispersion beim Übergang vom lokalen zum galaktischen Bezugssystem wird von ihnen als Indiz dafür gewertet, daß das galaktische Bezugssystem das in Bezug auf die CHVC-Population natürlichere Bezugssystem sei. Nach dieser Vorstellung sollte sich also die CHVC-Population eher um die Milchstraße herum gruppieren, anstatt sich innerhalb derselben aufzuhalten und an der galaktischen Rotation teilzuhaben.

Jedoch ist auch im galaktischen Bezugssystem die mittlere Radialgeschwindigkeit der 39 kartierten CHVCs noch immer stark negativ. Als Mittelwert ergibt sich anhand der Daten $\langle v_{\text{GSR}} \rangle = -112 \text{ km s}^{-1}$. Demnach würden CHVCs auch gegenüber dem galaktischen Ruhesystem im Mittel auf die Milchstraße einfallen. Dieser Befund ändert sich auch nicht, wenn wir zum Bezugssystem der Lokalen Gruppe (LGSr) übergehen, bei dem der Beitrag der Relativbewegung der Milchstraße in Bezug auf das Schwerezentrum der Lokalen Gruppe berücksichtigt wird (vergleiche Kapitel 3.1.1). Die Verteilung im LGSr ist im rechten Diagramm in Abbildung 15 dargestellt, und wir erhalten als mittlere LGSr-Geschwindigkeit $\langle v_{\text{LGSr}} \rangle = -100 \text{ km s}^{-1}$ bei einer Dispersion von $\sigma_{v_{\text{LGSr}}} = 116 \text{ km s}^{-1}$. Zu einem ähnlichen Resultat gelangen auch Braun & Burton 1999 [2] und schließen unter anderem aus der Minimierung der mittleren Geschwindigkeit und der Geschwindigkeitsdispersion im Bezugssystem der Lokalen Gruppe auf eine wahrscheinliche Verteilung der CHVC-Population über die gesamte Lokale Gruppe hinweg sowie einen Netto-Einfall der CHVCs auf die Lokale Gruppe als Ganzes. Die letzte Interpretation ist jedoch nicht zulässig, denn sie geht davon aus, daß bezüglich der Durchmusterung der CHVCs anhand des Leiden/Dwingeloo-Surveys (Hartmann & Burton 1997 [13]) eine gewisse Vollständigkeit erreicht wird, daß die beobachtete Geschwindigkeitsverteilung der CHVCs repräsentativ für die gesamte Population ist. Dies ist aber nicht gegeben, denn mögliche CHVCs, die in den Geschwindigkeitsbereich zwischen ungefähr $-100 \dots +100 \text{ km s}^{-1}$ fallen, können wegen der Obstruktion durch galaktische HI-Emission unter Umständen gar nicht nachgewiesen werden. In dem für mitteleuropäische Teleskope uneingeschränkt zugänglichen Bereich des Himmels in Richtung $l = 90^\circ$ betrifft dies aber gerade die Objekte, die bei der Korrektur bezüglich des galaktischen Bezugssystems durch Berücksichtigung der Rotationsgeschwindigkeit der Galaxis zu stärker positiven Geschwindigkeiten hin verschoben würden. Fehlen diese Wolken in der Durchmusterung, so können ihre positiven Geschwindigkeiten im galaktischen Bezugssystem nicht zum Mittelwert der Radialgeschwindigkeiten der CHVC-Population beitragen, der deshalb einen negativen Wert annehmen muß. Dieses Problem ist aus Diagramm (d) in Abbildung 16 zu ersehen, wo ein Defizit positiver Radialgeschwindigkeiten bei $l \approx 90^\circ$ verbleibt, selbst wenn man den Übergang vom lokalen zum galaktischen Bezugssystem vollzieht. Dies ist leicht einzusehen, würden doch die Objekte mit positiven GSR-Radialgeschwindigkeiten in dieser Region im LSR-System um 0 km s^{-1} liegen, so daß sie durch die galaktische Obstruktion gar nicht zu beobachten wären. Es ist somit unzulässig, von der negativen mittleren Radialgeschwindigkeit der mit dem Dwingeloo- oder Effelsberg-Teleskop beobachteten CHVC-Auswahl auf einen Netto-Einfall der CHVC-Population auf die Milchstraße oder die Lokale Gruppe zu schließen. Dieser Schluß ist nur möglich, wenn ein homogener Ganzhimmelskatalog von CHVCs als Grundlage verwandt wird, bei dem das Ungleichgewicht in der Vollständigkeit der in verschiedenen Himmelsregionen erfaßten CHVCs verschwindet.

Es gibt noch einen weiteren Aspekt, der die Beurteilung eines Einfalls der CHVC-Population auf die Milchstraße oder die Lokale Gruppe erschwert. Und zwar ist es denkbar, daß individuelle Phänomene, die nicht in unmittelbarem Zusammenhang mit der als primordiale Galaxienbausteine interpretierten CHVC-Population in Verbindung stehen, dennoch Eingang in den CHVC-Katalog von Braun & Burton 1999 [2] fanden. Solche Objekte könnten zum Beispiel Galaxien sein, die in ihrem Erscheinungsbild kompakten Hochgeschwindigkeitswolken ähnlich sind, aber mit der CHVC-Population in keiner kinematischen Beziehung stehen. Es ist durchaus denkbar, daß solche Galaxien in den CHVC-Katalog von Braun & Burton Einzug hielten, denn Galaxien in der Nähe der galaktischen Ebene sind möglicherweise durch die Extinktion galaktischen Staubs im Optischen gar nicht nachweisbar, wohl aber würden sie in der Emission des neutralen Wasserstoffs hervortreten, falls sie hohe Radialgeschwindigkeiten von $|v_{\text{LSR}}| \gtrsim 100 \text{ km s}^{-1}$ aufwiesen. Darüber hinaus gibt es auch in höheren galaktischen Breiten sogenannte *low surface brightness galaxies* (LSB-Galaxien), die sich durch eine sehr geringe Oberflächenhelligkeit im visuellen Spektralbereich auszeichnen und deshalb bislang unentdeckt geblieben sein können. In der Tat gelang es Burton et al. 1999 [5], ein Objekt aus den 39 mit Effelsberg kartierten Wolken (CHVC 15) als LSB-Galaxie nachzuweisen, die durch ihre geringe Oberflächenhelligkeit im Optischen bis dahin nicht entdeckt worden war. Es handelt sich dabei um eine Spiralgalaxie in etwa 6 Mpc Entfernung, die nach dem Sternbild, in dem sie steht, in *Cepheus 1* benannt wurde. Sie sticht überdies durch ihre Geschwindigkeit aus der beobachteten CHVC-Auswahl deutlich hervor. Zwar ist ihre Radialgeschwindigkeit im lokalen Bezugssystem mit 95 km s^{-1} nicht besonders auffällig. Beim Übergang in das galaktische Bezugssystem indes wächst die Radialgeschwindigkeit auf über 300 km s^{-1} an, so daß sich CHVC 15 als alleinstehendes Objekt am rechten Rand des mittleren und rechten Histogramms in Abbildung 15 augenscheinlich von der übrigen CHVC-Population abhebt.

Darüber hinaus gibt es konkrete Hinweise, daß Teile des Magellanschen Stroms und des *Leading Arm* in den CHVC-Katalog aufgenommen wurden. Der Magellansche Strom besitzt in dem mit dem Leiden/Dwingeloo-Survey bzw. mit der Effelsberg-Durchmusterung abgedeckten Teil stark negative Radialgeschwindigkeiten um $v_{\text{LSR}} \approx -400 \text{ km s}^{-1}$, die gleichsam einen stark negativen Mittelwert der Radialgeschwindigkeiten der beobachteten CHVC-Population auch im galaktischen Bezugssystem und im Bezugssystem der Lokalen Gruppe hervorrufen würden. Ein Kandidat für eine Zugehörigkeit zum Magellanschen Strom ist zum Beispiel CHVC 18, die in der HI-Durchmusterung des Magellanschen Systems durch Christian Brüns (Dissertation 2003) beobachtet wurde und räumlich und kinematisch möglicherweise mit dem Magellanschen Strom assoziiert sein könnte. Auch die nördlichen Ausläufer des *Leading Arm* sind den Teleskopen in Mitteleuropa zugänglich, und tatsächlich finden sich unter den 39 kartierten Wolken mit CHVC 43 und 44 zwei Objekte, bei denen es sich sehr wahrscheinlich um Verdichtungen und Knoten im Bereich einer filamentären Struktur des *Leading Arm* handelt. Diese wurden von Christian Brüns (Dissertation 2003) in einer ausgedehnten HI-Durchmusterung des Magellanschen Systems mit dem 65-m-Teleskop in Parkes kartiert und koinzidieren in Position und Geschwindigkeit mit dem in diesem Himmelsbereich beobachteten HI-Gas des *Leading Arm*. Auch CHVC 42, die durch einen Deklinationsfehler in der Effelsberg-Durchmusterung nicht nachgewiesen werden konnte, offenbart sich in der HI-Durchmusterung von Christian Brüns als offenbar der erwähnten Struktur des *Leading Arm* zugehörig. Eine tiefere Diskussion des Einflusses möglicher separater Strukturen auf die kollektiven Eigenschaften der CHVC-Population führe ich in Kapitel 4 bei der Besprechung der modellierten CHVC-Populationen.

Fassen wir die in diesem Kapitel gewonnenen Ergebnisse über die kinematischen Eigenschaften der untersuchten Auswahl von 39 kompakten Hochgeschwindigkeitswolken noch einmal in kurzen Stichpunkten zusammen:

- Die beobachtete Dispersion der Radialgeschwindigkeiten ist im lokalen Bezugssystem deutlich größer als im galaktischen Bezugssystem oder im Bezugssystem der Lokalen Gruppe. Dieser Befund, der auch von Braun & Burton 1999 [2] anhand ihres CHVC-Katalogs festgestellt wird, läßt sich als Indiz dafür werten, daß die CHVC-Population sich entweder um die Milchstraße herum oder über die gesamte Lokale Gruppe hinweg gruppiert.
- Darüber hinaus ist die mittlere Radialgeschwindigkeit der CHVCs in allen drei genannten Bezugssystemen stark negativ, was zunächst auf einen Nettoeinfall der CHVC-Population in Bezug auf das jeweilige Bezugssystem interpretiert werden könnte.
- Der Eindruck eines Nettoeinfalls der CHVC-Population auf die Milchstraße wird jedoch künstlich hervorgerufen, weil die am Südhimmel erwarteten CHVCs positiver Radialgeschwindigkeiten mit dem Effelsberg-Teleskop nicht beobachtbar sind.
- Außerdem könnten individuelle Strukturen wie Teile des Magellanschen Systems oder einzelne Galaxien, die in die behandelte Auswahl von CHVCs Einzug hielten, die mittlere Geschwindigkeit der Population maßgeblich beeinflussen, so daß eine Entscheidung in Bezug auf einen Nettoeinfall der CHVCs anhand der vorliegenden Daten nicht haltbar ist.
- Darüber hinaus ist es wegen der Inhomogenität des Datensatzes nicht möglich, anhand der kollektiven kinematischen Eigenschaften der vorliegenden Auswahl von CHVCs allein eine Aussage über die Verteilung der CHVCs innerhalb der Lokalen Gruppe zu treffen. Eine entsprechende Einschätzung von Braun & Burton 1999 [2] anhand des von ihnen erstellten CHVC-Katalogs ist aus denselben Erwägungen mit Vorsicht aufzunehmen.

6.3 Dynamische Eigenschaften und Stabilität der CHVCs

Ein erster Blick auf die in Abbildung 13 wiedergegebenen Fluß- bzw. Säulendichtekarten der 41 kartierten Objekte offenbart, daß die beobachtete Auswahl von CHVCs in Bezug auf Größe und Form sehr vielgestaltig ist. Neben kompakten Objekten wie CHVC 1 oder CHVC 15 finden sich auch sehr ausgedehnte, diffuse Wolken wie zum Beispiel CHVC 31 oder CHVC 44, die reich strukturiert erscheinen und den zur Kartierung ausgewählten Bereich deutlich sprengen. Ebenso verschieden und inhomogen sind auch die aus den Daten gewonnen physikalischen Eigenschaften der Wolken. Die beobachteten Maximalintensitäten reichen von 0.4 bis 2.8 K mit einem arithmetischen Mittelwert von $\langle T_B \rangle = 1.2 \pm 1.2$ K. Nur CHVC 43 weist mit einer maximalen Intensität von 7.5 K einen bedeutend größeren Wert auf, als alle anderen CHVCs. Das Objekt ist aber insofern nicht repräsentativ, als es – wie zuvor angesprochen – wahrscheinlich dem *Leading Arm* zugerechnet werden muß. Ein Histogramm der Verteilung der Wolken über die gemessenen Intensitäten ist im rechten Diagramm in Abbildung 18 wiedergegeben.

Das linke Histogramm in Abbildung 18 zeigt die Verteilung der CHVCs über die gemessenen maximalen Säulendichten. Diese reichen von $1.6 \cdot 10^{19} \text{ cm}^{-2}$ bis $1.9 \cdot 10^{20} \text{ cm}^{-2}$, also über gut eine Größenordnung. Wiederum finden wir den mit Abstand höchsten gemessenen Wert

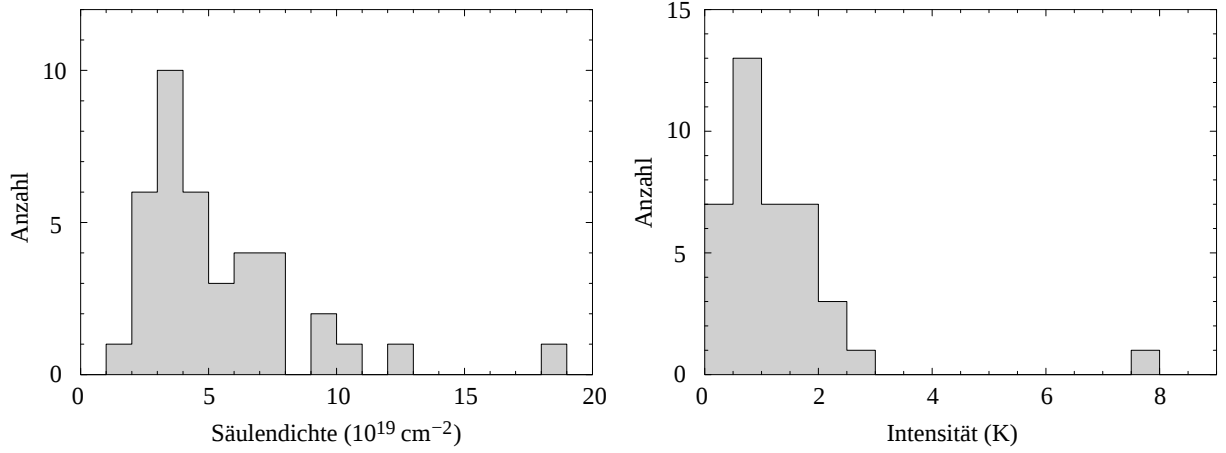


Abbildung 18: Linkes Diagramm: Histogramm der Verteilung der 39 beobachteten CHVCs über die gemessenen maximalen Säulendichten. Rechtes Diagramm: Histogramm der Verteilung der Objekte über die beobachteten Maximalintensitäten.

bei CHVC 43 vor, die durch ihre mögliche Assoziation mit dem Magellanschen System jedoch nicht repräsentativ ist. Der arithmetische Mittelwert der gemessenen maximalen Säulendichten beträgt $\langle N_{\text{HI}} \rangle = (5.3 \pm 3.3) \cdot 10^{19} \text{ cm}^{-2}$ und liegt ungefähr 2 Größenordnungen unterhalb der HI-Säulendichten, die wir in der Milchstraße in Richtung der galaktischen Ebene beobachten.

Anhand dieser Ergebnisse lassen sich einige interessante Eigenschaften kompakter Hochgeschwindigkeitswolken ableiten. Nehmen wir einmal an, CHVCs seien sphärisch-symmetrische Wolken mit konstanter Massendichte. Diese Annahme wird streng sicher niemals gelten, jedoch lassen sich hieran anschließend recht zuverlässige Abschätzungen über die mittlere Masse und Dichte sowie über die Stabilität von CHVCs machen. Nach dem Vorschlag von Braun & Burton 1999 [2] sollen sich CHVCs in einer typischen Entfernung von $d \approx 1 \text{ Mpc}$ aufhalten. Anhand des mittleren Winkeldurchmessers von grob $2\vartheta \approx 40'$ läßt sich sodann ihr wahrer, mittlerer Radius zu

$$R = d \tan \vartheta \approx 6 \text{ kpc} \quad (24)$$

abschätzen. Dies entspricht ungefähr 2/3 des Abstands der Sonne vom Zentrum der Milchstraße, so daß CHVCs unter den angeführten Umständen vergleichsweise ausgedehnte Objekte wären, vergleichbar mit der Großen Magellanschen Wolke. Unter den zuvor gemachten Annahmen der sphärischen Symmetrie und der konstanten Massendichte läßt sich hieraus nun die Teilchendichte des HI-Gases in CHVCs ableiten, indem wir die mittlere im Zentrum gemessene HI-Säulendichte der 39 kartierten CHVCs durch die soeben bestimmte Sichtlinie durch die Wolke dividieren:

$$n_{\text{HI}} = \frac{N_{\text{HI}}}{2R} \approx 1.5 \cdot 10^{-3} \text{ cm}^{-3}. \quad (25)$$

Dieser Wert ist vergleichsweise niedrig und ähnlich den Teilchendichten im Halo der Milchstraße. Offenbar wären CHVCs, falls sie tatsächlich eine typische Entfernung von $d \approx 1 \text{ Mpc}$ aufweisen sollten, recht diffuse Objekte. Anhand des Radius' und der Teilchendichte können wir nun eine Abschätzung der mittleren HI-Masse M_{HI} von CHVCs machen, indem wir erneut auf die Annahme der sphärischen Symmetrie zurückgreifen, um daraus das Volumen $V = (4/3)\pi R^3$ der

Wolke zu ermessen. Wir erhalten sodann eine geschätzte HI-Masse von

$$M_{\text{HI}} = n_{\text{HI}} V m_{\text{H}} \approx 3 \cdot 10^7 M_{\odot}. \quad (26)$$

Darin ist $m_{\text{H}} = 1.674 \cdot 10^{-27}$ kg die Masse eines Wasserstoffatoms. Unter der Annahme, daß noch einmal 40% dieser Masse durch Helium beigetragen wird, erhalten wir eine Gesamtmasse der sichtbaren Materie in CHVCs von gut $4 \cdot 10^7 M_{\odot}$. Dieser Wert ist etwa von der Größenordnung, die wir für die Massen kleiner Zwerggalaxien erwarten würden. Es läßt sich jedoch leicht zeigen, daß die abgeschätzte HI-Masse nicht ausreichen würde, um CHVCs durch ihre Eigengravitation zu binden und zu stabilisieren. Es wäre statt dessen erforderlich, daß entweder ein großer Anteil an Dunkler Materie für die gravitative Stabilität sorgt oder eine Stabilisierung nicht (ausschließlich) gravitativ, sondern durch den Außendruck eines umgebenden intergalaktischen Mediums erfolgt.

Eine im gravitativen Gleichgewicht befindliche Wolke gehorcht dem Virialsatz, der besagt, daß die mittlere potentielle Energie der Wolke gleich dem Zweifachen der mittleren kinetischen Energie entspricht. Daraus folgt in unserem Fall, daß

$$\frac{GM_{\text{HI}}}{fR} = \frac{6}{8 \ln 2} \Delta v^2. \quad (27)$$

Hierin ist Δv die Halbwertsbreite der HI-Linien, die in der beobachteten Auswahl von 39 CHVCs im Mittel $\Delta v \approx 25 \text{ km s}^{-1}$ bemißt, und f ist der Anteil der HI-Masse an der Gesamtmasse der Wolke. Die Gleichung beschreibt also in unserem Fall einen Gleichgewichtszustand zwischen der nach innen wirkenden Gravitationskraft auf der einen Seite, die durch die HI-Masse der Wolke bestimmt wird, und dem nach außen gerichteten, durch die thermische Bewegung der Wasserstoffatome verursachten Gasdruck auf der anderen Seite, der durch die Halbwertsbreite der HI-Linien charakterisiert wird. Neben der HI-Masse erwarten wir möglicherweise einen Anteil an Dunkler Materie sowie Helium, das in Gaswolken primordialer Zusammensetzung noch einmal 40% der HI-Masse beiträgt. Wenn wir Gleichung (27) nach f auflösen, so erhalten wir für die prognostizierte Entfernung von $d \approx 1 \text{ Mpc}$

$$f = \frac{8 \ln 2}{6} \frac{GM_{\text{HI}}}{\Delta v^2 d} \approx 0.033. \quad (28)$$

Dies ist ein interessantes Resultat, bedeutet es doch, daß lediglich etwa 3.3% der Gesamtmasse einer CHVC in Gestalt neutralen, atomaren Wasserstoffs vorläge, falls CHVCs durch ihre Eigengravitation stabilisiert würden! Nach Berücksichtigung des Masseanteils des Heliums verblieben noch immer gut 95% an unbekannter, fehlender Masse. CHVCs müßten in einer angenommenen Entfernung von $d \approx 1 \text{ Mpc}$ somit zu einem weit überwiegenden Teil aus Dunkler Materie bestehen, um eine Stabilisierung durch Eigengravitation zu gewährleisten. Die Situation würde sehr schwierig, falls wir statt dessen eine mittlere CHVC-Entfernung von nur 100 kpc annähmen. Der Anteil von neutralem Wasserstoff und Helium an der Gesamtmasse würde dann sogar auf nur noch knapp 0.5% schrumpfen, so daß die Dunkle Materie beinahe die gesamte Masse der CHVCs stellen würde. Erst in Entfernungen von $d \gtrsim 1 \text{ Mpc}$ wären nach diesen Ergebnissen gravitativ stabilisierte CHVCs mit einem realistischen Anteil an Dunkler Materie möglich. In solchen Entfernungen würde jedoch die Gesamtmasse der Wolken auf sehr große Werte ansteigen. In Tabelle 4 sind die zuvor berechneten physikalischen Eigenschaften der 39 CHVCs für den zirkumgalaktischen Fall ($d = 100 \text{ kpc}$) und den intergalaktischen Fall ($d = 1 \text{ Mpc}$) noch einmal zusammengestellt.

Tabelle 4: Zusammenfassung der physikalischen Eigenschaften der 39 untersuchten CHVCs in angenommenen Entfernungen von $d = 100$ kpc und $d = 1$ Mpc und unter der Annahme einer sphärischen Symmetrie. Es sind R der Radius, n_{HI} die Dichte der neutralen Wasserstoffatome, M_{HI} die HI-Masse, $f_{\text{HI+He}}$ der relative Anteil von HI und assoziiertem Helium an der Gesamtmasse, P/k der zur Stabilisierung notwendige Außendruck und n_e die maximale Elektronendichte des umgebenden Mediums.

d	100 kpc	1 Mpc
R	600 pc	6 kpc
n_{HI}	$1.5 \cdot 10^{-2} \text{ cm}^{-3}$	$1.5 \cdot 10^{-3} \text{ cm}^{-3}$
M_{HI}	$3 \cdot 10^5 M_{\odot}$	$3 \cdot 10^7 M_{\odot}$
$f_{\text{HI+He}}$	0.45 %	4.5 %
P/k	400 K cm^{-3}	40 K cm^{-3}
n_e	10^{-4} cm^{-3}	10^{-5} cm^{-3}

Einen Alternative bietet die Annahme einer (zusätzlichen) Stabilisierung durch den Außendruck P eines umgebenden intergalaktischen Mediums. In diesem Fall ist der Virialsatz um einen zusätzlichen Druckterm zu erweitern:

$$\frac{GM_{\text{tot}}^2}{R} + 3PV = \frac{6}{8 \ln 2} M_{\text{tot}} \Delta v^2. \quad (29)$$

Hierbei sei M_{tot} die Gesamtmasse der Wolke. Nehmen wir einmal den ungünstigsten Fall an, CHVCs beständen ausschließlich aus neutralem Wasserstoff, das heißt $M_{\text{tot}} = M_{\text{HI}}$. Gleichung 29 läßt sich leicht nach dem Druck P umstellen, und wir erhielten für eine angenommene Entfernung der CHVCs von $d \approx 1$ Mpc einen zur Stabilisierung notwendigen Außendruck von $P/k \approx 40 \text{ K cm}^{-3}$, worin k die Boltzmann-Konstante ist. Würden wir die CHVC-Population in einer typischen Entfernung von nur $d \approx 100$ kpc ansiedeln, so ergäbe sich ein notwendiger Außendruck von $P/k \approx 400 \text{ K cm}^{-3}$. Wenn wir nun annehmen, das Gas habe eine Temperatur in der Größenordnung von $T \approx 10^6 \text{ K}$ (vgl. Rasmussen et al. 2003 [24]) und enthalte einen Anteil von 10% Helium, so folgt die Elektronendichte dieses die CHVCs umgebenden Mediums zu

$$n_e = 0.52 \frac{P}{kT} \approx 10^{-5} \dots 10^{-4} \text{ cm}^{-3}. \quad (30)$$

Dieses Ergebnis zeigt, daß durch die Kombination eines Dunkle-Materie-Anteils in der Größenordnung von 10% mit einem realistischen Außendruck durch ein umgebendes Medium eine Stabilisierung kompakter Hochgeschwindigkeitswolken im intergalaktischen Medium der Lokalen Gruppe auf verschiedenen Entfernungsskalen möglich wird. Eine Stabilisierung allein durch den gravitativen Einfluß Dunkler Materie ist besonders bei geringeren Entfernungen um 100 kpc unwahrscheinlich, weil sie außergewöhnlich große Dunkle-Materie-Anteile an der Masse der CHVCs erfordern würde, die mit den in vielen Galaxienhaufen und Galaxien beobachteten Werten, die typischerweise um 5 bis 10% liegen, nicht verträglich wären.

Der letzte Schluß läßt sich umkehren: Sollten CHVCs stabil sein, so ist es wahrscheinlich, daß sie sich in einem umgebenden Medium bewegen, das durch seinen Druck zu ihrer Stabilisierung beiträgt. Dies ist ein Hinweis auf das mögliche Vorhandensein eines intergalaktischen Mediums in der Lokalen Gruppe, wobei aber natürlich über die Entfernungen der CHVCs keine

glaubwürdigen Informationen vorliegen (siehe Kapitel 3.2). Es wäre ebenso denkbar, daß sich die CHVC-Population gar nicht über die Lokale Gruppe hinweg erstreckt, sondern sich in der Umgebung der Milchstraße aufhält. Im Umfeld des galaktischen Halos wären die für eine potentielle Druckstabilisierung der CHVCs notwendigen Teilchendichten durchaus vorhanden, so daß ein die gesamte Lokalen Gruppe durchziehendes Medium gar nicht notwendig wäre. Wo auch immer sich das stabilisierende Medium befindet, es läßt sich unter Umständen durch den Nachweis von Wechselwirkungen mit dem HI-Gas der CHVCs indirekt nachweisen. In der Tat zeigen neue Ergebnisse von Brüns, Kerp & Pagels 2001 [8], daß CHVC 125+41–207 eine kometenförmige, sogenannte Kopf-Schweif-Struktur zeigt, die sich durch das Abstreifen einer diffusen Hülle warmen Gases von einem kompakten, kalten Kern erklären ließe. Dieses Resultat legt nahe, ausgewählte Objekte unter den 41 kartierten CHVCs noch einmal mit dem 100-m-Teleskop in Effelsberg zu untersuchen, um durch eine tiefere Integration der Spektren nach solchen Wechselwirkungsanzeichen zu suchen, die sich im Fall von CHVC 125+41–207 erst unterhalb einer HI-Säulendichte von $N_{\text{HI}} \approx 10^{19} \text{ cm}^{-2}$ und damit unterhalb der Nachweisgrenze der vorliegenden Daten manifestieren (vergleiche hierzu auch Kapitel 3.3).

Einen weiteren Hinweis auf die Existenz eines intergalaktischen Mediums in der Lokalen Gruppe, das die Druckstabilisierung von CHVCs bewirken könnte, liefert eine aktuelle Veröffentlichung von Rasmussen, Kahn & Paerels 2003 [24]. Die Autoren finden hochionisierten Sauerstoff (OVII und OVIII) in Röntgenabsorption gegen drei aktive Galaxienkerne und vermuten, die Absorption könne durch ein heißes Medium erfolgen, das sich in der Lokalen Gruppe befinde. Mit Hilfe weiterer Annahmen können sie die Eigenschaften dieses potentiellen hypothetischen Mediums eingrenzen. Für seine Ausdehnung erhalten sie Werte zwischen 100 kpc und 1 Mpc. Dies wäre verträglich sowohl mit einem ausgedehnten Halo der Milchstraße als auch mit einer mehr oder weniger kontinuierlichen Verteilung über die gesamte Lokale Gruppe hinweg. Die von Rasmussen et al. 2003 ermittelten Elektronendichten liegen im Bereich von $n_e \approx 7 \cdot 10^{-5} \dots 2 \cdot 10^{-4} \text{ cm}^{-3}$ bei einer wahrscheinlichen Temperatur des Gases von ungefähr $2 \cdot 10^6 \text{ K}$. Anhand der idealen Gasgleichung können wir daraus die erwarteten Drücke abschätzen, die durch dieses intergalaktische Medium ausgeübt würden, und erhalten

$$P/k = 1.9 \cdot n_e T \approx 300 \dots 750 \text{ K cm}^{-3}. \quad (31)$$

Der Faktor 1.9 folgt aus der Annahme, das Gas sei vollständig ionisiert und weise neben Wasserstoff den für primordiales Gas typischen Anteil an Heliumatomen von etwa 10% auf. Das obige Resultat ist zumindest der Größenordnung nach verträglich mit den Werten von $40 \dots 400 \text{ K cm}^{-3}$, die wir zuvor als für eine reine Druckstabilisierung der CHVCs notwendig abgeschätzt hatten, indem wir von den typischen Eigenschaften der 39 mit dem Effelsberg-Teleskop beobachteten Objekten ausgegangen waren. Es verdichten sich damit die Hinweise auf die Existenz eines heißen, intergalaktischen Mediums, das sich innerhalb der Lokalen Gruppe über eine Entfernung von einigen hundert kpc von der Milchstraße erstreckt mit einer typischen Dichte von $n_e \approx 10^{-5} \dots 10^{-4} \text{ cm}^{-3}$ und einer Temperatur um 10^6 K . Dieses Medium könnte nicht nur die Stabilisierung der CHVCs bewirken, sondern mitunter auch Wechselwirkungsprozesse hervorrufen, wie sie jüngst durch Brüns, Kerp & Pagels 2001 [8] im Fall von CHVC 125+41–207 beobachtet wurden.

Es muß jedoch klargestellt werden, daß eine Druckstabilisierung der CHVCs und damit das Vorhandensein eines intergalaktischen Mediums nicht zwingend erforderlich sind. Es ist durchaus denkbar, daß eine zusätzliche Stabilisierung der CHVCs durch die Wirkung von Magnetfeldern

erfolgt, so daß das zuvor postulierte, vergleichsweise dichte intergalaktische Medium in dieser Form gar nicht notwendig ist. Wir können leicht abschätzen, daß eine magnetische Flußdichte von $B \approx 0.4 \dots 1.2 \mu\text{G}$ ($4 \dots 12 \cdot 10^{-11} \text{ T}$) notwendig ist, um einen magnetischen Druck von $P/k \approx 40 \dots 400 \text{ K cm}^{-3}$ auf ein reines Plasma auszuüben. Darüber hinaus wäre es natürlich auch denkbar, daß CHVCs sich überhaupt nicht im Gleichgewicht befinden, sondern sich innerhalb kurzer Zeiträume verflüchtigen. In diesem Fall wären die Entwicklungszeiten der CHVCs aber kurz und wir hätten vergleichsweise junge Objekte vor uns. Unter diesen Umständen wäre es schwierig, Entstehungsszenarien für CHVCs zu entwickeln, die mit den kurzen Entwicklungszeiten verträglich wären, so daß eine Stabilisierung der Wolken wahrscheinlicher ist.

Fassen wir abschließend die in diesem Kapitel gewonnenen Ergebnisse über die dynamischen Eigenschaften der untersuchten Auswahl von 39 kompakten Hochgeschwindigkeitswolken noch einmal in kurzen Stichpunkten zusammen:

- Mit einer mittleren Säulendichte von $N_{\text{HI}} = (5.3 \pm 3.3) \cdot 10^{19} \text{ cm}^{-2}$ besäßen CHVCs in der von Braun & Burton 1999 prognostizierten typischen Entfernung von $d \approx 1 \text{ Mpc}$ eine mittlere HI-Masse von ungefähr $3 \cdot 10^7 M_{\odot}$, was unter Hinzunahme des Heliumanteils sowie etwaiger Dunkler Materie ungefähr der Masse kleiner Zwerggalaxien entspricht.
- Es läßt sich abschätzen, daß die HI-Masse allein nicht ausreichen würde, um CHVCs in dieser Entfernung allein anhand ihrer Eigengravitation zu stabilisieren. Statt dessen wäre ein Anteil von gut 95% an Dunkler Materie notwendig, um eine Stabilisierung zu erreichen.
- Nimmt man eine zirkumgalaktische CHVC-Population mit typischen Entfernungen von nur $d \approx 100 \text{ kpc}$ an, so müßten CHVCs sogar aus etwa 99.5% Dunkler Materie bestehen, um eine gravitative Stabilisierung zu gewährleisten. Dieser Wert erscheint unrealistisch hoch. Vermutlich gibt es neben der Gravitation eine weitere Druckkomponente zur Stabilisierung von CHVCs.
- Eine Stabilisierung der CHVCs könnte durch den Druck eines umgebenden intergalaktischen Mediums erfolgen, wobei bei einer reinen Druckstabilisierung Drücke von $P/k \approx 40 \dots 400 \text{ K cm}^{-3}$ erforderlich wären. Dies ist der Größenordnung nach verträglich mit aktuellen Ergebnissen von Rasmussen, Kahn & Paerels 2003 [24], die aus Absorptionslinien hochionisierten Sauerstoffs auf das Vorhandensein sowie die Eigenschaften eines heißen, intergalaktischen Mediums in der Lokalen Gruppe schließen.
- Neben der Stabilisierung der CHVCs sollte ein solches Medium mitunter auch Wechselwirkungsprozesse mit dem Gas der CHVCs bewirken, wie sie durch Brüns, Kerp & Pagels 2001 [8] bereits nachgewiesen wurden. Die vorliegenden Daten der Effelsberg-Durchmusterung sind aber nicht sensitiv genug, um Gasabstreifungen in Gestalt von Kopf-Schweif-Strukturen nachzuweisen, so daß tiefere Nachbeobachtungen ausgewählter Objekte notwendig sind, um Wechselwirkungsvorgänge sichtbar zu machen.

7 Auswahlkriterien für eine tiefere Kartierung

Die Ergebnisse der Untersuchung der kollektiven Eigenschaften der 39 mit dem 100-m-Teleskop in Effelsberg kartierten CHVCs legen nahe, ausgewählte Objekte erneut mit diesem Instrument zu beobachten, um durch eine tiefere Integration die physikalischen Bedingungen in den CHVCs und ihrer Umgebung näher zu beleuchten. Insbesondere wird die Entfernung der Wolken zur Zeit kontrovers diskutiert, und es liegen derzeit keine glaubwürdigen Entfernungsbestimmungen vor (siehe Kapitel 3.2). Die zuvor gewonnenen Einsichten über die Struktur der CHVCs und die mögliche Existenz eines die Lokale Gruppe durchziehenden intergalaktischen Mediums legen jedoch das Vorhandensein von Wechselwirkungsprozessen nahe, die in der Gestalt der Wolken ihren Niederschlag finden sollten. Aus diesem Grund erscheint es vielversprechend, eine Auswahl von CHVCs tiefer zu integrieren, um mögliche Wechselwirkungsvorgänge sichtbar zu machen, zumal sich viele der in der Durchmusterung untersuchten Objekte nur „mit Mühe“ über das Rauschen erheben können, so daß mögliche schwache Wechselwirkungsphänomene erst durch tiefere Integration in Erscheinung treten würden. Falls der Nachweis von durch Staudruck verursachten Wechselwirkungsvorgängen gelänge, so ergäbe sich daraus vielleicht die Möglichkeit, etwas über die Struktur und die Eigenschaften des potentiellen Mediums auszusagen, in das die CHVC-Population eingebettet sein könnte.

7.1 Festlegung der Auswahlkriterien

Es ist notwendig, anhand bestimmter Auswahlkriterien die Objekte zu selektieren, bei denen eine tiefere Beobachtung sinnvoll erscheint. Zunächst können aus der Liste der kartierten Objekte CHVC 42, 43 und 44 aus der weiteren Betrachtung ausgeschlossen werden, denn es hat sich gezeigt, daß es sich bei allen drei Objekten mit großer Wahrscheinlichkeit um Verdichtungen oder Knoten im Bereich einer filamentären Struktur des *Leading Arm* handelt (Christian Brüns, Dissertation 2003). Auch CHVC 15 ist von den weiteren Betrachtungen auszunehmen, da Burton et al. 1999 [5] nachweisen konnten, daß es sich bei diesem Objekt um eine LSB-Spiralgalaxie handelt.

Eine weitere Hilfe bei der Erlangung von Auswahlkriterien für eine tiefere Beobachtung ist die Arbeit von de Heij, Braun und Burton 2002 [10], in der die Autoren den Leiden/Dwingeloo-Survey erneut nach Hochgeschwindigkeitswolken durchsuchen, diesmal mit Hilfe einer verbesserten, automatisierten Suchroutine. Gegenüber Braun & Burton 1999 [2] können einige Objekte aus dem Katalog kompakter Hochgeschwindigkeitswolken entfernt werden, da sie den gewählten Isolationskriterien nicht genügen oder inzwischen eine Zuordnung als Galaxie, als Teil des Magellanschen Systems oder als HI-Gas galaktischen Ursprungs gelungen war. Andere Objekte können als CHVCs zumindest in Frage gestellt werden, wenn zum Beispiel ihre Geschwindigkeit nicht im gewählten Rahmen bleibt oder es Hinweise für eine mögliche Assoziation mit nahen Strukturen gibt. Nach einem Abgleich der 39 im Rahmen meiner Arbeit untersuchten CHVCs mit dem neuen Katalog von de Heij, Braun und Burton 2002 [10] verbleiben nur 17 Objekte, die auch nach den verbesserten Kriterien noch als kompakte Hochgeschwindigkeitswolken klassifiziert werden. Da eine hinreichend tiefe Kartierung dieser 17 Objekte mit dem Effelsberg-Teleskop aus Zeitgründen kaum möglich ist, muß eine weitere Einschränkung potentiell interessanter Wolken vorgenommen werden.

Ein weiteres, sinnvolles Kriterium für die Auswahl von CHVCs zur tieferen Nachbeobachtung ergibt sich aus dem Vergleich der mit dem Effelsberg-Teleskop gewonnenen maximalen Säulendichten $N_{\text{HI}}^{\text{Eff}}$ mit den von Braun & Burton 1999 [2] gefundenen Säulendichten aus dem Leiden/Dwingeloo-Survey $N_{\text{HI}}^{\text{LDS}}$. Angenommen, der von der Antennenkeule abgedeckte Bereich sei nicht gleichmäßig mit Gas angefüllt, sondern beinhalte kompakte Kerne mit einem deutlich kleineren Winkeldurchmesser als dem der Hauptkeule. Sei $\mathcal{N}$ die Zahl der kompakten Kerne über die Antennenkeule, f_B der sogenannte Antennenkeulen-Füllfaktor eines Kerns (das heißt das Verhältnis seines Raumwinkels zu dem der Antennenkeule) sowie N_{HI}^C die als konstant angenommene Säulendichte eines Kerns. Dann ergibt sich die mittlere mit dem Teleskop gemessene Säulendichte anhand einer stark vereinfachten geometrischen Betrachtung zu

$$N_{\text{HI}} = \mathcal{N} f_B N_{\text{HI}}^C = \mathcal{N} \frac{R_C^2}{R_B^2} N_{\text{HI}}^C, \quad (32)$$

wobei R_C der Durchmesser eines Kerns und R_B der Hauptkeulendurchmesser des Teleskops sind. Bildet man nun das Verhältnis der mit Effelsberg ($R_{\text{Eff}} = 9'$ HPBW) und Dwingeloo ($R_{\text{Dwl}} = 36'$ HPBW) gemessenen Säulendichten, so erhält man

$$\frac{N_{\text{HI}}^{\text{Eff}}}{N_{\text{HI}}^{\text{LDS}}} = 16 \frac{\mathcal{N}_{\text{Eff}}}{\mathcal{N}_{\text{LDS}}}. \quad (33)$$

Dieses Verhältnis sollte ≥ 1 sein, da das Dwingeloo-Teleskop mit 25 m Durchmesser eine viel größere Hauptkeule besitzt und damit am Himmel einen viel größeren Winkel abdeckt. Der maximale Wert von $N_{\text{HI}}^{\text{Eff}}/N_{\text{HI}}^{\text{LDS}} = 16$ ist dann gegeben, wenn der Kern kleiner ist als der Hauptkeulendurchmesser des Effelsberg-Teleskops, so daß er mit beiden Instrumenten nicht aufgelöst werden kann. Ist das Objekt hingegen größer als selbst der Durchmesser der Dwingeloo-Hauptkeule, so ergibt sich ein Wert von 1. Ein Wert zwischen 1 und 16 bedeutet aber nun, daß das Objekt kleine, kompakte Strukturen aufweist, die mit dem Dwingeloo-Teleskop auf Grund der größeren Auflösung nicht nachweisbar sind, wohl aber mit dem Effelsberg-Teleskop aufgelöst werden können. Solche Objekte sind natürlich für eine tiefere Beobachtung interessant, da sie gegenüber dem Leiden/Dwingeloo-Survey in Unterstrukturen aufgelöst werden können, so daß mit ihrer Neubeobachtung ein möglicher Erkenntnisgewinn verbunden ist. Objekte hingegen, bei denen $N_{\text{HI}}^{\text{Eff}}/N_{\text{HI}}^{\text{LDS}} \approx 1$, zeigen gegenüber dem Leiden/Dwingeloo-Survey keine zusätzlichen Strukturen, und ihre erneute Beobachtung erscheint daher wenig sinnvoll.

Die Verteilung der untersuchten Wolken auf die verschiedenen Werte von $N_{\text{HI}}^{\text{Eff}}/N_{\text{HI}}^{\text{LDS}}$ zeigt das Histogramm in Abbildung 19. In der Tat liegen die kleinsten gemessenen Werte um 1, wie nach der Theorie zu erwarten wäre. Im Anschluß erkennt man zwei Häufungen. Eine findet sich bei Werten zwischen 1 und 2, die andere im Bereich zwischen 2.5 und 5. Danach bricht die Verteilung abrupt ab mit Ausnahme von zwei Wolken, die bei 5.5 und 5.7 liegen. Das heißt alle gemessenen Objekte liegen deutlich unterhalb des maximal möglichen Wertes von 16, der für nicht aufgelöste Wolken zu erwarten wäre. Im Umkehrschluß kann man also annehmen, alle kartierten Wolken seien mit dem Effelsberg-Teleskop aufgelöst worden. Bei dieser Interpretation, die in der Tendenz richtig sein wird, ist aber Vorsicht angebracht. Zum einen beruht sie auf der streng falschen Näherung, die Wolken seien kompakte Objekte mit konstanter Säulendichte. Zum anderen ist es möglich, daß sich auf Grund des groben Rasters der Karten sowohl die Effelsberg- als auch die LDS-Daten zu kleine Werte für die Säulendichte ergeben, falls die Bereiche maximaler Säulendichte gerade zwischen zwei Rasterpunkten am Himmel liegen. In solchen Fällen

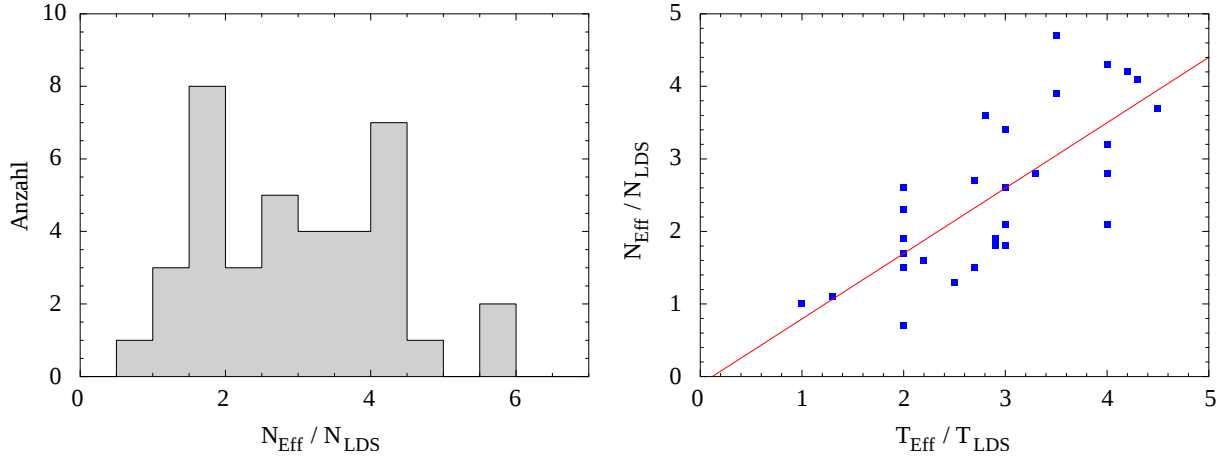


Abbildung 19: Linkes Diagramm: Histogramm der Verteilung aller beobachteten CHVCs (außer CHVC 15) über das Säulendichteeverhältnis zwischen Effelsberg und Dwingeloo. Rechtes Diagramm: Säulendichteeverhältnis zwischen Effelsberg und Dwingeloo aufgetragen gegen das Intensitätsverhältnis für alle CHVCs mit $N_{\text{HI}}^{\text{Eff}}/N_{\text{HI}}^{\text{LDS}} < 5$ und $T_{\text{Eff}}/T_{\text{LDS}} < 5$. In Rot ist die aus den Daten ermittelte Regressionsgerade eingezeichnet. Der lineare Zusammenhang deckt sich gut mit der theoretischen Erwartung nach Gleichung 36.

kann sich das Verhältnis der Säulendichten in beide Richtungen etwas verschieben. Auf Grund der geringeren Auflösung sind hier insbesondere die Daten aus dem Leiden/Dwingeloo-Survey empfindlich.

Nützlich ist auch die Untersuchung des sich aus den Effelsberg- und Dwingeloo-Messungen ergebenden Intensitätsverhältnisses. Für eine Wolke der Spintemperatur T_{S} und vernachlässigbarer Hintergrundemission ergibt sich nach Anhang A die mit dem Teleskop gemessene Intensität zu

$$T_{\text{B}} = T_{\text{S}} (1 - e^{-\tau}) \mathcal{N} f_{\text{v}} f_{\text{B}}, \quad (34)$$

wobei auf Grund der endlichen Auflösung des Teleskops noch der Hauptkeulenfüllfaktor f_{B} und der Geschwindigkeitsfüllfaktor f_{v} in die Formel einfließen, die angeben, in welchem Maß das Objekt die Antennenhauptkeule beziehungsweise ein Geschwindigkeitselement des Spektrums ausfüllen. Die Linienbreiten der CHVCs sind jedoch weit größer als die Geschwindigkeitsauflösungen des Leiden/Dwingeloo-Surveys und der Effelsberg-Durchmusterung, die beide bei gut 1 km s^{-1} liegen. Deswegen ist in beiden Fällen $f_{\text{v}} \approx 1$ zu setzen. Bilden wir nun ausgehend von Gleichung 34 das Verhältnis der mit Effelsberg und Dwingeloo gemessenen Intensitäten einer CHVC, so erhalten wir

$$\frac{T_{\text{Eff}}}{T_{\text{LDS}}} = \frac{\mathcal{N}_{\text{Eff}}}{\mathcal{N}_{\text{LDS}}} \frac{f_{\text{v}}^{\text{Eff}}}{f_{\text{v}}^{\text{LDS}}} \frac{f_{\text{B}}^{\text{Eff}}}{f_{\text{B}}^{\text{LDS}}} = 16 \frac{\mathcal{N}_{\text{Eff}}}{\mathcal{N}_{\text{LDS}}} \quad (35)$$

Ein Vergleich mit Gleichung 33 offenbart, daß das Säulendichteeverhältnis somit gleich dem Verhältnis der mit beiden Instrumenten gemessenen Intensitäten ist:

$$\frac{N_{\text{HI}}^{\text{Eff}}}{N_{\text{HI}}^{\text{LDS}}} = \frac{T_{\text{Eff}}}{T_{\text{LDS}}}. \quad (36)$$

Im rechten Diagramm in Abbildung 19 habe ich das Säulendichteverhältnis der CHVCs aus der Effelsberg-Durchmusterung gegen das Intensitätsverhältnis zwischen Effelsberg- und Dwingeloo-Beobachtungen aufgetragen. Einige Objekte, die auffallend große Werte von $N_{\text{HI}}^{\text{Eff}}/N_{\text{HI}}^{\text{LDS}} \geq 5$ oder $T_{\text{Eff}}/T_{\text{LDS}} \geq 5$ aufweisen, sind in dem Diagramm nicht berücksichtigt. Bei solch großen Verhältnissen besteht nämlich die Gefahr, daß sie durch eine Unterschätzung von Säulendichte und Intensität im Leiden/Dwingeloo-Survey entstehen, die mit einem Zusammenfallen der Säulendichtemaxima mit einer Position zwischen zwei Rasterpunkten am Himmel in Zusammenhang steht. Deshalb sind auffallend große Säulendichte- und Intensitätsverhältnisse möglicherweise stark fehlerbehaftet. Die verbleibenden 29 CHVCs mit Säulendichten- bzw. Intensitätsverhältnissen < 5 bestätigen den nach der Theorie erwarteten linearen Zusammenhang. Die durch die Datenpunkte gelegte Regressionsgerade ist von der Gestalt

$$\begin{aligned}\Delta N_{\text{HI}} &= a \Delta T + b, \\ a &= 0.90 \pm 0.15, \\ b &= -0.11 \pm 0.46.\end{aligned}\tag{37}$$

Hierin sind $\Delta N_{\text{HI}} := N_{\text{HI}}^{\text{Eff}}/N_{\text{HI}}^{\text{LDS}}$ und $\Delta T := T_{\text{Eff}}/T_{\text{LDS}}$. Die Ergebnisse sind mit den nach Gleichung 36 erwarteten Werten von $a = 1$ und $b = 0$ in guter Übereinstimmung, so daß das Säulendichteverhältnis tatsächlich ein mit der Theorie in Einklang stehendes, geeignetes Werkzeug zur Charakterisierung kompakter Strukturen zu sein scheint. Der gegenüber der theoretischen Erwartung geringfügig flachere Verlauf der Ausgleichsgeraden läßt sich leicht verstehen, denn in der Theorie waren wir von Wolken mit homogener Säulendichte ausgegangen. Tatsächlich aber würden wir beim Vorhandensein kompakter Kerne in den Wolken mit dem Effelsberg-Teleskop eine etwas größere Intensität beobachten als mit dem Dwingeloo-Teleskop, das durch seine geringere Auflösung solche kompakten Kerne nicht detektieren würde. Somit würden wir gegenüber der theoretischen Erwartung bei einem ähnlichen Säulendichteverhältnis ein etwas größeres Intensitätsverhältnis erhalten, so daß der Verlauf der Geraden im $\Delta N_{\text{HI}}\text{-}\Delta T$ -Diagramm etwas flacher wird.

Ein erster praktischer Test für die Aussagekraft des Säulendichteverhältnisses als Kriterium für kompakte, kleinskalige Strukturen ist das Objekt CHVC 125+41–207, das sowohl mit Effelsberg und Dwingeloo als auch in hoher Auflösung mit dem *Westerbork Synthese Radiotelescoop* (WSRT) beobachtet wurde, so daß die Struktur der Wolke auf verschiedenen Skalen bekannt ist. Charakteristisch für CHVC 125+41–207 ist das Vorhandensein eines kalten Kerns (CNM) umgeben von einer Hülle warmen Mediums (WNM). In den Kern sind zwei auffällige Klumpen hoher Säulendichte eingebettet, die mit Effelsberg bereits getrennt werden können und mit den WSRT-Beobachtungen im Detail gesehen werden. Eine Auflösung dieser Klumpen ist mit dem Dwingeloo-Teleskop nicht möglich. Aus diesem Grund sollte man ein Säulendichteverhältnis deutlich größer als 1 und deutlich kleiner als 16 zwischen Effelsberg und LDS erwarten. Brüns, Kerp und Pagels [8] messen mit Hilfe von Effelsberg eine maximale Säulendichte von $1.2 \cdot 10^{20} \text{ cm}^{-2}$, während Braun & Burton 1999 [2] aus dem LDS eine Säulendichte von $2.4 \cdot 10^{19} \text{ cm}^{-2}$ extrahieren. Aus diesen Werten erhält man ein Säulendichteverhältnis von $N_{\text{HI}}^{\text{Eff}}/N_{\text{HI}}^{\text{LDS}} = 5.0$, was anhand der Theorie in der Tat in dem Bereich anzusiedeln ist, wo eine Auflösung mit Dwingeloo nicht erzielt werden kann, wohl aber eine teilweise Auflösung mit Effelsberg.

Eine weitere, aussagekräftige Überprüfung des Säulendichteverhältnisses als Kriterium für das Auftreten kleinskaliger Strukturen ist mit Hilfe des Objekts MS28933 möglich. Diese kom-

pakte Hochgeschwindigkeitswolke mit $v_{\text{LSR}} \approx 250 \text{ km s}^{-1}$ wurde von Christian Brüns mit Hilfe des 65-m-Teleskops in Parkes aufgefunden und erscheint mit diesem Instrument als punktförmige Quelle. Eine daraufhin durchgeführte Nachbeobachtung mit dem 100-m-Teleskop in Effelsberg konnte das Objekt ebenfalls nicht auflösen, so daß MS28933 wohl die bislang kompakteste bekannte CHVC darstellen dürfte. Zwar war MS28933 weder von Braun & Burton 1999 [2] noch von de Heij, Braun & Burton 2002 [10] aus dem Leiden/Dwingeloo-Survey extrahiert worden, doch war es auf Grund der Effelsberg-Beobachtungen möglich, die Wolke nachträglich im LDS aufzufinden, wo sie sich als schwache Linie ($T_{\text{B}} = 2.4 \sigma_{\text{rms}}$) knapp über das Rauschen zu erheben vermag. Somit ist ein Vergleich der Effelsberg- und Dwingeloo-Säulendichten möglich. Die Effelsberg-Messungen ergeben eine maximale Säulendichte von $N_{\text{HI}}^{\text{Eff}} = (3.05 \pm 0.13) \cdot 10^{19} \text{ cm}^{-2}$, und aus dem LDS konnte ich eine Säulendichte von $N_{\text{HI}}^{\text{LDS}} = (1.78 \pm 0.55) \cdot 10^{18} \text{ cm}^{-2}$ extrahieren. Die angegebenen Fehler sind die sich aus dem Gaußfit ergebenden statistischen Fehler. Anhand dieser Ergebnisse errechnet sich ein Säulendichteverhältnis von $N_{\text{HI}}^{\text{Eff}}/N_{\text{HI}}^{\text{LDS}} = 17.1 \pm 5.3$. Dieses Resultat entspricht genau den Erwartungen, denn es ist mit dem für unaufgelöste Quellen erwarteten maximalen Säulendichteverhältnis von 16 sehr gut verträglich. Tatsächlich scheint das Säulendichteverhältnis ein brauchbares Kriterium zu sein, um auf das Vorhandensein kompakter Strukturen und deren ungefähre Ausdehnung zu schließen.

7.2 Auswahl von CHVCs für eine tiefere Kartierung

Aus der mit dem Effelsberg-Teleskop beobachteten Auswahl von 39 kompakten Hochgeschwindigkeitswolken habe ich gemäß den zuvor entwickelten Auswahlkriterien eine Zusammenstellung von 12 CHVCs extrahiert, bei denen zum einen die Isolations- und Geschwindigkeitskriterien des verbesserten Katalogs von de Heij, Braun & Burton 2002 [10] streng erfüllt sind und zum anderen das Säulendichteverhältnis $N_{\text{HI}}^{\text{Eff}}/N_{\text{HI}}^{\text{LDS}} \geq 3$ beträgt. Eine tabellarische Übersicht über diese für eine tiefere Beobachtung mit dem 100-m-Teleskop in Effelsberg vorgeschlagenen Objekte findet sich in Tabelle 5, wo zusätzlich einige ihrer physikalischen Eigenschaften angegeben sind. Karten aller 12 Wolken sind in Abbildung 20 noch einmal zur Übersicht wiedergegeben.

Die Grenze von $N_{\text{HI}}^{\text{Eff}}/N_{\text{HI}}^{\text{LDS}} \geq 3$ ist natürlich in gewisser Weise willkürlich, und der Grund für diese Wahl liegt darin, daß die Anzahl der damit zur tieferen Beobachtung ausgewählten CHVCs mit 12 in einem handhabbaren und im Hinblick auf die in Effelsberg verfügbare Beobachtungszeit angemessenen Rahmen bleibt. Im folgenden möchte ich mögliche Auswahlwirkungen untersuchen, die im Zusammenhang mit diesem Kriterium auftreten. Der Mittelwert der Intensitäten der ausgewählten Objekte beträgt $\langle T_{\text{B}} \rangle = 1.5 \pm 0.6 \text{ K}$ und ist damit etwas größer als die mittlere Intensität der zugrundeliegenden Durchmusterung von 39 CHVCs, die nur $\langle T_{\text{B}} \rangle = 1.2 \pm 1.2 \text{ K}$ bemißt. Dieser Sachverhalt verwundert nicht, da gerade ein besonders großes Säulendichteverhältnis und somit nach Gleichung 36 ein besonders großes Intensitätsverhältnis zwischen Effelsberg- und Dwingeloo-Daten als Auswahlkriterium dient. So sind es ausgerechnet jene Objekte, die kompakte, dichte Klumpen großer Intensität beherbergen, die für die Nachbeobachtung nominiert werden, so daß die mittlere Intensität der ausgewählten CHVCs größer sein muß als die der zugrundeliegenden Durchmusterung.

Interessanterweise liegt jedoch die mittlere zentrale Säulendichte der 12 ausgewählten Wolken mit $\langle N_{\text{HI}} \rangle = (4.9 \pm 1.7) \cdot 10^{19} \text{ cm}^{-2}$ leicht unter dem Säulendichtemittel der 39 CHVCs aus der Durchmusterung. Die Ursache für diesen Befund dürfte in der im Vergleich zu den Intensitäten großen Streuung der Säulendichten liegen, die im linken Histogramm in Abbildung 18 einzusehen

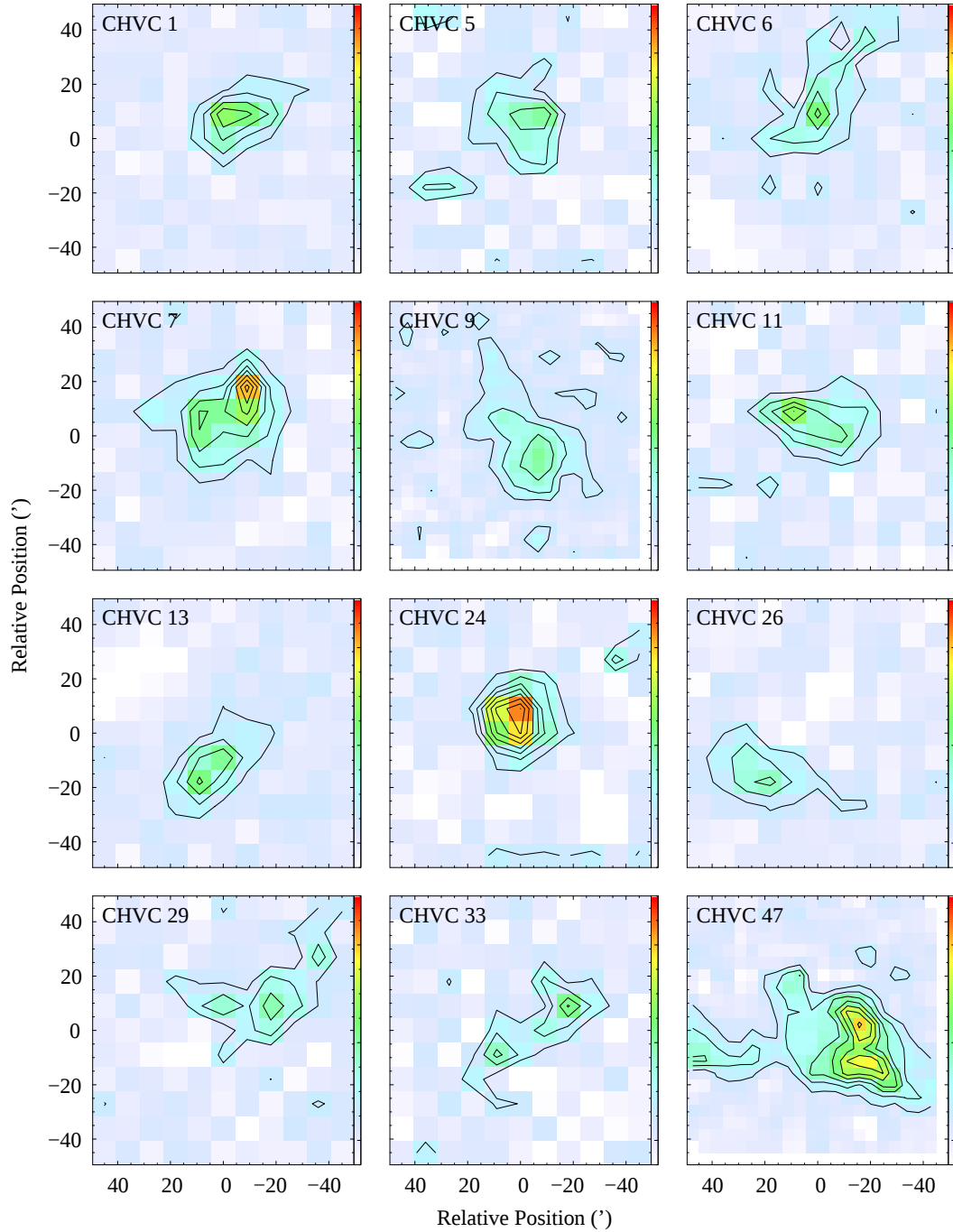


Abbildung 20: Karten der 12 zur Nachbeobachtung mit dem Effelsberg-Teleskop vorgeschlagenen CHVCs. Aufgetragen ist in Farbe der integrierte Fluß in einer linearen Skala von -5 bis 50 K km s^{-1} entsprechend einer maximalen Säulendichte von $9.1 \cdot 10^{19} \text{ cm}^{-2}$. Die Konturlinien laufen von $1 \cdot 10^{19} \text{ cm}^{-2}$ in Schritten von $1 \cdot 10^{19} \text{ cm}^{-2}$.

Tabelle 5: Auswahl von 12 CHVCs, die gemäß de Heij, Braun und Burton 2002 [10] alle notwendigen Kriterien der Isolation und Geschwindigkeit erfüllen und bei denen $N_{\text{HI}}^{\text{Eff}}/N_{\text{HI}}^{\text{LDS}} \geq 3$. Es bedeuten: α und δ die Rektaszension und die Deklination des Maximums der Säulendichte, v_{LSR} die mit der Säulendichte gewichtete mittlere Radialgeschwindigkeit im lokalen Bezugssystem, N_{HI} die maximal gemessene Säulendichte, T_{max} die maximal gemessene Intensität und $N_{\text{HI}}^{\text{Eff}}/N_{\text{HI}}^{\text{LDS}}$ das Säulendichteverhältnis zwischen den Effelsberg-Beobachtungen und dem Leiden/Dwingeloo-Survey.

#	Name (HVC $l \pm b \pm v$)	$\alpha(2000)$ (h:m:s)	$\delta(2000)$ (°:′)	v_{LSR} (km s ⁻¹)	N_{HI} (10 ¹⁹ cm ⁻²)	T_{max} (K)	$N_{\text{HI}}^{\text{Eff}}/N_{\text{HI}}^{\text{LDS}}$
1	HVC 017–25–218	19:59:06	–24:45	–228	5.0	2.8	4.2
5	HVC 032–31–299	20:41:06	–14:09	–309	5.6	1.5	4.0
6	HVC 039–37–231	21:15:36	–11:48	–241	3.9	1.8	3.5
7	HVC 039–33–260	21:01:00	–09:51	–261	7.0	1.6	3.2
9	HVC 040+01–282	19:02:36	06:36	–287	3.2	0.7	3.2
11	HVC 050–68–187	23:24:00	–19:00	–199	4.8	1.1	4.4
13	HVC 070+51–146	15:49:08	43:40	–145	4.0	1.0	3.1
24	HVC 148–82–258	01:05:00	–20:06	–268	7.6	2.1	4.2
26	HVC 157+03–185	04:48:04	49:21	–182	3.0	0.8	4.3
29	HVC 173–60–236	02:21:54	–05:39	–234	4.0	0.9	5.7
33	HVC 220–88–265	01:00:06	–27:21	–264	3.3	1.3	4.1
47	HVC 358+12–137	16:55:00	–23:42	–155	7.5	1.8	3.6

ist. Wir finden hier eine Reihe von Objekten mit verhältnismäßig großen Säulendichten vor, die zu einem erhöhten Mittelwert beitragen, jedoch nicht in die Auswahl der 12 CHVCs Einzug halten, so daß deren mittlere Säulendichte einen geringfügig niedrigeren Wert annehmen kann.

Die Radialgeschwindigkeiten der 12 ausgewählten CHVCs sind ausnahmslos negativ mit einem arithmetischen Mittel von $\langle v_{\text{LSR}} \rangle = -231 \pm 52 \text{ km s}^{-1}$, was durch das starke Überwiegen negativer LSR-Geschwindigkeiten in der zugrundeliegenden CHVC-Durchmusterung verständlich ist. Die mittlere Halbwertsbreite (FWHM) der HI-Linien der Objekte aus der Auswahl beträgt $\langle \Delta v \rangle = 20 \pm 4 \text{ km s}^{-1}$ und liegt damit etwas unter der mittleren Linienbreite der 39 CHVCs aus der Durchmusterung, die bei $\langle \Delta v \rangle = 25 \pm 8 \text{ km s}^{-1}$ liegt. Auch dieser Befund ist leicht verständlich, wenn wir annehmen, daß durch die Auswahlkriterien besonders jene CHVCs berücksichtigt werden, die kompakte, mit dem Effelsberg-Teleskop bereits aufgelöste Klumpen beherbergen. Solche Klumpen zeichnen sich für gewöhnlich durch geringere Temperaturen in der Größenordnung von einigen hundert Kelvin und somit durch schmalere HI-Linien aus.

Ein Anfang Oktober 2002 formulierter Antrag auf Beobachtungszeit mit dem 100-m-Teleskop in Effelsberg unter dem Titel „Deep HI Observations of Compact High-Velocity Clouds“, in dem wir vorschlugen, 11 der ausgewählten 12 CHVCs tiefer zu beobachten, wurde durch das Programmkomitee mit der Gesamtnote 1.5 bewertet und daraufhin vom Direktorenkollegium des Max-Planck-Instituts für Radioastronomie in vollem Umfang mit 130 beantragten Stunden genehmigt. Die ursprünglich in die Auswahl mit aufgenommene CHVC 13 wurde in dem Beobachtungsantrag nicht mehr berücksichtigt, da sich herausgestellt hatte, daß das Objekt durch Christian Brüns bereits in großem Detail mit dem Effelsberg-Teleskop kartiert worden war.

Das Ziel dieser neuen, tiefen Beobachtungen war es, die Gestalt der CHVCs bis hinunter zu Säulendichten in der Größenordnung von $N_{\text{HI}} \approx 10^{18} \text{ cm}^{-2}$ zu untersuchen. Zum einen wollten wir jedes Objekt erneut mit derselben Rasterung wie bisher, jedoch mit einer deutlich längeren Integrationszeit pro Position kartieren. Dies würde uns gestatten, die Struktur der gesamten Wolke bis hinunter zu einer gewünschten Säulendichtengrenze von $N_{\text{HI}} \approx 5 \cdot 10^{18} \text{ cm}^{-2}$ zu erfassen, wobei sich nach den bisherigen Simulationen und Beobachtungen bei einer solchen Sensitivität bereits die Anzeichen möglicher Wechselwirkungen mit einem umgebenden Medium manifestieren sollten. Darüber hinaus war geplant, entlang einer geeigneten, anhand der Karte ermittelten Achse einen Schnitt durch jede CHVC zu legen. Entlang dieses Schnitts wollten wir Spektren mit besonders feiner Abtastung von $4.5'$ und besonders tiefer Integration von 10 Minuten pro Spektrum aufnehmen, um die Verteilung des Gases bis hinunter zu $N_{\text{HI}} \approx 2 \cdot 10^{18} \text{ cm}^{-2}$ zu untersuchen. Die daraus zu erwartenden, detaillierten Einsichten in die Struktur und die physikalischen Eigenschaften des Gases könnten uns möglicherweise einen Einblick in die Verhältnisse eines die CHVCs potentiell umgebenden Mediums gewähren.

8 Tiefere Kartierung von CHVCs

Die tieferen Beobachtungen der 11 ausgewählten kompakten Hochgeschwindigkeitswolken wurden im Zeitraum zwischen dem 3. Oktober 2002 und dem 11. Mai 2003 am 100-m-Teleskop in Effelsberg durchgeführt. In diesem Kapitel möchte ich die Datenaufnahme und -auswertung beschreiben und auf dabei auftretende Interferenzprobleme und ihre Auswirkungen eingehen.

8.1 Aufnahme der Daten

Mit CHVC 218+29+145 wurde ein ursprünglich nicht vorgesehenes Objekt aus dem neuen CHVC-Katalog von de Heij, Braun & Burton 2002 [10] kartiert, das sich als „Lückenfüller“ in Zeiträumen anbot, in denen keines der geplanten Objekte hoch genug am Himmel stand, um beobachtet zu werden. Darüber hinaus konnte ich aus Zeitmangel CHVC 6 nicht beobachten, so daß von den ursprünglich anhand der Auswahlkriterien selektierten 12 Wolken CHVC 6 und CHVC 13 nicht beobachtet wurden, stattdessen aber CHVC 218+29+145 als zusätzliches, nicht vorgesehenes Objekt in das Beobachtungsprogramm mit aufgenommen wurde. Es verbleiben somit 11 Wolken, die mit dem Effelsberg-Teleskop tiefer kartiert wurden.

Für jedes Objekt wurde eine Karte von 11×11 Punkten auf einem $9'$ -Raster gemessen, die auf den anhand der vorangegangenen Durchmusterung abgeschätzten Mittelpunkt der Säulendichteverteilung jeder Wolke zentriert war. Jedes Spektrum wurde 180 Sekunden lang im sogenannten *Inband-Frequency-Switch*-Verfahren integriert, das ein gegenüber dem gewöhnlichen *Frequency-Switch*-Modus etwas vermindertes Rauschen liefert und in Anhang B näher erläutert ist. Aus der dabei verwandten Bandbreite von $\Delta\nu = 6.3$ MHz resultiert eine Geschwindigkeitsauflösung von $\Delta v = 2.6 \text{ km s}^{-1}$ und eine mittlere Nachweisgrenze der Säulendichte von $N_{\text{HI}} \approx 4 \dots 7 \cdot 10^{18} \text{ cm}^{-2}$.

Die einzige Ausnahme bildete CHVC 218+29+145. Bei einer ersten Sondierung dieses Objekts beobachtete ich Linienbreiten von zum Teil nur 4 km s^{-1} FWHM. Die beim *Inband-Frequency-Switch*-Verfahren notwendige Bandbreite von $\Delta\nu = 6.3$ MHz liefert aber mit $\Delta v = 2.6 \text{ km s}^{-1}$ eine zu geringe Geschwindigkeitsauflösung, um die schmalen Linien von CHVC 218+29+145 noch hinreichend gut auflösen zu können. Aus diesem Grund mußte ich hier eine geringere Bandbreite von $\Delta\nu = 3.1$ MHz wählen, wodurch bei einer auf $\Delta v = 1.3 \text{ km s}^{-1}$ verbesserten Geschwindigkeitsauflösung aber nur noch das gewöhnliche *Frequency-Switch*-Verfahren benutzt werden konnte. Aus diesem Grund ist das Rauschen in den Spektren von CHVC 218+29+145 etwa um einen Faktor 2 größer als bei den anderen kartierten Objekten.¹

Durch jedes der 11 kartierten Objekte hatte ich darüber hinaus eine geeignete Achse gelegt, entlang der ich Spektren mit einer noch längeren Integrationszeit von im Mittel 10 Minuten und mit noch genauerer Abtastung von $4.5'$ oder $6.4'$ aufnahm. Dadurch war es möglich, den Verlauf der HI-Säulendichte, der Linienbreite sowie der Radialgeschwindigkeit entlang der Symmetrieachse jeder CHVC in großem Detail und mit einer Nachweisgrenze von $N_{\text{HI}} \approx 2 \dots 5 \cdot 10^{18} \text{ cm}^{-2}$ in Säulendichte zu studieren. Die Achse hatte ich dabei so festgelegt, daß sie entweder entlang der offenkundigen Symmetrieachse oder entlang des größten Gradienten der Radialgeschwindigkeit verlief.

¹Ein Faktor $\sqrt{2}$ ergibt sich durch die andere Beobachtungsmethode, und ein weiterer Faktor $\sqrt{2}$ entsteht durch die höhere Geschwindigkeitsauflösung.

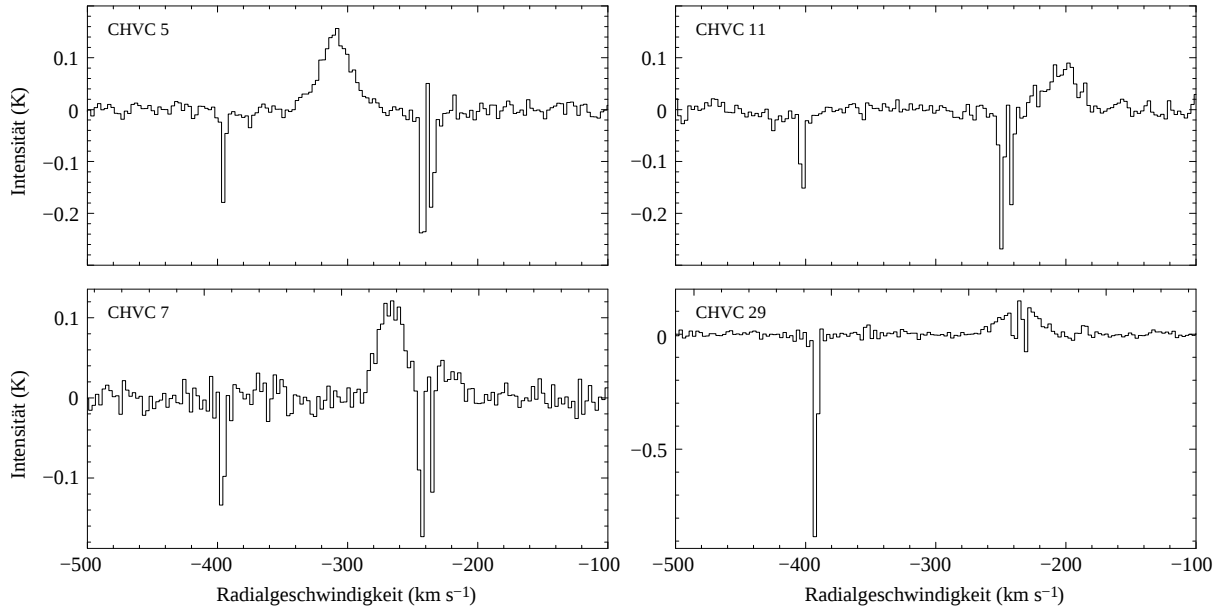


Abbildung 21: Die gezeigten Spektren einiger tiefer kartierter CHVCs wurden jeweils aus einer unterschiedlichen Anzahl von Einzelspektren gemittelt. Man erkennt deutlich das Auftreten von Interferenzlinien mit negativem Signal, die über alle Beobachtungen hinweg beinahe stationär blieben.

8.2 Reduktion und Auswertung der Daten

Die Reduktion und Auswertung der tieferen CHVC-Beobachtungen erfolgte genau in derselben Form wie bei der vorangegangenen Durchmusterung der 41 CHVCs, so daß an dieser Stelle auf Kapitel 5 verwiesen sei, wo die einzelnen Schritte im Detail erläutert werden. Während der Datenreduktion mußte allerdings an einer Stelle ein zusätzlicher Schritt getan werden, der mit einer Eigenheit bei der Ermittlung der Rohspektren in Effelsberg in Zusammenhang stand und erst durch die Benutzung der *Inband-Frequency-Switch*-Methode notwendig wurde. Dieser zusätzliche Schritt wird im Zusammenhang mit der Beschreibung des *Inband-Frequency-Switch*-Verfahrens in Anhang B diskutiert.

8.3 Interferenzprobleme

Bei der Auswertung der Spektren stellte sich heraus, daß nach dem Mitteln vieler Einzelspektren sich Interferenzlinien mit negativem Signal und Intensitäten von im allgemeinen 0.1 . . . 0.2 K zeigten (siehe Abbildung 21). Sie sind damit zu schwach, um in den Einzelspektren klar hervorzutreten. Da die Amplituden negativ sind, müssen die Signale im Rahmen der Datengewinnung von den Spektren subtrahiert worden sein, so daß es sich um Signale im Referenzspektrum handeln muß (vgl. auch Anhang B). Es fällt darüber hinaus auf, daß die Interferenzlinien ihre Gestalt als Singulett- und Duplettlinie bei allen Beobachtungen beibehielten, so daß es sich in allen Fällen um dieselbe Störquelle gehandelt haben muß.

Auch die Position der Linien im Spektrum ist für alle Beobachtungen beinahe dieselbe, wobei geringe Linienverschiebungen dadurch auftreten, daß es sich um eine terrestrische Quelle

handelt, die gegenüber dem lokalen Bezugssystem (LSR) im Laufe der Zeit ihre Geschwindigkeit natürlich ändert, weil sich die Erde auf Grund ihrer Rotation und Revolution relativ zum LSR beschleunigt bewegt. Darüber hinaus sind die Interferenzen in allen Messungen nachweisbar, die immerhin von Oktober 2002 bis Mai 2003 reichten. Ihr Auftreten ist dabei unabhängig von der Tageszeit, zu der die Spektren aufgenommen wurden, und unabhängig von der Position, auf die das Teleskop gerichtet war.

Diese Umstände legen nahe, daß die Störung durch eine Installation im Teleskop selbst erzeugt wird und möglicherweise aus dem Primär- oder Sekundärfokus direkt in den Empfänger gelangt. Aus diesem Grund wurde der für die Interferenzsituation in Effelsberg zuständige Mitarbeiter am Max-Planck-Institut für Radioastronomie auf die Situation aufmerksam gemacht, und es wurden ihm einige Beispielspektren zur Analyse des Problems an die Hand gegeben.

Glücklicherweise läßt sich bei Kenntnis des Interferenzproblems die Störung umgehen, indem das Referenzband bei den *Frequency-Switch*-Beobachtungen um einen kleinen Betrag in seiner Frequenz verschoben wird. Da sich die Störsignale im Referenzband aufhalten, können wir somit ihre Position relativ zu den Spektrallinien der kompakten Hochgeschwindigkeitswolken verschieben, bis die Spektrallinien in einen störungsfreien Bereich des Spektrum fallen. Außerdem sollten die Interferenzsignale auf Grund ihrer vergleichsweise geringen Intensitäten bei der Auswertung der Einzelspektren zu keinen nennenswerten Fehlern führen. Nehmen wir beispielsweise eine mittlere Breite der Störsignale von einem Kanal und eine mittlere Intensität von 0.2 K an, so ergibt sich ein scheinbarer Säulendichtebeitrag einer solchen Interferenzlinie von knapp $1 \cdot 10^{18} \text{ cm}^{-2}$, was im Vergleich zu den erzielten Nachweisgrenzen vernachlässigt werden kann.

Allenfalls in den Fällen, in denen die Störlinien unmittelbar auf den Spektrallinien liegen, könnten die gemessenen Säulendichten, Linienbreiten und Radialgeschwindigkeiten der betroffenen CHVCs in den äußeren Bereichen schwacher Emission leicht fehlerbehaftet sein. Der Extremfall einer exakten Koinzidenz zwischen Stör- und Spektrallinien ist aber nur bei der Kartierung von CHVC 29 gegeben. Bei allen anderen Objekten liegen die Interferenzsignale neben den Spektrallinien oder streifen allenfalls die Linienflanken.

9 Die Eigenschaften der tiefer kartierten CHVCs

In diesem Kapitel möchte ich die 11 mit dem Effelsberg-Teleskop tiefer beobachteten kompakten Hochgeschwindigkeitswolken und ihre physikalischen Eigenschaften vorstellen und besprechen. Zunächst möchte ich auf die kollektiven Eigenschaften der kartierten Auswahl von CHVCs eingehen. Es hat sich gezeigt, daß selbst die anhand strengerer Kriterien ausgewählten Objekte, die in den ursprünglichen mit dem 100-m-Teleskop in Effelsberg aufgenommenen, stark verrauschten Daten relativ homogen in ihren Eigenschaften erschienen, anhand der tieferen und detaillierteren Neubeobachtungen eine große Komplexität und Verschiedenheit offenbaren. Aus diesem Grund möchte ich im Anschluß an die gemeinsame Besprechung der Objekte jedes einzelne von ihnen noch einmal gesondert vorstellen.

Es wird sich zeigen, daß das Vorhandensein eines umgebenden Mediums, das wir anhand der Ergebnisse der Effelsberg-Durchmusterung der 41 CHVCs in Kapitel 6 bereits vermutet hatten, durch die tieferen Beobachtungen in vielen Fällen bestätigt werden kann. Bei vielen der 11 Objekte gibt es deutliche Anzeichen für Wechselwirkungsprozesse in Gestalt von Kopf-Schweif-Strukturen oder einem bugwellenförmigen Aussehen der Wolke. Diese Hinweise werden durch ein entsprechendes Verhalten der beobachteten Radialgeschwindigkeiten und Linienbreiten bekräftigt.

9.1 Kollektive Eigenschaften der tiefer kartierten CHVCs

In Abbildung 22 sind Säulendichtekarten aller 11 tiefer kartierten CHVCs abgebildet. Zunächst lassen die Karten erkennen, daß die ausgewählten Objekte vergleichsweise kompakt sind und einen typischen Durchmesser von ungefähr $40'$ im Säulendichteniveau von $5 \cdot 10^{18} \text{ cm}^{-2}$ aufweisen. Nur CHVC 47 ist deutlich ausgedehnter und sprengt den für die Kartierung gewählten Rahmen in östlicher und westlicher Richtung. Darüber hinaus läßt der Überblick erkennen, daß die 11 Objekte deutlich komplexer strukturiert erscheinen, als dies für primordiale, gasreiche Dunkle-Materie-Halos, die über die gesamte Lokale Gruppe hinweg verteilt sein sollen, naiv zu erwarten wäre. Einzig CHVC 24 erscheint bei der Auflösung und Sensitivität der Effelsberg-Daten weitgehend sphärisch-symmetrisch. Alle anderen Objekte weichen von diesem Erscheinungsbild mehr oder weniger stark ab. Neben stark elongierten Wolken wie CHVC 218+29+145 finden wir bei einigen CHVCs Anzeichen für eine angedeutete kometenähnliche Kopf-Schweif-Struktur, so zum Beispiel bei CHVC 1 und CHVC 9. Solche Strukturen, die in noch stärkerer Ausprägung durch Brüns, Kerp & Pagels 2001 [8] bei CHVC 125+41–207 aufgefunden wurden (vergl. Kapitel 6.3), geben einen deutlichen Hinweis auf mögliche Wechselwirkungsvorgänge mit einem umgebenden Medium. In dieselbe Richtung deutet auch die bugwellenförmige Gestalt von CHVC 26 und CHVC 29. Diese Hinweise auf das etwaige Vorhandensein eines umgebenden Mediums, durch dessen Staudruck Gas von den CHVCs abgestreift werden könnte, sind sehr interessant, denn wir hatten bei der Diskussion über die Stabilität von CHVCs in Kapitel 6.3 über die Existenz eines solchen Mediums zur Druckstabilisierung kompakter Hochgeschwindigkeitswolken spekuliert. Die Erwartung damit verbundener Wechselwirkungsanzeichen war mit einer Motivation für die Durchführung tieferer Effelsberg-Beobachtungen von ausgewählten CHVCs gewesen. Diese Erwartung wird nun durch die Ergebnisse der tieferen Kartierung bekräftigt. Aber erst die detailliertere Analyse der aus den HI-Spektren abgeleiteten physikalischen Eigenschaften der betreffenden Objekte, die ich in der Einzelbesprechung der 11 kartierten CHVCs vornehmen werde,

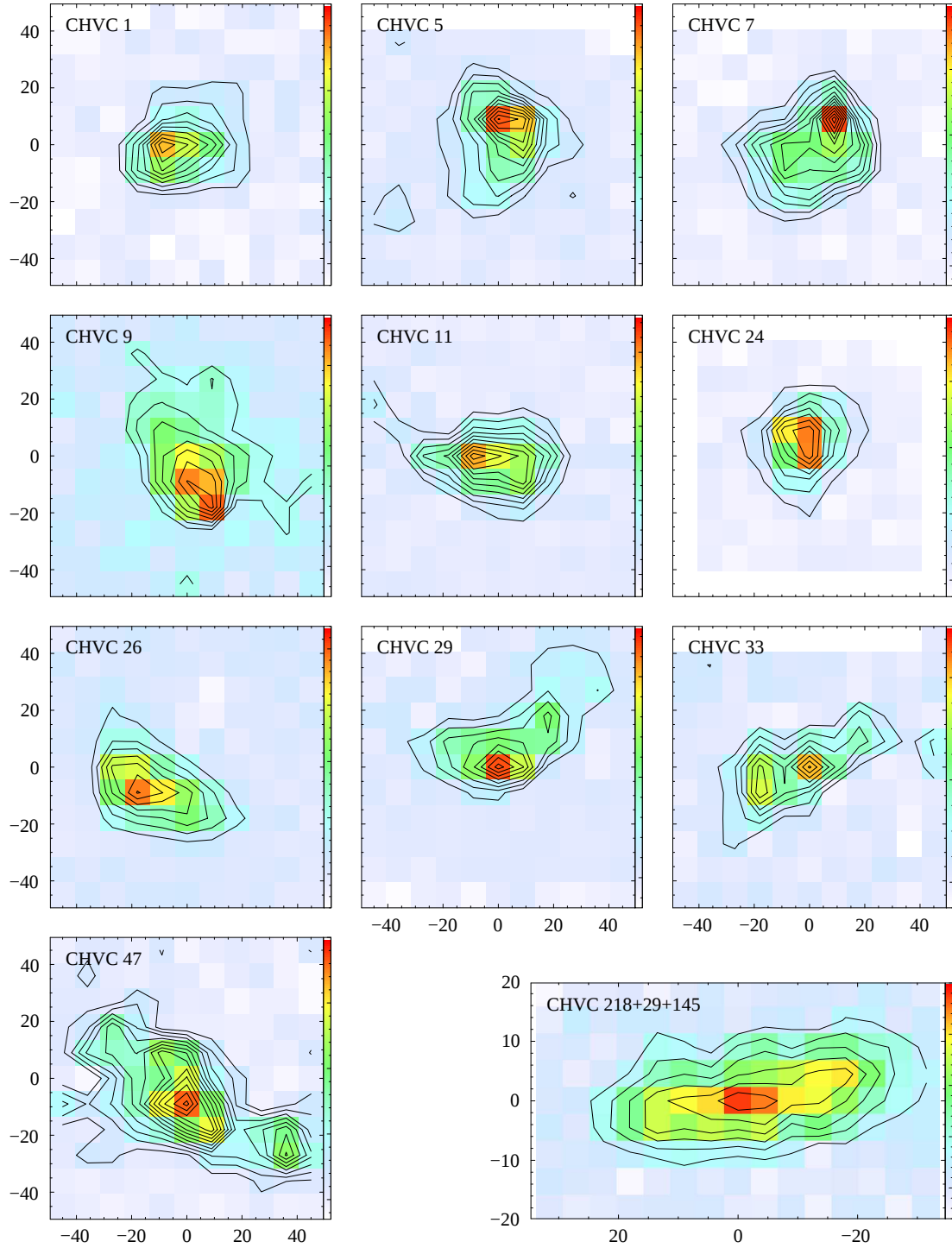


Abbildung 22: Karten aller 11 tiefer kartierten CHVCs. Die Konturlinien laufen von $N_{\text{HI}} = 5 \cdot 10^{18} \text{ cm}^{-2}$ (bei CHVC 9 von $1 \cdot 10^{19} \text{ cm}^{-2}$) in Schritten von $5 \cdot 10^{18} \text{ cm}^{-2}$ (bei CHVC 24 $1 \cdot 10^{19} \text{ cm}^{-2}$), die relativen Positionen sind in Bogenminuten angegeben. Vergl. den Qualitätszuwachs gegenüber den ursprünglichen, wesentlich kürzer integrierten Karten auf Seite 74.

Tabelle 6: Eigenschaften der tiefer kartierten CHVCs. Es bedeuten l und b die galaktische Länge und Breite des Säulendichtemaximums, v_{LSR} und v_{GSR} die nach der Säulendichte gewichtete mittlere Radialgeschwindigkeit im lokalen bzw. galaktischen Bezugssystem, σ_v die Standardabweichung der Radialgeschwindigkeiten vom Mittelwert, Δv und $\sigma_{\Delta v}$ die mittlere Linienbreite und deren Standardabweichung, T_{B} die als Temperatur ausgedrückte maximal gemessene Intensität, $N_{\text{HI}}^{\text{max}}$ und $N_{\text{HI}}^{\text{min}}$ die maximale bzw. minimale nachgewiesene Säulendichte ($T_{\text{B}} \geq 3\sigma_{\text{rms}}$) und σ_{rms} das mittlere rms-Rauschen der Basislinie. In den beiden unteren Zeilen sind der arithmetische Mittelwert und die Standardabweichung einiger Spalten angezeigt, wobei der kursiv gedruckte Wert von der Mittelwertbildung ausgeschlossen wurde.

#	l ($^{\circ}$)	b ($^{\circ}$)	v_{LSR} (km s^{-1})	v_{GSR} (km s^{-1})	σ_v	Δv (km s^{-1})	$\sigma_{\Delta v}$	T_{B} (K)	$N_{\text{HI}}^{\text{max}}$ (10^{19} cm^{-2})	$N_{\text{HI}}^{\text{min}}$ (10^{19} cm^{-2})	σ_{rms} (mK)
1	16.8	-25.2	-228	-171	2	14	5	3.1	5.6	0.3	60
5	32.1	-30.7	-308	-207	9	30	7	1.3	6.0	0.7	50
7	39.0	-33.2	-262	-147	5	22	6	1.6	8.0	0.4	53
9	39.9	0.6	-278	-137	5	32	10	0.7	4.5	0.4	41
11	50.4	-68.4	-195	-133	20	27	9	1.3	4.7	0.3	46
24	147.5	-82.3	-269	-254	3	22	2	2.2	8.0	0.9	51
26	157.1	2.9	-184	-98	3	22	3	0.9	3.6	0.6	40
29	172.1	-59.6	-235	-219	4	28	6	0.9	4.2	0.3	40
-	218.1	29.0	145	27	1	6	2	2.8	3.2	0.3	88
33	220.5	-88.2	-258	-263	17	22	5	1.0	3.7	0.5	51
47	357.8	12.4	-159	-167	21	27	10	1.5	6.4	0.5	55
$\langle x \rangle$			-203	-161	8	23	6	1.6	5.3	0.5	49
σ_x			± 118	± 77	± 7	± 7	± 3	± 0.8	± 1.6	± 0.2	± 6

wird schließlich eine Bestätigung für die anhand des visuellen Eindrucks formulierte Vermutung liefern können, die beobachteten Strukturen seien durch Wechselwirkungsvorgänge verursacht.

In Tabelle 6 sind die aus den HI-Spektren abgeleiteten Eigenschaften der tiefer kartierten Wolken zusammengestellt. Interessant ist zunächst ein Blick auf die in der letzten Zeile eingetragenen Standardabweichungen der einzelnen Größen von dem in der Zeile darüber angegebenen arithmetischen Mittelwert. Hierbei fällt auf, daß die Streuung der physikalischen Eigenschaften der 11 untersuchten CHVCs gegenüber der ursprünglichen Auswahl von 39 CHVCs in den meisten Fällen deutlich geringer geworden ist (vergl. Kapitel 6.2 und 6.3). Dies läßt sich als ein Indiz dafür interpretieren, daß die getroffene Auswahl von 11 Objekten homogener in ihren physikalischen Parametern ist als die der Auswahl zugrundeliegende Durchmusterung. Dies ist verständlich, weil wir zum einen zahlreiche Objekte ausgeschlossen hatten, die den verbesserten Kriterien von de Heij, Braun & Burton 2002 [10] nicht mehr genügen und deshalb möglicherweise einer als primordiale Dunkle-Materie-Halos in der Lokalen Gruppe interpretierten CHVC-Population ohnehin nicht zugerechnet werden dürfen. Solche Objekte anderen Ursprungs hätten natürlich mitunter auch andere Eigenschaften, deren Eingang in die Mittelwerte der zugrundeliegenden CHVC-Auswahl zu einer großen Streuung führen würde. Zum anderen ist der Rahmen, in dem sich die Parameter der 11 CHVCs aufhalten können, durch die Beschränkung auf Säulendichteverhältnisse von $N_{\text{HI}}^{\text{Eff}}/N_{\text{HI}}^{\text{LDS}} \geq 3$ ohnehin eingeschränkt worden, wie wir in Kapitel 7 bereits gesehen hatten.

Weiter sei die Qualität der tiefer integrierten Daten aufgezeigt. Das mittlere rms-Rauschen der Basislinie, das bei der Kartierung der 11 Objekte erzielt wurde, liegt bei etwa $\sigma_{\text{rms}} =$

50 mK. Dabei ist CHVC 218+29+145 ausgenommen, bei der durch die um einen Faktor 2 höhere Geschwindigkeitsauflösung und die Beobachtung im gewöhnlichen *Frequency-Switch*-Modus ein doppelt so hohes *rms*-Rauschen der Basislinie zu erwarten ist. Aus diesen Werten resultiert eine mittlere erreichte Nachweisgrenze ($T_B \geq 3\sigma_{\text{rms}}$) der Säulendichte von $N_{\text{HI}}^{\text{min}} = 5 \cdot 10^{18} \text{ cm}^{-2}$, womit die bei der Beantragung der Beobachtungszeit formulierte Erwartung gut erfüllt wurde.

Die mittlere zentrale Säulendichte der 11 tiefer beobachteten CHVCs besitzt mit $\langle N_{\text{HI}} \rangle = (5.3 \pm 1.6) \cdot 10^{19} \text{ cm}^{-2}$ denselben Wert wie die der zugrundeliegenden Auswahl von 39 Objekten. Zugleich ist, wie schon erwähnt, die Streuung der Säulendichten um den Mittelwert mit $\sigma_{N_{\text{HI}}} = 1.2 \cdot 10^{19} \text{ cm}^{-2}$ deutlich kleiner geworden. Das bedeutet, daß die getroffene Auswahl homogener in Bezug auf die charakteristischen Säulendichten ist, so daß Objekte sowohl besonders kleiner als auch besonders großer Säulendichtemaxima durch die zur Auswahl benutzten Kriterien ausgeschlossen wurden. Tatsächlich variieren die Säulendichten der 11 CHVCs nur zwischen etwa $3 \dots 8 \cdot 10^{19} \text{ cm}^{-2}$.

Die mittleren Halbwertsbreiten der HI-Linien der 11 Objekte bewegen sich im allgemeinen zwischen etwa $20 \dots 30 \text{ km s}^{-1}$ mit Ausnahme von CHVC 1 und CHVC 218+29+145, die deutlich geringere Linienbreiten aufweisen. Diese geringen Linienbreiten stehen in Zusammenhang mit dem in beiden Fällen starken Auftreten einer kalten Gaskomponente, die auf Grund ihrer geringeren Temperatur von der Größenordnung von einigen 100 K und der damit verbundenen geringeren Geschwindigkeitsdispersion der Wasserstoffatome Linienbreiten von typischerweise $\Delta v \lesssim 10 \text{ km s}^{-1}$ aufweist. Bei einigen der kartierten CHVCs ist es möglich, in den Spektren eine kalte und eine warme Gaskomponente zu separieren, woraus sich interessante physikalische Einblicke in diese Objekte ergeben. Bei der Einzeldarstellung der CHVCs werde ich darauf näher eingehen.

9.2 CHVC 1

CHVC 1 bietet ein schönes Beispiel für ein vergleichsweise kompaktes Objekt. Sie liegt bei südlicher galaktischer Breite in der Nähe der HVC-Komplexe GCP und GCN und weist einen Winkeldurchmesser von etwa $40'$ bei der Säulendichtekontur von $5 \cdot 10^{18} \text{ cm}^{-2}$ auf. Die beiden HVC-Komplexe GCP (*Galactic Centre Positive*) und GCN (*Galactic Centre Negative*) erhielten ihre Bezeichnung auf Grund ihrer Lage nahe der Richtung zum galaktischen Zentrum und ihrer überwiegend positiven respektive negativen Radialgeschwindigkeiten. Es handelt sich bei ihnen aber weniger um große, zusammenhängende HI-Regionen, als eher um eine Ansammlung vieler kleiner Wolken mit sehr unterschiedlichen Radialgeschwindigkeiten über ein Feld von je etwa 15° Durchmesser, wovon CHVC 1 ein typischer Vertreter ist.

CHVC 1 darf morphologisch zu den asymmetrischen CHVCs gerechnet werden, da die Emission bereits bei vergleichsweise hohen Säulendichten deutlich in westliche bis nordwestliche Richtung elongiert ist (siehe Abbildung 23). Die Asymmetrie geht einher mit einem deutlichen Gradienten der Halbwertsbreite der HI-Linien. Während im südöstlichen Bereich der Wolke Linienbreiten (FWHM) um nur 10 km s^{-1} FWHM auftreten, steigen diese im nordwestlichen Bereich auf über 20 km s^{-1} FWHM an. Etwas weniger systematisch verhalten sich die gemessenen LSR-Radialgeschwindigkeiten, wobei grob ein Nord-Süd-Gradient festgestellt werden kann, der aber nur etwa 5 km s^{-1} bemißt.

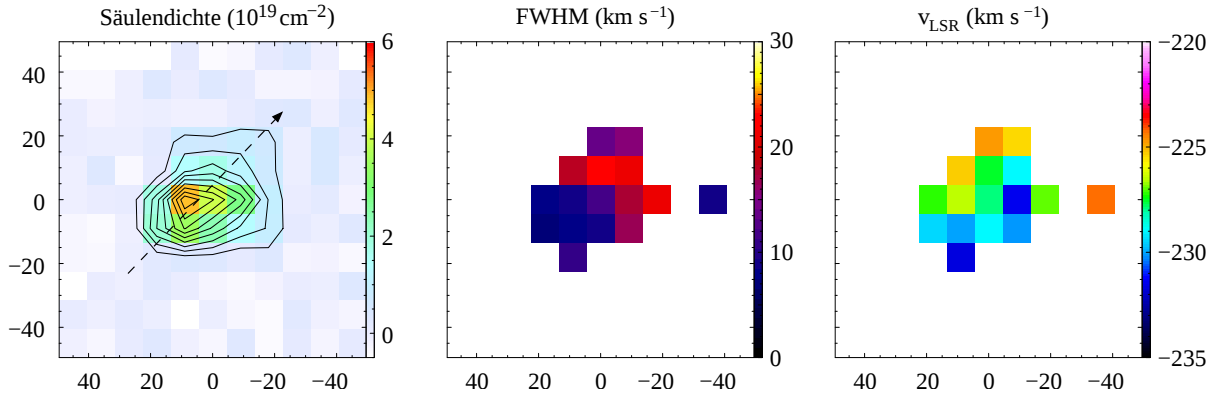


Abbildung 23: CHVC 1. Die linke Karte zeigt die integrierte Säulendichte im Intervall von -500 bis -100 km s^{-1} . Die überlagerten Konturlinien laufen von $5 \cdot 10^{18} \text{ cm}^{-2}$ in Schritten von $5 \cdot 10^{18} \text{ cm}^{-2}$. Die gestrichelte, schwarze Linie markiert den gewählten Schnitt. Die mittlere Karte gibt die gemessenen Linienbreiten (FWHM) wieder. Die rechte Karte zeigt die Verteilung der gemessenen Radialgeschwindigkeiten im lokalen Bezugssystem (LSR).

Interessant ist das Auftreten einer Zwei-Komponenten-Struktur in einigen Spektren von CHVC 1. Besonders im zentralen Bereich des Objekts erkennt man deutlich das Vorhandensein einer breiten Komponente einerseits, die das warme neutrale Medium (WNM) nachzeichnet, und einer schmalen Linienkomponente andererseits, die dem kalten neutralen Medium (CNM) entspricht (siehe Abbildung 24 (a)). Es bietet sich daher an, eine Zerlegung der Spektren in zwei gaußförmige Komponenten durchzuführen, um die Eigenschaften der beiden Gaskomponenten sowie ihre Verteilungen getrennt voneinander zu untersuchen. Eine solche Zerlegung der entlang des Schnitts gewonnenen Spektren habe ich mit `class` vollzogen und die Ergebnisse in den Diagrammen (b) bis (d) in Abbildung 24 wiedergegeben. Bei allen eingezeichneten Fehlern handelt es sich ausschließlich um die aus der Gaußkurvenanpassung resultierenden statistischen Fehler. Mögliche systematische Fehler sind ebensowenig berücksichtigt wie der Fehler, der aus der streng sicher falschen Annahme eines rein aus zwei Gaußkurven zusammengesetzten Linienprofils folgt. Beide Fehlerarten lassen sich nur schwer quantisieren und finden deshalb keinen Eingang in die Darstellung der Daten.

Abbildung 24 (d) zeigt zunächst die Verteilung der gemessenen Linienbreiten des kalten und warmen Gases als Funktion der relativen Position über den Schnitt hinweg. Beide Gaskomponenten erscheinen in diesem Diagramm klar voneinander getrennt. Das kalte Medium weist Linienbreiten von ungefähr 7 km s^{-1} FWHM auf, woraus sich eine Obergrenze der Temperatur des Gases von grob 1000 K ableiten läßt. Die warme Komponente zeigt in den zentralen Bereichen von CHVC 1 Linienbreiten von rund 20 km s^{-1} , was einer Temperaturobergrenze des Gases von etwa 9000 K entspricht.

In Abbildung 24 (b) ist die Verteilung der gemessenen Säulendichten der beiden Komponenten als Funktion der relativen Position entlang des Schnitts zu sehen. Diese Verteilung zeigt deutlich eine räumliche Trennung des kalten und warmen Mediums. Die kalte Komponente hat das Maximum ihrer Verteilung am südöstlichen Rand der Wolke, wohingegen die warme Komponente das Maximum ihrer Säulendichte in den zentralen Bereichen einnimmt. Darüber hinaus ist die kalte Komponente relativ kompakt, so daß man von einem kalten Kern von CHVC 1 spre-

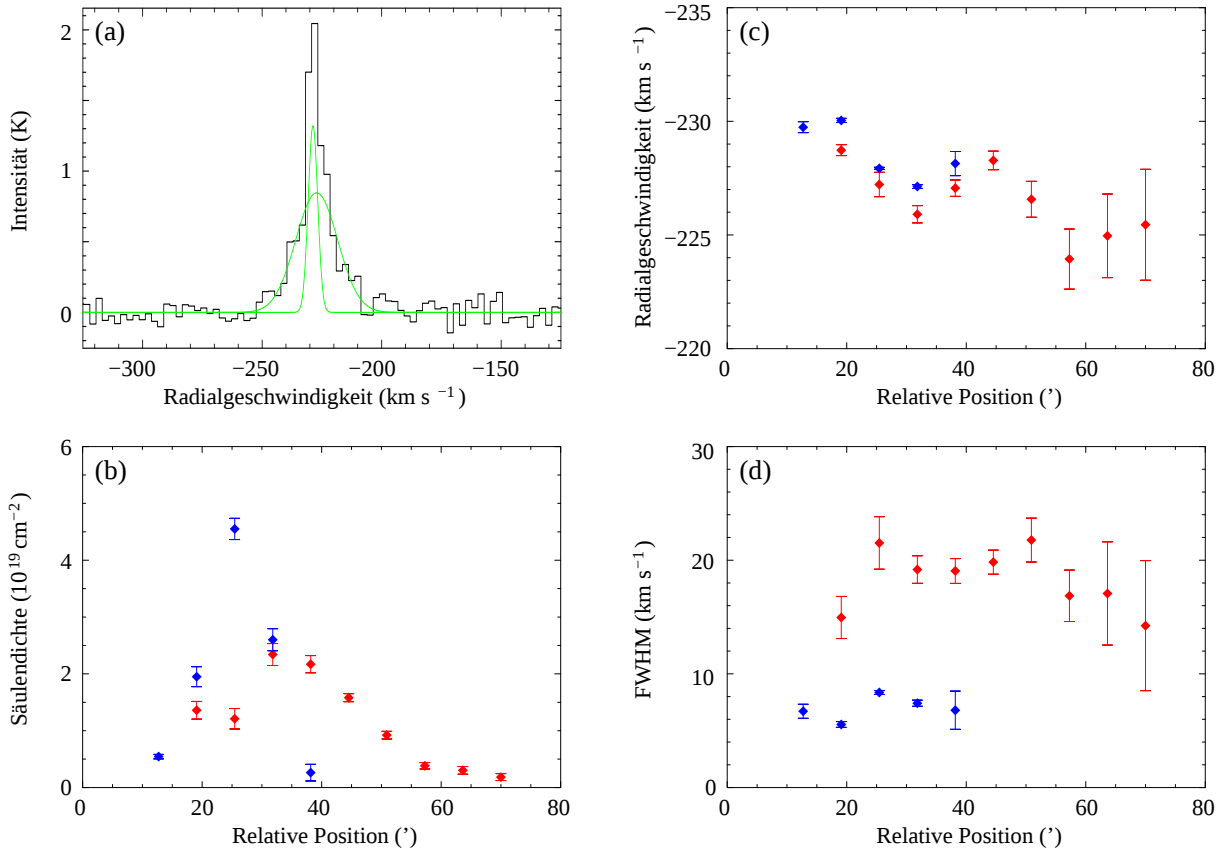


Abbildung 24: Gaußsche Zerlegung der Spektren entlang des Schnitts durch CHVC 1. (a) Typisches Spektrum, das eine deutliche Zwei-Komponenten-Struktur zeigt. (b) Säulendichte der kalten (blau) und warmen (rot) Komponente aufgetragen gegen die Position entlang des Schnitts. (c) Radialgeschwindigkeiten beider Komponenten im lokalen Bezugssystem (LSR). (d) Linienbreiten (FWHM) beider Komponenten.

chen kann mit einer Halbwertsbreite der Säulendichteverteilung von ungefähr 15'. Im Gegensatz dazu ist das warme neutrale Medium sehr ausgedehnt und zeigt gegen den nordwestlichen Rand der Wolke hin einen schweifähnlichen Fortsatz schwacher Emission, so daß man hier von einer kometenähnlichen Kopf-Schweif-Struktur sprechen kann. Am äußersten südöstlichen Rand von CHVC 1 ist gar kein warmes Medium mehr nachweisbar, so daß hier der bloße kalte Kern hervortritt.

Dieser Befund einer räumlichen Separation des kalten, dichten Kerns von seiner warmen, diffusen Hülle erweckt sofort die Vermutung, es könne im Fall von CHVC 1 eine Abstreifung des warmen Mediums durch die Wechselwirkung mit einem umgebenden Medium vorliegen. Diese Vermutung wird durch die Untersuchung der kinematischen Eigenschaften beider Komponenten gestützt. In Abbildung 24 (c) sind die Radialgeschwindigkeiten des kalten und des warmen Mediums im lokalen Bezugssystem (LSR) über die relative Position entlang des Schnitts aufgetragen. Auffallend ist zunächst das seltsam wellenförmige Aussehen der Radialgeschwindigkeitsverteilung, das einen Hinweis auf irgendeine Form von Störung des Gases geben könnte. Nach

den hydrodynamischen Simulationen von Vieser 2001 [30] werden in vielen Fällen durch die Wechselwirkungsprozesse im Zusammenhang mit einer durch ein umgebendes Medium bewegten Gaswolke starke Turbulenzen und Wirbel erzeugt, die möglicherweise ein solches Verhalten der Radialgeschwindigkeiten verursachen können, wie wir es bei CHVC 1 beobachten. Darüber hinaus folgt die Geschwindigkeit des kalten Kerns sehr genau jener der warmen Hülle, jedoch um einen geringen Betrag verschoben. Neben der räumlichen Trennung der beiden Gaskomponenten läßt sich auch eine mögliche kinematische Trennung beobachten, die die Vorstellung eines Abstreifens der warmen Hülle vom kalten Kern stützt und somit die räumliche Trennung herbeigeführt haben dürfte. Bildet man den arithmetischen Mittelwert der Geschwindigkeitsdifferenzen zwischen beiden Gasanteilen an den vier Positionen, an denen beide gleichzeitig nachgewiesen werden können, so findet man, daß der Kern von CHVC 1 in radialer Richtung um $\delta v = 1.1 \pm 0.2 \text{ km s}^{-1}$ schneller ist, als die ihn partiell umgebende diffuse Hülle. Allerdings ist der Effekt im Rahmen der Sensitivität der Daten und der Geschwindigkeitsauflösung der Spektren von 2.6 km s^{-1} nicht sehr ausgeprägt, so daß der Geschwindigkeitsunterschied zwischen warmer und kalter Gasphase in der Größenordnung der statistischen Fehler der aus den Gaußfits ermittelten Radialgeschwindigkeiten liegt.

Wenn wir diesen Geschwindigkeitsunterschied zwischen dem kalten Kern und der warmen Hülle als durch einen Abstreifprozeß verursacht sehen, so können wir hieran anknüpfend einige Abschätzungen über die Lebensdauer von CHVC 1 anstellen. Ein Problem ergibt sich zunächst daraus, daß wir den genauen Geschwindigkeitsunterschied zwischen beiden Gaskomponenten nicht kennen, weil die Inklination, das heißt der Winkel zwischen der Bewegungsrichtung der Wolke und dem Sehstrahl zum Beobachter, unbekannt ist. Der einzig gangbare Weg ist, die Inklination einfach zu 45° anzunehmen, wodurch wir zumindest die Größenordnung des Geschwindigkeitsunterschieds richtig erfaßt haben dürften. Daraus ergibt sich der tatsächliche Geschwindigkeitsunterschied zwischen dem kalten Kern und der warmen Hülle von CHVC 1 in einer groben Abschätzung zu

$$\delta v \mapsto \frac{\delta v}{\sin 45^\circ} \approx 1.6 \text{ km s}^{-1}. \quad (38)$$

Wenn wir nun den Winkeldurchmesser von CHVC 1 zu $\varphi = 40'$ ansetzten, so können wir als Funktion der Entfernung d der Wolke von der Erde die charakteristische Zeit τ ausrechnen, in der sich Kern und Hülle von CHVC 1 um einen Wolkendurchmesser voneinander entfernen würden. Wir erhalten nach kurzer Rechnung

$$\tau(d) = \frac{d \tan \varphi}{\delta v} \Rightarrow \tau [\text{Ga}] = 7.1 \cdot d [\text{Mpc}]. \quad (39)$$

Anhand des rechten Teils der Gleichung können wir sofort abschätzen, daß CHVC 1 in einer Entfernung von $d = 1 \text{ Mpc}$, wie von Braun & Burton 1999 [2] als typische CHVC-Entfernung angenommen, eine charakteristische Lebensdauer von $\tau \approx 7 \text{ Ga}$ aufweisen würde und somit über kosmologisch relevante Zeiträume stabil wäre. Anders sieht es aus, falls wir eine Entfernung von nur $d = 100 \text{ kpc}$ annehmen. Dann nämlich läge die charakteristische Zeitskala bei nur noch $\tau \approx 700 \text{ Ma}$, was in Bezug auf die Entwicklungsgeschichte der Milchstraße und der Lokalen Gruppe eine sehr kurze Zeit wäre. In einer solch geringen Entfernung also müßte CHVC 1 ein recht junges Objekt sein, was im Widerspruch zu der Annahme steht, es handle sich um einen primordialen, gasreichen Dunkle-Materie-Halo als Überrest aus der Galaxienentstehung in der Lokalen Gruppe. Die Interpretation als primordiales Objekt läßt sich indes aufrecht erhalten, indem wir annehmen, CHVC 1 sei erst vor wenigen Hundertmillionen Jahren in die Nähe der

Milchstraße geraten und würde daher erst seit relativ kurzer Zeit mit einem ausgedehnten Halogas unserer Galaxis in Wechselwirkung stehen. Diese Zeit hätte für eine vollständige Zerstörung von CHVC 1 dann noch nicht ausgereicht.

Ausgehend von der letzten Annahme können wir abschätzen, wie lange sich CHVC 1 bei einer hypothetischen Entfernung von ungefähr 100 kpc bereits in Wechselwirkung mit dem umgebenden Medium befindet. Anhand von Abbildung 24 (b) läßt sich der Abstand zwischen den Intensitätsmaxima der warmen und kalten Komponente zu etwa $10'$ abschätzen. Wenn wir weiter annehmen, der Geschwindigkeitsunterschied zwischen Kern und Hülle habe während der gesamten Zeit den heute beobachteten Wert gehabt, so ergibt sich, daß CHVC 1 seit grob 200 Millionen Jahren in Wechselwirkung hätte stehen müssen, um die derzeit beobachtete Separation von Kern und Hülle zu erreichen. Wenn wir anhand der Daten in Tabelle 6 einmal eine Raumeschwindigkeit von CHVC 1 von grob 250 km s^{-1} in Bezug auf das Ruhesystem der Milchstraße annehmen, so hätte das Objekt innerhalb dieser 200 Millionen Jahre eine Strecke von 50 kpc zurückgelegt, was ungefähr dem Abstand zwischen der Milchstraße und der Großen Magellanschen Wolke entspricht.

Die soeben abgeschätzten Zahlen sollen aufzeigen, daß auf vernünftigen Entfernungs- und Zeitskalen ein Eintritt von CHVC 1 in ein ausgedehntes galaktisches Halogas stattgefunden haben kann, der die beobachteten Wechselwirkungsvorgänge ohne Zwang zu erklären vermag. Das heißt die Größenordnungen der abgeschätzten Parameter lassen sich ohne weiteres miteinander in Einklang bringen.

Zusammenfassend erhalten wir von CHVC 1 folgendes Bild: Es handelt sich um ein vergleichsweise kompaktes Objekt, das deutlich einen konzentrierten Kern kalten neutralen Gases und eine diffuse Hülle warmen neutralen Gases aufweist. Kern und Hülle sind räumlich und möglicherweise kinematisch separiert, was sich als ein Abstreifen der diffusen Hülle vom kompakten Kern auf Grund der Wechselwirkung mit einem umgebenden Medium erklären ließe. Dies geht einher mit der Beobachtung, daß das warme Gas einen schweifartigen Fortsatz ausbildet, der dem gesamten Objekt eine kometenförmige Kopf-Schweif-Struktur verleiht. Eine Abschätzung charakteristischer Zeitskalen zeigt, daß CHVC 1 in geringen Entfernungen um 100 kpc bereits binnen weniger 100 Millionen Jahre stark zerlegt würde. Deshalb müßte das Objekt bei einer solchen Entfernung entweder eine kurze Entwicklungszeit besitzen oder aber erst in der jüngeren Zeit der beobachteten Wechselwirkung unterliegen. In einer weit größeren Entfernung um 1 Mpc hingegen betrüge die charakteristische Lebenszeit viele Jahrmilliarden. Dies wäre mit einer Interpretation der CHVCs als primordiale Dunkle-Materie-Halos, wie sie von Braun & Burton 1999 [2] angeführt wird, unmittelbar verträglich, wobei aber das Auftreten der Kopf-Schweif-Struktur eher eine Nähe zum galaktischen Halogas nahelegt.

9.3 CHVC 5

CHVC 5 liegt nur unweit von CHVC 1 am Rand des HVC-Komplexes GCN und gehört zu den etwas ausgedehnteren und diffuseren Objekten mit einem Durchmesser von ungefähr $50' - 60'$ beim Säulendichteniveau von $5 \cdot 10^{18} \text{ cm}^{-2}$. Wie schon CHVC 1, so darf auch CHVC 5 zu den deutlich asymmetrischen CHVCs gezählt werden. Unterhalb einer Säulendichte von etwa $2 \cdot 10^{19} \text{ cm}^{-2}$ ist die Emission deutlich in südliche bis südöstliche Richtung elongiert. Auffällig ist darüber hinaus Emission in der südöstlichen Ecke der Karte, die Säulendichten von $1 \cdot 10^{19} \text{ cm}^{-2}$ erreicht und

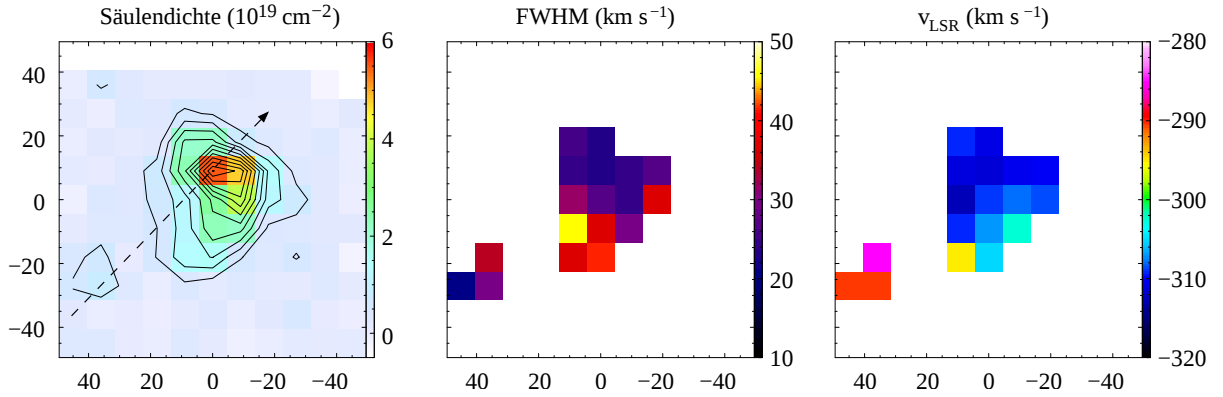


Abbildung 25: CHVC 5. Die linke Karte zeigt die integrierte Säulendichte im Intervall von -500 bis -100 km s^{-1} . Die überlagerten Konturlinien laufen von $5 \cdot 10^{18} \text{ cm}^{-2}$ in Schritten von $5 \cdot 10^{18} \text{ cm}^{-2}$. Die gestrichelte, schwarze Linie markiert den gewählten Schnitt. Die mittlere Karte gibt die gemessenen Linienbreiten (FWHM) wieder. Die rechte Karte zeigt die Verteilung der gemessenen Radialgeschwindigkeiten im lokalen Bezugssystem (LSR).

von dem Hauptteil der CHVC 5 durch einen schmalen Bereich mit nicht nachweisbarer Emission getrennt ist. Während über den größten Teil der Wolke die gemessenen LSR-Geschwindigkeit mit etwa -310 km s^{-1} beinahe konstant bleibt, steigt sie hingegen im südöstlichen Bereich auf Werte um -280 bis -290 km s^{-1} an. Dies geht einher mit einem zum Teil drastischen Anstieg der Linienbreiten auf 40 bis 50 km s^{-1} FWHM (vgl. Abbildung 25).

Es ergibt sich hier wieder der Eindruck eines Abstreifens von Gas durch die Wechselwirkung mit einem umgebenden Medium, was nicht nur die Gestalt von CHVC 5, sondern auch die beobachteten Verteilungen von Radialgeschwindigkeit und Linienbreite erklären könnte. Um dies zu untersuchen, habe ich einen Schnitt in einem Winkel von 45° über die Wolke gelegt (vgl. Abbildung 25), entlang dessen ich Spektren mit etwa $6.4'$ Abstand und Meßzeiten von im Mittel 10 Minuten beobachtet habe. Dadurch konnte ich in den äußeren Bereichen der Wolke ein Rauschen von $\sigma_{\text{rms}} \approx 25 \text{ mK}$ erreichen, was in einer mittleren Nachweisgrenze der Säulendichte von etwa $4.4 \cdot 10^{18} \text{ cm}^{-2}$ resultiert.

Die Ergebnisse der Auswertung der Spektren entlang des Schnitts sind in Abbildung 26 wiedergegeben. Zunächst ist in Abbildung 26 (a) ein typisches Spektrum von CHVC 5 abgebildet, das ein in etwa gaußförmiges Profil besitzt. Eine deutliche Zwei-Komponenten-Struktur ist in den Spektren von CHVC 5 nicht zu erkennen. Der Verlauf der Säulendichte entlang des Schnitts ist in Abbildung 26 (b) gezeigt. Hier sehen wir deutlich den Hauptteil von CHVC 5 als relativ konzentriertes Gebilde mit einer steil abfallenden Flanke am nordwestlichen Rand und einem deutlich langsameren Abfall der Säulendichten in südöstlicher Richtung. Südöstlich davon macht sich als kleine Erhebung im Diagramm die in der linken, unteren Ecke der Karte erfaßte Emission bemerkbar, die Säulendichten von kaum mehr als $N_{\text{HI}} = 10^{19} \text{ cm}^{-2}$ erreicht. Der Verlauf der Säulendichte scheint die Interpretation einer Wechselwirkung zunächst zu stützen, wenn man annimmt, das Objekt bewege sich in nordwestliche Richtung. Der dort beobachtete steile Anstieg der Säulendichte wäre mit der Vorstellung eines Abstreifens des diffusen, äußeren Gases durchaus vereinbar, ebenso der langsamere Abfall der Säulendichten in der entgegengesetzten Richtung, wo wir den Schweif aus abgestreiftem Gas erwarten würden. Nach dieser Vorstellung könnte man

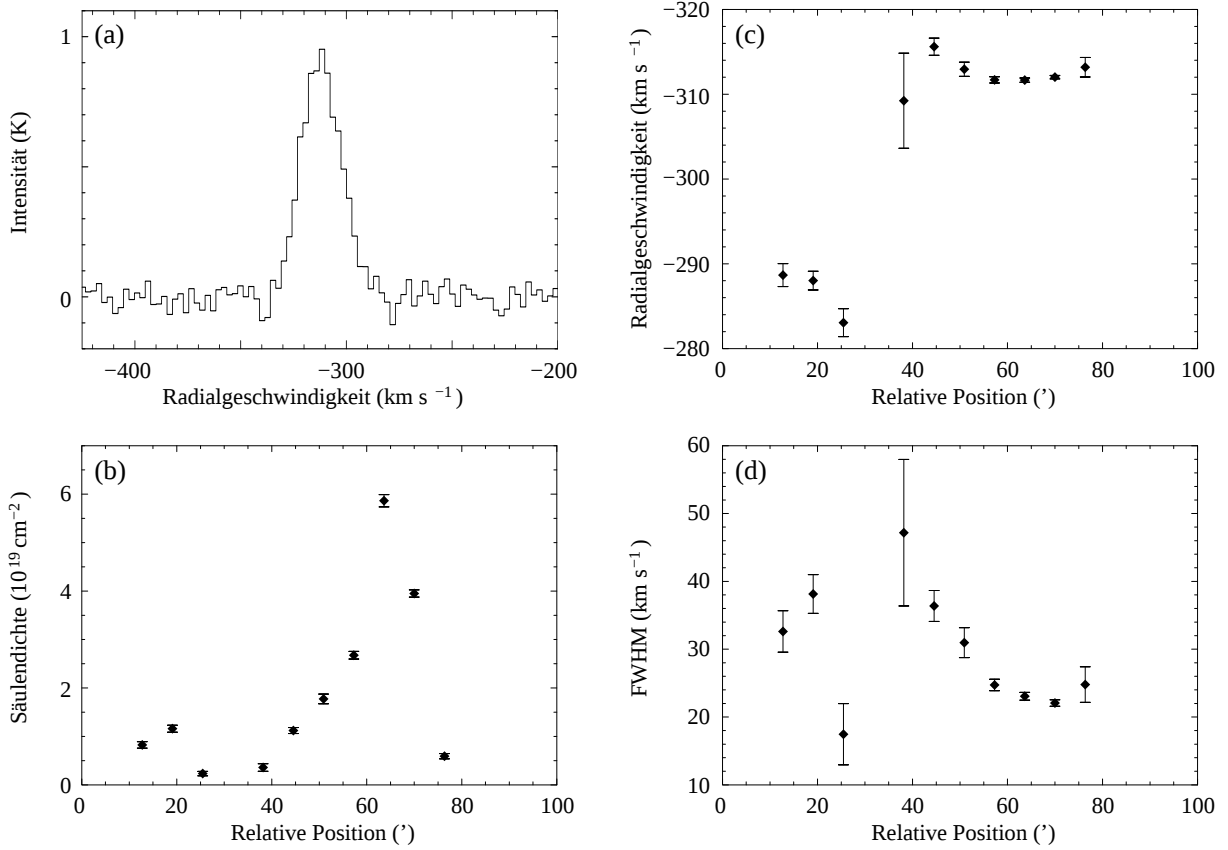


Abbildung 26: Messung des Profils durch CHVC 5. (a) Typisches Spektrum, das eine im wesentlichen gaußförmige Struktur zeigt. (b) Säulendichte aufgetragen gegen die Position entlang des Schnitts. (c) Radialgeschwindigkeit im lokalen Bezugssystem (LSR). (d) Linienbreite (FWHM).

auch das isolierte Wölkchen am südöstlichen Rand der Karte als eine Konzentration im Schweif in Gestalt eines vom Hauptkörper losgelösten Fragments verstehen.

Jedoch kann mit der Sensitivität der vorliegenden Daten keine „Brücke“ nachgewiesen werden, die dieses mutmaßliche Fragment mit dem Hauptkörper von CHVC 5 verbinden würde. Bei einer zu erwartenden Linienbreite einer solchen Brücke von etwa 30 km s^{-1} und einem mittleren Rauschen von $\sigma_{\text{rms}} \approx 25 \text{ mK}$ muß man unter der Annahme, daß ein Signal von $2\sigma_{\text{rms}}$ noch bequem nachweisbar sein sollte, die Säulendichte in einer solchen Materiebrücke zu $N_{\text{HI}} \lesssim 2.7 \cdot 10^{18} \text{ cm}^{-2}$ annehmen. Darüber hinaus ist das Fragment auch durch einen Unterschied von etwa 30 km s^{-1} in Radialgeschwindigkeit von dem Hauptkörper von CHVC 5 getrennt, so daß die Annahme eines durch den Wechselwirkungsprozeß mit einem umgebenden Medium vom Hauptkörper losgelösten Fragments zunächst fragwürdig erscheint.

Problematisch in dieser Hinsicht ist auch die Radialgeschwindigkeit, deren Verlauf in Abbildung 26 (c) dargestellt ist. Hier zeigt sich, daß der Hauptkörper von CHVC 5 eine relativ einheitliche Radialgeschwindigkeit entlang des gewählten Schnitts von etwa $-310 \dots -315 \text{ km s}^{-1}$ aufweist und kinematisch offenbar keine Verbindung zu dem kleinen Wölkchen am südöstlichen Kartenrand besteht, das mit $-280 \dots -290 \text{ km s}^{-1}$ eine in Bezug auf den Betrag um

etwa 30 km s^{-1} geringere Radialgeschwindigkeit besitzt. Auf der anderen Seite ist allerdings eine zufällige Ansammlung zweier verschiedener Objekte entlang der Sichtlinie, deren Radialgeschwindigkeiten so ähnlich sind, sehr unwahrscheinlich, so daß von einem Zusammenhang zwischen dem Hauptkörper von CHVC 5 und dem „Anhängsel“ ausgegangen werden kann.

Etwas uneinheitlich ist in diesem Zusammenhang das Verhalten der Linienbreiten. Die schmalsten Linien mit gut $\Delta v = 20 \text{ km s}^{-1}$ (FWHM) finden wir am nordwestlichen Rand, also in Richtung der mutmaßlichen Bewegung von CHVC 5. Gegen den südöstlichen Rand der Wolke hin werden die Linien systematisch breiter und erreichen schließlich Werte um $\Delta v = 40 \text{ km s}^{-1}$ (FWHM). Diese Werte wären verträglich mit der Vorstellung, daß es im Bereich des Schweifs zu Turbulenzen oder Wirbeln kommt, die eine starke Verbreiterung der Linien dort hervorrufen könnten. Im Bereich des „Anhängsels“ sind die Linienbreiten dann sehr uneinheitlich und reichen von etwa 20 bis 40 km s^{-1} . Allerdings ist der rechte der drei Meßpunkte, in dem das kleine Wölkchen detektiert wurde, mit einer größeren Unsicherheit behaftet, da die Intensität ohne Hanning-Glättung des Spektrums bei nur $T_B = 2.6 \sigma_{\text{rms}}$ liegt.

Diese doch recht breiten Linien selbst am der nordwestlichen Ende der Wolke, wo durch das mögliche Abstreifen der diffusen Hülle eigentlich der kalte, kompakte Kern bloßliegen sollte, geben schließlich einen wichtigen Hinweis, wie die Daten möglicherweise zu interpretieren sind. Solch breite Linien können wir unmöglich als rein thermisch auffassen, denn das würde im Schweif Temperaturen um 35000 K erfordern, und selbst im kompakten Kopf der Wolke bräuchten wir noch Gastemperaturen um 10000 K . Bei solch hohen Temperaturen sollte ein großer Teil des Wasserstoffs eigentlich ionisiert sein. Es muß also ein bedeutender Teil der Linienbreiten durch eine Überlagerung von Gasanteilen verschiedener Radialgeschwindigkeiten entlang der Sichtlinie erzeugt werden, und hierin liegt der Schlüssel zum Verständnis von CHVC 5: Möglicherweise blicken wir in Bezug auf die Bewegung beinahe von vorn auf das Objekt, das heißt die Bewegungsrichtung der Wolke liegt fast genau in Richtung der Sichtlinie zum Beobachter. Das hätte zur Folge, daß die Sichtlinie durch das Gas hindurch an jedem Punkt von CHVC 5 sehr lang wäre. Wir würden also praktisch längs durch den in Wahrheit sehr ausgedehnten Schweif blicken, wo die zahlreichen unterschiedlichen Geschwindigkeiten in den verschiedenen Positionen des Schweifs eine sehr breite Spektrallinie generieren würden. Interessanterweise ist CHVC 5 das in Bezug auf den Betrag das Objekt mit der höchsten Radialgeschwindigkeit im lokalen Bezugssystem unter den 11 kartierten Wolken, und auch im galaktischen Bezugssystem besitzt CHVC 5 noch die vierthöchste Radialgeschwindigkeit. Wenn sich aber, wie gerade spekuliert, die Wolke direkt auf uns zubewegen würde, so wäre eine solch hohe Radialgeschwindigkeit sehr wahrscheinlich.

Somit ließe sich nun auch das Fragment erklären: Dieses könnte sich schon vor längerer Zeit vom Hauptkörper gelöst haben und müßte sich inzwischen weit von jenem entfernt haben. Durch den kleinen Winkel zwischen Bewegungsrichtung und Sichtlinie aber scheint das Fragment noch immer in unmittelbarer Nähe zum Hauptkörper zu stehen. Damit könnten wir auch die deutlich geringere Geschwindigkeit des Fragments erklären, denn dieses hätte genügend Zeit gehabt, um durch das umgebende Medium so weit abgebremst worden zu sein. Das Fehlen einer Materiebrücke zwischen Fragment und Hauptkörper ist ebenfalls verständlich, wenn wir annehmen, daß das Fragment sich überhaupt nur bis in so große Entfernung von CHVC 5 halten können, weil es durch seine Kompaktheit und Dichte der Zersetzung durch das umgebende Medium, durch Instabilität oder durch ionisierende Strahlung widerstehen konnte. Dadurch wird der Anschein erweckt, wir hätten zwei separate Objekte vor uns, die zwar ähnliche Positionen

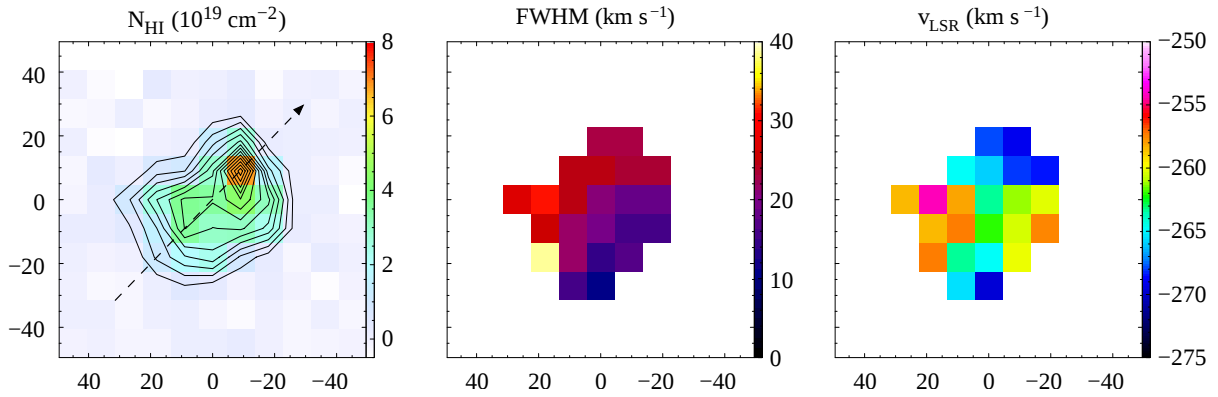


Abbildung 27: CHVC 7. Die linke Karte zeigt die integrierte Säulendichte im Intervall von -380 bis -100 km s^{-1} . Die überlagerten Konturlinien laufen von $5 \cdot 10^{18} \text{ cm}^{-2}$ in Schritten von $5 \cdot 10^{18} \text{ cm}^{-2}$. Die gestrichelte, schwarze Linie markiert den gewählten Schnitt. Die mittlere Karte gibt die gemessenen Linienbreiten (FWHM) wieder. Die rechte Karte zeigt die Verteilung der gemessenen Radialgeschwindigkeiten im lokalen Bezugssystem (LSR).

am Himmel besäßen, aber deutlich verschiedene Geschwindigkeiten aufwiesen.

Zusammenfassend läßt sich für CHVC 5 feststellen, daß sowohl die Gestalt als auch der Verlauf von Säulendichte, Radialgeschwindigkeit und Linienbreite über den gewählten Schnitt hinweg mit einer möglichen Wechselwirkung mit einem umgebenden Medium, durch welches hindurch sich CHVC 5 bewegt, verträglich sind. Das kleine Wölkchen, das im südöstlichen Bereich der Karte detektiert wurde, könnte man zunächst als ein im Verlauf des Wechselwirkungsprozesses vom Hauptkörper losgelöstes Fragment betrachten. Jedoch ist die Radialgeschwindigkeit dieses Fragments von der des Hauptkörpers sehr verschieden, und es ist darüber hinaus keine Brücke mit Säulendichten von $N_{\text{HI}} \gtrsim 2.7 \cdot 10^{18} \text{ cm}^{-2}$ nachweisbar, die beide miteinander verbinden würde. Jedoch lassen sich die gefundenen Strukturen mühelos erklären, wenn wir annehmen, CHVC 5 bewege sich beinahe direkt auf uns zu. Dann könnte sich das Fragment schon weit vom Hauptkörper entfernt haben, so daß genügend Zeit für die starke Abbremsung blieb. Überhaupt wären die beobachteten großen Linienbreiten sowie die hohe Radialgeschwindigkeit von CHVC 5 mit $v_{\text{LSR}} \approx -310 \text{ km s}^{-1}$ durch die Annahme einer Bewegungsrichtung beinahe direkt auf den Beobachter zu leicht zu verstehen.

9.4 CHVC 7

CHVC 7 liegt in derselben Region wie die vorangegangenen Objekte, nämlich im Bereich des HVC-Komplexes GCN in südlichen galaktischen Breiten. Der Durchmesser von ungefähr $40' - 50'$ bei der Säulendichtekontur von $9 \cdot 10^{18} \text{ cm}^{-2}$ ist typisch für die 11 zur tieferen Kartierung ausgewählten Objekte.

Die Morphologie von CHVC 7 ist merkwürdig. Zunächst ist das Objekt stark asymmetrisch, wobei die Emission unterhalb einer vergleichsweise hohen Säulendichte von etwa $4 \cdot 10^{19} \text{ cm}^{-2}$ stark in südöstliche Richtung elongiert ist. Zunächst würde man an eine kometenartige Struktur denken, wie sie durch Wechselwirkung mit einem umgebenden Medium hervorgerufen werden

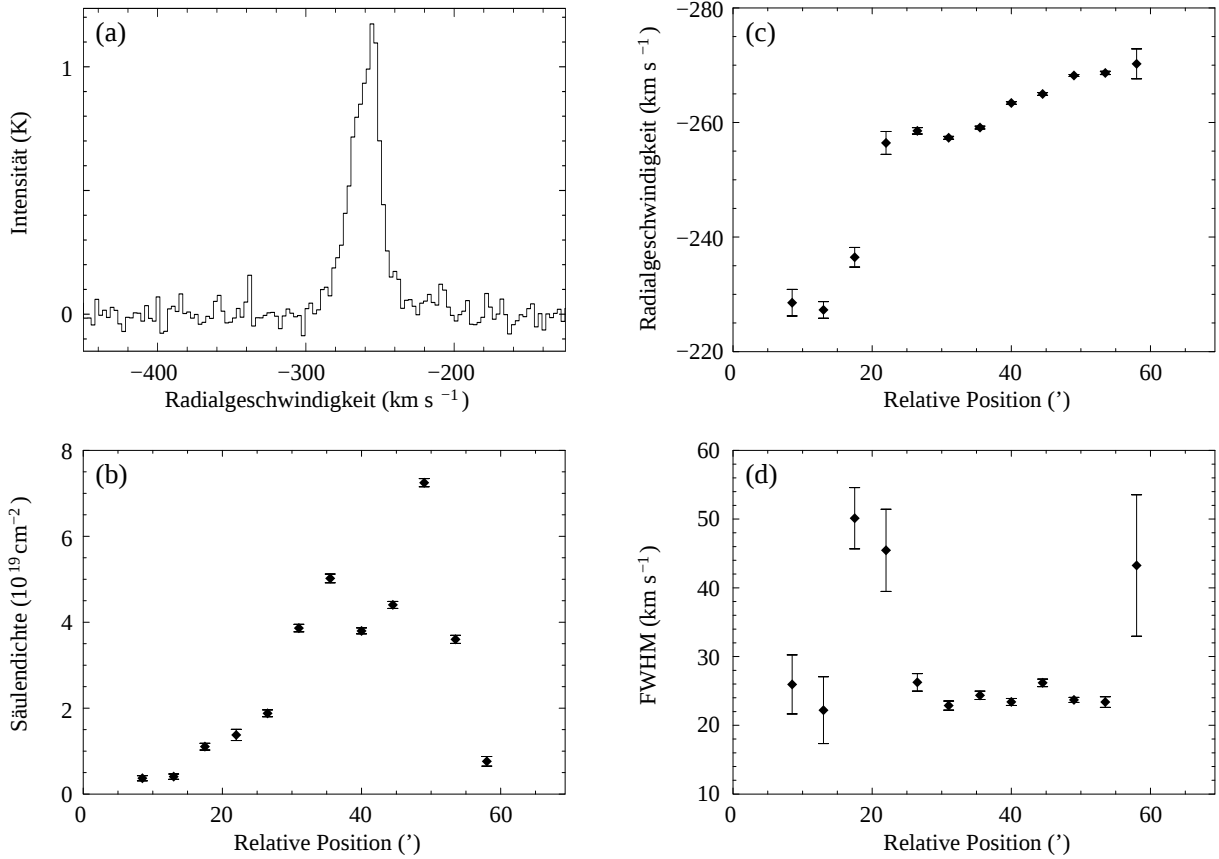


Abbildung 28: Messung des Profils durch CHVC 7. (a) Typisches Spektrum, das eine deutlich komplexe Struktur zeigt. (b) Säulendichte aufgetragen gegen die Position entlang des Schnitts. (c) Radialgeschwindigkeit im lokalen Bezugssystem (LSR). (d) Linienbreite (FWHM).

könnte. Jedoch scheinen die Verteilungen von Linienbreiten und Geschwindigkeiten der durch diese Annahme implizierten Axialsymmetrie nicht recht zu folgen. Die Geschwindigkeiten weisen gar keinen deutlichen Trend auf. Am Nordende des Objekts beobachtet man Emission bei etwa -270 km s^{-1} , am östlichen und westlichen Ende der Wolke liegen die Geschwindigkeiten hingegen bei knapp -260 km s^{-1} (vgl. Abbildung 27). Noch ungewöhnlicher mutet die Verteilung der Linienbreiten an. Im südwestlichen Bereich von CHVC 7 treffen wir mit 15 km s^{-1} FWHM vergleichsweise schmale Linien an, während im Norden die Linienbreiten 25 km s^{-1} FWHM erreichen. Am Ostrand der Wolke beobachtet man dann sogar Breiten von mehr als 30 km s^{-1} FWHM.

Hinzu kommt, daß die Gestalt der HI-Linien auf eine komplexere Strukturierung des Gases hinweist, die durch ein einfaches Gaußprofil nicht beschrieben werden kann (vergleiche Abbildung 28 (a)). Auch der Versuch, eine sich in einigen Linien andeutende Zwei-Komponenten-Struktur durch Anpassen zweier Gaußprofile zu erfassen, führt nicht zu sinnvollen Ergebnissen, da die beiden hypothetischen Gaskomponenten keine stetigen Eigenschaften aufweisen. Überdies scheinen die kalte und warme Komponente ihre Rollen mitunter zu vertauschen, so daß die Annahme des Vorhandenseins zweier voneinander getrennter Gasphasen nicht haltbar ist, sondern eine komplexere Struktur von CHVC 7 angenommen werden muß.

Eine Hilfe bei der Interpretation von CHVC 7 könnten die entlang des gewählten Schnitts aufgenommenen Spektren bieten. Der Schnitt wurde in einem Winkel von 45° entlang der scheinbaren Symmetrieachse der Wolke gewählt, die der Längsachse entspricht. Die Ergebnisse der Auswertung dieser Spektren sind in den Diagrammen (b) bis (d) in Abbildung 28 dargestellt. Abbildung 28 (b) zeigt den Verlauf der Säulendichte als Funktion der relativen Position entlang des Schnitts. Charakteristisch ist das Auftreten eines starken, konzentrierten Maximums der Säulendichte, das auch in der Karte in Abbildung 27 deutlich hervortritt. Nordwestlich davon fällt die Säulendichte dann schlagartig auf nicht mehr nachweisbare Werte ab. In Richtung Südost ist die Situation komplizierter. Der Abfall der Säulendichte ist hier nicht monoton, sondern es zeigt sich ein zweites, lokales Maximum, das in der Karte in Abbildung 27 nicht hervortritt, da es gerade auf einer Position zwischen zwei Kartierungspunkten liegt. Danach fällt die Säulendichte gegen den südöstlichen Rand hin ganz allmählich ab, so daß der Eindruck eines schweifartigen Fortsatzes von CHVC 7 entsteht.

Die in Abbildung 28 (c) wiedergegebene Verteilung der Radialgeschwindigkeiten des HI-Gases über den gewählten Schnitt hinweg erscheint auf den ersten Blick sehr stetig und erinnert an eine Rotation. Wir müssen jedoch berücksichtigen, daß die in der rechten Karte von Abbildung 27 dargestellte Verteilung der Radialgeschwindigkeiten über die gesamte Wolke hinweg deutlich komplexer erscheint und mit einer einfachen Rotation nicht verträglich ist. Es hat den Anschein, als handle es sich bei CHVC 7 um eine sehr komplizierte Gaswolke, die in ihrem Innern stark strukturiert und geklumpt ist, wodurch sowohl die komplexen Linienprofile als auch die irreguläre Verteilung der Radialgeschwindigkeiten erklärt werden können.

Abbildung 28 (d) zeigt die Verteilung der beobachteten HI-Linienbreiten über den gewählten Schnitt hinweg. Die Linienbreiten erscheinen im wesentlichen konstant um etwa $\Delta v = 20 \dots 25 \text{ km s}^{-1}$ FWHM. Der an den Rändern beobachtete Anstieg muß in Anbetracht der dort deutlich größeren statistischen Fehler relativiert werden. Ein Blick in die mittlere Karte in Abbildung 27 zeigt, daß die über den Schnitt hinweg beobachteten Linienbreiten zwar für den nordwestlichen Teil von CHVC 7 typisch sind, nicht aber für den südöstlichen Teil, wo wir mit Linienbreiten um $\Delta v = 15 \text{ km s}^{-1}$ FWHM bedeutend schmalere Linien vorfinden. Diese Zweiteilung der Wolke in Bezug auf die Linienbreiten ist sehr stark ausgeprägt und unterstreicht die komplexe Struktur des Objekts.

Die Beobachtungen zeigen, daß CHVC 7 ein asymmetrisches Objekt ist, das deutliche Anzeichen für eine Substruktur aufweist, die sich sowohl in komplexen Linienprofilen als auch in einer ungewöhnlichen Verteilung der beobachteten Radialgeschwindigkeiten und Linienbreiten offenbart. Zugleich gibt es Anzeichen für eine Kopf-Schweif-Struktur, indem die Säulendichten am nordwestlichen Rand sehr schnell abfallen, während man am südöstlichen Rand der Wolken einen deutlich langsameren Abfall bemerkt, der sich in dem Säulendichteprofil als schweifartiger Fortsatz andeutet. Dies ist wiederum ein Hinweis auf das Vorhandensein eines umgebenden Mediums, mit dem CHVC 7 in Wechselwirkung steht. Das Objekt ist auf Grund seiner Strukturierung ein interessantes Ziel für interferometrische Beobachtungen, die möglicherweise die sich andeutenden Substrukturen auflösen vermögen.

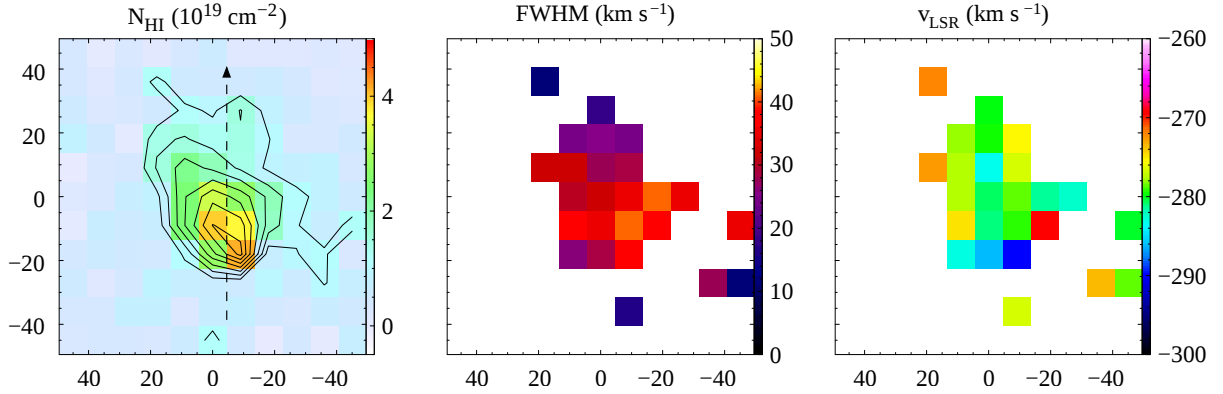


Abbildung 29: CHVC 9. Die linke Karte zeigt die integrierte Säulendichte im Intervall von -450 bis -150 km s^{-1} . Die überlagerten Konturlinien laufen von $1 \cdot 10^{19} \text{ cm}^{-2}$ in Schritten von $5 \cdot 10^{18} \text{ cm}^{-2}$. Die gestrichelte, schwarze Linie markiert den gewählten Schnitt. Die mittlere Karte gibt die gemessenen Linienbreiten (FWHM) wieder. Die rechte Karte zeigt die Verteilung der gemessenen Radialgeschwindigkeiten im lokalen Bezugssystem (LSR).

9.5 CHVC 9

CHVC 9 liegt einige Grad nördlich des HVC-Komplexes GCP direkt am galaktischen Äquator und inmitten der optischen *zone of avoidance*. Die Wolke ist sehr diffus und ausgedehnt, und man kann schwache Emission über den gesamten Bereich der Karte hinweg nachweisen. Mit einer maximalen Intensität von 0.6 K gehört CHVC 9 zu den schwächeren Objekten.

Die Morphologie der CHVC 9 ist bemerkenswert. Sie zeigt eine deutliche Asymmetrie dergestalt, daß die Emission um einen länglichen, vergleichsweise kompakten Kern herum auf sämtlichen Säulendichteskalen stark in nordöstliche Richtung elongiert ist, so daß man von einer kometenartigen Erscheinung sprechen kann. Zusätzlich kann man über den gesamten Bereich der Karte mit dem Auge schwache Emission ausmachen, die sich aber meist nicht signifikant über das *rms*-Rauschen der Basislinie erhebt und deshalb keiner weiteren Auswertung unterzogen werden kann. Dies geht einher mit einer über große Teile der zentralen Wolke relativ einheitlichen radialen LSR-Geschwindigkeit von etwa -280 km s^{-1} . Auch die Linienbreiten zeigen keinen klaren Trend und liegen in den zentralen Bereichen von CHVC 9 bei etwa 30 bis 40 km s^{-1} FWHM. Nur im Falle der diffusen Emission in den äußeren Bereichen findet man deutlich geringere Linienbreiten bis hinunter zu ungefähr 15 km s^{-1} FWHM.

Die augenscheinliche Kopf-Schweif-Struktur von CHVC 9 legt nahe, daß hier Wechselwirkungsprozesse mit einem umgebenden Medium stattfinden, die zu einem Abstreifen des Gases in den äußeren Bereichen der Wolke führen. Dieser Eindruck wird von den entlang des Schnitts (s. Säulendichtekarte in Abbildung 29) aufgenommenen Spektren bestätigt. Die Ergebnisse der Auswertung dieser Spektren sind in Abbildung 30 aufgetragen. In Abbildung 30 (a) ist zunächst ein typisches Spektrum abgebildet, das eine über ein einfaches Gaußprofil hinausreichende Struktur aufweist, die aufzeigt, daß hier Gasanteile unterschiedlicher Geschwindigkeiten entlang der Sichtlinie auftreten müssen. Dieser Eindruck wird auch durch die relativ großen Linienbreiten von bis zu $\Delta v \approx 40 \text{ km s}^{-1}$ FWHM untermauert. Solch breite Linien lassen sich nicht allein thermisch erklären, da dies Gastemperaturen um $T \approx 35000 \text{ K}$ erfordern würde, so daß der

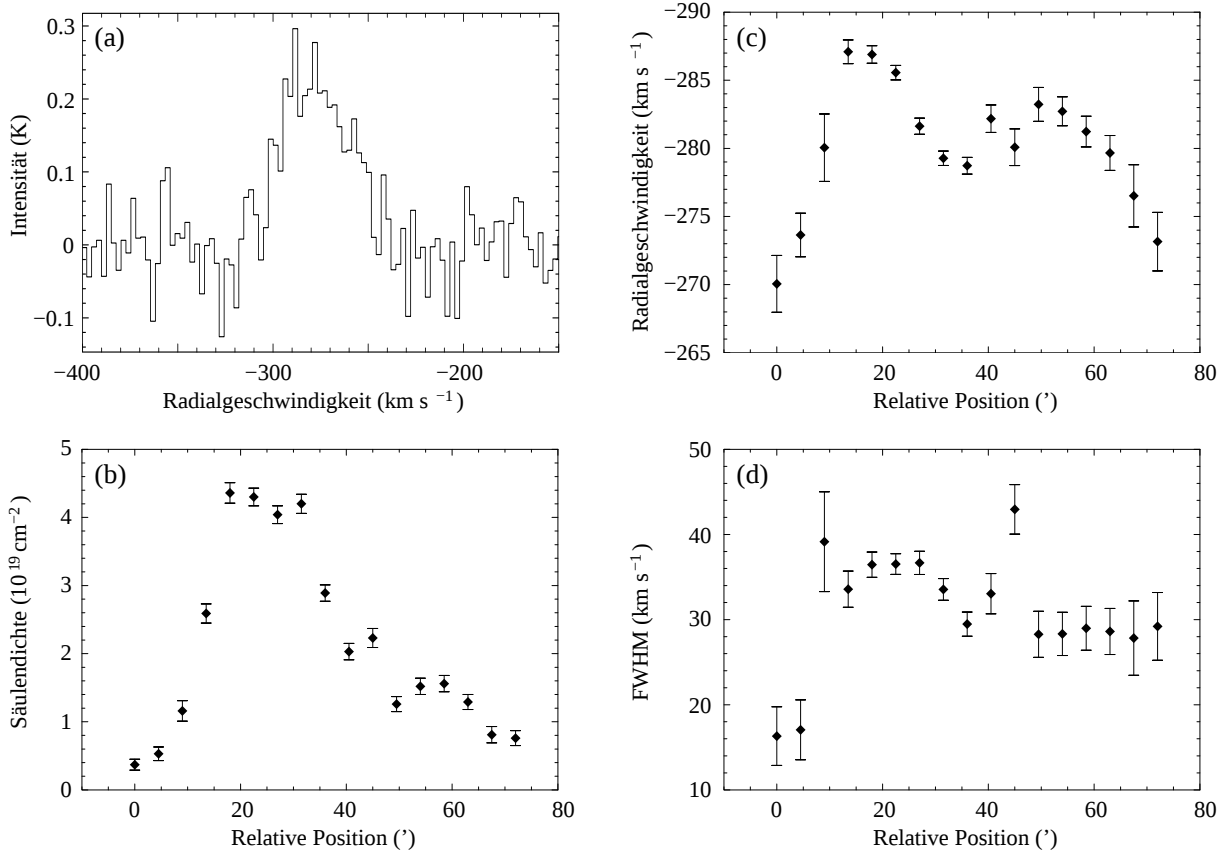


Abbildung 30: Messung des Profils durch CHVC 9. (a) Typisches Spektrum, das eine nicht ganz gaußförmige Struktur zeigt. (b) Säulendichte aufgetragen gegen die Position entlang des Schnitts. (c) Radialgeschwindigkeit im lokalen Bezugssystem (LSR). (d) Linienbreite (FWHM).

Wasserstoff dann ionisiert und in der 21-cm-Linienemission nicht mehr nachweisbar sein sollte. Die auf Grund der Linienprofile und Halbwertsbreiten erforderlichen unterschiedlichen Gasgeschwindigkeiten entlang der Sichtlinie sind mit der Vorstellung einer Wechselwirkung mit einem Umgebungsmedium insofern gut zu vereinbaren, als sie ein Anzeichen für Turbulenzen oder Wirbel darstellen könnten, die im Zusammenhang mit den Wechselwirkungsprozessen zu erwarten sind (vgl. Vieser 2001 [30]).

In Abbildung 30 (b) ist die Verteilung der Säulendichte entlang des Schnitts durch CHVC 9 als Funktion der relativen Position aufgetragen. Die schon aus der Karte ersichtliche, kometenartige Struktur spiegelt sich hier gut wider. Während die Säulendichte in der mutmaßlichen Bewegungsrichtung der Wolke steil abfällt, läuft sie in der entgegengesetzten Richtung flach aus und geht beinahe fließend in ein diffuses Medium über, das mit einer Intensität von 50...100 mK über praktisch des gesamten Bereich der Karte nachgewiesen werden kann. Dieses diffuse Medium weist typische Säulendichten von ungefähr $N_{\text{HI}} = 5 \cdot 10^{18} \text{ cm}^{-2}$ auf und ist besonders stark in den südlichen und westlichen Bereichen der Karte ausgeprägt.

Hilfreich bei der Bewertung dieser allgegenwärtigen, diffusen Gaskomponente ist der Verlauf der Radialgeschwindigkeiten des Gases über den gewählten Schnitt hinweg, der in Abbil-

dung 30 (c) wiedergegeben ist. Die in Bezug auf den Betrag höchsten Radialgeschwindigkeiten von etwa $v_{\text{LSR}} = -287 \text{ km s}^{-1}$ finden wir im Bereich des Kerns von CHVC 9. In Richtung des Schweifs fallen die Geschwindigkeiten dem Betrag nach dann erwartungsgemäß auf Werte um $v_{\text{LSR}} = -275 \text{ km s}^{-1}$ ab, wobei der Abfall nicht monoton ist. Statt dessen finden wir, ähnlich wie auch schon bei CHVC 1, ein wellenartiges Verhalten der Radialgeschwindigkeiten, was auf Turbulenzen oder Wirbelbildung im Zusammenhang mit den Wechselwirkungsvorgängen zurückzuführen sein könnte.

Betrachten wir nun den Verlauf der Radialgeschwindigkeit im linken Teil des Diagramms, in dem Bereich also, der dem Kopf in seiner mutmaßlichen Bewegungsrichtung vorangeht. Hier fällt die Radialgeschwindigkeit des Gases bis an den Rand des beobachteten Bereichs auf $v_{\text{LSR}} \approx -270 \text{ km s}^{-1}$ ab, so daß relativ zum Kopf ein Geschwindigkeitsabfall von 17 km s^{-1} über einen Winkelabstand von nicht ganz $15'$ zu beobachten ist. Diese Beobachtung erweckt zunächst die Vermutung, CHVC 9 könne mit eben diesem langsameren, diffusen Medium, dessen HI-Emission über weite Bereiche der Karte nachweisbar ist, in Wechselwirkung stehen. Dies ist jedoch sehr unwahrscheinlich, denn weshalb sollte ausgerechnet in der Umgebung von CHVC 9 diffuses HI-Gas mit ähnlichen Geschwindigkeiten vorhanden sein? Statt dessen ist es wahrscheinlicher, daß es sich um im Zuge der Wechselwirkung von CHVC 9 abgestreiftes Gas handelt. Dieses Gas kann durchaus scheinbar „vor“ dem Kopf der Wolke liegen, wenn man annimmt, daß sich CHVC 9 beinahe direkt auf uns zubewegt, so daß der Winkel zwischen der Bewegungsrichtung des Gases und der Sichtlinie zum Beobachter klein ist. Unter diesen Umständen kann abgestreiftes Gas, das hinter dem Kopf von CHVC 9 zurückgeblieben ist, dennoch in der Projektion an die zweidimensionale Himmelsphäre um den gesamten Kopf herum erscheinen, so daß der Anschein eines vor der Wolke stehenden, langsameren Gases erweckt wird.

In Abbildung 30 (d) habe ich schließlich noch die Halbwertsbreiten der HI-Linien als Funktion der relativen Position entlang des Schnitts aufgetragen. Es fallen die eingangs bereits angesprochenen großen Linienbreiten über den gesamten Bereich der Wolke auf, die auf Gasanteile unterschiedlicher Radialgeschwindigkeit entlang der Sichtlinie hindeuten. Dies ist im übrigen sehr gut verträglich mit dem vermuteten geringen Winkel zwischen Bewegungsrichtung und Sichtlinie, denn in diesem Fall würde die Sichtlinie einen großen Teil der Wolke und insbesondere des Schweifs schneiden. Durch den entlang des Schweifs nachgewiesenen Geschwindigkeitsgradienten kämen die großen Linienbreiten dann mühelos zustande.

Fassen wir noch einmal zusammen: CHVC 9 ist ein Beispiel für eine CHVC mit stark ausgeprägter Kopf-Schweif-Struktur, die eine Wechselwirkung mit einem umgebenden Medium nahelegt. Dies ist mit dem beobachteten Geschwindigkeitsgradienten verträglich, wonach im Kopf die höchsten Radialgeschwindigkeiten vorliegen. Interessant ist das Auftreten einer diffusen Gas-komponenten, die mit geringen Intensitäten über beinahe die gesamte Karte hinweg nachweisbar ist. Hierbei handelt es sich wahrscheinlich um von CHVC 9 im Zuge der Wechselwirkung bereits abgestreiftes Material, was im Rahmen einer Geometrie, die einen kleinen Winkel zwischen der Bewegungsrichtung der Wolke und der Sichtlinie zum Beobachter voraussetzt, durchaus möglich ist. Die in einem solchen Fall langen Sichtlinien durch die Wolke hindurch implizieren das Auftreten von Gas unterschiedlicher Geschwindigkeiten entlang der Sichtlinie, was sich in den beobachteten großen Linienbreiten von bis zu 40 km s^{-1} FWHM widerspiegelt.

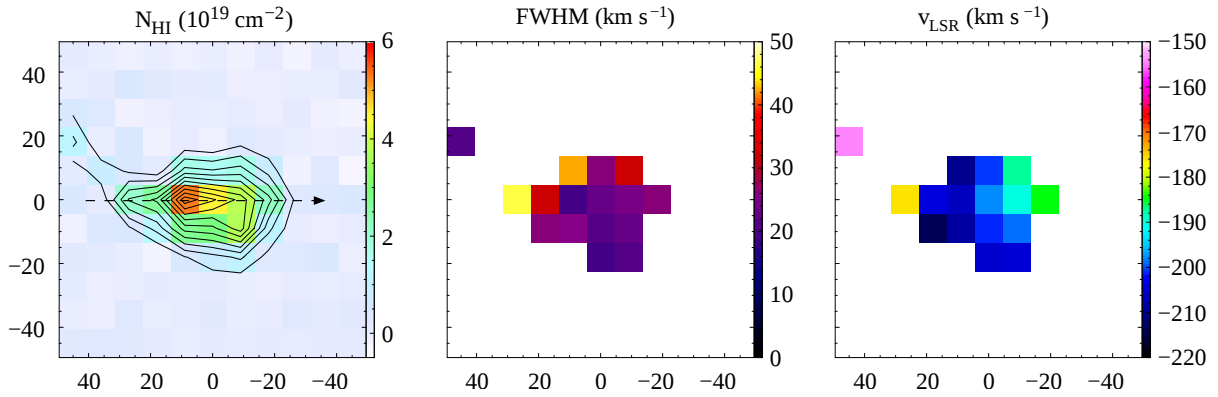


Abbildung 31: CHVC 11. Die linke Karte zeigt die integrierte Säulendichte im Intervall von -400 bis -100 km s^{-1} . Die überlagerten Konturlinien laufen von $5 \cdot 10^{18} \text{ cm}^{-2}$ in Schritten von $5 \cdot 10^{18} \text{ cm}^{-2}$. Die gestrichelte, schwarze Linie markiert den gewählten Schnitt. Die mittlere Karte gibt die gemessenen Linienbreiten (FWHM) wieder. Die rechte Karte zeigt die Verteilung der gemessenen Radialgeschwindigkeiten im lokalen Bezugssystem (LSR).

9.6 CHVC 11

CHVC 11 liegt in großer südlicher galaktischer Breite nur wenige Grad westlich des Magellanischen Stroms, weist jedoch eine deutlich andere Geschwindigkeit auf. Das Objekt ist relativ kompakt mit einer Ausdehnung von lediglich etwa $30'$ in Deklination bezüglich der Säulendichtekontur von $5 \cdot 10^{18} \text{ cm}^{-2}$. In Rektaszension beträgt die Ausdehnung hingegen etwa $50'$.

CHVC 11 fällt besonders durch ihren großen Geschwindigkeitsgradienten auf, der in etwa in West-Ost-Richtung verläuft und in der rechten Karte in Abbildung 31 deutlich hervortritt. Während am westlichen Ende der Wolke Geschwindigkeiten um -180 km s^{-1} zu beobachten sind, steigt die Geschwindigkeit (in Bezug auf ihren Betrag) mit zunehmender Rektaszension bis auf etwa -210 km s^{-1} an. Der beobachtete Anstieg beträgt somit zirka 30 km s^{-1} über einen Winkelabstand von nur $40'$. Im Anschluß fällt die Geschwindigkeit über einen Winkelabstand von etwa $20'$ wieder auf Werte um -150 km s^{-1} ab, wobei der Gradient in diesem Fall den extrem großen Wert von 180 km s^{-1} pro Grad annimmt. Dieser enorme Gradient sowie der starke Anstieg der Linienbreiten in diesem Bereich legen nahe, daß sich hier wahrscheinlich Gaskomponenten verschiedener Geschwindigkeiten entlang derselben Sichtlinie befinden, so daß die beobachteten Effekte schlicht durch Überlagerung verschiedener Emissionslinien generiert werden.

Um diesen Effekt näher zu beleuchten, habe ich in Abbildung 32 die Eigenschaften der Spektren entlang des gewählten Schnitts durch CHVC 11 graphisch gegen die relative Position aufgetragen. Abbildung 32 (b) zeigt den Verlauf der Säulendichte. Diese fällt beiderseits eines schmalen, plateauartigen Maximums ungefähr linear und mit gleicher Stärke bis hin zu nicht mehr nachweisbaren Werten ab. Bemerkenswert ist der Verlauf der zugehörigen Radialgeschwindigkeiten, der in Abbildung 32 (c) wiedergegeben ist. Man erkennt hier eindrucksvoll den zuvor angesprochenen, extremen Gradienten, der nahelegt, daß es insbesondere im Übergangsbereich zwischen dem starken Anstieg und erneuten Abfall (nahe der relativen Position $20'$ im Diagramm) zu einer Überlagerung von Gasanteilen unterschiedlicher Geschwindigkeiten kommen muß. Diese Vermutung wird auch durch die Gestalt der Spektren in diesem Bereich bestätigt,

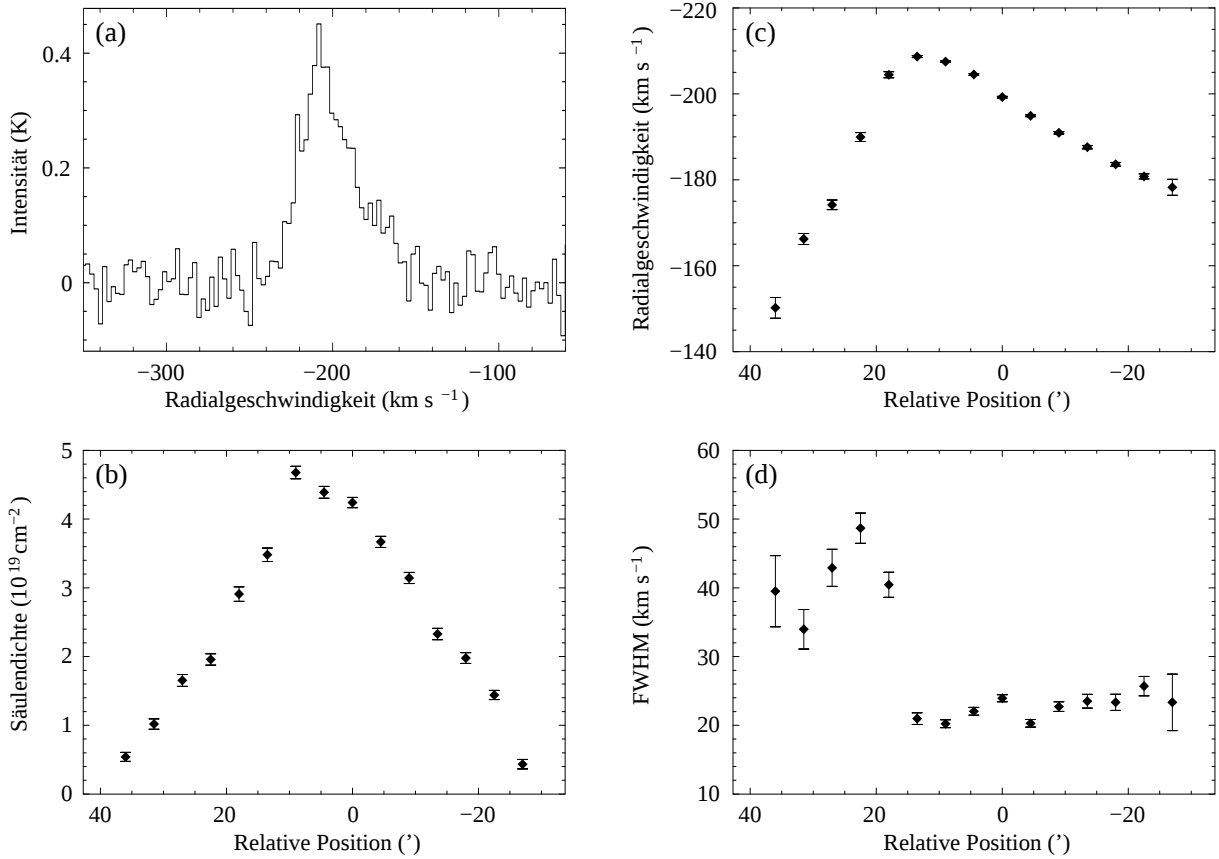


Abbildung 32: Messung des Profils durch CHVC 11. (a) Typisches Spektrum, das eine deutlich komplexe Struktur zeigt. (b) Säulendichte aufgetragen gegen die Position entlang des Schnitts. (c) Radialgeschwindigkeit im lokalen Bezugssystem (LSR). (d) Linienbreite (FWHM).

die eine deutlich komplexe Struktur aufweisen, die eine Superposition verschiedener Gasanteile nahelegt (vgl. Abbildung 32 (a)). In die gleiche Richtung deutet auch das in Abbildung 32 (d) wiedergegebene Verhalten der Halbwertsbreiten der HI-Linien. Während wir über einen großen Bereich von CHVC 11 in etwa konstante Linienbreiten um 20 km s^{-1} beobachten können, steigen die Werte im östlichen Bereich der Wolke schlagartig auf ungefähr 40 km s^{-1} an. Diese großen Linienbreiten sind nur durch eine Überlagerung von Gasanteilen verschiedener Geschwindigkeiten zu erklären, deren wechselnde Intensitäten einen Teil des Geschwindigkeitsgradienten in diesem Bereich zu erklären vermögen.

Eine mögliche Erklärung für das beobachtete Verhalten der Radialgeschwindigkeiten könnten wir darin sehen, daß es sich in Wahrheit um zwei miteinander assoziierte Objekte handelt, die leicht unterschiedliche Geschwindigkeiten aufweisen und beinahe an derselben Position des Himmels stehen. Gleichzeitig legt das vergleichsweise einheitliche Verhalten von Radialgeschwindigkeiten und Linienbreiten im zentralen und westlichen Bereich von CHVC 11 nahe, daß wir hier einen von der Konfusion mit anderem Gas freien Bereich beobachten, so daß der beobachtete Geschwindigkeitsgradient in diesem Teil der Wolke real sein und physikalische Ursachen besitzen könnte. In diesem Fall bietet sich eine Interpretation des Gradienten als Anzeichen

einer Rotation der Wolke an. Unter dieser Prämisse ist es uns mitunter möglich, die Entfernung von CHVC 11 zumindest der Größenordnung nach zu ermessen. Wir schätzen hierzu zunächst anhand des Diagramms in Abbildung 32 (c) ab, daß der Geschwindigkeitsgradient über die zentralen und westlichen Bereiche von CHVC 11 ungefähr $\delta v = 30 \text{ km s}^{-1}$ über einen Winkelabstand von etwa $\varphi = 40'$ beträgt. Da die Inklination der Wolke, das heißt der Winkel zwischen der gedachten Rotationsachse und der Sichtlinie zum Beobachter unbekannt ist, nehmen wir diese zu $i = 45^\circ$ an, um wenigstens eine grobe Abschätzung zu erhalten. Unter diesen Annahmen können wir die Rotationsgeschwindigkeit von CHVC 11 zu

$$v_{\text{rot}} = \frac{\delta v}{2 \sin i} \approx 20 \text{ km s}^{-1} \quad (40)$$

abschätzen. Indem wir nun am gedachten Außenrand der Wolke die nach innen wirkende Gravitationskraft gleich der nach außen gerichteten Zentrifugalkraft setzen, können wir die sogenannte dynamische Masse M_{dyn} innerhalb der Wolke als Funktion der Entfernung d von CHVC 11 ableiten. Wir erhalten unmittelbar:

$$M_{\text{dyn}}(d) = \frac{v_{\text{rot}}^2 d \tan(\varphi/2)}{G} \sim d. \quad (41)$$

Hierin ist G die Gravitationskonstante. Da wir die dynamische Masse allein anhand ihres gravitativen Einflusses auf die beobachteten Gasatome bestimmen konnten, haben wir mit ihr alle Massenanteile innerhalb der Wolke erfaßt, also nicht nur die Masse des atomaren Wasserstoffs, sondern die gesamte Masse aller sichtbaren und dunklen Materie. Allerdings geht in Gleichung 41 noch die Entfernung von CHVC 11 als unbekannte Größe ein. Wir können uns dies jedoch zunutze machen, um die Entfernung d abzuschätzen, indem wir zusätzlich die HI-Masse der Wolke bestimmen. Diese ergibt sich als Funktion der Entfernung d unmittelbar aus der beobachteten Säulendichte:

$$M_{\text{HI}}(d) = m_{\text{H}} N_{\text{HI}}^{\text{tot}} A(d) \sim d^2. \quad (42)$$

Hierin sind $m_{\text{H}} = 1.674 \cdot 10^{-27} \text{ kg}$ die Masse eines Wasserstoffatoms, $N_{\text{HI}}^{\text{tot}}$ die gesamte, integrierte Säulendichte der Wolke und $A(d)$ die Fläche eines Auflösungselements der Karte in Abhängigkeit von der Entfernung d . Da wir nur den zentralen und westlichen Teil von CHVC 11 als individuelles, in sich rotierendes Objekt betrachten wollen, habe ich nur die 5×5 Spektren um den Ursprung der Karte herum zur Ermittlung der Gesamtsäulendichte herangezogen, die in etwa den gewünschten Bereich von CHVC 11 abdecken. Wir erhalten dann eine integrierte Säulendichte von $N_{\text{HI}}^{\text{tot}} \approx 4.2 \cdot 10^{20} \text{ cm}^{-2}$ und eine Fläche von $A = d^2 \tan^2(9')$.

Nun können wir anhand der Gleichungen 41 und 42 den Verlauf der dynamischen Masse und der HI-Masse von CHVC 11 miteinander vergleichen. In Abbildung 33 sind die beiden Massen in einem doppellogarithmischen Diagramm gegen die Entfernung d aufgetragen, wobei die HI-Masse um einen zusätzlichen Heliumanteil von 40% erweitert wurde, das heißt $M_{\text{He}} = 0.4 M_{\text{HI}}$. Stünde CHVC 11 in einer Entfernung von ungefähr 20 Mpc, so wäre die kombinierte HI- und He-Masse gleich der dynamischen Masse. Hiermit haben wir also eine obere Entfernungsgrenze für CHVC 11 gefunden, denn bei noch größeren Entfernungen würde die HI/He-Masse größer als die dynamische Masse werden, was nicht sein kann, da die dynamische Masse bereits die gesamte sichtbare und unsichtbare Materie in der Wolke enthält. Auf der anderen Seite ist es unwahrscheinlich, daß CHVC 11 ausschließlich aus neutralem, atomarem Wasserstoff und dem dazugehörigen Heliumanteil besteht. Realistischer wäre ein Anteil der HI/He-Masse an der Gesamtmasse der Wolke in der Größenordnung von 10%, wie wir ihn in zahlreichen Galaxienhaufen

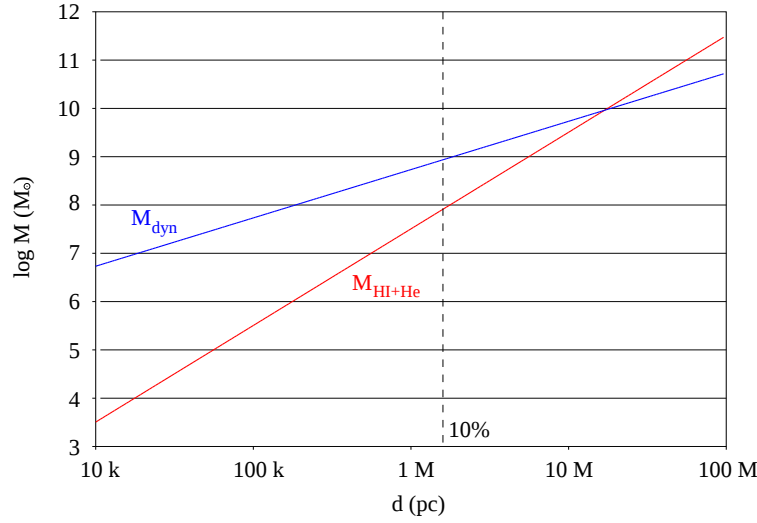


Abbildung 33: Dynamische Masse und HI/He-Masse von CHVC 11 als Funktion der Entfernung. Die gestrichelte Linie markiert die Entfernung, in der die HI/He-Masse gerade 10% der dynamischen Masse ausmacht. Eine nähere Erläuterung des Diagramms erfolgt im Text.

oder Zwerggalaxien beobachten. In diesem Fall hätte CHVC 11 eine Entfernung von grob 2 Mpc und eine Gesamtmasse von etwa $10^9 M_{\odot}$. Diese Werte legen die Vermutung nahe, es könne sich bei CHVC 11 möglicherweise um eine noch unentdeckte LSB-Galaxie handeln, wobei wir in dem Anhängsel am östlichen Rand der Wolke mit seinen breiten, komplexen Linien und dem extrem großen Geschwindigkeitsgradienten einen kleineren Begleiter sehen könnten. Ein Blick in den entsprechenden Himmelsausschnitt des *Digitized Sky Survey* (DSS) zeigt allerdings auf den ersten Blick keine Konzentration von Sternen im Bereich von CHVC 11, was mit der Vorstellung einer LSB-Galaxie durchaus verträglich ist.

Eine weitere auffällige Eigenschaft vieler Spektren von CHVC 11 ist das Auftreten einer deutlichen Zwei-Komponenten-Struktur des Linienprofils dergestalt, daß hier eine Superposition aus einer schmalen Komponente, die das Vorhandensein kalten neutralen Gases anzeigt, und einer breiten Komponente, die ein warmes neutrales Medium nachzeichnet, vorliegt (siehe Abbildung 34 (a)). Diese Zwei-Phasen-Struktur ist bei einigen Spektren entlang des gemessenen Profils außerordentlich stark ausgeprägt, und im Gegensatz zu anderen CHVCs ist die warme Phase in Teilen von CHVC 11 ausgesprochen dominant und trägt den größten Teil zur beobachteten Säulendichte bei. Die Zwei-Phasen-Struktur tritt allerdings nur in den zentralen und westlichen Teilen der Wolke auf. Gegen den östlichen Rand hin machen sich hingegen zunehmend komplexe, breite Linienprofile bemerkbar, die mit dem eingangs erwähnten starken Geschwindigkeitsabfall einhergehen und keine reguläre, gaußförmige Struktur mehr aufweisen. Aus diesem Grund habe ich nur für die zentralen und westlichen Bereiche von CHVC 11 eine gaußsche Zerlegung der entlang des Schnitts aufgenommenen Spektren durchgeführt, um die Eigenschaften der kalten und warmen Gasphase getrennt zu untersuchen. Die Ergebnisse sind in den Diagrammen in Abbildung 34 (b) bis (d) zu sehen.

In Abbildung 34 (b) ist zunächst der Verlauf der Säulendichte von kalter und warmer Gasphase entlang des gewählten Schnitts aufgetragen. Auffallend ist die gleichermaßen große

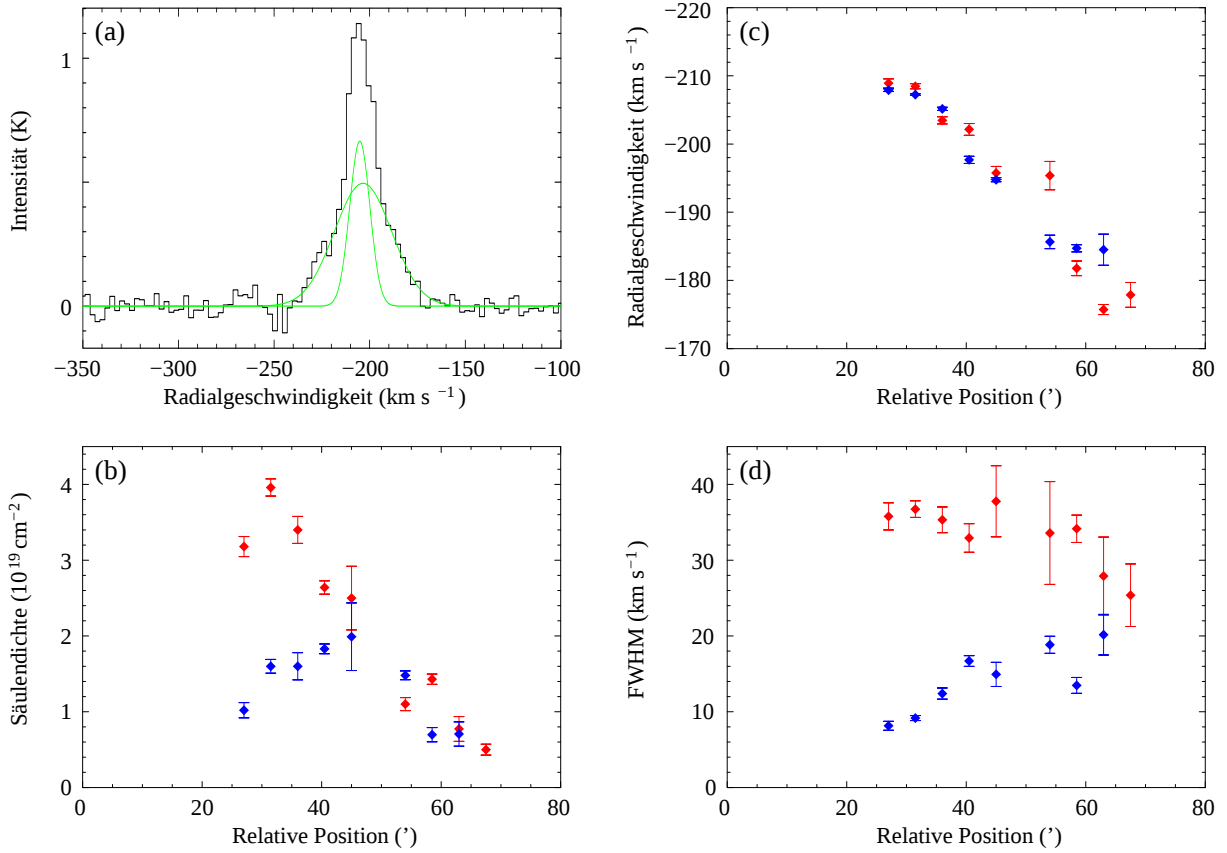


Abbildung 34: Gaußsche Zerlegung der Spektren entlang des Schnitts durch CHVC 11. (a) Typisches Spektrum, das eine deutliche Zwei-Komponenten-Struktur zeigt. (b) Säulendichte der kalten (blau) und warmen (rot) Komponente aufgetragen gegen die Position entlang des Schnitts. (c) Radialgeschwindigkeit beider Komponenten im lokalen Bezugssystem (LSR). (d) Linienbreiten (FWHM) beider Komponenten.

Ausdehnung beider Komponenten, so daß das kalte Gas nicht in Gestalt eines kompakten Kerns auftritt, wie das zum Beispiel bei CHVC 1 der Fall ist. Außerdem erreicht das warme Medium nahe des östlichen Randes der Wolke das Maximum der Säulendichteverteilung, wohingegen die kalte Komponente in den zentralen Bereichen ihre größte Säulendichte einnimmt. Gegen den westlichen Rand hin tragen schließlich beide Gasphasen etwa zu gleichen Teilen zur beobachteten Säulendichte bei. Eine Interpretation dieser Ergebnisse im Hinblick auf die räumliche Struktur von CHVC 11 sowie auf mögliche Wechselwirkungsprozesse ist nicht einfach.

Auch der in Abbildung 34 (c) wiedergegebene Verlauf der Radialgeschwindigkeiten beider Gaskomponenten macht eine Interpretation der Daten nicht einfacher. Wie bereits erwähnt, finden wir einen großen Geschwindigkeitsgradienten, der ungefähr in Ost-West-Richtung über CHVC 11 hinweg verläuft. An diesem Gradienten nehmen beide Gaskomponenten gleichermaßen Anteil. Darüber hinaus lassen sich keine systematischen Unterschiede in den Radialgeschwindigkeiten der kalten und warmen Gasphase feststellen, obschon die Geschwindigkeitsverläufe einer starken Streuung unterworfen sind, die sich insbesondere im rechten Teil des Diagramms bemerkbar macht. Die Ursache hierfür dürfte in der Annahme eines streng zweikomponentigen,

gaußförmigen Linienprofils zu finden sein, die gegen den westlichen Rand der Wolke hin nicht mehr gut erfüllt zu sein scheint, da hier eine so klare Ausprägung der Zwei-Komponenten-Struktur der Linien wie im zentralen Teil von CHVC 11 nicht mehr zu beobachten ist. Mithin kann von einer kinematischen Entkopplung beider Gasphasen nicht gesprochen werden. Auch die Ursache für den beobachteten starken Gradienten der Radialgeschwindigkeit bleibt rätselhaft. Daß es sich bei CHVC 11 um eine physikalisch nicht zusammenhängende Ansammlung von Gasmassen unterschiedlicher Geschwindigkeiten handelt, ist angesichts der relativ stetigen und homogenen physikalischen Eigenschaften der beobachteten zwei Gasphasen nicht wahrscheinlich. Folglich muß dem Gradienten eine physikalische Ursache zugeschrieben werden wie zum Beispiel eine mögliche Rotation der Wolke.

In Abbildung 34 (d) ist der Verlauf der Linienbreiten der kalten und warmen Gaskomponente wiedergegeben. Im östlichen Bereich der Wolke sind beide Komponenten klar ausgeprägt und getrennt. Die kalte Komponente hat hier eine Breite von etwa 8 km s^{-1} , was einer Obergrenze der Gastemperatur von ungefähr 1400 K entspricht. Die warme Gasphase zeigt eine Linienbreite um 35 km s^{-1} entsprechend einer Temperaturobergrenze von gut 25000 K. In westlicher Richtung jedoch wächst die beobachtete Linienbreite des kalten Mediums immer weiter an, und die Linienbreite des warmen Mediums nimmt beständig ab, bis beide Gasphasen praktisch fließend ineinander übergehen und nicht mehr getrennt werden können. Diese Einzelkomponente am westlichen Ende von CHVC 11 weist eine mittlere Linienbreite um 25 km s^{-1} auf, woraus sich eine obere Grenze für die Temperatur des dort vorhandenen Gases von zirka 14000 K ableiten läßt. Ein solcher Gradient in Linienbreite muß aber nicht unbedingt einen Temperaturgradienten nachzeichnen, da auch Turbulenz in der Wolke oder Gas unterschiedlicher Geschwindigkeiten entlang der Sichtlinie eine Verbreiterung der Spektrallinien bewirken können.

Zusammenfassend läßt sich sagen, daß sich CHVC 11 auf Grund ihres extremen Geschwindigkeitsgradienten gegenüber den übrigen tiefer beobachteten CHVCs abhebt. Über den zentralen und westlichen Bereich des Objekts beobachten wir einen sehr regelmäßigen Gradienten von etwa 30 km s^{-1} . Zugleich finden wir hier sehr regelmäßige Linienprofile, die eine Zwei-Komponenten-Struktur des Gases offenbaren. Diese Beobachtungen legen nahe, daß es sich bei diesem Hauptteil von CHVC 11 um eine einheitliche Gasmasse handelt, deren Geschwindigkeitsgradient eine Rotation nachzeichnet. Demgegenüber beobachten wir in dem östlichen Anhang von CHVC 11 sehr komplexe und breite Spektrallinien und einen extremen Gradienten in Radialgeschwindigkeit von etwa 60 km s^{-1} . Hier sehen wir wahrscheinlich ein kleineres Begleitobjekt mit leicht unterschiedlicher Radialgeschwindigkeit, so daß die beobachteten Linienbreiten und -profile sowie der starke Geschwindigkeitsgradient sich möglicherweise durch eine Überlagerung der Emissionen dieses Begleiters und des Hauptkörpers von CHVC 11 erklären lassen. Die aus der Annahme eines HI-Anteils von etwa 10% an der Gesamtmasse von CHVC 11 abgeschätzte Entfernung in der Größenordnung von $d \approx 2 \text{ Mpc}$ ist mit der Vorstellung verträglich, es könne sich bei CHVC 11 um eine noch unentdeckte LSB-Galaxie mit Begleiter handeln. Eine mögliche Wechselwirkung zwischen beiden Objekten könnte darüber hinaus auch die schwache, ausgedehnte Emission hervorgerufen haben, die wir in der nordöstlichen Ecke der Karte bis an den Kartenrand verfolgen können und die an einen Gezeitenarm erinnert.

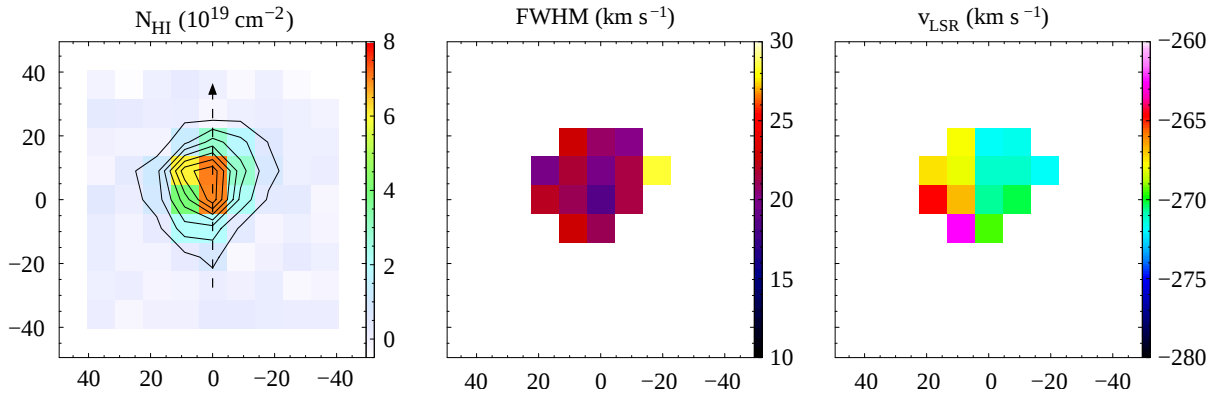


Abbildung 35: CHVC 24. Die linke Karte zeigt die integrierte Säulendichte im Intervall von -400 bis -150 km s^{-1} . Die überlagerten Konturlinien laufen von $5 \cdot 10^{18} \text{ cm}^{-2}$ in Schritten von $1 \cdot 10^{19} \text{ cm}^{-2}$. Die gestrichelte, schwarze Linie markiert den gewählten Schnitt. Die mittlere Karte gibt die gemessenen Linienbreiten (FWHM) wieder. Die rechte Karte zeigt die Verteilung der gemessenen Radialgeschwindigkeiten im lokalen Bezugssystem (LSR).

9.7 CHVC 24

CHVC 24 liegt nahe des galaktischen Südpols sowie des Magellanschen Stroms, der in diesem Bereich jedoch deutlich andere Radialgeschwindigkeiten aufweist. Mit einer zentralen Säulendichte von $N_{\text{HI}} = 8 \cdot 10^{19} \text{ cm}^{-2}$ gehört CHVC 24 zu den dichteren Objekten. Darüber hinaus ist sie die einzige der 11 tiefer kartierten CHVCs, die eine einigermaßen sphärisch-symmetrische Gestalt offenbart, und mit $40'$ Winkeldurchmesser in der Säulendichtekontur von $5 \cdot 10^{18} \text{ cm}^{-2}$ ist sie auch eines der kompaktesten Objekte, grob vergleichbar mit dem Durchmesser der Vollmonds am Himmel (siehe linke Karte in Abbildung 35).

Das Erscheinungsbild von CHVC 24 legt eine sphärische Symmetrie nahe, die es uns möglich macht, die physikalischen Parameter wie Masse oder Entfernung abzuschätzen. Das symmetrische Bild von CHVC 24 setzt sich auch in der Verteilung der beobachteten Halbwertsbreiten und Radialgeschwindigkeiten der HI-Linien fort, die in der mittleren und linken Karte in Abbildung 35 wiedergegeben sind. Die Linienbreiten bewegen sich überwiegend zwischen etwa $20 \dots 25 \text{ km s}^{-1}$ und sind in der Tendenz in den zentralen Bereichen von CHVC 24 etwas schmaler als in den äußeren Bereichen. Dies wäre für eine sphärisch-symmetrische, im Gleichgewicht befindliche Wolke auch zu erwarten, bei der die Temperatur im Zentrum geringer sein sollte als weiter außen. Eine Trennung in eine warme und eine kalte Gaskomponente ist anhand der Spektren von CHVC 24 nicht zu ersehen, jedoch deutet die Zuspitzung der Spektrallinien in den zentralen Bereichen der Wolke das Vorhandensein einer kalten Gaskomponente im Zentrum an (vgl. Abbildung 36 (a)).

Auch die Radialgeschwindigkeitsverteilung sieht vergleichsweise symmetrisch aus und ist mit einer Rotation der Wolke um eine von Nordost nach Südwest orientierte Achse vereinbar. Wenn alle unsere Annahmen bezüglich der stark symmetrischen und ungestörten Natur von CHVC 24 richtig sein sollten, so könnten wir auf verschiedenen Wegen versuchen, eine konsistente Abschätzung der Entfernung zu erreichen.

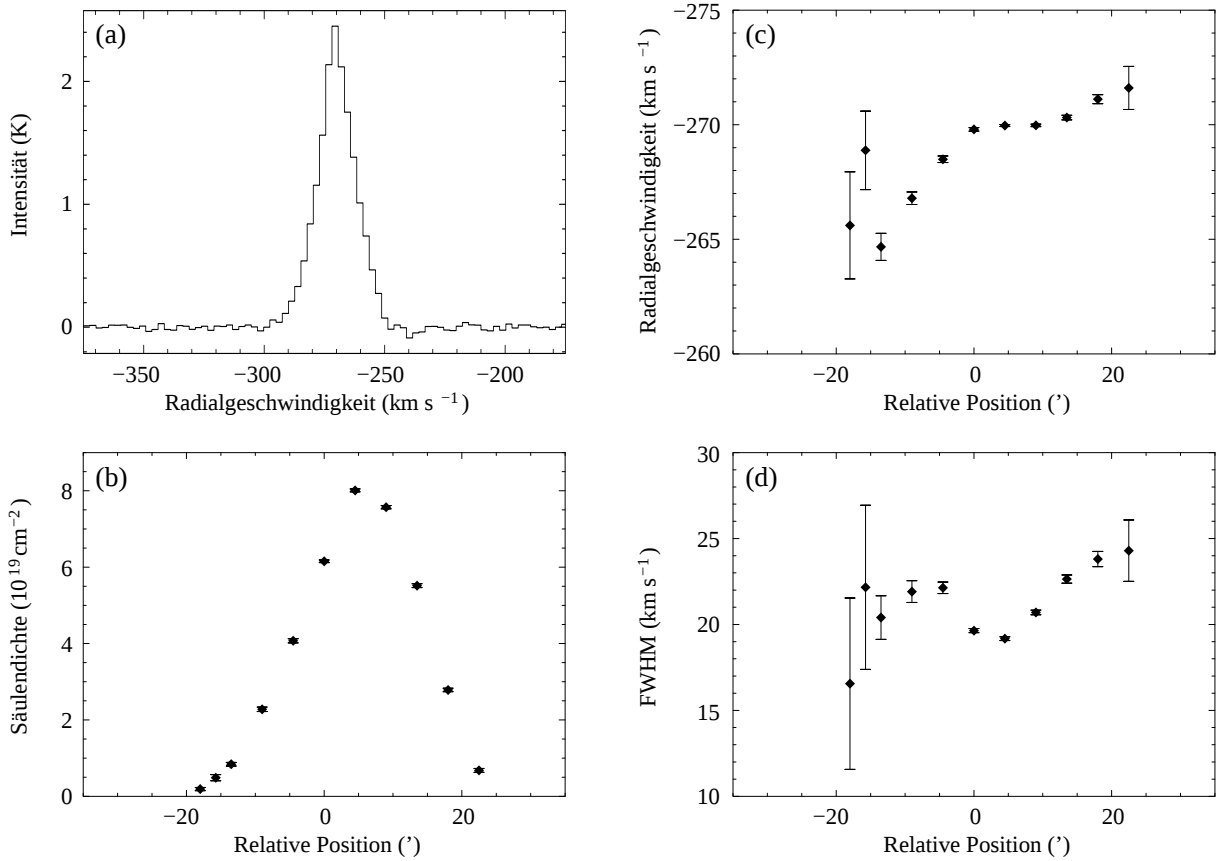


Abbildung 36: Messung des Profils durch CHVC 24. (a) Typisches Spektrum, das eine sehr regelmäßige Struktur zeigt. (b) Säulendichte aufgetragen gegen die Position entlang des Schnitts. (c) Radialgeschwindigkeit im lokalen Bezugssystem (LSR). (d) Linienbreiten (FWHM).

Hilfreich dabei könnte der durch die Wolke gelegte Schnitt sein, entlang dessen wir die Eigenschaften der HI-Linien in guter Winkelauflösung und mit großer Genauigkeit kennen. Die physikalischen Parameter der entlang dieses Schnitts aufgenommenen HI-Spektren sind in Abbildung 36 gegen die relative Position in Bogenminuten aufgetragen. Abbildung 36 (b) zeigt den Verlauf der Säulendichte und bestätigt noch einmal den bereits anhand der Karte formulierten Eindruck einer deutlich sphärischen Symmetrie. Allerdings ist der Abfall der Säulendichte in südliche Richtung ein wenig flacher, was sich bereits in der Karte in Abbildung 35 in Gestalt eines größeren Abstands der Konturlinien manifestiert.

Nicht ganz regulär ist der Verlauf der Radialgeschwindigkeit über den Schnitt, der in Abbildung 36 (c) wiedergegeben ist. Dennoch ist ein im wesentlichen monotoner Anstieg der Radialgeschwindigkeit in Bezug auf ihren Betrag über die gesamte Wolke hinweg zu erkennen. Dieser Gradient ließe sich als Rotation interpretieren, insbesondere wenn man die sehr symmetrische Gestalt der einzelnen Spektren als auch der gesamten Wolke in Betracht zieht. In Abbildung 36 (d) ist schließlich der Verlauf der Linienbreiten über den Schnitt hinweg aufgetragen. Die Daten bestätigen die schon anhand der Karte gemachte Beobachtung, daß die Linien in den zentralen Bereichen von CHVC 24 – wohl wegen der geringeren Gastemperaturen im Kern

– schmaler sind als in den äußeren Bereichen.

Wir wollen jetzt versuchen, anhand der soeben erarbeiteten Eigenschaften von CHVC 24 deren Entfernung abzuschätzen. Indem wir hierzu verschiedene, voneinander unabhängige Methoden verwenden, können wir möglicherweise ein konsistentes Bild der physikalischen Eigenschaften des Objekts erstellen. Die Nutzung verschiedener Methoden zur Entfernungsbestimmung ist bei CHVC 24 überhaupt nur möglich, weil wir eine sphärische Symmetrie angenommen und den beobachteten Gradienten in Radialgeschwindigkeit als Rotation interpretiert hatten. Diese Annahmen stellen folgerichtig die bedeutendsten Einschränkungen an die Genauigkeit aller berechneten Entfernungen dar. Zugleich läßt sich der durch die Abweichungen von diesen idealisierten Annahmen eingebrachte Fehler nicht bemessen, so daß alle Entfernungsbestimmungen nur Abschätzungen sein können.

Eine erste Möglichkeit, zu einer Entfernungsabschätzung zu gelangen, besteht wieder in der Berechnung der dynamischen Masse und der HI-Masse unter der Annahme einer reinen Rotation als Ursache für den Geschwindigkeitsgradienten. Diesen Weg hatten wir schon bei CHVC 11 beschritten, und es sei an dieser Stelle auf die auf Seite 100 dargelegten Grundlagen verwiesen. Da der gewählte Schnitt nicht exakt entlang des Geschwindigkeitsgradienten gelegt wurde, müssen wir die Rotationsgeschwindigkeit von CHVC 24 anhand der Spektren aus der Karte ermitteln. Es ergibt sich demnach ein Geschwindigkeitsunterschied zwischen dem südöstlichen und dem nordwestlichen Rand der Wolke von $\delta v \approx 10 \text{ km s}^{-1}$ über eine Distanz von zirka $\varphi = 40'$. Daraus läßt sich die Rotationsgeschwindigkeit am äußeren Rand von CHVC 24 zu

$$v_{\text{rot}} = \frac{\delta v}{2 \sin i} \approx 7 \text{ km s}^{-1} \quad (43)$$

abschätzen, wobei ich in Ermangelung der Kenntnis des Inklinationwinkels wieder einen Wert von $i = 45^\circ$ annehmen mußte. Anhand dieses Wertes können wir nun nach Gleichung 41 auf Seite 100 die dynamische Masse $M_{\text{dyn}}(d)$ von CHVC 24 als Funktion der Entfernung d berechnen.

Die integrierte Säulendichte von CHVC 24 ergibt sich zu etwa $N_{\text{HI}}^{\text{tot}} = 5.0 \cdot 10^{20} \text{ cm}^{-2}$. Daraus können wir mit Hilfe von Gleichung 42 auf Seite 100 die beobachtete Masse des neutralen Wasserstoffs von CHVC 24 als Funktion der Entfernung d der Wolke ausrechnen. Durch Vergleich von dynamischer Masse und HI-Masse können wir wie schon bei CHVC 11 versuchen, eine Abschätzung der Entfernung von CHVC 24 zu erreichen.

In Abbildung 37 habe ich die abgeschätzte dynamische Masse und die errechnete HI-Masse von CHVC 24 als Funktion der Entfernung d in ein Diagramm eingetragen, wobei auf die HI-Masse noch einmal 40% für den mit dem Wasserstoff assoziierten Heliumanteil aufgeschlagen wurde. Unter der vernünftigen Annahme, der HI/He-Anteil an der dynamischen Masse liege bei ungefähr 5...10%, was ungefähr dem bei vielen Galaxien beobachteten Wert entspricht, ergibt sich eine Entfernung von CHVC 24 in der Größenordnung von $d \approx 100 \dots 200 \text{ kpc}$. Dieser Wert ist natürlich nur eine Abschätzung der Größenordnung, denn wir hatten neben der willkürlichen Annahme eines Inklinationwinkels von 45° eine Interpretation des beobachteten Geschwindigkeitsgradienten als Rotation in die Berechnung einfließen lassen. Die durch diese beiden Annahmen implizierten Fehler lassen sich praktisch nicht quantisieren. Die Entfernungsabschätzung zeigt jedoch, daß die beobachteten Eigenschaften von CHVC 24 mit der Vorstellung einer zirkumgalaktischen CHVC-Population gut verträglich sind.

Eine weitere Möglichkeit, die Entfernung von CHVC 24 zu ermessen, besteht in der Abschätzung des thermischen Drucks im Zentrum des Objekts. Diese Methode wird in Kapitel 3.2.3

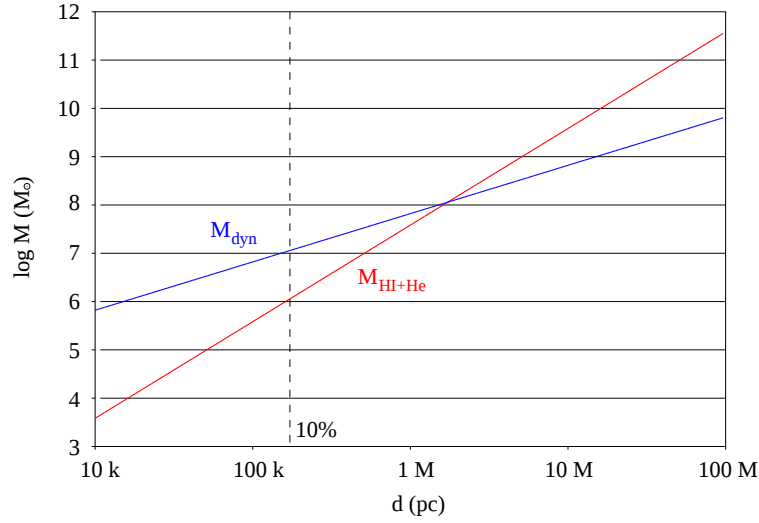


Abbildung 37: Dynamische Masse und HI/He-Masse von CHVC 24 als Funktion der Entfernung. Die gestrichelte Linie markiert die Entfernung, in der die HI/He-Masse gerade 10% der dynamischen Masse ausmacht. Eine nähere Erläuterung des Diagramms erfolgt im Text.

vorgestellt und erfordert die Annahme einer im thermischen Gleichgewicht befindlichen Wolke. Darüber hinaus müssen wir eine Abschätzung des thermischen Drucks vornehmen, der im Innern von CHVC 24 herrscht. Burton, Braun & Chengalur 2001 [4] verwenden die Methode ebenfalls zur Entfernungsabschätzung und verwenden ausgehend von einer Arbeit von Wolfire et al. 1995 [35] einen Wert von $P/k = 100 \text{ K cm}^{-3}$, der für die Ausbildung einer Zwei-Phasen-Struktur, die bei vielen CHVCs beobachtet wird, notwendig ist. Einen ähnlichen Ansatz machen Sternberg, McKee & Wolfire 2002 [26] und erhalten einen Druck von $P/k \gtrsim 50 \text{ K cm}^{-3}$ für eine stabile Zwei-Phasen-Struktur. Es erscheint also sinnvoll, einen thermischen Druck in der Größenordnung von $P/k \approx 100 \text{ K cm}^{-3}$ für das Zentrum von CHVC 24 anzusetzen.

Mit diesem Druck können wir nun anhand von Gleichung 17 die Entfernung von CHVC 24 abschätzen. Wir benötigen hierzu weiter die maximale Säulendichte von $N_{\text{HI}} = 8 \cdot 10^{19} \text{ cm}^{-2}$, den Winkeldurchmesser von $2\varphi \approx 40'$ sowie die Temperatur, die wir anhand der mittleren Linienbreite von $\Delta v = 22 \text{ km s}^{-1}$ zu $T \approx 10^4 \text{ K}$ ansetzen können. Mit diesen Werten erhalten wir schließlich eine Entfernung von CHVC 24 in der Größenordnung von $d \approx 200 \text{ kpc}$. Dieses Ergebnis ist in guter Übereinstimmung mit den Werten, die wir anhand des Vergleichs von dynamischer Masse und HI-Masse abgeschätzt hatten.

Zusammenfassend lassen sich aus der Konsistenz der mit beiden Methoden gewonnenen Entfernungsabschätzungen wichtige Schlußfolgerungen ziehen. Offenbar handelt es sich bei CHVC 24 um eine sphärisch-symmetrische Wolke in einer Entfernung von etwa $100 \dots 200 \text{ kpc}$ von der Milchstraße, was sich mit der Vorstellung einer zirkumgalaktischen CHVC-Population gut deckt. Die Ergebnisse sind konsistent mit einem HI-Masseanteil an der dynamischen Masse von etwa $5 \dots 10\%$ und einem entsprechenden Dunkle-Materie-Anteil von $90 \dots 95\%$. Aus diesen Werten resultiert ein Durchmesser von ungefähr $D = 1 \dots 2.5 \text{ kpc}$ und eine dynamische Masse von etwa $(0.7 \dots 1.3) \cdot 10^7 M_\odot$.

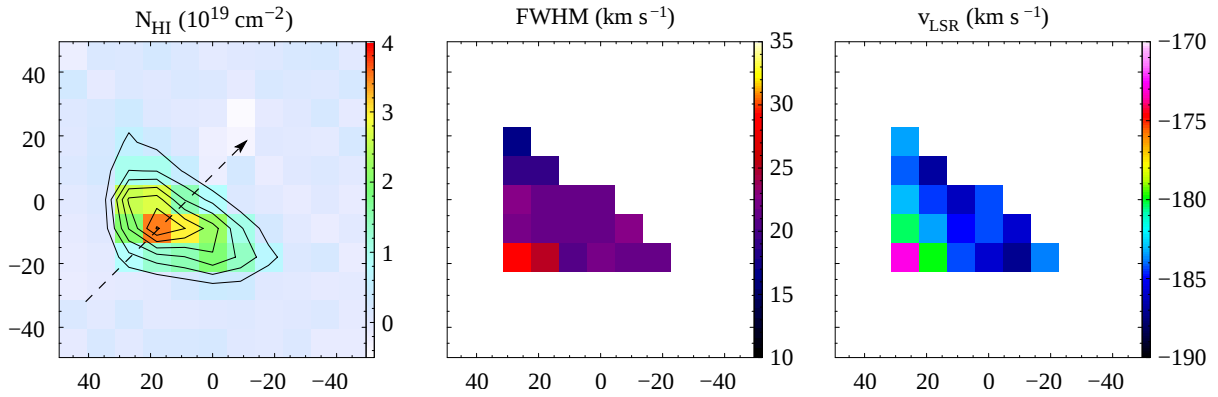


Abbildung 38: CHVC 26. Die linke Karte zeigt die integrierte Säulendichte im Intervall von -400 bis -150 km s^{-1} . Die überlagerten Konturlinien laufen von $5 \cdot 10^{18} \text{ cm}^{-2}$ in Schritten von $5 \cdot 10^{18} \text{ cm}^{-2}$. Die gestrichelte, schwarze Linie markiert den gewählten Schnitt. Die mittlere Karte gibt die gemessenen Linienbreiten (FWHM) wieder. Die rechte Karte zeigt die Verteilung der gemessenen Radialgeschwindigkeiten im lokalen Bezugssystem (LSR).

9.8 CHVC 26

CHVC 26 liegt in der Nähe des galaktischen Antizentrums und mit einer galaktischen Breite von $b \approx +3^\circ$ beinahe exakt in der galaktischen Ebene. Sie weicht deutlich von einer sphärisch-symmetrischen Gestalt ab und erweckt den Eindruck einer bugwellenförmigen Struktur. Die kürzere Achse, die der Symmetrieachse der zweidimensionalen Projektion an den Himmel entspricht, bemißt etwa $40'$ in Bezug auf das Säulendichteniveau von $5 \cdot 10^{18} \text{ cm}^{-2}$. Die längere Achse weist eine Winkelausdehnung von etwa 1° auf.

Die eingangs erwähnte, bugwellenförmige Gestalt von CHVC 26, die in der Säulendichtekarte links in Abbildung 38 gut zu erkennen ist, legt nahe, daß das Objekt sich durch ein umgebendes Medium hindurchbewegt, wobei wir naiv erwarten würden, daß die Bewegung relativ zu diesem Medium in südöstliche Richtung erfolgt. Dieser Eindruck wird unterstützt durch die beobachtete Verteilung der Linienbreiten und Radialgeschwindigkeiten über die Wolke hinweg. Die Verteilung der Linienbreiten ist in der mittleren Karte in Abbildung 38 wiedergegeben. Während wir über einen großen Bereich von CHVC 26 Breiten um 20 km s^{-1} FWHM beobachten, steigt die Linienbreite gegen den mutmaßlich in Bewegungsrichtung liegenden Rand der Wolke systematisch auf $25 \dots 30 \text{ km s}^{-1}$ FWHM an. Dieser Anstieg kann als Anzeichen für eine mögliche Aufheizung des auf das umgebende Medium treffenden Gases interpretiert werden. Darüber hinaus ist es auch denkbar, daß durch Turbulenz oder Abstreifen von Gas ein breiteres Linienprofil am vorderen Ende der Wolke erzeugt wird. Beides wäre mit der Vorstellung einer Wechselwirkung von CHVC 26 mit einem Umgebungsmedium gut verträglich.

In dieselbe Richtung weist die beobachtete Verteilung der Radialgeschwindigkeiten, die in der rechten Karte in Abbildung 38 wiedergegeben ist. Wiederum beobachten wir eine in Bezug auf den Betrag starke Abnahme der Radialgeschwindigkeit gegen den vermutlich in Bewegungsrichtung liegenden Teil der Wolke hin, was auf ein Abbremsen des Gases in diesem Bereich durch die Wechselwirkung mit einem umgebenden Medium hindeutet. Alle Beobachtungen deuten also darauf hin, daß CHVC 26 tatsächlich mit einem umgebenden Medium in Wechselwirkung steht,

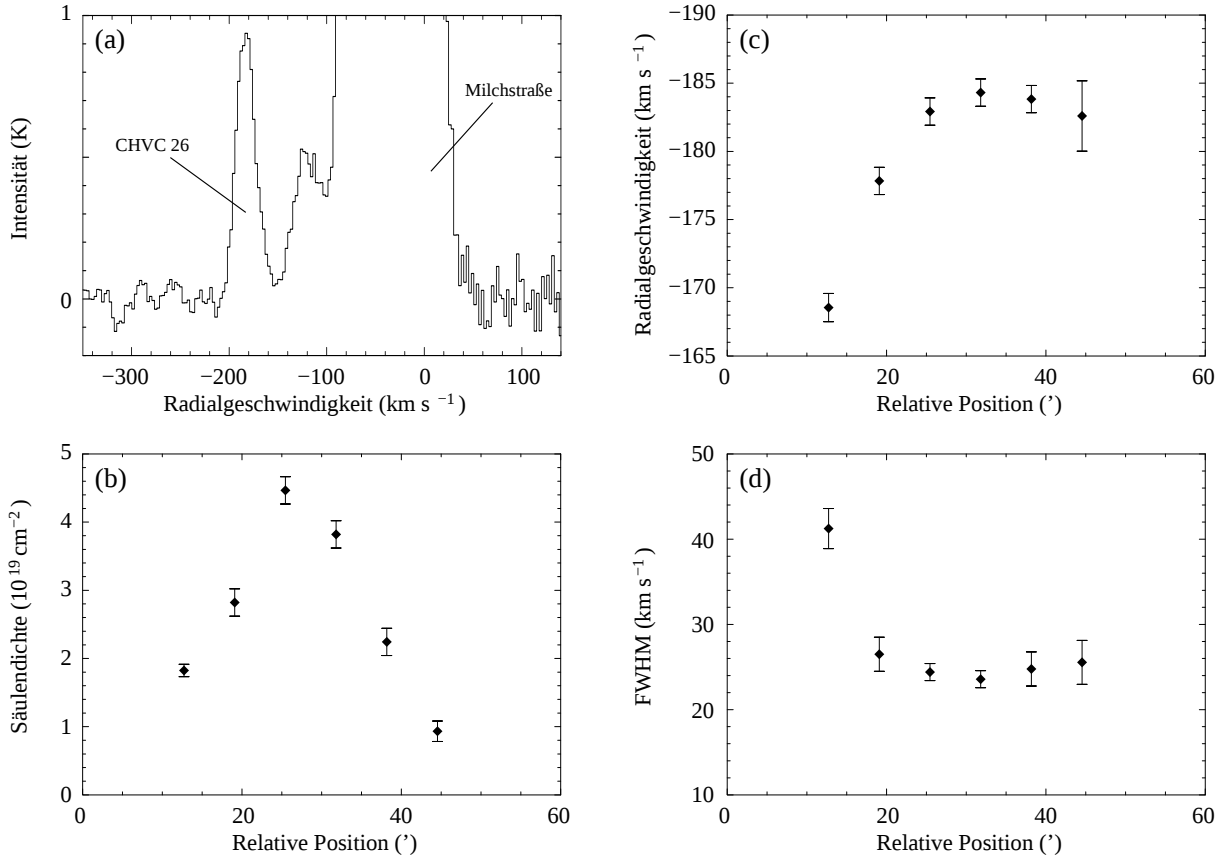


Abbildung 39: Messung des Profils durch CHVC 26. (a) Typisches Spektrum, das eine im wesentlichen gaußförmige Struktur zeigt. (b) Säulendichte aufgetragen gegen die Position entlang des Schnitts. (c) Radialgeschwindigkeit im lokalen Bezugssystem (LSR). (d) Linienbreite (FWHM).

wodurch sich die offensichtliche Deformation des Objekts erklärt.

Das Vorliegen einer Wechselwirkung von CHVC 26 mit einem Umgebungsmedium wird auch durch die Ergebnisse des Schnitts durch die Wolke bestätigt, die in Abbildung 39 wiedergegeben sind. Die Lage des Schnitts wird durch den schwarzen Pfeil in der linken Karte in Abbildung 38 angezeigt. In Abbildung 39 (a) ist zunächst ein typisches Spektrum von CHVC 26 zu sehen, das ein reguläres, gaußförmiges Profil aufweist. Auffallend ist auch die intensive und ausgedehnte 21-cm-Linienemission der Milchstraße, die hier, nahe der galaktischen Ebene, besonders stark ausgeprägt ist.

In Abbildung 39 (b) ist der Verlauf der Säulendichte über den Schnitt hinweg aufgetragen. Wie bereits aus der Karte in Abbildung 38 zu ersehen, ist der Abfall der Säulendichte zu beiden Seiten der Wolke hin etwa gleich stark. Eine sehr gute Bestätigung dafür, daß CHVC 26 sich durch ein umgebendes Medium hindurchbewegt und mit diesem in Wechselwirkung steht, folgt anhand des Verlaufs der Radialgeschwindigkeiten und der Linienbreiten entlang des Schnitts, die in Abbildung 39 (c) und (d) aufgetragen sind. Die Radialgeschwindigkeit zeigt gegen den mutmaßlich in Bewegungsrichtung der Wolke stehenden Rand einen deutlichen Abfall in Bezug auf ihren Betrag. Diese Feststellung hatten wir bereits anhand der Geschwindigkeitskarte in Ab-

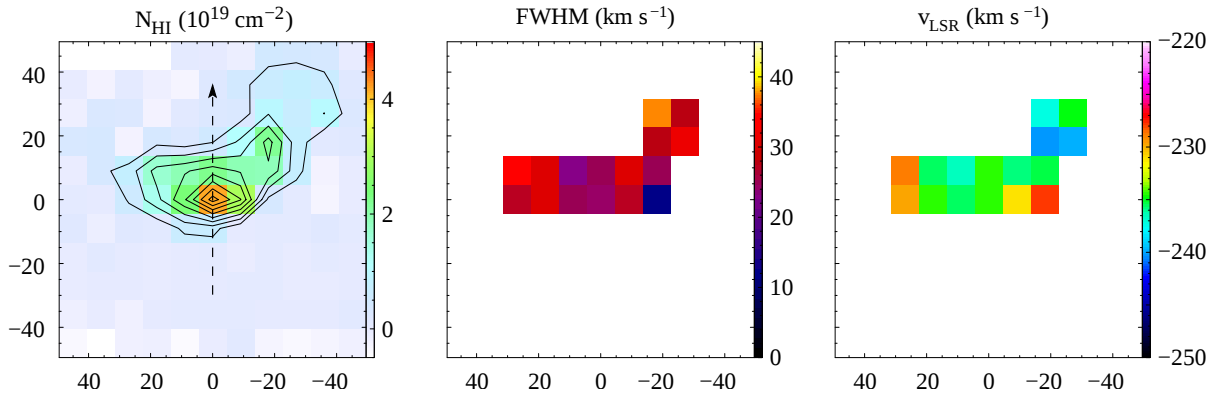


Abbildung 40: CHVC 29. Die linke Karte zeigt die integrierte Säulendichte im Intervall von -500 bis -100 km s^{-1} . Die überlagerten Konturlinien laufen von $5 \cdot 10^{18} \text{ cm}^{-2}$ in Schritten von $5 \cdot 10^{18} \text{ cm}^{-2}$. Die gestrichelte, schwarze Linie markiert den gewählten Schnitt. Die mittlere Karte gibt die gemessenen Linienbreiten (FWHM) wieder. Die rechte Karte zeigt die Verteilung der gemessenen Radialgeschwindigkeiten im lokalen Bezugssystem (LSR).

bildung 38 gemacht und als deutliches Indiz für die Richtigkeit der Wechselwirkungs-Hypothese gewertet. Auch der beobachtete Anstieg der Linienbreiten in Richtung des „vorderen“ Teils von CHVC 26 wird durch die detaillierten Messungen entlang des gewählten Schnitts bestätigt.

Es ergibt sich also ein konsistentes Bild einer durch ein umgebendes Medium hindurchlaufenden Wolke, die durch die dabei auftretenden Wechselwirkungsprozesse deutlich verformt wird. Diese Vorstellung wird bestätigt durch den deutlichen und systematischen Abfall der Radialgeschwindigkeiten des Gases in der mutmaßlichen Bewegungsrichtung von CHVC 26 relativ zum Umgebungsmedium. Dieser Abfall wird durch die Vorstellung eines Abbremsens des Gases durch den Staudruck des Mediums unmittelbar verständlich. Darüber hinaus weist der Anstieg der Linienbreiten in diesem Bereich auf ein Aufheizen des Gases respektive auf das Auftreten von Turbulenzen oder Abstreifprozessen hin, was die Wechselwirkungshypothese weiter erhärtet. Mit CHVC 26 haben wir somit ein eindrucksvolles Beispiel für eine kompakte Hochgeschwindigkeitswolke vor uns, die offenbar in ein Umgebungsmedium eingebettet ist und mit diesem in Wechselwirkung steht.

9.9 CHVC 29

CHVC 29 liegt in südlicher galaktischer Breite und südlich des Antizentrum-HVC-Komplexes AC. Wie bereits CHVC 26 weicht sie deutlich von einer sphärisch-symmetrischen Gestalt ab und erweckt ebenfalls den Eindruck einer bugwellenförmigen Struktur. Die kürzere Achse, die der Symmetrieachse der zweidimensionalen Projektion an den Himmel entspricht, bemisst etwa $30'$ in Bezug auf das Säulendichteniveau von $5 \cdot 10^{18} \text{ cm}^{-2}$. Die längere Achse weist eine Winkelausdehnung von etwa 1° auf.

Die bereits angesprochene bugwellenförmige Gestalt von CHVC 29, die in der Säulendichtekarte links in Abbildung 40 zu sehen ist, legt wie bei CHVC 26 nahe, daß das Objekt sich durch ein umgebendes Medium hindurchbewegt, wobei wir hier naiv erwarten würden, daß die Bewe-

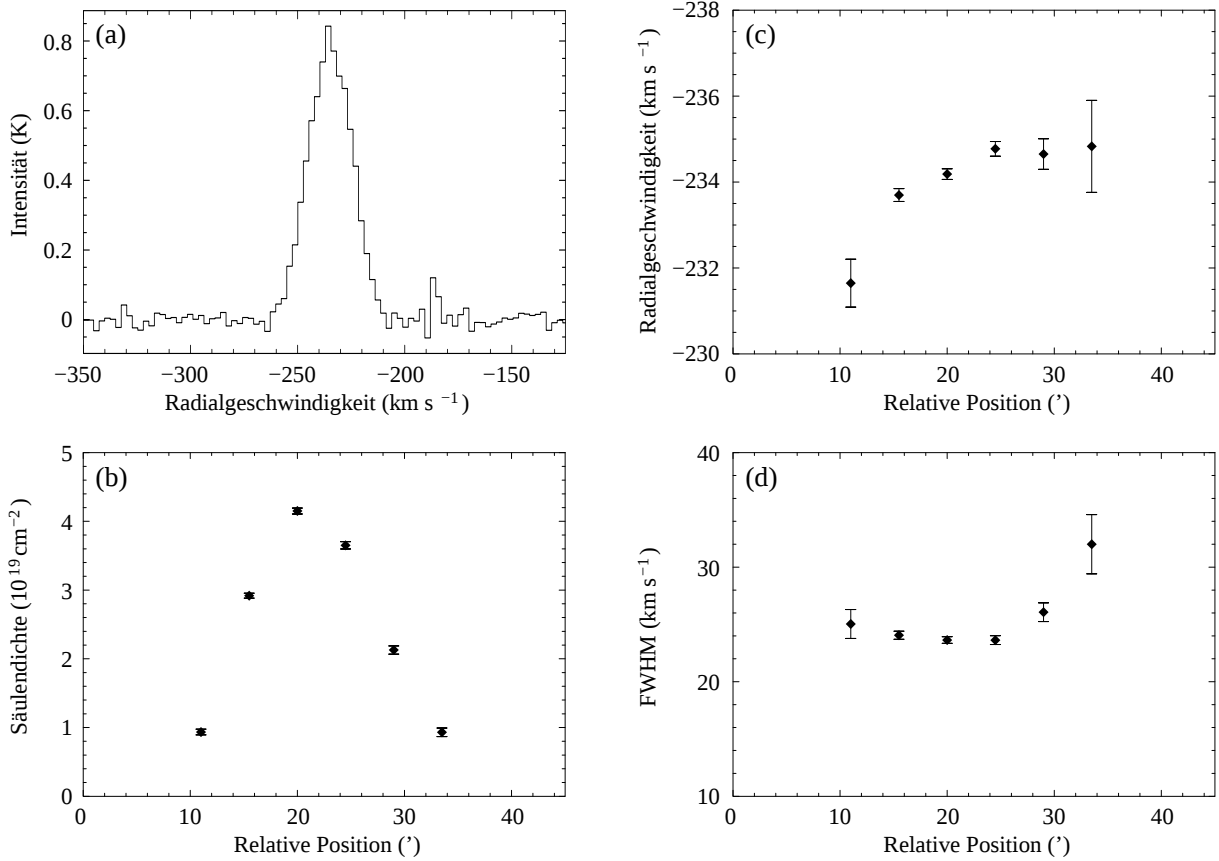


Abbildung 41: Messung des Profils durch CHVC 29. (a) Typisches Spektrum, das eine im wesentlichen gaußförmige Struktur zeigt. (b) Säulendichte aufgetragen gegen die Position entlang des Schnitts. (c) Radialgeschwindigkeit im lokalen Bezugssystem (LSR). (d) Linienbreite (FWHM).

gung relativ zu diesem Medium ziemlich genau in südliche Richtung erfolgt. Darüber hinaus fällt auf, daß die Gestalt der „Flügel“ nicht symmetrisch ist, sondern daß das HI-Gas in nordwestliche Richtung sehr viel weiter ausgedehnt ist als in nordöstliche. Allerdings ist das Verhalten der Linienbreiten und Radialgeschwindigkeiten – dargestellt in der mittleren und rechten Karte in Abbildung 40 – nicht so einheitlich und systematisch wie im Fall von CHVC 26. Die beobachteten Linienbreiten liegen um $\Delta v = 30 \text{ km s}^{-1}$ FWHM, wobei die Linienbreiten in den „Flügeln“ systematisch größer sind als im zentralen Bereich des Objekts.

Die beobachteten Radialgeschwindigkeiten liegen über weite Bereiche der Wolke relativ einheitlich bei etwa $v_{\text{LSR}} = -235 \text{ km s}^{-1}$. Nur gegen den östlichen und südwestlichen Rand beobachten wir in Bezug auf den Betrag etwas geringere Radialgeschwindigkeiten, was mit der Vorstellung eines Abbremsens des Gases in diesem Bereich durch die Wirkung eines sich der Wolke entgegenstellenden Mediums verträglich ist. Einen deutlicheren Hinweis für die Wechselwirkungshypothese finden wir indes in den aus dem Schnitt über die Wolke gewonnenen Meßdaten.

Die Position des gewählten Schnitts durch CHVC 29 ist durch den schwarzen Pfeil in der linken Karte in Abbildung 40 markiert. Es wurde eine Achse gewählt, die zum einen parallel

zur mutmaßlichen Bewegungsrichtung der Wolke liegt und zum anderen durch das detektierte Maximum der Säulendichte hindurch verläuft. In Abbildung 41 sind die Ergebnisse der Auswertung der entlang dieses Schnitts aufgenommenen Spektren dargestellt. Abbildung 41 (a) zeigt zunächst ein typisches Spektrum von CHVC 29, das ein weitgehend gaußförmiges Profil aufweist. Auffällig ist allenfalls das spitze Zulaufen der Linie im Maximum, das einen Hinweis auf eine überlagerte kalte Gaskomponente geringerer Linienbreite geben könnte. Von einer deutlichen Trennung kalten und warmen Gases in den Linienprofilen, so wie wir dies bei anderen Objekten beobachten konnten, kann aber bei CHVC 29 nicht gesprochen werden.

Abbildung 41 (b) zeigt den über den Schnitt gemessenen Verlauf der Säulendichte des HI-Gases. Der Abfall ist in Richtung der mutmaßlichen Bewegung der Wolke gegenüber dem Umgebungsmedium ein wenig stärker, was durch den erwarteten Staudruck leicht zu erklären wäre. Einen noch viel deutlicheren Hinweis auf das Vorliegen einer Wechselwirkung gibt die Verteilung der über den Schnitt gemessenen Radialgeschwindigkeiten, die in Abbildung 41 (c) dargestellt ist. Wiederum finden wir, daß wie im Fall von CHVC 26 die Radialgeschwindigkeit des Gases dem Betrag nach gegen den „vorderen“ Rand von CHVC 29 hin systematisch abnimmt, was auf ein Abbremsen des Gases durch den Staudruck des umgebenden Mediums hinweist.

Nicht ganz so deutlich wie bei CHVC 26 ist das Verhalten der Linienbreiten über den Schnitt hinweg, die in Abbildung 41 (d) dargestellt sind. Die geringsten Linienbreiten finden wir in den zentralen Bereichen des Objekts, was zusätzlich zu den bereits angesprochenen zugespitzten Linienprofilen einen weiteren Hinweis auf eine kalte Gaskomponente im Zentrum von CHVC 29 liefert. Die Zunahme der Linienbreiten in Richtung des „vorderen“ Randes der Wolke ist angedeutet zu erkennen aber bei weitem nicht so ausgeprägt wie im Fall von CHVC 26. Statt dessen wachsen die Linienbreiten am nördlichen Rand von CHVC 29 sehr viel deutlicher an, so daß hier möglicherweise ein Teil des warmen Gases abgestreift wurde und hinter dem Objekt zurückblieb.

Zusammenfassend läßt sich CHVC 29 als ein Objekt beschreiben, das durch die Wechselwirkung mit einem Umgebungsmedium deutlich verformt zu werden scheint und in der Morphologie Ähnlichkeiten mit CHVC 26 aufweist. Die Vorstellung einer Wechselwirkung mit einem Medium wird auch durch den Verlauf der beobachteten Radialgeschwindigkeiten des HI-Gases bestätigt, die gegen den mutmaßlich in Bewegungsrichtung stehenden Rand der Wolke systematisch abnehmen, was durch ein Abbremsen des Gases durch den Staudruck des umgebenden Mediums erklärt werden kann. Eine in diesem Bereich solch deutliche Zunahme der Linienbreiten wie bei CHVC 26 ist allerdings bei CHVC 29 nicht zu beobachten.

9.10 CHVC 33

CHVC 33 liegt mit einer galaktischen Breite von $b = -88^\circ$ unmittelbar am galaktischen Südpol und nahe des Magellanschen Stroms, der in diesem Bereich jedoch vollkommen andere Radialgeschwindigkeiten aufweist, so daß ein Zusammenhang zwischen beiden Objekten unwahrscheinlich ist. CHVC 33 ist außergewöhnlich stark elongiert mit einer Breite von nur etwa $20'$ bis $30'$ in Bezug auf das Säulendichtenniveau von $5 \cdot 10^{18} \text{ cm}^{-2}$ und mit einer Längsausdehnung von etwas über 1° . Darüber hinaus ist das Objekt reich strukturiert und weist eine Reihe von „Knoten“ auf.

In der linken Karte in Abbildung 42 ist die integrierte Säulendichte von CHVC 33 aufgetragen. Es fallen die angesprochenen genannten Verdichtungen entlang des Objekts auf, von denen

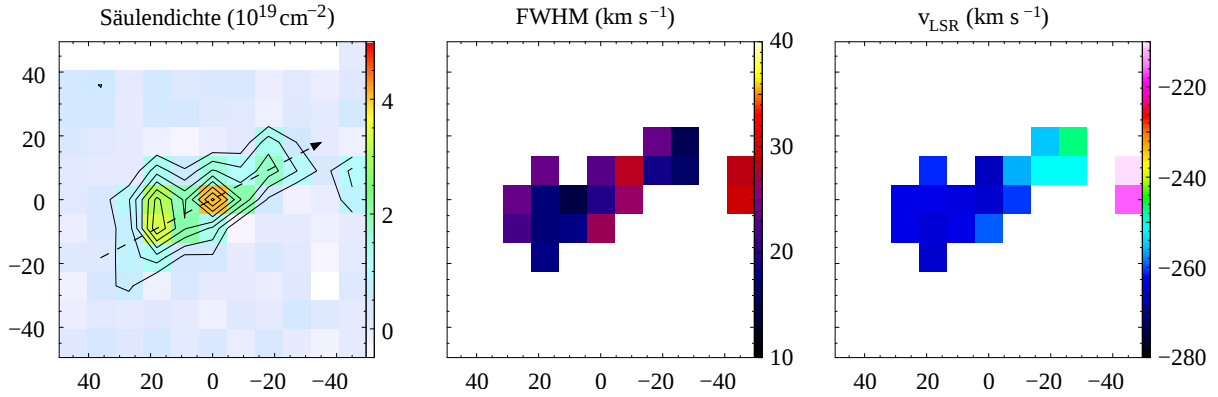


Abbildung 42: CHVC 33. Die linke Karte zeigt die integrierte Säulendichte im Intervall von -500 bis -100 km s^{-1} . Die überlagerten Konturlinien laufen von $5 \cdot 10^{18} \text{ cm}^{-2}$ in Schritten von $5 \cdot 10^{18} \text{ cm}^{-2}$. Die gestrichelte, schwarze Linie markiert den gewählten Schnitt. Die mittlere Karte gibt die gemessenen Linienbreiten (FWHM) wieder. Die rechte Karte zeigt die Verteilung der gemessenen Radialgeschwindigkeiten im lokalen Bezugssystem (LSR).

die zentrale mit etwa $4 \cdot 10^{19} \text{ cm}^{-2}$ die größte Säulendichte aufweist. Es wird sofort deutlich, daß CHVC 33 von der sphärisch-symmetrischen Idealgestalt, die wir für primordiale, gasreiche Dunkle-Materie-Halos der Lokalen Gruppe naiv erwarten würden, außerordentlich stark abweicht. Ein weiteres augenscheinliches Merkmal ist Emission am westlichen Kartenrand, die mit gut $1 \cdot 10^{19} \text{ cm}^{-2}$ deutlich signifikant ist.

Ein Blick auf die Verteilung der gemessenen Radialgeschwindigkeiten des HI-Gases, die in der rechten Karte in Abbildung 42 wiedergegeben ist, zeigt einen deutlichen Geschwindigkeitsgradienten entlang der Wolke. Während wir in den östlichen und zentralen Bereichen der Karte einheitliche Radialgeschwindigkeiten um $v_{\text{LSR}} = -265 \text{ km s}^{-1}$ beobachten, fällt die Geschwindigkeit am westlichen Ende von CHVC 33 dem Betrag nach auf etwa $v_{\text{LSR}} = -250 \text{ km s}^{-1}$ ab. Das am westlichen Kartenrand gefundene Gas weist mit etwa $v_{\text{LSR}} = -210 \text{ km s}^{-1}$ noch einmal deutlich geringere Radialgeschwindigkeiten auf.

In diesem Zusammenhang ist das Verhalten der Linienbreiten besonders interessant, die in der mittleren Karte in Abbildung 42 aufgetragen sind. Sowohl im östlichen als auch im westlichen Bereich von CHVC 33 finden wir mit etwa $\Delta v = 20 \text{ km s}^{-1}$ FWHM einheitliche Linienbreiten vor. Nur im Übergangsbereich, wo wir die plötzliche Änderung der beobachteten Radialgeschwindigkeiten des Gases beobachtet hatten, sind die Spektrallinien mit ungefähr $\Delta v = 25 \dots 30 \text{ km s}^{-1}$ FWHM signifikant breiter. Dies ist ein deutlicher Hinweis darauf, daß das westliche Ende von CHVC 33 von den zentralen und östlichen Teilen kinematisch und räumlich separiert sein könnte, so daß durch eine Superposition der Spektrallinien beider Teilobjekte die größeren Linienbreiten im Übergangsbereich hervorgerufen werden könnten. Die Auswertung der entlang des Schnitts aufgenommenen, tiefer integrierten Spektren, die ich weiter unten vorstelle, wird diese Ansicht untermauern. Das am westlichen Kartenrand detektierte Gas besitzt mit etwa $\Delta v = 30 \text{ km s}^{-1}$ FWHM größere Linienbreiten als CHVC 33, so daß dieses Objekt in Position, Radialgeschwindigkeit und Linienbreite von CHVC 33 deutlich verschieden ist.

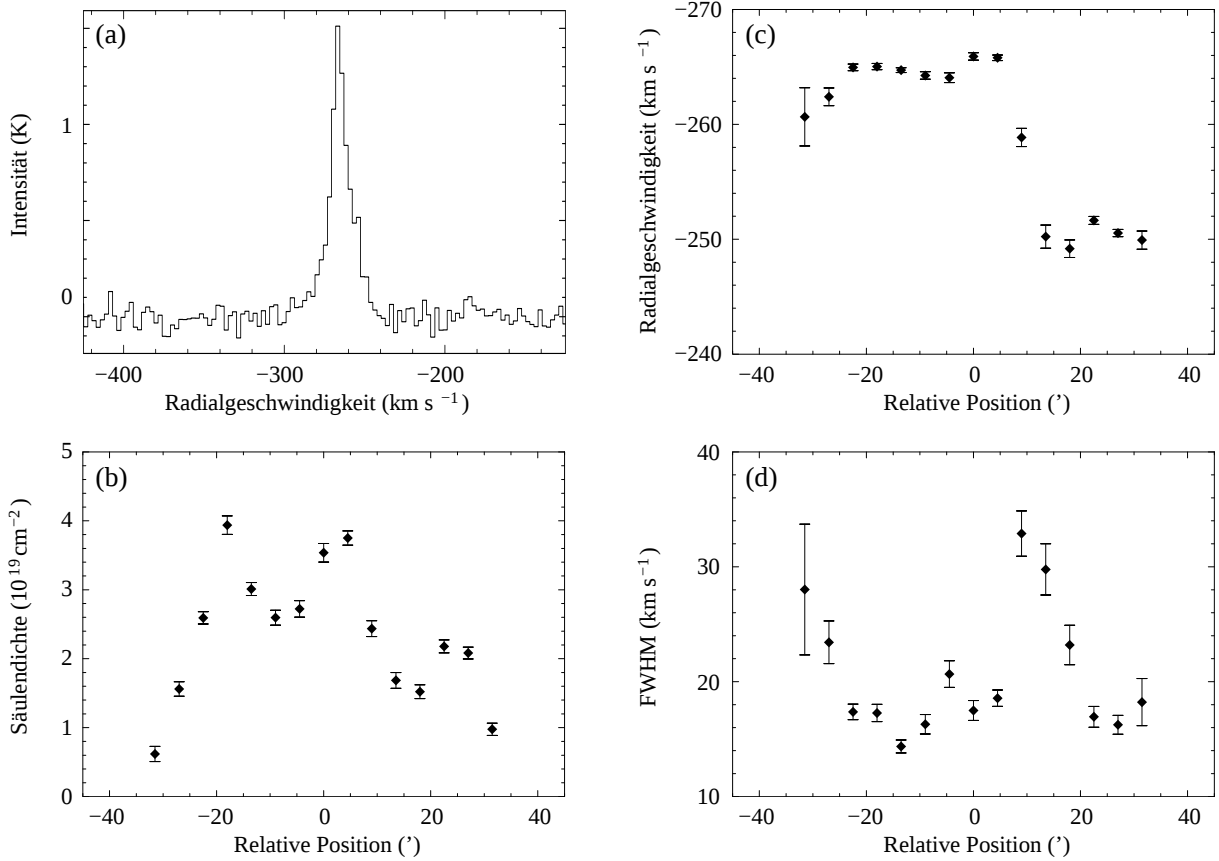


Abbildung 43: Messung des Profils durch CHVC 33. (a) Typisches Spektrum, das eine etwas komplexere Struktur offenbart. (b) Säulendichte aufgetragen gegen die Position entlang des Schnitts. (c) Radialgeschwindigkeit im lokalen Bezugssystem (LSR). (d) Linienbreite (FWHM).

In Abbildung 43 sind die Ergebnisse der entlang des durch CHVC 33 gelegten Schnitts aufgenommenen Spektren wiedergegeben. In Abbildung 43 (a) ist zunächst ein typisches Spektrum abgebildet. Über weite Teile der Wolke sind die Linienprofile nicht exakt gaußförmig, sondern zeigen deutliche Anzeichen des Auftretens einer schmalen Komponente kalten Gases, der eine breitere Komponente warmen Gases unterlegt ist. Ich führe weiter unten eine gaußsche Zerlegung der Spektren durch, um die Eigenschaften beider Gaskomponenten getrennt zu untersuchen.

In Abbildung 43 (b) ist das gemessene Säulendichteprofil entlang des Schnitts aufgetragen. Wir erkennen sogleich die schon aus der Karte bekannten drei Maxima, wobei sich die Säulendichten der beiden linken „Knoten“ auf Grund der feineren räumlichen Rasterung als etwa gleichgroß herausstellen, wohingegen in der Karte in Abbildung 42 das zentrale Maximum noch am größten erschien.

Sehen wir uns nun die Verteilung der über den Schnitt gemessenen Radialgeschwindigkeiten an, die in Abbildung 43 (c) dargestellt ist. Wir erkennen hier sehr deutlich, daß der westliche Teil von CHVC 33 deutlich andere Radialgeschwindigkeiten aufweist als der östliche und zentrale Bereich. Bemerkenswert ist, daß sich die beobachteten Geschwindigkeiten im Übergangsbereich

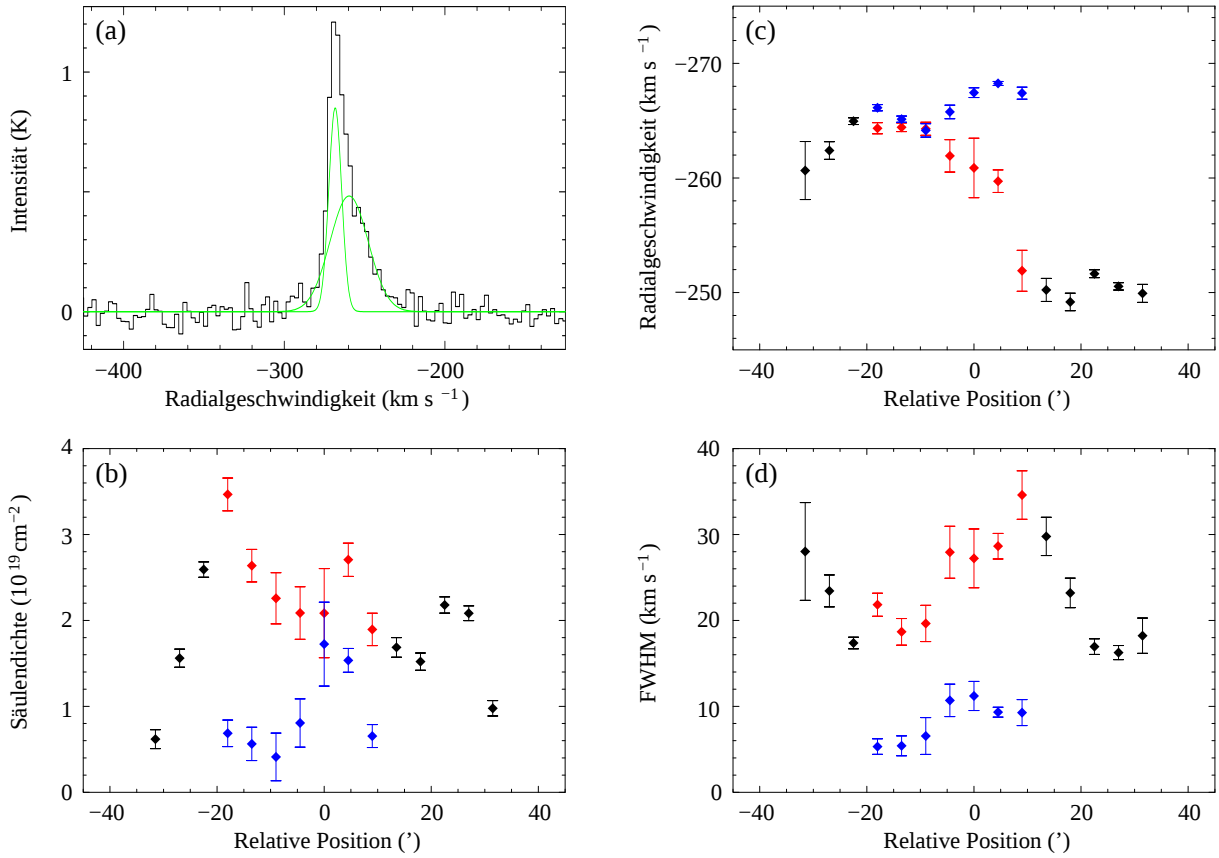


Abbildung 44: Gaußsche Zerlegung der Spektren entlang des Schnitts durch CHVC 33. (a) Typisches Spektrum, das eine deutliche Zwei-Komponenten-Struktur zeigt. (b) Säulendichte der kalten (blau) und warmen (rot) Komponente aufgetragen gegen die Position entlang des Schnitts. (c) Radialgeschwindigkeiten beider Komponenten im lokalen Bezugssystem (LSR). (d) Linienbreiten (FWHM) beider Komponenten. An den in schwarzer Farbe eingetragenen Positionen konnte keine eindeutige Trennung in zwei Komponenten festgestellt werden.

schlagartig ändern, während sie beiderseits davon beinahe konstant sind. Diese Beobachtung unterstützt die bereits geäußerte Vermutung, der westliche Teil von CHVC 33 könne räumlich und kinematisch von dem übrigen Teil der Wolke getrennt sein.

Auch die in Abbildung 43 (d) gezeigten Linienbreiten über den Schnitt hinweg weisen das bereits angesprochene Verhalten auf, über große Teile der Wolke mit knapp $\Delta v = 20 \text{ km s}^{-1}$ ungefähr konstant zu sein, jedoch im Übergangsbereich zwischen den Bereichen unterschiedlicher Radialgeschwindigkeiten stark anzusteigen. Wiederum stützt dies die Vermutung einer Trennung zwischen dem westlichen Teil von CHVC 33 und der übrigen Wolke, wobei die Verbreiterung der Linien im Übergangsbereich durch die Überlagerung verschiedener Gasanteile leicht zu verstehen ist.

Einige der Spektren von CHVC 33 weisen eine deutliche Zwei-Komponenten-Struktur auf, die nahelegt, die Koexistenz eines kalten und eines warmen neutralen Gases anzunehmen. Um die Eigenschaften beider Gasphasen getrennt zu untersuchen, habe ich eine gaußsche Zerlegung

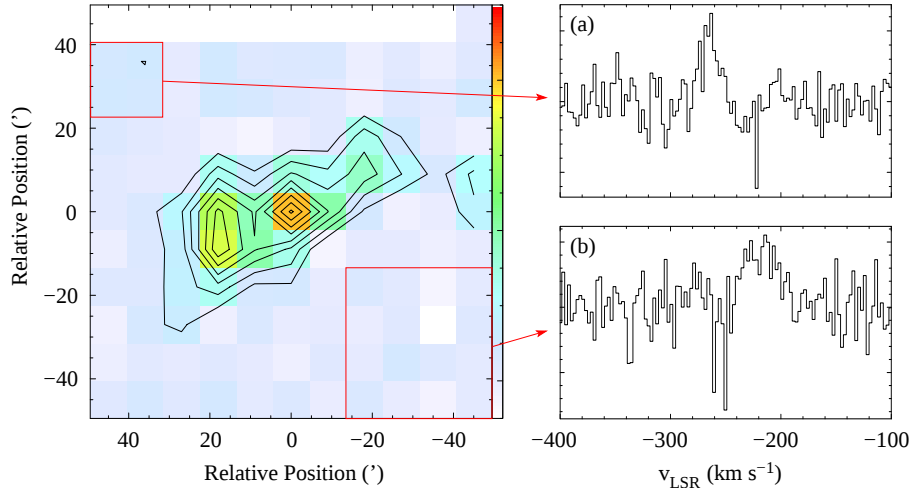


Abbildung 45: Die beiden gezeigten Spektren wurden durch Mittelung aller durch die roten Quadrate umfaßten Einzelpositionen erzeugt. In beiden Bereichen ist eine schwache Emission zu erkennen, die in den Einzelspektren wegen des zu geringen Signal-zu-Rausch-Verhältnisses nicht zutage tritt.

der Spektrallinien in eine schmale und eine breite Komponente durchgeführt und die Ergebnisse in Abbildung 44 wiedergegeben. In Abbildung 44 (a) ist zunächst ein typisches Spektrum abgebildet, das eine deutliche Trennung in eine schmale und eine breite Linienkomponente zeigt, wobei beide Komponenten deutlich unterschiedliche Radialgeschwindigkeiten aufweisen. Die Verteilung der Säulendichte in Abbildung 44 (b) zeigt, daß die warme Gasphase in allen Bereichen von CHVC 33 gegenüber der kalten Gaskomponente dominiert. Die Trennung zwischen beiden Komponenten ist in den Linienbreiten gut zu erkennen, die in Abbildung 44 (d) wiedergegeben sind. Während die kalte Komponente durchgehend Linienbreiten von $\Delta v \lesssim 10 \text{ km s}^{-1}$ FWHM zeigt, weist die warme Komponente mit $\Delta v \approx 20 \dots 30 \text{ km s}^{-1}$ FWHM deutlich breitere Linien auf.

In Abbildung 44 (c) schließlich ist der Verlauf der Radialgeschwindigkeiten beider Gaskomponenten als Funktion der relativen Position entlang des Schnitts aufgetragen. Im zentralen Bereich der Wolke zeigen die Radialgeschwindigkeiten ein bemerkenswertes Verhalten. Während das kalte Gas die für diesen Bereich festgestellten Radialgeschwindigkeiten um $v_{\text{LSR}} = -265 \text{ km s}^{-1}$ beibehält, fällt die Geschwindigkeit des warmen Gases nach Westen hin kontinuierlich ab und erreicht schließlich den für den westlichen Bereich üblichen Wert von etwa $v_{\text{LSR}} = -250 \text{ km s}^{-1}$. Man würde zunächst an eine Trennung der kalten und warmen Gaskomponente denken, wie sie durch Wechselwirkungsprozesse hervorgerufen werden könnte. Jedoch zeigt die gleichzeitige Zunahme der Linienbreiten in diesem Bereich, daß hier offenbar bereits Gasanteile des westlichen Teils der Wolke auf der Sichtlinie vorhanden sind, deren nach Westen hin wachsenden Intensitäten zu einer allmählichen Verschiebung des Linienschwerpunkts und damit der beobachteten Geschwindigkeit des warmen Gases führen dürften. Es gibt also keinen Anlaß, eine Wechselwirkung zwischen dem westlichen Teil von CHVC 33 und der übrigen Wolke anzunehmen.

Noch immer rätselhaft ist die Emission am westlichen Kartenrand, die sich auf Grund ihrer deutlich geringeren Radialgeschwindigkeit von CHVC 33 unterscheidet. Bemerkenswert ist, daß es im Bereich der Karte schwache Emission gibt, die abseits von CHVC 33 liegt und in den

Einzelpektren wegen des zu geringen Signal-zu-Rausch-Verhältnisses gar nicht zu erkennen ist. Wenn wir jedoch mehrere Spektren an verschiedenen Positionen mitteln, läßt sich diese Emission herausarbeiten. In Abbildung 45 habe ich für die nordöstliche und südwestliche Ecke der Karte einmal verschiedene Positionen gemittelt und die resultierenden Spektren dargestellt. Man findet in der nordöstlichen Ecke durch Mitteln von 4 Positionen ein Signal von etwa $2.5 \sigma_{\text{rms}}$ bei einer Radialgeschwindigkeit von $v_{\text{LSR}} \approx -265 \text{ km s}^{-1}$, was exakt der Geschwindigkeit des Gases in den östlichen und zentralen Bereichen von CHVC 33 entspricht! Die über diese 4 Positionen gemittelte Säulendichte beträgt etwa $N_{\text{HI}} = (4.0 \pm 0.5) \cdot 10^{18} \text{ cm}^{-2}$, was einer integrierten Säulendichte von etwa $1.5 \cdot 10^{19} \text{ cm}^{-2}$ entspricht. Es ist sehr unwahrscheinlich, daß es sich hierbei um eine zufällige Koinzidenz handelt, so daß das dort vorhandene HI-Gas offenbar in einem Zusammenhang mit CHVC 33 steht. Eine ähnliche Beobachtung können wir in der südwestlichen Ecke der Karte machen, wo ich durch Mitteln von 16 Positionen ein $2 \sigma_{\text{rms}}$ -Signal bei $v_{\text{LSR}} \approx -217 \text{ km s}^{-1}$ auffinden konnte. Diese Radialgeschwindigkeit korrespondiert sehr gut mit jener, die ich für das Gas am westlichen Kartenrand extrahieren konnte, so daß auch hier ein Zusammenhang bestehen muß. Die mittlere Säulendichte liegt in diesem Bereich bei etwa $N_{\text{HI}} = (2.0 \pm 0.4) \cdot 10^{18} \text{ cm}^{-2}$, woraus eine integrierte Säulendichte von immerhin etwa $3 \cdot 10^{19} \text{ cm}^{-2}$ resultiert.

Offensichtlich handelt es sich bei CHVC 33 nicht um ein kompaktes, isoliertes Objekt, sondern um eine Ansammlung einzelner Gasmassen, die aber auf Grund ihrer ähnlichen Radialgeschwindigkeiten und Positionen am Himmel einen gemeinsamen Ursprung haben müssen. Darüber hinaus scheinen die einzelnen Komponenten von CHVC 33 mit ausgedehntem, diffusem Gas assoziiert zu sein, das ähnliche Radialgeschwindigkeiten aufweist wie die individuellen Wolken. Diese Ergebnisse legen einen Aufenthalt von CHVC 33 in der Nähe der Milchstraße nahe, da sich die beobachteten Eigenschaften des Objekts ohne einen zusätzlichen äußeren Einfluß kaum bewirken lassen.

9.11 CHVC 47

CHVC 47 ist eines der ungewöhnlichsten Objekte unter den tiefer kartierten CHVCs. Sie liegt sehr nahe des galaktischen Zentrums (etwa 12° nördlich davon) und besitzt mit einem Längsdurchmesser von etwa 2° die größte Ausdehnung aller von mir beobachteten kompakten Hochgeschwindigkeitswolken. Die maximale Säulendichte beträgt $6.4 \cdot 10^{19} \text{ cm}^{-2}$.

Morphologisch ist CHVC 47 außerordentlich bemerkenswert. Auffälligstes Merkmal ist ein sehr starker Gradient in Radialgeschwindigkeit, der in etwa in einem Winkel von 45° von Südwest nach Nordost verläuft und in der rechten Karte in Abbildung 46 gut zu erkennen ist. Während im südwestlichen Teil der Karte Geschwindigkeiten von $v_{\text{LSR}} = -190 \text{ km s}^{-1}$ beobachtet werden, fallen diese dem Betrag nach im nordöstlichen Teil auf Werte um $v_{\text{LSR}} = -135 \text{ km s}^{-1}$ ab. Dieser starke Gradient geht einher mit dem Auftreten mehrerer Linienkomponenten in den Spektren. Insbesondere im zentralen Bereich der Wolke treten komplexe Linienprofile auf, die sich durch einen Anstieg der Linienbreiten in diesem Teil der Karte bemerkbar machen, da an jedes Spektrum nur eine einzige Gaußkurve angepaßt wurde.

Es liegt nahe, die beobachtete Geschwindigkeitsverteilung als Rotation zu interpretieren. Durch die Ergebnisse der entlang des Schnitts aufgenommenen, tiefer integrierten Spektren wird diese Annahme untermauert. Der Schnitt wurde entlang des schwarzen Pfeils in der linken Karte in Abbildung 46 gelegt, und die Ergebnisse sind in Abbildung 47 wiedergegeben. In

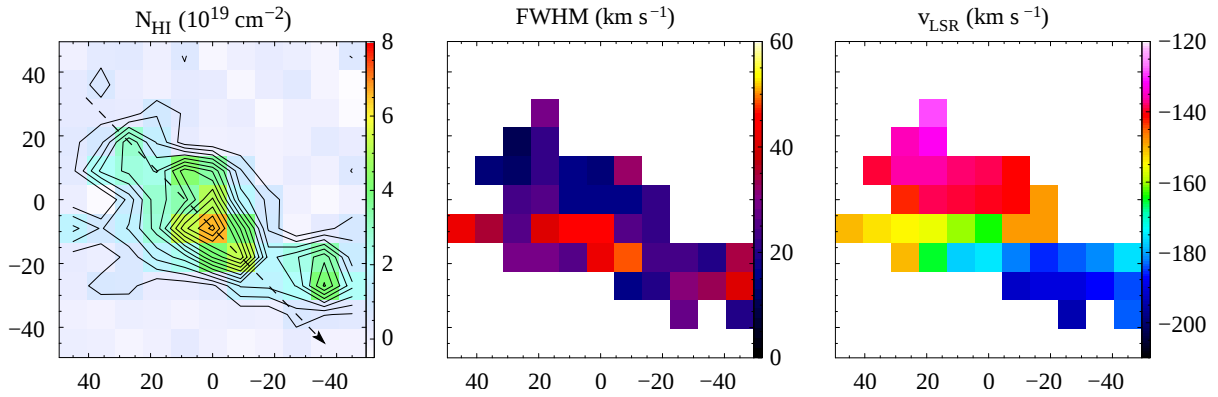


Abbildung 46: CHVC 47. Die linke Karte zeigt die integrierte Säulendichte im Intervall von -450 bis -75 km s^{-1} . Die überlagerten Konturlinien laufen von $5 \cdot 10^{18} \text{ cm}^{-2}$ in Schritten von $5 \cdot 10^{18} \text{ cm}^{-2}$. Die gestrichelte, schwarze Linie markiert den gewählten Schnitt. Die mittlere Karte gibt die gemessenen Linienvbreiten (FWHM) wieder. Die rechte Karte zeigt die Verteilung der gemessenen Radialgeschwindigkeiten im lokalen Bezugssystem (LSR).

Abbildung 47 (a) ist zunächst ein typisches Spektrum abgebildet, das an einer der zentralen Positionen aufgenommen wurde und eine sehr komplexe Struktur offenbart, die das Vorhandensein verschiedener Gaskomponenten mit unterschiedlichen Radialgeschwindigkeiten anzeigt.

Die Säulendichteverteilung, die in Abbildung 47 (b) wiedergegeben ist, zeigt eine leichte Asymmetrie dergestalt, daß die Säulendichte gegen das südwestliche Ende von CHVC 47 hin sehr stark abfällt und dann auf einem niedrigen Niveau verharret. Zum nordöstlichen Rand hin ist der Abfall hingegen deutlich langsamer. Dieses Verhalten zeichnet die offensichtliche Asymmetrie des gesamten Objekts nach, die bereits in der Säulendichtekarte in Abbildung 46 ersichtlich ist und auf eine Störung von CHVC 47 hinweist.

Kommen wir aber nun zur Verteilung der Radialgeschwindigkeiten des HI-Gases entlang der großen Achse von CHVC 47, die in Abbildung 47 (c) dargestellt ist. In der Tat zeigt die Radialgeschwindigkeit einen Verlauf, wie er für die flache Rotationskurve einer Spiralgalaxie typisch ist. Bildet man den arithmetischen Mittelwert der Geschwindigkeiten der jeweils äußeren 6 (Nordost) bzw. 10 (Südwest) Meßpunkte der Kurve, bei denen die Geschwindigkeiten mehr oder weniger konstant werden, so erhält man für den nordöstlichen Teil der Wolke eine LSR-Radialgeschwindigkeit von $v_1 = -134.3 \pm 0.5 \text{ km s}^{-1}$ und für den südwestlichen Teil $v_2 = -187.6 \pm 5.4 \text{ km s}^{-1}$. Als Fehler habe ich dabei die Standardabweichung der Meßwerte vom Mittelwert angenommen. Daraus ergibt sich die Rotationsgeschwindigkeit von CHVC 47 zu

$$v_{\text{rot}} \sin i = \frac{v_1 - v_2}{2} = 26.7 \pm 2.7 \text{ km s}^{-1}, \quad (44)$$

wobei i der unbekannte Inklinationwinkel ist, das heißt der Neigungswinkel zwischen der Rotationsebene des Objekts und der Projektionsebene am Himmel. Diese Geschwindigkeit ist typisch für die Rotationsgeschwindigkeiten kleiner Galaxien. Möglicherweise könnte es sich bei CHVC 47 um eine noch unbekannte Galaxie handeln, was im Hinblick auf die Lage des Objekts nahe des galaktischen Zentrums auf Grund der dort vorhandenen Extinktion durch galaktische Staubwolken durchaus denkbar ist. Auf Grund der großen Ausdehnung von etwa 2° in der Emission des

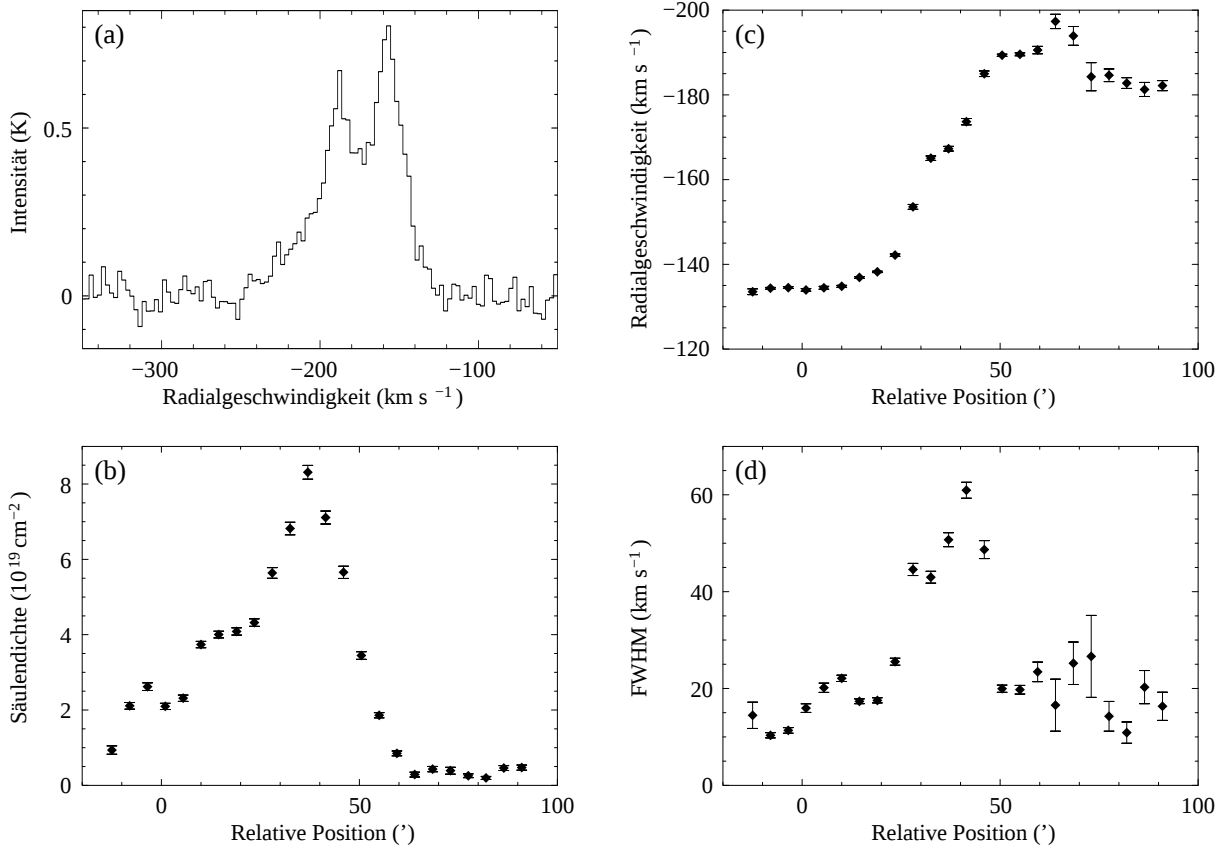


Abbildung 47: Messung des Profils durch CHVC 47. (a) Typisches Spektrum, das eine sehr komplexe Struktur offenbart. (b) Säulendichte aufgetragen gegen die Position entlang des Schnitts. (c) Radialgeschwindigkeit im lokalen Bezugssystem (LSR). (d) Linienbreite (FWHM).

neutralen, atomaren Wasserstoffs erwarten wir, daß es sich um ein vergleichsweise nahes Objekt der Lokalen Gruppe handelt.

Um diese Vermutung näher zu untersuchen, habe ich in Abbildung 48 (a) eine IRAS-Karte bei 100 μm Wellenlänge dargestellt, die ein $4.5^\circ \times 4.5^\circ$ großes Feld um die Zentralposition von CHVC 47 herum abdeckt und im wesentlichen die thermische Strahlung des Staubs wiedergibt. Man erkennt ein ausgedehntes, galaktisches Staubfilament, das genau durch die Position von CHVC 47 hindurch verläuft. Abbildung 48 (b) zeigt einen Ausschnitt von $1.5^\circ \times 1.5^\circ$, der den von mir in HI beobachteten Bereich umfaßt. Die überlagerten Konturlinien geben die aus den Effelsberg-Beobachtungen extrahierte HI-Säulendichte wieder und bestätigen, daß das sich in den IRAS-Daten abzeichnende Staubfilament exakt mit der Position von CHVC 47 koinzidiert. Es ist zu erwarten, daß der Staub die Strahlung der dahinter liegenden Objekte so stark absorbiert, so daß möglicherweise in CHVC 47 vorhandene Sterne im visuellen Spektralbereich bislang nicht nachgewiesen werden konnten. Diese Annahme wird durch einen Blick auf den entsprechenden Kartenausschnitt aus dem *Digitized Sky Survey* bestätigt, der in Abbildung 48 (c) dargestellt ist. Wir sehen hier sehr deutlich, daß im Bereich der starken IRAS-Emission die Dichte an Sternen bedeutend geringer ist als in emissionsfreien Gebieten.

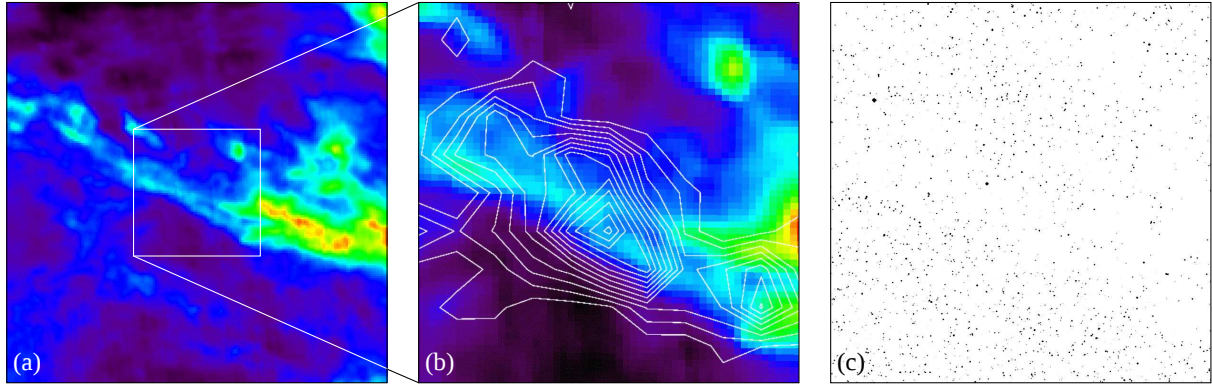


Abbildung 48: (a) Farbkodierte IRAS-Karte der Umgebung von CHVC 47 bei 100 μm Wellenlänge ($4.5^\circ \times 4.5^\circ$). (b) Ausschnitt, der den in HI kartierten Bereich umfaßt ($1.5^\circ \times 1.5^\circ$). (c) Derselbe Ausschnitt in einer kontrastverstärkten Aufnahme aus dem Digitized Sky Survey (DSS). Die überlagerten Konturlinien geben die HI-Säulendichte wieder und laufen von $5 \cdot 10^{18} \text{ cm}^{-2}$ in Schritten von $5 \cdot 10^{18} \text{ cm}^{-2}$. (Quelle der Bilder: Skyview)

Man kann nun einwenden, die erstaunliche Koinzidenz zwischen dem Staubfilament und der HI-Emission von CHVC 47 sei nicht zufällig, sondern beide seien miteinander assoziiert. Dies ist jedoch aus verschiedenen Gründen sehr unwahrscheinlich. Zum einen ist das Staubfilament in der IRAS-Karte sehr viel weiter ausgedehnt als die HI-Emission der CHVC, was dafür spricht, daß es sich um zwei verschiedene Phänomene handelt. Außerdem muß sich der Staub inmitten der Milchstraße in relativ großer Sonnennähe aufhalten, da er das Licht zahlreicher dahinter stehender Sterne sichtbar schwächt. Ein Aufenthalt von CHVC 47 innerhalb der Galaxis ist hingegen sehr zweifelhaft, da das Objekt gemäß seiner Definition als kompakte Hochgeschwindigkeitswolke eine Radialgeschwindigkeit aufweist, die nicht nur mit einer Teilnahme an der galaktischen Rotation unverträglich ist, sondern auch zu einer sehr gewaltsamen Wechselwirkung mit dem dichten intergalaktischen Medium führen müßte, die sich aber in den HI-Daten nicht abzeichnet. Zudem legen die Gestalt und die Parameter der Rotationskurve von CHVC 47 nahe, daß es sich um eine individuelle Galaxie außerhalb der Milchstraße handelt.

Die Interpretation des beobachteten Geschwindigkeitsgradienten von CHVC 47 als Rotation können wir wiederum nutzen, um zu einer Abschätzung der Entfernung des Objekts zu gelangen. Unter der Annahme eines Inklinationswinkels von $i = 45^\circ$ können wir die Rotationsgeschwindigkeit gemäß Gleichung 44 zu

$$v_{\text{rot}} = \frac{v_1 - v_2}{2 \sin i} \approx 40 \text{ km s}^{-1} \quad (45)$$

abschätzen. Nun können wir die dynamische Masse und die HI-Masse von CHVC 47 anhand der Gleichungen 41 und 42 als Funktion der Entfernung d berechnen. Als Winkeldurchmesser nehme ich $\varphi = 2^\circ$ an, und die integrierte Säulendichte ergibt sich zu $N_{\text{HI}}^{\text{tot}} \approx 1 \cdot 10^{21} \text{ cm}^{-2}$.

Die mit diesen Werten berechneten Massen habe ich in Abbildung 49 gegen die Entfernung d von CHVC 47 aufgetragen, wobei ich auf die HI-Masse noch den zu erwartenden Heliumanteil von 40% aufgeschlagen habe. Man erkennt sofort, daß sich die beiden Kurven innerhalb einer Entfernung von $d = 10 \text{ Mpc}$ nicht überschneiden. Selbst in einer solch großen Entfernung

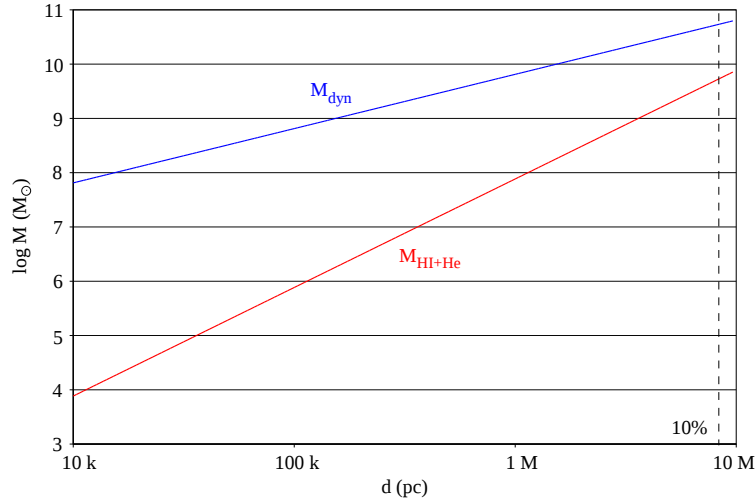


Abbildung 49: Dynamische Masse und HI/He-Masse von CHVC 47 als Funktion der Entfernung. Die gestrichelte Linie markiert die Entfernung, in der die HI/He-Masse gerade 10% der dynamischen Masse ausmacht. Eine nähere Erläuterung des Diagramms erfolgt im Text.

überstiege die dynamische Masse die HI/He-Masse noch um einen Faktor 10. Auf der anderen Seite ist eine Entfernung von mehr als ein paar Mpc unwahrscheinlich, da bei einer angenommenen Hubble-Expansion von $70 \text{ km s}^{-1} \text{ Mpc}^{-1}$ die Fluchtgeschwindigkeit in einer Entfernung von 10 Mpc bereits bei 700 km s^{-1} liegen würde, so daß CHVC 47 eine peculiare Geschwindigkeit in radialer Richtung von etwa 850 km s^{-1} aufweisen müßte, was im Vergleich zu den bei nahen Galaxien beobachteten Radialgeschwindigkeiten unglaublich hoch ist.

Wenn der beobachtete Geschwindigkeitsgradient tatsächlich durch eine Rotation verursacht wird, so ist die daraus zuvor abgeleitete Rotationsgeschwindigkeit eher typisch für Zwerggalaxien wie die Kleine Magellansche Wolke. Zusammen mit dem Winkeldurchmesser von etwa 2° am Himmel würden wir deshalb eher eine Entfernung in der Größenordnung von 100 kpc erwarten, was einem absoluten Durchmesser von etwa 3.5 kpc entspräche. In einer solchen Entfernung allerdings lägen die dynamische Masse und die HI-Masse um 3 Größenordnungen auseinander, so daß der neutrale Wasserstoff nur etwa 1‰ der dynamischen Masse ausmachen würde. Wir hätten dann eine Zwerggalaxie vor uns, die große Teile ihres Gases bereits verloren hätte. Auf der anderen Seite könnten natürlich auch die gemachten Annahmen bezüglich der Rotation von CHVC 47 falsch sein. Eine falsche Inklination würde allerdings keine allzu großen Auswirkungen haben, da wir hierdurch die dynamische Masse maximal um einen Faktor 2 verringern könnten. Es bleibt also nur die Möglichkeiten, daß die Annahme einer Rotation allgemein falsch ist. Dann allerdings hätten wir einen enormen und sehr symmetrischen Geschwindigkeitsgradienten auf andere Weise zu erklären, was wiederum problematisch wäre.

Zusammenfassend läßt sich also festhalten, daß CHVC 47 einen Geschwindigkeitsgradienten aufweist, der stark an die flache Rotationskurve einer Galaxie erinnert. Die Rotationsgeschwindigkeit von etwa 40 km s^{-1} bei einer angenommenen Inklination von 45° ist für Zwerggalaxien typisch, was unter Berücksichtigung der beobachteten Winkelausdehnung auf eine Entfernung in der Größenordnung von 100 kpc schließen läßt. Die dynamische Masse betrüge dann etwa

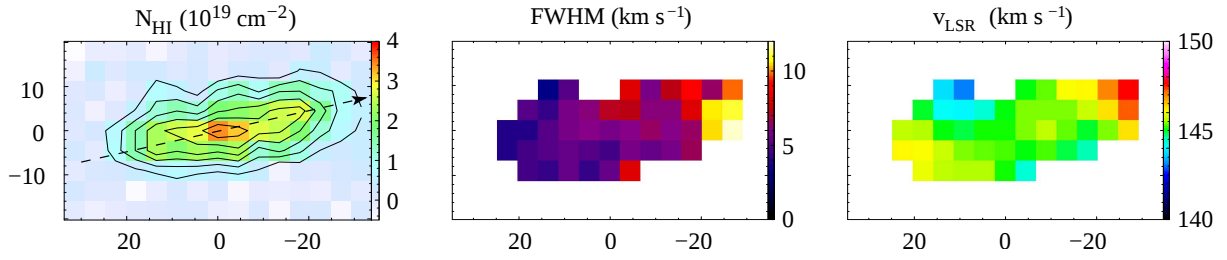


Abbildung 50: CHVC 218+29+145. Die linke Karte zeigt die integrierte Säulendichte im Intervall von +100 bis +400 km s^{-1} . Die überlagerten Konturlinien laufen von $5 \cdot 10^{18} \text{ cm}^{-2}$ in Schritten von $5 \cdot 10^{18} \text{ cm}^{-2}$. Die gestrichelte, schwarze Linie markiert den gewählten Schnitt. Die mittlere Karte gibt die gemessenen Linienbreiten (FWHM) wieder. Die rechte Karte zeigt die Verteilung der gemessenen Radialgeschwindigkeiten im lokalen Bezugssystem (LSR).

$10^9 M_{\odot}$ mit einem HI-Anteil von nur 1%, so daß CHVC 47 einen großen Teil ihres Gases bereits verloren haben könnte. Leider wird eine Detektion von möglicherweise vorhandenen Sternen im visuellen Spektralbereich durch die Absorption galaktischen Staubs stark erschwert, was mit der Lage des Objekts nahe der Richtung des galaktischen Zentrums zusammenhängt. Unter diesen Umständen wären detailliertere Nachbeobachtungen dieses interessanten Objekts auch in anderen Wellenlängen lohnend und vielversprechend.

9.12 CHVC 218+29+145

CHVC 218+29+145 war ursprünglich nicht in der Liste der 12 tiefer zu beobachtenden CHVCs enthalten, zumal das Objekt in dem CHVC-Katalog von Braun & Burton 1999 [2] noch gar nicht aufgeführt war. Es ergab sich indes, daß während der Beobachtungsperioden in Effelsberg einige Stunden an Zeit anfielen, in denen keines der geplanten Objekte hoch genug am Himmel stand, um beobachtet zu werden. Aus diesem Grund hatte ich den neuen Katalog von de Heij, Braun & Burton 2002 [10] nach CHVCs durchsucht, deren Beobachtung interessant erschien und die sich als „Füllobjekte“ in der freigebliebenen Zeit anboten. Auf Grund der geringen Größe und der mit 7 km s^{-1} FWHM angegebenen, sehr geringen Linienbreite entschied ich mich, in der für das eigentliche Programm nicht nutzbaren Zeit CHVC 218+29+145 zu kartieren.

In ihrem Erscheinungsbild vereint CHVC 218+29+145 eine Reihe von Extremen. Sie ist nicht nur das kompakteste, sondern auch das am stärksten elongierte Objekt unter den 12 kartierten Wolken (siehe Abbildung 50). In der Säulendichte-Kontur von 10^{19} cm^{-2} findet man eine Breite von nur etwa $15'$, hingegen eine Längsausdehnung von rund $50'$. Mit einer maximalen Intensität von nicht ganz 3 K gehört CHVC 218+29+145 zu den „hellsten“ CHVCs, wenngleich die maximale Säulendichte im Zentrum ob der geringen Linienbreiten nur $3.2 \cdot 10^{19} \text{ cm}^{-2}$ beträgt.

Bemerkenswert ist die Verteilung der gemessenen Geschwindigkeiten und Linienbreiten über die Wolke. Als einzige der 12 kartierten Objekte zeigt CHVC 218+29+145 keinen ausgeprägten Geschwindigkeitsgradienten. Statt dessen hält sich die gemessene Radialgeschwindigkeit im *local standard of rest* über beinahe die gesamte Wolke hinweg zwischen etwa 144 und 146 km s^{-1} auf. Nur gegen den westlichen Rand hin bemerkt man einen leichten Anstieg auf etwa 148 km s^{-1} . Die Linienbreiten indes gehören zu den geringsten bisher bei CHVCs beobachteten und erreichen

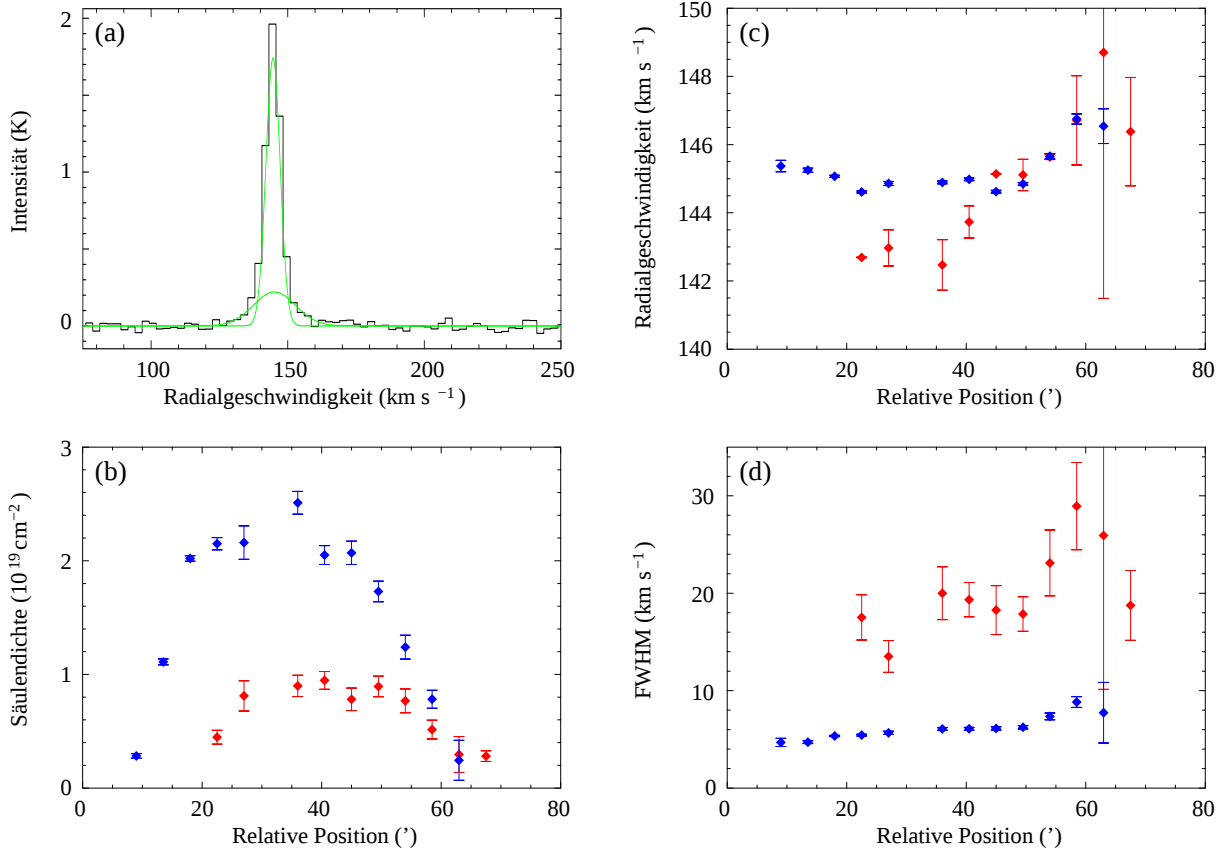


Abbildung 51: Gaußsche Zerlegung der Spektren entlang des Schnitts durch CHVC 218+29+145. (a) Typisches Spektrum, das eine deutliche Zwei-Komponenten-Struktur zeigt. (b) Säulendichte der kalten (blau) und warmen (rot) Komponente aufgetragen gegen die Position entlang des Schnitts. (c) Radialgeschwindigkeiten beider Komponenten im lokalen Bezugssystem (LSR). (d) Linienbreiten (FWHM) beider Komponenten.

am östlichen Rand der Wolke Werte von rund 4 km s⁻¹ FWHM. Darüber hinaus beobachtet man einen deutlichen Gradienten entlang der langen Achse von CHVC 218+29+145 dergestalt, daß die gemessenen Linienbreiten gegen den westlichen Rand der Wolke hin systematisch auf Werte von über 10 km s⁻¹ FWHM anwachsen. Dies geht einher mit der Beobachtung, daß hier die Säulendichten im wesentlichen sehr allmählich abfallen und schwache Emission bis an den Rand der Karte evident ist. Am östlichen Rand der Wolke hingegen fallen die Säulendichten schlagartig binnen wenigen Bogenminuten auf nicht mehr nachweisbare Werte ab.

Auch bei CHVC 218+29+145 läßt sich in den meisten Spektren eine Zwei-Komponenten-Struktur ausmachen, die auf das Vorhandensein einer kalten und einer warmen neutralen Gas-komponente hindeutet. Allerdings ist diese Struktur nicht so stark ausgeprägt wie beispielsweise bei CHVC 1, so daß hier die schmale Linienkomponente als Indikator für das kalte Medium dominiert (vergleiche Abbildung 51 (a)). Dennoch bietet es sich an, für die entlang des Schnitts aufgenommenen Spektren eine Zerlegung der Linien in zwei Gaußkomponenten vorzunehmen. Die Ergebnisse dieser Zerlegung sind in Abbildung 51 (b) bis (d) wiedergegeben. Bei den in den

Diagrammen aufgeführten Fehlern handelt es sich wiederum um die rein statistischen Fehler der Gaußkurvenanpassung.

In Abbildung 51 (b) ist der Verlauf der gemessenen Säulendichten beider Gaskomponenten als Funktion der relativen Position entlang des Schnitts aufgetragen. Man erkennt zunächst, daß sowohl die kalte als auch die warme Gasphase sehr ausgedehnt erscheinen, so daß man nicht von einem kompakten, kalten Kern in einer diffusen, warmen Hülle sprechen kann. Weiter fällt auf, daß die beiden Gaskomponenten räumlich nicht exakt koinzidieren. Die warme Gasphase ist erst in den zentralen Bereichen von CHVC 218+29+145 nachweisbar und stärker ausgeprägt, nicht aber am östlichen Rand der Wolke. Dort treffen wir nur die kalte neutrale Komponente an, die nicht mehr in eine umhüllende warme Gasphase eingebettet erscheint. Wiederum läßt diese Beobachtung vermuten, die warme Gasphase könne durch die Wechselwirkung mit einem umgebenden Medium abgestreift werden, womit das „Bloßliegen“ des kalten Gases erklärt werden könnte.

Diese Vermutung wird weiter gestützt durch die Analyse der Radialgeschwindigkeiten beider Gaskomponenten, die in Abbildung 51 (c) dargestellt sind. Grob ergibt sich das Bild, daß die Radialgeschwindigkeit der kalten Gasphase über den größten Teil von CHVC 218+29+145 beinahe konstant ist und nur gegen den westlichen Rand hin geringfügig ansteigt. Im Fall der warmen Gasphase hingegen beobachtet man einen deutlichen Gradienten in Radialgeschwindigkeit, der entlang des gewählten Schnitts von Ost nach West verläuft. In den zentralen Bereichen der Wolke hat das warme Medium eine deutlich geringere Radialgeschwindigkeit als die kalte Komponente, was im Rahmen der Interpretation als Wechselwirkungsvorgang mit einem Abstreifen des warmen Gases durch ein umgebendes Medium erklärt werden könnte, durch welches hindurch sich CHVC 218+29+145 bewegt. Gegen den westlichen Rand hin nähern sich die Radialgeschwindigkeiten beider Gasphasen hingegen immer mehr an, so daß hier im Schutz des voranlaufenden Teils der Wolke kaltes und warmes Gas kinematisch noch aneinander gekoppelt zu sein scheinen.

Die drei östlichsten Positionen, an denen beide Gasphasen nachgewiesen werden können, lassen sich heranziehen, um den Geschwindigkeitsunterschied zwischen kalter und warmer Komponente zu bestimmen, der in diesem Teil der Wolke einen ungefähr konstanten Wert annimmt. Berechnet man den arithmetischen Mittelwert der Geschwindigkeitsdifferenzen dieser drei Punkte, so erhält man, daß das kalte Medium im zentralen Bereich von CHVC 218+29+145 eine um $2.1 \pm 0.2 \text{ km s}^{-1}$ höhere Radialgeschwindigkeit aufweist als das warme Medium.

In Abbildung 51 (d) schließlich sind die Linienbreiten beider Gaskomponenten als Funktion der relativen Position entlang des Schnitts durch die Wolke aufgetragen. Kalte und warme Gasphase erscheinen hier deutlich voneinander getrennt. Auffallend ist der Linienbreitengradient, der im kalten Medium stark ausgeprägt ist. Während die Linienbreiten am östlichen Rand nur etwa 4.7 km s^{-1} FWHM bemessen, woraus eine Obergrenze der Gastemperatur von ungefähr 500 K resultiert, steigen sie zum westlichen Rand hin auf knapp 9 km s^{-1} FWHM an, was einer Gastemperatur von etwa 1800 K entspricht. In der Karte finden sich abseits des Schnitts sogar noch geringere Linienbreiten von knapp 4 km s^{-1} , was auf Temperaturen $\lesssim 350 \text{ K}$ hindeutet. Das warme Medium weist in den zentralen Bereichen von CHVC 218+29+145 eine Linienbreite um 18 km s^{-1} FWHM auf, woraus eine Obergrenze der Temperatur des warmen Gases von etwa 7000 K resultiert.

Zusammenfassend läßt sich für CHVC 218+29+145 folgendes Bild erstellen: Es handelt sich um ein recht kompaktes und stark elongiertes Objekt, das keinen ausgeprägten Geschwindigkeitsgradienten aufweist und mit rund 4 km s^{-1} FWHM die schmalsten Linien aller von mir kartierten CHVCs besitzt. Daraus läßt sich eine Obergrenze der Gastemperatur von nur 350 K am östlichen Rand der Wolke ableiten. Darüber hinaus lassen die Linienprofile eine Zwei-Komponenten-Struktur erkennen, die auf das Vorhandensein einer kalten und einer warmen neutralen Gaskomponente hindeutet. Eine Zerlegung der Spektren in zwei Gaußkomponenten ergibt, daß beide Gasphasen weder räumlich noch kinematisch koinzidieren. Die Verteilungen von Säulendichten und Radialgeschwindigkeiten deuten stattdessen auf Abstreifprozesse hin, die durch die Wechselwirkung mit einem umgebenden Medium hervorgerufen werden könnten und die beobachtete räumliche und kinematische Entkopplung von kaltem und warmem Gas erklären würden.

10 Zusammenfassung und Ausblick

In diesem abschließenden Kapitel möchte ich die Ergebnisse meiner Arbeit resümieren und herausstellen, welche Erkenntnisse wir anhand der durchgeführten Beobachtungen gewinnen konnten. Darüber hinaus möchte ich kurz darlegen, welche weiteren Schritte meines Erachtens über die im Rahmen meiner Arbeit durchgeführten und ausgewerteten Beobachtungen hinaus notwendig sind, um unsere Kenntnisse der kompakten Hochgeschwindigkeitswolken weiter auszubauen und zu vervollkommen.

10.1 Was gemacht wurde

Die Grundlage für meine Arbeit war eine Durchmusterung von 41 kompakten Hochgeschwindigkeitswolken in der 21-cm-Linienemission des neutralen, atomaren Wasserstoffs mit dem 100-m-Teleskop des Max-Planck-Instituts für Radioastronomie in Effelsberg. Diese Durchmusterung erlaubte erstmals die systematische Untersuchung einer größeren Auswahl von CHVCs mit einer vergleichsweise hohen Auflösung von $9'$. Es stellte sich heraus, daß CHVCs nicht die erwartete sphärisch-symmetrische Gestalt aufweisen, sondern mehr oder weniger komplex strukturiert sind (Kapitel 6). Darüber hinaus erwies sich der als Grundlage für die Beobachtungen benutzte CHVC-Katalog von Braun & Burton 1999 [2] als inhomogen in Bezug auf die Natur der Objekte. So konnte ich einige CHVCs als offensichtliche Fragmente des Magellanschen Stroms und des *Leading Arm* identifizieren (Kapitel 6). Außerdem zeigte die Untersuchung des Gesamthimmelskatalogs von de Heij, Braun & Burton 2002b [11], daß CHVCs nicht homogen über den Himmel verteilt sind, sondern an einigen Stellen auffällige Konzentrationen bilden, die mit einem einfachen Modell einer zirkum- oder intergalaktischen Verteilung nicht verträglich sind (Kapitel 6 & 4).

Die Untersuchung der physikalischen Eigenschaften der 39 in der Durchmusterung nachgewiesenen CHVCs (Kapitel 6) zeigte überdies, daß mit gewöhnlichen Dunkle-Materie-Anteilen eine Stabilisierung der Wolken durch die Eigengravitation insbesondere in Entfernungen von $d \lesssim 1$ Mpc nicht möglich ist. Eine Lösung dieses Problems bietet die Annahme eines umgebenden Mediums, das durch seinen Druck eine zusätzliche Stabilisierung der CHVCs bewirkt. Ich konnte zeigen, daß in Entfernungen von 100 kpc bis 1 Mpc Drücke von $P/k \approx 400 \dots 40 \text{ K cm}^{-3}$ für eine reine Druckstabilisierung der von mir untersuchten CHVC-Population ausreichen würden. Dies entspricht einer Elektronendichte von $n_e \approx 10^{-4} \dots 10^{-5} \text{ cm}^{-3}$, wenn man eine Temperatur dieses die CHVCs umgebenden Mediums von $T \approx 10^6 \text{ K}$ ansetzt.

Aus dem Vorhandensein eines Mediums folgt die Erwartung möglicher Wechselwirkungsprozesse mit dem Gas der CHVCs. Bisherige Beobachtungen (Brüns, Kerp & Pagels 2001 [8]) und Simulationen (Vieser 2001 [30], Quilis & Moore 2001 [23]) deuteten an, daß die Sensitivität der Daten der Effelsberg-Durchmusterung der 41 CHVCs nicht ausreichen würde, um Verformungen und Gasabstreifungen von CHVCs durch den Staudruck eines Umgebungsmediums nachzuweisen, die sich erst unterhalb einer Säulendichte von grob $N_{\text{HI}} = 10^{19} \text{ cm}^{-2}$ bemerkbar machen sollten. Aus diesem Grund wählte ich unter bestimmten Kriterien 11 kompakte Hochgeschwindigkeitswolken aus der Durchmusterung für eine tiefere HI-Kartierung aus, um gezielt nach Wechselwirkungsanzeichen zu suchen.

Die Ergebnisse dieser tieferen Beobachtungen (Kapitel 9) bestätigen das komplexe Aussehen der meisten CHVCs. Darüber hinaus konnte ich bei 6 der 11 Objekte eine kometenförmige Kopf-Schweif-Struktur oder eine bugwellenförmige Gestalt nachweisen, die zusammen mit der Verteilung der Linienbreiten und Radialgeschwindigkeiten klare Anzeichen einer Wechselwirkung der Wolken mit einem Umgebungsmedium liefern. Diese Beobachtungen wurden in einigen Fällen durch den Nachweis einer Zwei-Phasen-Struktur des Gases unterstützt. Es zeigte sich hier, daß eine Hülle warmen, neutralen Gases von einem Kern kalten, neutralen Mediums offensichtlich abgestreift wird, was nur durch den Staudruck eines umgebenden Mediums erklärt werden kann, durch das sich die Wolke hindurchbewegt.

10.2 Schlußfolgerungen

In der Einleitung zu dieser Arbeit in Kapitel 2 hatte ich meine Studien der kompakten Hochgeschwindigkeitswolken durch drei grundlegende Fragen zur Natur dieser Objekte motiviert. An dieser Stelle möchte ich nun diese drei Fragen wiederholen und konstatieren, was wir durch die tieferen und detaillierteren Beobachtungen der 11 ausgewählten CHVCs in dieser Hinsicht haben lernen können:

- *Ist die bei CHVC 125+41–207 entdeckte Kopf-Schweif-Struktur eine Ausnahme oder zeigen auch andere CHVCs Anzeichen einer Wechselwirkung mit einem Umgebungsgas?*

Wir hatten bei der Auswertung der Effelsberg-Durchmusterung der 41 CHVCs bereits die Notwendigkeit des Vorhandenseins eines die CHVCs umgebenden Mediums erkannt und die Möglichkeit von Wechselwirkungen mit diesem Medium erwogen. Die Daten der 11 tiefer kartierten CHVCs bestätigen nun, daß Wechselwirkungen zwischen kompakten Hochgeschwindigkeitswolken und einem Umgebungsmedium eher die Regel sind als die Ausnahme. Von den 11 untersuchten Objekten zeigen 6 deutliche Anzeichen in Gestalt von Kopf-Schweif-Strukturen oder bugwellenförmiger Gestalt, die sich am besten durch den Staudruck (*ram pressure*) eines Umgebungsmediums erklären lassen, durch welches hindurch sich die CHVCs bewegen. Diese Vorstellung wird zudem durch die beobachtete Verteilung der Radialgeschwindigkeiten und Linienbreiten der Wolken unterstützt.

In zwei Fällen, bei CHVC 1 und CHVC 218+29+145, war es zudem möglich, eine Trennung der Linienprofile in eine kalte und eine warme Gaskomponente durchzuführen. Es zeigte sich, daß beide Komponenten räumlich und kinematisch voneinander separiert erscheinen. Dieser Befund ist ein direkter Hinweis darauf, daß hier die warme, diffuse Gashülle von dem kalten, kompakten Kern des Objekts abgestreift wird, was sich nur durch den Staudruck eines Umgebungsmediums erklären läßt.

Von den übrigen 5 Objekten, die keine einfachen Wechselwirkungsanzeichen zeigen, ist CHVC 24 die einzige sphärisch-symmetrisch erscheinende Wolke. CHVC 7 und CHVC 11 besitzen in Bezug auf ihre Kinematik und die Verteilung der Linienbreiten eine irreguläre und komplexe Struktur, obschon die Verteilung der Säulendichten bei beiden Objekten zunächst wieder einer Kopf-Schweif-Struktur gleicht. CHVC 33 erscheint stark filamentär und geklumpt, wobei darüber hinaus auch noch schwache Emission in vielen Bereichen der Karte nachweisbar ist. Zwar gibt es auch hier viele Anzeichen für eine Wechselwirkung, aber auf Grund der irregulären Struktur des Objekts erinnert CHVC 33 nicht an die

übliche Gestalt wechselwirkender CHVCs, so daß man dem Objekt eher einen Sonderstatus zusprechen muß. CHVC 47 schließlich wurde als möglicher Galaxienkandidat ausführlich besprochen.

Möchte man eine morphologische Einteilung der 11 untersuchten Objekte vornehmen, so erhält man 1 sphärisch-symmetrisches Objekt, 4 Kopf-Schweif-CHVCs, 2 bugwellenförmige Objekte und 4 irreguläre Wolken. Dieses Resultat belegt, daß die von Burton, Braun & Chengalur 2001 [4] benutzte Annahme, CHVCs seien sphärisch-symmetrische, im Gleichgewicht befindliche Gaswolken, im allgemeinen nicht gültig ist. Aus diesem Grund sind die von Burton, Braun & Chengalur [4] abgeschätzten Entfernungen ebenso mit Vorsicht aufzunehmen wie die Ergebnisse und Vorhersagen der hydrodynamischen Modelle von Sternberg, McKee & Wolfire 2002 [26], die auf den Ergebnissen von Burton, Braun & Chengalur [4] aufbauen.

- *Sind CHVCs tatsächlich über die gesamte Lokale Gruppe hinweg verteilt oder handelt es sich eher um eine zirkumgalaktische Population?*

Die bei vielen der 11 untersuchten CHVCs gefundenen Anzeichen für eine Wechselwirkung mit einem umgebenden Medium sind ein deutlicher Hinweis darauf, daß die CHVCs nicht über die gesamte Lokale Gruppe hinweg verteilt sind, wie von Braun & Burton 1999 [2] vermutet wurde. Stattdessen ist eine zirkumgalaktische Verteilung der CHVCs mit typischen Entfernungen in der Größenordnung von 100 kpc viel wahrscheinlicher. In einer solchen Entfernung könnten die Wolken mit einem ausgedehnten, diffusen Halogas der Milchstraße in Wechselwirkung stehen, wodurch die irreguläre und gestörte Struktur, die wir bei den meisten CHVCs beobachten, hervorgerufen worden sein kann.

Eine Ableitung der Entfernung aus den Beobachtungsdaten ist für den Großteil der untersuchten Wolken nicht ohne weiteres möglich, weil alle dazu geeigneten Methoden von einer sphärischen Symmetrie der Objekte ausgehen (vgl. Kapitel 3.2). Die einzige sphärisch-symmetrisch erscheinende Wolke ist CHVC 24. Für dieses Objekt konnte ich über den thermischen Druck sowie über die Annahme, der beobachtete Gradient in Radialgeschwindigkeit sei durch eine Rotation des Objekts zu erklären, eine Entfernungsabschätzung vornehmen, die Werte um 100...200 kpc ergab. Diese Entfernung ist mit der Vorstellung einer zirkumgalaktischen CHVC-Population sehr gut verträglich, für die wir typische Entfernungen in der Größenordnung von 100 kpc erwarten würden.

Auch bei CHVC 11 und CHVC 47 konnte ich unter der Annahme einer Rotation durch den Vergleich zwischen dynamischer Masse und HI/He-Masse eine Abschätzung der Entfernung vornehmen. Bei beiden Objekten sind die sich unter der Annahme einer HI-Masse von etwa 10% ergebenden Entfernungen aber in der Größenordnung von einigen Mpc. Das ist leicht verständlich, denn bei beiden Objekten beobachten wir einen extrem starken Geschwindigkeitsgradienten über eine geringe Winkeldistanz, was nur durch eine große dynamische Masse zu erklären ist, falls der beobachtete Gradient tatsächlich eine Rotation nachzeichnet. Die beiden Objekte fallen allerdings aus dem Rahmen, indem es sich bei beiden möglicherweise um Kandidaten für noch unbekannte Galaxien handeln könnte. Diese Interpretation hatte ich insbesondere für CHVC 47 erwogen und ausführlich diskutiert.

- *Sind CHVCs die primordialen, gasreichen Dunkle-Materie-Halos, die von den kosmologischen Modellen vorhergesagt werden?*

Diese Frage läßt sich anhand der durchgeführten Untersuchungen nicht abschließend beantworten. Die Ergebnisse der tieferen Kartierung legen nahe, daß sich die meisten der untersuchten CHVCs in einer zirkumgalaktischen Population in einer typischen Entfernung um 100 kpc aufhalten. Darüber hinaus zeigen viele der Objekte deutliche Anzeichen für eine Wechselwirkung mit einem dort vorhandenen Medium. Diese Wechselwirkungen müssen mit einem Energieverlust der CHVCs einhergehen, so daß wir hier möglicherweise die prognostizierten Dunkle-Materie-Minihalos sehen, die gerade im Begriff sind, von der Milchstraße akkretiert und einverleibt zu werden. In einer prognostizierten Entfernung von 100 kpc wären die CHVCs dann eher dem unteren Ende des Massenspektrums zuzuordnen, denn die HI-Massen in dieser Entfernung lägen bei nur einigen $10^5 M_{\odot}$. Allerdings können wir in den meisten Fällen keine Aussage über die dynamische Masse treffen, so daß ein nicht unerheblicher Dunkle-Materie-Anteil vorhanden sein könnte, der diese Objekte in Bezug auf ihre Gesamtmassen nahe den Zwerggalaxien ansiedeln könnte.

Darüber hinaus muß bemerkt werden, daß einige der als CHVC klassifizierten Objekte wahrscheinlich anderer Natur sein dürften. Vielfach angesprochen wurde bereits CHVC 47, die als Kandidat für eine noch unbekannte Galaxie einer anderen Objektklasse zugeschrieben werden müßte. CHVC 33 fällt auf Grund ihrer filamentären und geklumpten Struktur auf, die auf eine starke Störung der Wolke hindeutet. Dies läßt einen Aufenthalt in unmittelbarer Nähe der Milchstraße vermuten, wo das Objekt durch den starken Staudruck galaktischen Gases möglicherweise gerade zerstört wird. Vielleicht haben wir hier ein Beispiel einer CHVC vor uns, deren Akkretion durch die Milchstraße bereits weit fortgeschritten ist.

10.3 Ausblick

Ein zukünftiges Studium von CHVCs kann sich in zwei Teile gliedern. Zum einen ist es sinnvoll, die bekannten, wahrscheinlich zirkumgalaktischen CHVCs in noch größerem Detail zu studieren. Dies wäre mit einer Kombination von Einzelteleskop-Beobachtungen mit den Daten eines Interferometers möglich. Dadurch kann die Verteilung des kalten und warmen Gases in CHVCs mit großer Auflösung und Sensitivität studiert werden, so daß die physikalischen Bedingungen innerhalb der Objekte als auch in ihrer Umgebung extrahiert werden können. Auf diese Weise ist es möglich, in Kombination mit hydrodynamischen Simulationen die Wechselwirkungsvorgänge zwischen CHVCs und dem umgebenden Medium genau zu untersuchen und Rückschlüsse auf die Eigenschaften des Umgebungsmediums und möglicherweise den Aufenthalt der CHVCs zu ziehen.

Ein zweiter wichtiger Aspekt ist die Suche und Kartierung von CHVCs in der Umgebung der Andromeda-Galaxie (M31). Wenn sich die bekannten CHVCs in der Umgebung der Milchstraße aufhalten, würden wir eine vergleichbare Population auch in der Umgebung der Andromeda-Galaxie erwarten. Das Auffinden und Untersuchen dieser M31-Population von CHVCs würde es direkt erlauben, die Vorstellung einer zirkumgalaktischen Verteilung dieser Objekte zu verifizieren, da wir von außen auf die Population blicken würden und die Entfernung der Andromeda-Galaxie gut bekannt ist. Dadurch ließe sich die radiale Verteilung der Objekte und deren Mas-

senspektrum direkt ableiten, so daß uns ein mächtiges Werkzeug zur Verfügung stände, um die Vorhersagen der kosmologischen Strukturentstehungsmodelle direkt zu überprüfen. Darüber hinaus ließe sich über die kinematischen Eigenschaften der CHVCs die Masse von M31 ableiten.

Wir sind in unserem Verständnis kompakter Hochgeschwindigkeitswolken im Hinblick auf die Strukturentstehung in der Lokalen Gruppe schon ein großes Stück vorangekommen, und mit den zuvor skizzierten Vorhaben kann es gelingen, die Natur und den Ursprung dieser Objekte innerhalb der nächsten Jahre zu enträtseln.

A Die 21-cm-Linie des neutralen Wasserstoffs

Die 21-cm-Linie des neutralen Wasserstoffs (HI) entsteht durch einen Hyperfeinstrukturübergang zwischen dem Zustand mit parallelen Spins von Elektron und Proton ($F = 1$) und dem Zustand mit antiparallelen Spins ($F = 0$). Es handelt sich dabei um einen magnetischen Dipolübergang mit äußerst geringer Übergangswahrscheinlichkeit $A_{21} = 2.87 \cdot 10^{-15} \text{ s}^{-1}$, was einer natürlichen Lebensdauer von $\tau = 1.1 \cdot 10^7 \text{ a}$ entspricht (nach Rohlfs 1986 [25]). Da die Zeit zwischen zwei Stößen von Wasserstoffatomen im interstellaren Medium bedeutend kürzer als die natürliche Lebensdauer des Zustands ist, werden die meisten Übergänge (in beide Richtungen) durch Stöße induziert. Strahlungsübergänge in den Zustand niedrigerer Energie tragen nur zu einem Anteil von etwa 10^{-3} bei.

Zur Charakterisierung des Besetzungsverhältnisses zwischen den beiden Zuständen höherer und niedrigerer Energie definiert man als Anregungstemperatur die sogenannte *Spin-Temperatur* T_S über

$$\frac{N_2}{N_1} = \frac{g_2}{g_1} \exp\left(-\frac{h\nu}{kT_S}\right). \quad (46)$$

Dabei sind N_2 und N_1 die Anzahlen der Atome im angeregten Zustand und im Grundzustand, g_2 und g_1 sind die zugehörigen statistischen Gewichte, und ν ist die Übergangsfrequenz entsprechend der Energiedifferenz $h\nu$ zwischen beiden Zuständen. Die Übergangsfrequenz konnte experimentell sehr genau bestimmt werden und beträgt nach Rohlfs 1986 [25] rund

$$\nu = 1420.40575 \text{ MHz}. \quad (47)$$

A.1 Die Strahlungstransportgleichung

Durch eine Reihe von Rechenschritten und Näherungen läßt sich die Strahlungstransportgleichung für den Fall der 21-cm-Linienstrahlung umformen zu

$$\frac{dT_B}{d\tau(\nu)} = T_S - T_B(\nu). \quad (48)$$

Hierin ist $\tau(\nu)$ die optische Tiefe und $T_B(\nu)$ die sogenannte *brightness temperature*, die definiert ist als die Temperatur eines Schwarzkörpers, der bei der Frequenz ν die Intensität $I(\nu)$ emittiert. Diese Form der Strahlungstransportgleichung läßt sich für den Fall einer homogenen HI-Wolke vor einer homogenen Hintergrundemission lösen, und wir erhalten

$$T_B(\nu) = T_{BG}(\nu) e^{-\tau(\nu)} + T_S \left(1 - e^{-\tau(\nu)}\right). \quad (49)$$

Dabei ist $T_{BG}(\nu)$ die *brightness temperature* der Hintergrundemission. Für den optisch dünnen Fall ($\tau(\nu) \ll 1$) erhalten wir hieraus unmittelbar den einfachen Zusammenhang

$$T_B(\nu) = \tau(\nu) T_S. \quad (50)$$

Außerdem ist $T_B(\nu)$ in diesem Fall direkt zur Säulendichte N_{HI} des HI-Gases proportional, so daß wir unter Umformung der Frequenz ν in die Radialgeschwindigkeit v über den Dopplereffekt eine nützliche Formel zur Berechnung der HI-Säulendichte ableiten können:

$$N_{\text{HI}} = 1.823 \cdot 10^{18} \int T_B dv, \quad (51)$$

worin $[N_{\text{HI}}] = \text{cm}^{-2}$, $[T_{\text{B}}] = \text{K}$ und $[v] = \text{km s}^{-1}$. Das bedeutet, daß wir für den Fall optisch dünnen HI-Gases dessen Säulendichte unmittelbar aus der Fläche unter der Spektrallinie erhalten, falls wir das Spektrum in der Form $T_{\text{B}}(v)$ gegeben haben. Da wir es im Fall kompakter Hochgeschwindigkeitswolken ausschließlich mit optisch dünnem Gas zu tun haben, können wir deren HI-Säulendichte also leicht anhand von Gleichung 51 aus den Spektren ableiten.

A.2 Linienbreiten

Die natürliche Linienbreite der 21-cm-Linie, die durch die Heisenbergsche Unschärferelation festgelegt wird, ist wegen der langen Lebensdauer des angeregten Zustands extrem klein. Auf Grund der geringen Teilchendichten im interstellaren Medium ist auch die Stoßverbreiterung der Linien vernachlässigbar gering, so daß die beobachteten Linienbreiten allein durch den Dopplereffekt bestimmt werden. Hier sind vor allem die thermische Bewegung der Atome sowie das Vorhandensein von Gas mit unterschiedlichen Geschwindigkeiten entlang der Sichtlinie relevant.

In einem Idealen Gas sind die thermischen Geschwindigkeiten der Gasteilchen durch die Maxwellsche Geschwindigkeitsverteilung gegeben. Demnach wird der Anteil der Teilchen $n(v)/n$ bei der Geschwindigkeit v durch die Funktion

$$\frac{n(v)}{n} = \left(\frac{m}{2\pi kT}\right)^{3/2} \exp\left(-\frac{mv^2}{2kT}\right) \quad (52)$$

bestimmt, in der k die Boltzmann-Konstante, T die Temperatur und m die Masse der Gasteilchen beschreiben. Hieraus läßt sich der thermische Anteil Δv an der Halbwertsbreite (FWHM) von HI-Linien ableiten:

$$\Delta v = \sqrt{\frac{8kT \ln 2}{m}}. \quad (53)$$

Umgekehrt ist die Temperatur als Funktion der Linienbreite gegeben durch

$$T = \frac{m\Delta v^2}{8k \ln 2}. \quad (54)$$

Bei Kompakten Hochgeschwindigkeitswolken beobachtet man typischerweise Halbwertsbreiten von $\Delta v \approx 20 \text{ km s}^{-1}$. Wenn man annimmt, diese Breite sei allein durch die thermische Bewegung der Wasserstoffatome verursacht, so erhielte man Temperaturen in der Größenordnung von 10000 K. Ein solch warmes, neutrales Wasserstoffgas wird als *warm neutral medium* (WNM) bezeichnet. In einigen CHVCs findet man zusätzlich im Innern eine kompakte, kühle Gaskomponente, die als *cold neutral medium* (CNM) bezeichnet wird und typischerweise Temperaturen von nur einigen 100 K aufweist, was in Linienbreiten von wenigen km s^{-1} resultiert.

B Beobachtungsverfahren

Die dieser Arbeit zugrundeliegenden HI-Spektren wurden mit dem *Frequency-Switch*-Verfahren beziehungsweise mit dem ähnlichen *Inband-Frequency-Switch*-Verfahren aufgenommen. Beide Methoden möchte ich im folgenden kurz vorstellen und ihre Vor- und Nachteile erläutern. Darüber hinaus ist bei der Reduktion der im *Inband-Frequency-Switch*-Verfahren gewonnenen Daten ein etwas abweichender Weg zu beschreiten, der an dieser Stelle ebenfalls kurz skizziert sei.

B.1 *Frequency-Switch*-Methode

Die Durchmusterung der 41 kompakten Hochgeschwindigkeitswolken mit dem 100-m-Teleskop in Effelsberg wurde im sogenannten *Frequency-Switch*-Verfahren durchgeführt. Bei diesem Verfahren wird der Bandpaßfilter des Empfängers zunächst auf die Frequenz der zu messenden Spektrallinie zentriert, so daß wir ein Spektrum des gewünschten Objekts erhalten. Im Anschluß wird die Zentralfrequenz des Bandpasses um einen bestimmten Betrag verschoben, so daß wir nun einen emissionsfreien Frequenzbereich abseits der Spektrallinie aufnehmen. Wir erhalten also für jede Position zwei Spektren, die wir als Signal- und Referenzspektrum bezeichnen wollen. Beide Spektren werden im folgenden voneinander abgezogen, so daß wir ein Spektrum erhalten, das zum einen die gewünschte Spektrallinie enthält und zum anderen von einer Reihe von instrumentellen Einflüssen bereits befreit ist. So ist zum Beispiel die Gestalt des Bandpasses für die Signal- und Referenzmessung idealerweise dieselbe, so daß die Basislinie des Differenzspektrums sehr eben wird und sich bei der späteren Auswertung der Spektren durch ein Polynom niedrigen Grades nähern läßt. In der Praxis ist das Verfahren noch etwas komplexer als hier skizziert, jedoch sollen diese Ausführungen genügen, um das Prinzip der *Frequency-Switch*-Methode sowie ihre Vor- und Nachteile zu verstehen.

Anstelle des *Frequency-Switch*-Verfahrens kann man auch das sogenannte *Position-Switch*-Verfahren anwenden, um bereinigte Spektren zu erhalten. Hierbei wird die Zentralfrequenz des Bandpasses auf der Spektrallinie belassen und statt dessen zur Referenzmessung das Teleskop auf eine möglichst emissionsfreie Stelle des Himmels gerichtet. Auch hierdurch kann man den zuvor geschilderten instrumentellen Einflüssen begegnen. Jedoch ist bei der Beobachtung der 21-cm-Linienemission der Milchstraße nur das *Frequency-Switch*-Verfahren sinnvoll, weil es keine emissionsfreien Stellen des Himmels gibt, die sich für eine Referenzmessung beim *Position-Switch*-Verfahren eignen würden. Ein Nachteil beider Verfahren ist, daß im allgemeinen die Hälfte der Meßzeit auf die Referenzmessung verwandt wird und nicht für die Detektion des Signals zur Verfügung steht. Im Fall des *Frequency-Switch*-Verfahrens ist es allerdings möglich, diesem Problem zu begegnen, indem Signal- und Referenzband so gewählt werden, daß beide die Spektrallinie des beobachteten Objekts beinhalten, so daß die astronomische Quelle während der gesamten Meßzeit detektiert wird (*Inband-Frequency-Switch*-Methode).

B.2 *Inband-Frequency-Switch*-Methode

Um ein möglichst großes Signal-zu-Rausch-Verhältnis zu erreichen, habe ich die tiefen Kartierungen der ausgewählten CHVCs im *Inband-Frequency-Switch*-Modus durchgeführt. Die Eigen-

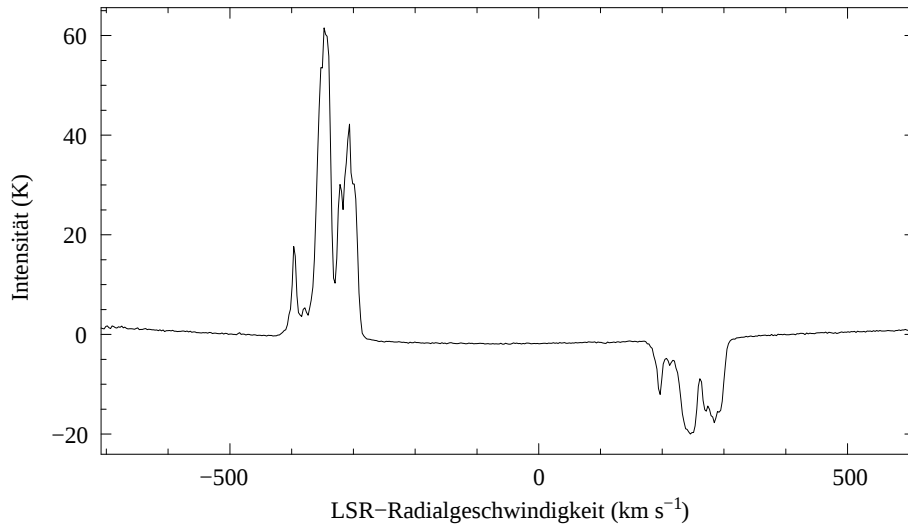


Abbildung 52: Die S7-Quelle als Beispiel für ein Spektrum im Inband-Frequency-Switch-Modus. Das Spektrum ist von der Form $T_0 = T_{\text{sys}} (T_S - T_R)/T_R$. Links sieht man das positive Signal aus dem Signalband, rechts das invertierte Signal aus dem Referenzband. Auf Grund der Division durch das Referenzspektrum $T_R(n)$ sind die invertierten Linien falsch skaliert.

schaften dieses Verfahrens sowie die dabei anfallenden Schritte zur Reduktion der Daten sollen im folgenden erläutert werden.

Ein Nachteil des *Frequency-Switch*-Verfahrens ist, daß nur die Hälfte der Meßzeit auf die Detektion der Quelle verwandt wird, da das Teleskop in der verbleibenden Zeit das Referenzspektrum aufnimmt. Hier setzt nun die *Inband-Frequency-Switch*-Methode an, bei der die Verschiebung des Bandpasses zwischen Signal- und Referenzmessung hinreichend klein gewählt wird, so daß die Quelle in beiden Bändern noch enthalten ist. Es wird also die Quelle während der gesamten Meßzeit detektiert, und man erreicht ein rms-Rauschen, das gegenüber dem normalen *Frequency-Switch*-Verfahren um einen Faktor $\sqrt{2}$ vermindert ist.

Ein Problem beim *Inband-Frequency-Switch*-Verfahren ist indes der fehlende Einfluß auf die Form der Basislinie. Während man beim gewöhnlichen *Frequency-Switch*-Modus die *Offset*-Frequenz über einen größeren Bereich so lange variieren kann, bis die Basislinie des Spektrums hinreichend eben ist, fehlt diese Möglichkeit beim *Inband-Frequency-Switch*-Modus, bei dem hinsichtlich der *Offset*-Frequenz ein enger Rahmen gesteckt ist. Es besteht somit die Gefahr, daß durch eine sehr „unruhige“ Basislinie der durch das Verringern des Rauschens erreichte Vorteil aufgewogen wird. Es hat sich jedoch gezeigt, daß die in Effelsberg im *Inband-Frequency-Switch*-Modus aufgenommenen Spektren sehr ebene Basislinien aufweisen, die sich bereits durch ein Polynom niedriger (im allgemeinen 3.) Ordnung beschreiben lassen, so daß das Verfahren ohne Probleme benutzt werden kann.

Bei der Reduktion der am 100-m-Teleskop in Effelsberg gewonnenen Spektren muß ein gegenüber dem gewöhnlichen *Frequency-Switch*-Modus etwas abweichender Weg beschritten werden, der zunächst durch eine Beschreibung der erhaltenen „Rohspektren“ motiviert werden soll. Als Einheit der Abszisse der Spektren sei zunächst die Kanalzahl n des Spektrometers angenommen, ferner seien $T_S(n)$ die als Temperatur ausgedrückte Intensität des Signalspektrums

und $T_R(n)$ jene des Referenzspektrums. T_{sys} sei die Systemtemperatur, die im Falle der HI-Spektroskopie in Effelsberg bei etwa 25...40 K liegt. Die am Teleskop erhaltenen Rohspektren sind dann von der Gestalt

$$T_0(n) = T_{\text{sys}} \frac{T_S(n) - T_R(n)}{T_R(n)} \quad (55)$$

(vergleiche Abbildung 52). Der wesentliche Bestandteil dieser Formel ist die Differenz aus Signal- und Referenzspektrum, die für die Kalibration der Spektren in Bezug auf atmosphärische und instrumentelle Einflüsse sorgt. Das Referenzspektrum enthält nun aber ebenfalls die Quelle, so daß diese zusätzlich als negatives Signal mit verschobener Geschwindigkeit erscheint. Da aber zugleich noch durch $T_R(n)$ dividiert wird, ist das negative Signal der Quelle falsch skaliert. Ein einfaches Mitteln des positiven und des invertierten negativen Signals der Quelle würde mithin zu einer falschen Intensität führen. Der beschriebene Effekt ist in Abbildung 52 anhand der S7-Eichquelle als Beispiel dargestellt.

Um dennoch das Signal aus dem Referenzband verwenden zu können, muß man in Effelsberg mit Hilfe des Programms `spec2` durch Vertauschen von Signal- und Referenzkanälen zusätzlich das Verhältnis

$$T_0^{\text{inv}}(n) = T_{\text{sys}} \frac{T_R(n) - T_S(n)}{T_S(n)} \quad (56)$$

bilden, bei dem jetzt das Spektrum aus dem Referenzband positiv und richtig skaliert erscheint, während das Spektrum aus dem Signalband invertiert und falsch skaliert ist. Durch Aufeinanderschieben und Mitteln der Spektren $T_0(n)$ und $T_0^{\text{inv}}(n)$ gewinnt man schlußendlich das fertige Spektrum, das alle Einzelspektren umfaßt und die richtige Skalierung aufweist. Die weitere Kalibration der Spektren und die Auswertung mit `class` erfolgen wie gewohnt.

Literatur

- [1] Barnes, D. G., Staveley-Smith, L., de Blok, W. J. G. et al., 2001, MNRAS 322, 486
- [2] Braun, R. & Burton, W. B., 1999, A&A 341, 437
- [3] Braun, R. & Burton, W. B., 2000, A&A 354, 853
- [4] Burton, W. B., Braun, R. & Chengalur, J. N., 2001, A&A 369, 616
- [5] Burton, W. B., Braun, R., Walterbos, R. A. M. & Hoopes, C.G., 1999, AJ 117, 194
- [6] Benjamin, R. A. & Danly, L., 1997, ApJ 481, 764
- [7] Blitz, L., Spergel, D. N., Teuben, P. J., Hartmann, D. & Burton, W. B., 1999, ApJ 514, 818
- [8] Brüns, C., Kerp, J. & Pagels, A., 2001, A&A 370, L26
- [9] Danly, L., Albert, C. E. & Kuntz, K. D., 1993, ApJ 416, 29
- [10] de Heij, V., Braun, R. & Burton, W. B., 2002, A&A 391, 159
- [11] de Heij, V., Braun, R. & Burton, W. B., 2002, A&A 392, 417
- [12] Detig, C., 1997, „Der L^AT_EX Wegweiser“, International Thomson Publishing GmbH, ISBN 3-8266-0256-0
- [13] Hartmann, D. & Burton W. B., 1997, „Atlas of Galactic Neutral Hydrogen“, Cambridge University Press
- [14] Hopp, U., Schulte-Ladbeck, R. E. & Kerp, J., 2003, MNRAS 339, 33
- [15] Klypin, A., Kravtsov, A. V., Valenzuela, O. & Prada, F., 1999, ApJ 522, 82
- [16] Maloney, P. R. & Putman, M. E., 2003, in Vorbereitung, astro-ph/0302040
- [17] Mateo, M., 1998, ARA&A 36, 435
- [18] Mathewson, D. S., Cleary, M. N. & Murray, J. D., 1974, ApJ 190, 291
- [19] Moore, B., Ghigna, S., Governato, G., Lake, G., Quinn, T., Stadel, J. & Tozzi, P., 1999, ApJ 524, L19
- [20] Muller, C. A., Oort, J. H., & Raimond, E., 1963, Comptes Rendus de l'Académie des Sciences 257, 1661
- [21] Pacholczyk, A. G., 1970, „Radio Astrophysics“, W. H. Freeman and Company
- [22] Putman, M. E., de Heij, V., Staveley-Smith, L. et al., 2002, AJ 123, 873
- [23] Quilis, V. & Moore, B., 2001, ApJ 555, L95
- [24] Rasmussen, A., Kahn, S. M. & Paerels, F., 2003, in Vorbereitung, astro-ph/0301183

-
- [25] Rohlfs, K., 1986, „Tools of Radio Astronomy“, Springer-Verlag, ISBN 3-540-16188-0
 - [26] Sternberg, A., McKee, C. F. & Wolfire, M. G., 2002, ApJS 143, 419
 - [27] Stöcker, H. (Hrsg.), 1994, „Taschenbuch der Physik“, Verlag Harri Deutsch, ISBN 3-8171-1358-7
 - [28] Stöcker, H. (Hrsg.), 1995, „Taschenbuch mathematischer Formeln und moderner Verfahren“, Verlag Harri Deutsch, ISBN 3-8171-1461-3
 - [29] van Woerden, H., Schwarz, U. J., Peletier, R. F., Wakker, B. P. & Kalberla, P. M. W., 1999, Nat. 400, 138
 - [30] Vieser, W., 2001, „Entwicklung von Molekülwolken unter Berücksichtigung von Wärmeleitung“, Shaker Verlag Aachen, ISBN 3-8265-9047-3
 - [31] van der Kruit, P. C. & Searle, L., 1981, A&A 95, 105
 - [32] Wakker, B. P., 1991, A&A 250, 499
 - [33] Wakker, B. P., 2001, ApJS 136, 463
 - [34] Wakker, B. P. & van Woerden, H., 1997, Annu. Rev. Astron. Astrophys. 35, 217
 - [35] Wolfire, M. G., McKee, C. F., Hollenbach, D., & Tielens, A. G. G. M., 1995, ApJ 453, 673
 - [36] Zwaan, M., 2000, „Atomic Hydrogen in the Local Universe“, ISBN 90-367-1305-6

Danksagung

Diese Arbeit verdankt ihr Gelingen dem Wirken zahlreicher Menschen, denen ich mich an dieser Stelle dem Dank verpflichtet fühle.

An erster Stelle gilt mein Dank Herrn Prof. Dr. Ulrich Mebold für die Überlassung des Themas, die freundliche Aufnahme in das Radioastronomische Institut und die fruchtbaren Diskussionen. Darüber hinaus danke ich Herrn Mebold dafür, daß er mir die Anstellung als studentische Hilfskraft ermöglichte. Ihm und Herrn Prof. Dr. Klaas S. de Boer gilt außerdem mein herzlicher Dank für die Übernahme des Referats bzw. des Koreferats.

Jürgen Kerp und Christian Brüns sei mein großer Dank für die hervorragende Betreuung der Arbeit ausgesprochen. Sie standen mir zu jeder Tages- und Nachtzeit mit Rat und Tat zur Seite und haben in zahlreichen Diskussionen wichtige Impulse für den Fortgang der Arbeit gegeben. Darüber hinaus haben sie mich bei der Durchführung der HI-Beobachtungen in Effelsberg maßgeblich unterstützt, indem sich mich in die Beobachtungstechnik einwiesen und jederzeit die Mühe auf sich nahmen, mich für die Zeit der Beobachtungen zum Teleskop zu fahren und wieder abzuholen.

I would like to thank Mary E. Putman for providing me with HIPASS data cubes for some of my CHVCs. This was a great help when choosing the positions and sizes of the maps for the deep follow-up observations with the Effelsberg 100-m telescope.

Weiter danke ich Jens Kauffmann und Thorsten Haas für die Begleitung während des Studiums. Sie waren mir während der Vorlesungen, Übungen und Praktika ständige und liebe Gefährten, und ich erinnere mich noch mit einem Schmunzeln daran, wie wir uns während des Grundstudiums des Abends in Kneipen oder U-Bahn-Haltestellen zusammenfanden, um die Übungsblätter zu bearbeiten. Gern denke ich an die vielen gemeinsamen Unternehmungen zurück, die uns auch über das Studium hinaus verbanden.

Nicht zuletzt danke ich all jenen, die im Radioastronomischen Institut ihre Arbeit verrichten und für eine angenehme Arbeitsatmosphäre sorgten. Es gab immer ein offenes Ohr für Fragen oder Diskussionen, wodurch die ein oder andere Idee für meine Arbeit erst heranreifte.