



universität  
wien

# Bakkalaureatsarbeit

Titel der Bakkalaureatsarbeit

„Das System der Zwerggalaxien um die  
Milchstraße“

Verfasser  
Victor Marian

angestrebter akademischer Grad  
Bakkalaureus der Astronomie (Bakk.)

Wien, im Jänner 2012

Studienkennzahl lt. Studienblatt: 033 661  
Studienrichtung lt. Studienblatt: Astronomie  
Betreuer: Univ.-Prof. Dipl.-Phys. Dr. Gerhard Hensler



# Das System der Zwerggalaxien um die Milchstraße

V. Marian, 9071422

Preprint online version: 4. Juni 2012

## Zusammenfassung

**Aims.** Im Rahmen des Bachelor-Seminars wurde für die Bakkalaureatsarbeit das Thema *Das System der Zwerggalaxien der Milchstraße* gewählt. Ziel soll sein durch Recherche geeigneter Papers und des eigenen Verständnisses und Wissens, eine Publikation zu erstellen, die den Ansprüchen solch einer wissenschaftliche Abhandlung genügt.

**Methods.** Grundlage bildeten die hervorragenden Publikationen von M. Mateo (1998) und Tolstoy et al. (2009). Zusätzlich wurde noch aus weiteren passenden Publikationen recherchiert, um mehrere Ansichten zu sammeln, um damit einen besseren Überblick zu geben und mehrere Meinungen wiederzugeben.

**Results.** Es wird in dieser Arbeit versucht, nach einer generellen Einleitung über Zwerggalaxien, den aktuellen Wissensstand über die besondere Verteilung und die Sternentstehungsgeschichte und die damit verbundene chemische Entwicklung der begleitenden Zwerggalaxien wiederzugeben. Ein näheres Eingehen auf alle Teilgebiete würde bedauerlicherweise den Umfang einer solchen Arbeit sprengen. Zusätzlich wurde eine Animation erstellt, mithilfe derer die anisotrope Verteilung der Begleitgalaxien visualisiert werden soll.

**Key words.** dSph, dIrr, UFD, Distribution, Synthetische CMD-Methode

## 1. Einleitung

Die Anhäufung der Galaxien, die Lokale Gruppe, in der sich auch unsere Heimatgalaxie, die Milchstraße, befindet, besitzt im Vergleich zur Fülle der anderen Haufen keine auffälligen Besonderheiten oder Merkmale. Ganz alleine der Umstand der Nähe der umliegenden Galaxien macht sie für uns zu etwas Einmaligem, da dadurch Beobachtungen und somit auch Schlussfolgerungen möglich sind, die uns weiter entfernte Gebilde nicht bieten können.

Historisch betrachtet wurde der Begriff *Lokale Gruppe* erstmals von E. Hubble in dessen Buch *The Realm of Nebulae* (1936) verwendet, in welchem er eine kleine isolierte Gruppe von Nebeln beschreibt. Er ordnete diese nach abnehmender Helligkeit, angefangen mit den einzigen Spiralgalaxien in der Lokalen Gruppe, M31, Milchstraße, M33, über die mit freiem Auge erkennbaren Magellanschen Wolken, bis hin zu den hellsten Zwerggalaxien, wie M32. Mittlerweile hat sich die Anzahl der Mitglieder der Gruppe von den von Hubble beschriebenen 12 auf rund 50 erhöht.

Dominiert wird die Lokale Gruppe, sowohl Helligkeit, als auch sichtbare Masse betreffend, von unserer Milchstraße und M31, die auch jeweils mit ihren Satellitengalaxien wiederum eine eigene Untergruppe der Lokalen Gruppe bilden. Gemessen an der Anzahl sind jedoch die Zwerggalaxien mit Abstand in der Überzahl. So beträgt ein aktueller Wert für die totale Masse der Lokalen Gruppe  $M_T = (1.29 \pm 0.14) \cdot 10^{12} M_\odot$  (Karachentsev & Kashibadze 2006), wobei die Masse der Milchstraßen-Untergruppe durch Orbitalberechnungen auf über  $M = 96 \cdot 10^{10} M_\odot$  geschätzt wird (Karachentsev 2005). Der Radius der *zero-velocity surface* der Lokalen Gruppe, also jener Oberfläche, die vereinfacht gesagt, darüber Auskunft gibt, ob ein Objekt noch gravitativ an die Lokale Gruppe gebunden ist, beträgt  $R_0 = 1.18 \pm 0.15 \text{ Mpc}$  (van den Bergh 2000).

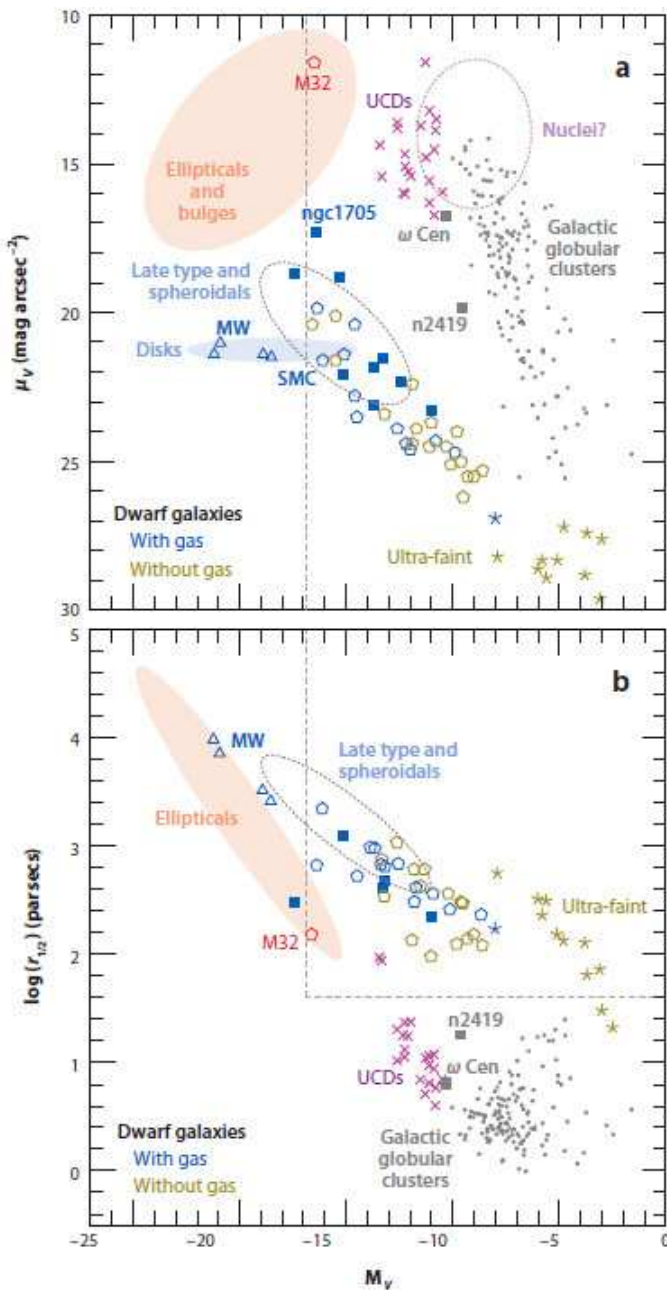
Diese Arbeit befasst sich nun mit dem Gebilde, dass die Milchstraße mit ihren Satellitengalaxien bildet, beziehungswei-

se mit den Zwerggalaxien per se. Da es leider das Ausmaß einer Bakkalaureatsarbeit bei weitem übersteigen würde, auf alle Charakteristika und Merkmale dieser Galaxien einzugehen, wird der Schwerpunkt dieser Arbeit einerseits auf der Verteilung und damit gegebenenfalls einhergehender Interaktion und andererseits auf der Sternentstehungsgeschichte liegen. Auch die Magellanschen Wolken werden keine größere Beachtung finden.

## 2. Eigenschaften von Zwerggalaxien

Wie oben bereits erwähnt, bilden nun Zwerggalaxien, das Satellitensystem um die Milchstraße. Aber wann kann man von einer Zwerggalaxie sprechen und welche Merkmale besitzen diese?

Viele Eigenschaften wie Potentialtiefe, Metallizität und Größe gehen einher mit Masse und Leuchtkraft wie bei Galaxien größeren Ausmaßes. Und auch sonst existieren keine besonderen Hinweise, darauf, dass Zwerggalaxien eine besondere Art von System darstellen sollen (Abb.1). So weisen sie eine geringe Masse zwischen  $10^6$  und maximal  $10^{10} M_\odot$  auf, eine niedrige Metallizität mit  $Z = 1/3 - 1/50 Z_\odot$ , ebenso eine geringe Leuchtkraft die zwischen  $10^6 - 10^{10} L_\odot$  liegt, sowie eine langsame Rotation mit  $10 - 100 \text{ km s}^{-1}$ . Erwähnenswert sei, dass die Große Magellansche Wolke, die nicht immer zu den Zwerggalaxien gezählt wird, eine Masse von rund  $5 \cdot 10^9 M_\odot$  aufweist. Um nun Zwerggalaxien zu klassifizieren geht man vielmehr nach einem der offensichtlichsten Kriterien und bezeichnet alle Galaxien, welche eine räumliche Ausdehnung besitzen, die jene von Kugelsternhaufen übertrifft und eine Helligkeit von  $M_B > -16$  beziehungsweise  $M_V > -17$  aufweisen als Zwerggalaxie (Tammann 1994). Zudem weisen Zwerggalaxien eine geringere Konzentration als Kugelsternhaufen auf und sind flacher als diese. Wie man in Abbildung 1 erkennen kann, existiert eine Kontinuität zwischen den verschiedenen Galaxientypen, jedoch sieht man auch, dass zwischen den zwei Zwerggalaxientypen, die durch das Hauptkriterium, gasreich und gasarm, beziehungs-



**Abbildung 1.** Zusammenhang der Eigenschaften der verschiedenen Galaxientypen. a) zeigt die absolute Helligkeit  $M_V$  gegen die zentrale Oberflächenhelligkeit  $\mu_V$ , b)  $M_V$  gegen den Effektivradius  $r_{1/2}$ . Blaue, leere Fünfecke stellen gasreiche Zwerggalaxien der Lokalen Gruppe dar, grüne jene ohne Gas. Wie man erkennen kann liegt die absolute Helligkeit zwischen -17 und -3 (Tolstoy et al. 2009)

weise -frei getrennt werden, eine Überlappung besteht. Diese Tatsache kann man dahingehend deuten, dass die gasfreien Zwerggalaxien, *Dwarf Ellipticals* (*dE*) und *Dwarf Spheroidals* (*dSph*), frühe Typen, in Abbildung 1 dargestellt durch die grünen Fünfecke, und die gasreichen, *Dwarf Irregulars* (*dIrr*), späte Typen, blaue Fünfecke, eventuell den gleichen morphologischen Typus darstellen, der nur durch den Gasinhalt eine Differenzierung in zwei verschiedenen Typen erfährt. Unterstützt wird diese These dadurch, dass sowohl *dIrr* als auch *dSph* ähnliche exponentielle, radiale Helligkeitsprofile zeigen. Wie man erkennt, gibt es aber noch weitere Objekte, die für die

se Arbeit von Bedeutung sind, und zwar die erst kürzlich entdeckten *Ultrafaint Dwarfs* (*UFD*), welche eine sehr niedrige Oberflächenhelligkeit und ähnliche Eigenschaften wie *dSph* aufweisen. Diese scheinen, untermauert durch eine absolute Helligkeit von  $-7 < M_V < -4$ , eine Fortsetzung der Sequenz der Zwerggalaxien darzustellen. Es sei allerdings zu beachten, dass vor allem, wie in Abbildung 1a gut zu erkennen ist, diese auch eine Verlängerung der Kugelsternhaufen sein könnten, was somit eine Identifizierung etwas erschwert. Zu berücksichtigen sei aber auch Abbildung 1b die diesmal die absolute Helligkeit  $M_V$  dem Effektivradius  $r_{1/2}$  gegenüberstellt. Zwar ist auch in diesem Diagramm gut zu erkennen, dass klassische *dSph* und *dIrr* wiederum denselben Bereich einnehmen, jedoch auch, dass die *UFD*, diesmal nun klar von den Kugelsternhaufen getrennt, hingegen aber auch etwas versetzt zu der Sequenz der klassischen Zwerggalaxien liegen. Grund hierfür könnten einerseits ungenaue Messungen der Größe sein, begründet durch das lichtschwache Auftreten, andererseits darf man natürlich auch nicht komplett die Möglichkeit ausschließen, dass es sich doch um einen gänzlich anderen Galaxientypen handelt.

Unterschiede zwischen den zwei Haupttypen der Zwerggalaxien zeigen sich aber nun beispielsweise dahingehend, dass bei *dIrr* der Anteil von HI-Gas zur Gesamtmasse zwischen 7-50% liegt, während dieser Wert bei *dSph* rund  $\leq 0.1\%$  beträgt. Weiters sind auch HII-Regionen bei *dIrr* vorhanden, bei *dSph* jedoch nicht, was somit erklärt, warum *dIrr* von Sternentstehungskomplexen und OB-Assoziationen dominiert werden. Sind somit bei *dSph* generell nur ältere Sterne zu finden, muss aber stets beachtet werden, dass sich ebenfalls bei *dIrr*, trotz der Vielzahl an jungen Sternen, im Hintergrund eine alte, symmetrisch verteilte Sternpopulation befindet. Überdies sind bei gleicher optischen Leuchtkraft *dSph* metallreicher als *dIrr*, auch wenn die Metallizität trotzdem deutlich unter jener der Sonne liegt, und überdies auch nicht rotationsgestützt im Vergleich zu *dIrr*. Auch die zentrale Oberflächenhelligkeit der *dIrr* würde nach dem Abklingen der Phase starker Evolution bedeutend kleiner sein, als jene der *dSph* (Mateo 1998). All diese Punkte sind wieder Argumente, die dagegen sprechen, *dIrr* und *dSph* als ein einziges System verschiedener Erscheinung zu betrachten. Die Frage, die sich nun stellen würde, ist natürlich jene, welche inneren oder äußeren Faktoren entscheidend sind, ob sich eine junge Galaxie zu einer *dSph* oder *dIrr* ausbildet.

Zu beachten sei noch, dass Vergleiche zwischen *dIrr* und *dSph* dadurch erschwert werden, dass dieselben Eigenschaften prinzipiell mit verschiedenen Parametern gemessen werden. So können beispielsweise die kinematischen Daten von *dIrr* leicht von den Gaskomponenten abgeleitet werden, wohingegen bei *dSph*, aufgrund des Mangels an Gas, nur Sterne herangezogen werden können. Auch Häufigkeiten werden einerseits in *dIrr* über [O/H] der HII-Regionen gemessen, andererseits in *dSph* über [Fe/H] einzelner RGB-Sterne. Hierdurch wird damit auch die Bedeutung der Lokalen Gruppe, und somit natürlich auch der Milchstraßengruppe, erkennbar, was auch bereits in der Einleitung erwähnt wurde: Die Nähe der Galaxien der Lokalen Gruppe erlaubt es uns aus Beobachtungen Schlussfolgerungen zu ziehen, die sonst, aufgrund unserer technischen Möglichkeiten, nicht möglich wären.

### 3. Die Zwerggalaxien der Milchstraße im Detail

Das System um die Milchstraße wird nun, mit Ausnahme der Magellanschen Wolken, ausschließlich von *dSph* und den neu entdeckten *UFD* gebildet. Während die Große Magellansche Wolke auf Parameter, wie Masse, Leuchtkraft und Größe be-

zogen eher Spiralgalaxien niedriger Leuchtkraft ähnelt, gleicht die Kleine Magellansche Wolke, was ihre Eigenschaften Masse, Leuchtkraft und Metallizität der Sternentstehungsregion angeht, eher einer *dIrr*, was auch in Abbildung 1 ersichtlich wird (Tolstoy et al. 2009). Deswegen wird einerseits auf die Große Magellansche Wolke in dieser Arbeit nicht näher eingegangen, andererseits steht aber auch die Kleine Magellansche Wolke nicht im Mittelpunkt. Letztere kann zwar als Zwerggalaxie identifiziert werden, aber erstens werden ihre Eigenschaften stark aufgrund Interaktionen mit der Großen Magellanschen Wolke, aber auch mit der Milchstraße beeinflusst, und zweitens weichen auch die Parameter intrinsischer Natur von den anderen Begleitern, die eben wie erwähnt alle dem Typ *dSph* zu zuschreiben sind, ab. Auch die Canis Major Zwerggalaxie wird nicht weiters erwähnt, da noch immer Unsicherheit besteht, ob es sich bei diesem Objekt um ein in sich geschlossenes Gebilde oder doch etwa nur eine Dichteanammlung der Milchstraße handelt. Sei es auch der Fall, dass diese Galaxie ein eigenes Objekt ist, so ist sie, aufgrund ihrer starken Verformung, bedingt durch die enge Interaktion mit der Milchstraße, kein geeignetes Beispiel für die, in dieser Arbeit, betrachteten Systeme.

Warum jetzt somit nur *dSph* das Gefüge der Satellitengalaxien um die Milchstraße bilden, könnte mit den Modellen, die den Ursprung der *dSph* erklären sollen:

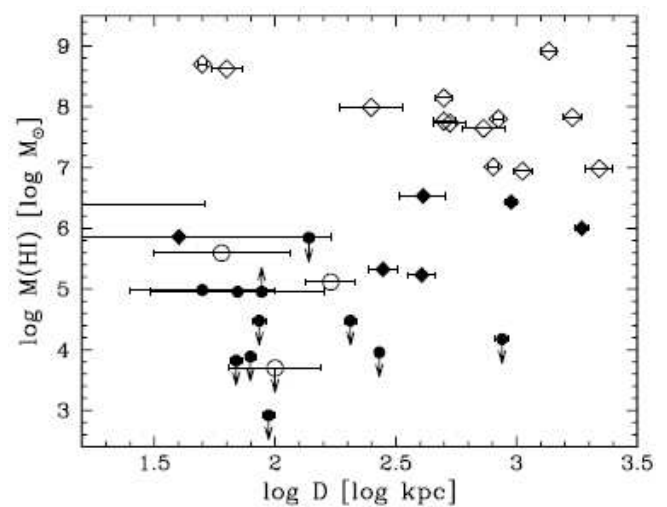
- Gezeitenkräfte und Interaktionen
- Prozesse die in Verbindung mit der Entstehung kleiner Systeme stehen, insbesondere das Lambda-CDM-Modell betreffend
- Fragmente, die durch Kollision zweier größerer Galaxien freigesetzt werden

beziehungsweise eine Kombination in jedweder Form dieser drei Möglichkeiten und den Prozessen, die den Gasverlust erklären, begründet werden. So ist es am wahrscheinlichsten, dass eine Kombination von Gasverlust durch Staudruck (*Ram-Pressure Stripping*) und eine Kollision, sei es nun eine Verschmelzung oder nur ein naher Vorbeiflug einer großen, gasreichen Galaxie mit unserer Milchstraße und die daraus resultierenden Gezeitenfragmente, die Ursprünge der jetzigen Satellitengalaxien darstellen (Grebelt et al. 2003 und Referenzen darin). Ein Kandidat für eine solche Begegnung könnte eventuell M33 sein, die mittlerweile mit M31 assoziiert wird.

Jedoch muss beachtet werden, dass es bei allen *dSph* eine starke Sternentstehung in frühen Entwicklungsstadien gegeben und damit die Galaxie anfällig für einen Verlust des verbliebenen Gases gemacht hat. Von numerischen Modellen aber ausgehend, kann dieser Vorgang nicht komplett dafür verantwortlich sein. Sowohl das Fehlen von Anzeichen in jeder *dSph* für einen Sternentstehungsausbruch, der schlagartig alles Gas aus der Galaxie hinaus blasen konnte, als auch das Ansammeln eines zu berücksichtigenden Wertes an Metallen in den *dSph*, bewiesen durch Untersuchungen der Sternentstehungsgeschichte, untermauern dies. Weiters kann auch nicht das ganze Gas zu Sternen gebildet werden, da aus Überlegungen und Berechnungen, die Effizienz der Sternentstehung üblicherweise zwischen 1 und 9% liegt. Dieser Wert kann höchstens auf einen Wert zwischen 30 und 50% steigen, wenn man nur von einer Bildung massearmer Sterne ausgeht. Schlussendlich muss auch die geringe Stärke des Gravitationspotentials mit einberechnet werden, da diese einen Gasverlust durch Winde begünstigt, und somit den Gasgehalt ebenfalls indirekt beeinflusst. Auch in Betracht gezogen werden kann, dass Gas einfach nicht gefunden wurde, weil es in einem ionisierten Zustand ist und somit noch nicht beobachtet wurde.

Dies würde aber wiederum zu einer geringeren Dichte des Gases führen und sein Entweichen wiederum begünstigen.

Eine Veranschaulichung zur Erklärung bietet Abbildung 2, in der die Masse des HI-Gases aller Zwerggalaxien in der Lokalen Gruppe gegen die Distanz der nächstliegenden, massereichen Galaxie, Milchstraße oder M31, aufgetragen wird. Wie man deutlich erkennen kann, sind *dSph*, die eben eine geringes Aufkommen von neutralem Wasserstoffgas aufweisen, durch ausgefüllte Kreise dargestellt, maximal 250 kpc entfernt. Nur größere und massereichere Galaxien konnten binnen dieser Weite ihr Gas behalten. Dieser Umstand wird auch aus Tabelle 1 ersichtlich, in der die bekannten Satellitengalaxien der Milchstraße, eben bis auf die Magellanschen Wolken, ausschließlich *dSph* und *UFD*, sich innerhalb dieser Distanz befinden. Ausnahmen, auf die nicht näher eingegangen wird, sind die *dSph* Tucana und Cetus, die sich weder nahe an M31, noch der Milchstraße befinden.



**Abbildung 2.** Die Masse des HI-Gases in Abhängigkeit der Distanz zur nächstliegenden massereichen Galaxie. Die *dSph* werden durch ausgefüllte Kreise dargestellt. (Grebelt et al. 2003)

Neben den *dSph* wurden in letzter Zeit, wie bereits erwähnt, immer mehr leuchtschwache Objekte gefunden, die *UFD*, die ebenfalls Satelliten der Milchstraße sind. Diese sind aufgrund ihrer geringen Helligkeit und mitunter geringen Distanz zur Milchstraße sehr schwer herauszufiltern und benötigen eine genauere Untersuchung, um ausschließen zu können, dass es sich möglicherweise nur um Dichteanfasslungen innerhalb eines Gezeitenstromes und somit gar kein eigenständiges System handelt (Tolstoy et al. 2009). Zu dieser Kategorie zählt man zum Beispiel unter anderem die Galaxien Ursa Major I, Ursa Major II, Boötes I, Leo IV und Leo V.

Tab.1 listet nun die zur Zeit bekannten Begleiter der Milchstraße, unterteilt in *dSph* und *UFD*, auf. Angegeben sind die galaktozentrischen Koordinaten, die Distanz zur Milchstraße in kpc und auch die absoluten Helligkeiten  $M_V$ , um nochmals die geringen Helligkeiten zu betonen und somit auch Abbildung 1 zu verifizieren.

Einige der Zwerggalaxien verdienen weiters eine eingehendere Betrachtung. So zeigt Hercules, obwohl diese Galaxie doch etwas weiter entfernt ist, starke Anzeichen von Gezeitenwechselwirkungen, was auf einen exzentrischen Orbit hindeuten könnte.

| Name   | $l_{MW}$ | $b_{MW}$ | $R_{MW}$ | $M_V$   |
|--------|----------|----------|----------|---|
| Sgr    | 8.8      | -21.5    | 16.0     | -15.0 <sup>a</sup>                                |
| LMC    | 269      | -33.3    | 50.2     | -18.5 <sup>b</sup>                                |
| SMC    | 292.2    | -47.1    | 56.9     | -17.1 <sup>b</sup>                                |
| UMi    | 114.5    | 43.1     | 68.1     | -9.0 <sup>a</sup>                                 |
| Scu    | 237.5    | -82.3    | 79.2     | -11.2 <sup>a</sup>                                |
| Dra    | 93.6     | 34.7     | 82.0     | -8.6 <sup>a</sup>                                 |
| Sex    | 237.1    | 40.5     | 89.2     | -9.5 <sup>b</sup>                                 |
| Car    | 255.1    | -21.8    | 102.7    | -9.3 <sup>a</sup>                                 |
| For    | 230.5    | -63.8    | 140.1    | -13.2 <sup>a</sup>                                |
| Leo II | 216.5    | 65.5     | 207.7    | -9.8 <sup>a</sup>                                 |
| Leo I  | 223.9    | 48.1     | 254.0    | -11.9 <sup>a</sup>                                |
| UMa II | 159.6    | 30       | 36.5     | -4.2±0.5 <sup>c</sup>                             |
| Wil I  | 164.7    | 47.7     | 43.0     | -2.7±0.7 <sup>c</sup>                             |
| CBe    | 201.8    | 75.1     | 45.2     | -4.1±0.5 <sup>c</sup>                             |
| Boo II | 348.1    | 78.4     | 47.6     | -2.4±0.7 <sup>c</sup>                             |
| Boo I  | 356.6    | 77.5     | 57.6     | -6.3±0.2 <sup>c</sup>                             |
| UMa I  | 162      | 50.8     | 104.9    | -5.5±0.3 <sup>c</sup>                             |
| Her    | 30.9     | 38.8     | 134.2    | -6.6±0.3 <sup>c</sup>                             |
| CVn II | 132.7    | 80.9     | 150.7    | -4.9±0.5 <sup>c</sup>                             |
| Leo IV | 260      | 56.2     | 160.6    | -5.0 <sup>+0.6</sup> <sub>-0.5</sub> <sup>c</sup> |
| Leo V  | 256.8    | 58.1     | 180.8    | -4.3±0.5 <sup>d</sup>                             |
| CVn    | 86.9     | 80.2     | 219.8    | -8.6 <sup>+0.2</sup> <sub>-0.1</sub> <sup>c</sup> |

**Tabelle 1.** Die momentan bekannten Satellitengalaxien der Milchstraße: In der ersten Spalte erscheint der Name der Galaxie, in der zweiten und dritten die Länge und respektive Breite in galaktischen Koordinaten, in der vierten die Entfernung in kpc und in der fünften die absoluten Helligkeiten im V-Band. Die Objekte über den Querstrich stellen die *dSph* dar, die darunter die *UDF*, beide Typen jeweils geordnet nach Entfernung zur Milchstraße. Der Gesamtheit halber werden auch die Magellanschen Wolken angeführt. Koordinaten und Distanzen aus Metz et al. (2007, 2009), Helligkeiten aus <sup>a</sup>Tolstoy et al. (2009); <sup>b</sup>Grebel et al. (2003); <sup>c</sup>Martin, De Jong, Rix (2008); <sup>d</sup>Belokurov et al. (2006)

Auch Sculptor zeigt in Radioaufnahmen eine Besonderheit. So zeigt diese Galaxie im 21cm-Bereich eine bimodiale Verteilung von neutralem Wasserstoffgas in den äußersten Bereichen mit einer Säulendichte von  $2.2 \cdot 10^{19} \text{ cm}^{-2}$ . Während die Position und radiale Geschwindigkeit des Gases auf eine Verknüpfung mit der Zwerggalaxie hinweisen, könnte es trotzdem einer größeren Struktur angehören, welche doch in keiner Verbindung mit Sculptor steht (Grebel et al. 2003). Wäre das HI-Gas jedoch doch mit dem Satelliten assoziiert, so könnte dieses eventuell als „Vorratstanks“ dienen und so einen Faktor bezüglich der Sternentstehungsgeschichte spielen (Mateo 1998).

Weiters nennenswert sind Leo IV und Leo V, welche sowohl räumlich, als auch die Geschwindigkeit betrachtend, sehr eng aneinander liegen und somit beide möglicherweise Überreste eines Gezeitenereignisses sind. Außerdem sind die Populationen dieser zwei Zwerggalaxien sehr metallarm, was dahingehend interpretiert werden kann, als dass beide aus den äußeren Gebieten der Galaxie stammen, die Opfer dieser Interaktion geworden ist.

Besonders hervorzuheben sei auch Fornax. Diese Galaxie besitzt wie alle Satellitengalaxien alte und, wie die meisten auch, Populationen mittleren Alters, jedoch auch von allen bis heute gefundenen Begleitern der Milchstraße, die jüngste, da die Sternentstehung erst vor 0.1 - 0.2 Gyrs stoppte. Grund dafür könnte sein, dass Fornax gar kein Satellit der Milchstraße ist, sondern sich auf einem exzentrischen Orbit um diese befindet und momentan sich ihrer nächsten Position der Milchstraße nähert (Grebel et al. 2003). Weiters scheinen Fornax und die Kleine Magellansche Wolke auch bezüglich des dominierenden Alters der Sterne und der chemischen Eigenschaften sehr ähnlich zu

sein, mit dem Unterschied eben, dass in letzterer noch Gas enthalten ist und somit eine aktive Sternentstehung existiert.

Auch Sagittarius sollte nicht unerwähnt bleiben, da diese Galaxie mit M54 einen extragalaktischen Kugelsternhaufen als Kern haben soll. Weiters besteht auch die Möglichkeit, dass diese Zwerggalaxie, sofern sie es noch nicht ist, bald eine sichtbare Interaktion mit der Milchstraße erfahren kann, so wie es für Ursa Major II, welche sich möglicherweise hinter einer Hochgeschwindigkeitswolke befindet, und Canis Major bereits der Fall sein dürfte beziehungsweise ist. Diese gestörten oder sogar bereits zerrissenen Zwerggalaxien sollten als Resultat einen langlebigen, 1-2 Gyrs überdauernden (Stern-)Strom bilden, ähnlich dem Magellanschen Strom.

Dies legt auch die Idee nahe, dass möglicherweise der Halo der Milchstraße aus in der Vergangenheit einverleibten Zwerggalaxien besteht. Deutliches Gegenargument gegen diese Theorie ist jedoch, dass die Sternpopulationen der heutigen Satelliten nicht zu jenen des Halo passen. Andererseits wiederum haben die gegenwärtigen Begleiter der Milchstraße bis zum heutigen Datum überlebt, was somit die Beweisführung etwas erschwert.

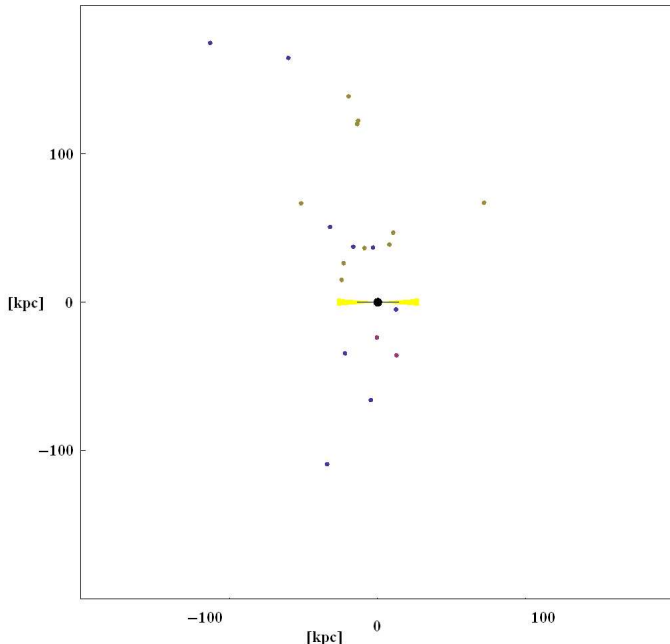
#### 4. Die Verteilung der Satellitengalaxien

Auffällig ist nun, dass bei weitem keine isotrope Verteilung der Satellitengalaxien vorliegt, was, von dem Lambda-CDM-Modell ausgehend, erwartet wird. Dieses Modell beschreibt nach heutiger Kenntnis die Entwicklung des Universums bislang am besten, da es, unter anderem, die kosmische Hintergrundstrahlung, die beschleunigte Expansion des Universums gemäß des Hubble-Gesetzes und auch die Entstehung größerer Strukturen erklären kann. Lambda,  $\Lambda$ , steht hierbei für die kosmologische Konstante, die Energiedichte des Vakuums, in anderen Worten für die Dunkle Energie, wird in diesem Weltmodell als (noch) konstant angesehen und ist vereinfacht gesagt, verantwortlich für die beschleunigte Expansion des Universums. CDM wiederum bezeichnet die Abkürzung für *Cold Dark Matter* und bedeutet, dass die Dunkle Materie zum Zeitpunkt der Entstehung der Sterne und Galaxien nicht relativistische Geschwindigkeiten aufwies. Die dimensionslosen Dichteparameter sind wiederum die Quotienten der Dichten der jeweiligen Materie- oder Energieform und der kritischen Dichte, also jenen Wert für die Energiedichte, den man erhält, wenn die Form des Universum einer euklidischen Geometrie entspricht. Addiert man nun alle Dichteparameter zusammen, ergibt sich eine Summe gleich 1, was somit ein flaches Universum als Resultat hat, also eines, in der die euklidische Geometrie gültig ist.

Basierend nun auf diesem kosmologischen Modell, das eben davon ausgeht, dass Dunkle Materie den Bildungsprozess gravitativer Systeme dominiert und die baryonische Materie sich sozusagen nur daran orientiert, sollen die Strukturen der Verteilung der Dunklen Materie in galaktischen Maßen ein Abbild der Verteilung in galaktischen Haufen sein. Resultierend daraus sollte somit die Verteilung nicht nur gleichmäßig, also sphärisch sein, sondern die Milchstraße etwa 500 Satelliten mit Massen  $M \geq 10^8 M_{\odot}$  besitzen (Moore et al. 1999).

Im Gegensatz dazu, befinden sich die bis heute gefundenen Satelliten alle in einer relativ flachen Scheibe. Die Dicke dieses Gefüges beträgt rund 20kpc, es steht nahezu normal, nämlich rund  $88^{\circ}$  zur Ebene der Milchstraße und durchdringt diese nur in rund 8kpc Entfernung vom galaktischen Zentrum. (Metz, Kroupa, Jerjen 2007). In dieser Arbeit wurde die Verteilung mithilfe der Koordinaten aus Tabelle 1 erneut untersucht und eine um die galaktische z-Achse rotierende Animation, welche eine

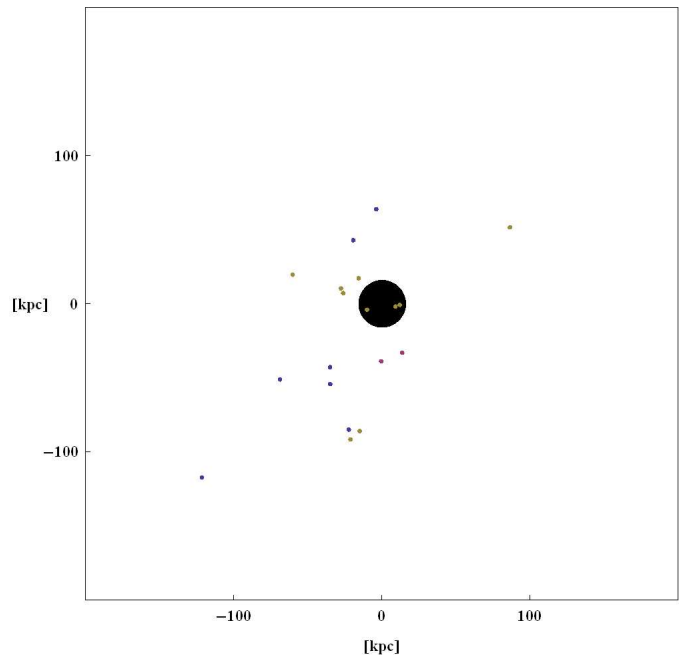
edge-on Ansicht auf die Scheibe der Milchstraße bietet, ers Abbildung 3 zeigt einen Einzelausschnitt dieser Anim Abbildung 4 eine volle Ansicht der Milchstraße mit Stand galaktischer Nordpol. Zusätzlich wurde in Abbildung 3 als be Region, jenes Gebiet ausgewiesen, dass durch die galaktische Scheibe mit einem Winkel von  $\alpha < |5^\circ|$  verdeckt wird. Als Punkte werden die „klassischen“ *dSph* dargestellt, als grün neuentdeckten *UFD* und als violette die Magellanschen Wo



**Abbildung 3.** Edge-On Ansicht auf die Scheibe der Milchstraße. Blaue Punkte markieren die länger bekannten *dSph*, grüne die kürzlich entdeckten *UFD* und violette die Magellanschen Wolken. Die orange Region ist das durch die galaktische Scheibe verdeckte Gebiet mit einem Winkel von  $\alpha < |5^\circ|$ . Deutlich erkennbar gibt sich die anisotrope Verteilung der Satellitengalaxien

Der Grund für den Mangel und die Verteilung der Satelliten ist noch nicht gefunden, dafür gibt es aber umso mehr Ansätze, die sich nicht selten komplett ausschließen. Einer der nächstliegenden für diese Erscheinungsform, neben dem Verdecken von Objekten durch die galaktische Scheibe, sollen in der Natur der Aufnahmeregion des Sloan Digital Sky Survey liegen, da dieser bekanntlich (mit wenigen Ausnahmen) nur die Region um den galaktischen Nordpol detektiert und somit die geringe Abdeckung der Himmelsdurchmusterung für den Mangel an Galaxien verantwortlich ist. Hinzu kommt, dass aufgrund des Beobachtungskegels, die Chance, eine Satellitengalaxie zu finden, umso niedriger ist, umso kleiner die galaktische Breite ist. Diese Annahme ist zwar prinzipiell richtig, wurde aber in einer Studie von Metz, Kroupa, Jerjen (2009a) als nicht relevant eingestuft, da größere Regionen existieren, die zwar untersucht wurden, ohne aber eine Galaxie preiszugeben, besonders bei größeren Distanzen  $R > 100kpc$ .

Eine weitere Erkenntnis ist, dass die Scheibenform von den Unsicherheiten in den Distanzmessungen nicht relevant beeinflusst wird und, was besonders wichtig ist, dass eine 99.5% Wahrscheinlichkeit besteht, dass die bis heute gefundenen Satellitengalaxien, seien es nun *dSph* oder *UFD*, nicht aus einer isotropen Verteilung stammen (Metz, Kroupa, Jerjen 2007).



**Abbildung 4.** Ansicht auf die Scheibe der Milchstraße vom Standpunkt des galaktischen Nordpols. Markierungen bezüglich der Galaxietypen haben dieselbe Bedeutung wie in Abb.3. Auch in diesem Plot kann man eine anisotrope Verteilung erkennen.

Es kursieren zwar etliche verschiedene Modellierungen des Lambda-CDM-Modells, um dieses Erscheinungsbild zu erklären, jedoch gibt es auch Ansätze, die sich nicht darauf berufen, wie jenes, das den Ursprung der Satellitengalaxien und damit der Scheibe, in der sich jene befinden, in Gezeitenwechselwirkungen hat. Demnach betreffen Zusammenhänge zwischen kinematischen Daten und radialer Geschwindigkeit nicht nur die Verteilung, sondern deuten auch auf eine gemeinsame Bewegung der Satelliten hin, was somit bedeutet, dass es sich bei der Scheibe um ein rotationsgestütztes Gebilde handeln könnte. So soll es zu einer Interaktion zwischen der jungen Milchstraße und einer gasreichen Galaxie gekommen sein, die als Resultat herausgeschleuderte Gezeitenfragmente hätte, die sich mit der Zeit zu den heute bekannten Zwerggalaxien formten. Aufgrund der Drehimpulserhaltung würden sich diese in einer Ebene, der heute sichtbaren Scheibe, aufhalten (Metz, Kroupa, Jerjen 2007; Metz et al. 2009b).

Egal welchen Ansatz man nun vertreten mag. Die Frage, die man sich stellen muss, ist ob, die Zwerggalaxien von Dunkler Materie dominiert sind oder nicht. Hohe  $M/L$ -Werte deuten darauf hin, dass dies der Fall sein müsste. Jedoch werden als Grundlage für diese Interpretation unter anderem angenommen, dass sich die Zwerggalaxien im Virialgleichgewicht befinden, sphärisch symmetrisch sind und auch eine isotrope Geschwindigkeitsdispersion besitzen. Beobachtungen zeigen aber öfters andere Umstände wie durch Gezeitenkräfte deformierte Systeme und eine anisotrope Geschwindigkeitsdispersion.

Weiteren Aufschluss über diese Problemstellung kann möglicherweise unter anderem das Stromlo Missing Satellite Survey bieten, dass demnach auch niedrigere galaktische Breiten untersuchen wird. Diese Suche soll die ganze südliche Hemisphäre abdecken und eine Helligkeitsgrenze besitzen, die 0.5-1mag unter jener des SDSS liegt (Jerjen 2010). Dadurch könnten etliche neue Galaxien, naheliegenderweise insbesondere lichtschwache,

also *UFD* entdeckt werden. Würde sich herausstellen, dass diese doch eine gleichmäßige Verteilung besitzen, müsste man sich natürlich die Frage stellen, ob diese dann eventuell aus einem anderen Ursprung als die helleren *dSph* stammen, und warum sich die leuchtkräftigeren Satellitengalaxien nichtsdestotrotz in einer Scheibe befinden. Im Gegensatz dazu, würde natürlich ein Auffinden von Positionen weiterer Galaxien ausschließlich in der Scheibe das Lambda-CDM-Modell vor weitere Rätsel stellen.

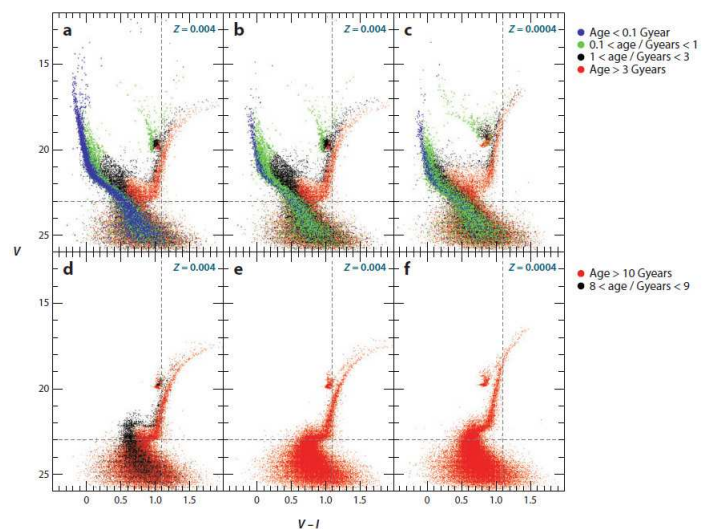
Zum Abschluss dieses Themas sei zu sagen, dass möglicherweise ein tieferer Blick in das Universum etwas Klärung bringen könnte, indem man die Verteilung rund um andere größere Galaxien betrachtet. So zeigt zwar M31 ebenfalls eine anisotrope Verteilung, weiter entfernte Galaxien jedoch eine gleichmäßige. Es sollte aber erwähnt werden, dass die Stichprobengröße dieser weit entfernten Systeme sehr klein ist, und diese möglicherweise gar nur einen einzigen Satelliten enthält.

## 5. Die Sternentstehungsgeschichte der Satellitengalaxien

Wie bereits in der Einleitung erwähnt, liegt der zweite Fokus dieser Arbeit auf der Sternentstehungsgeschichte der Zwergsatellitengalaxien der Milchstraße. Während man früher noch mit dem Vergleichen von theoretischen und beobachteten Isochronen, also im Prinzip ein Abgleichen der Hertzsprung-Russel-Diagramme, begonnen hat, die Geschichte der Sternentstehung zu entschlüsseln, ist man heute übergegangen zu der Synthetischen-C(olor)M(agnitude)D(iagram)Methode. Grund hierfür ist, dass ersteres nur passend ist für einfache, astronomisch gesehen, zeitgleich entstandenen Populationen, wie sie in Kugelsternhaufen auftreten, aber nicht für jene, die in Galaxien vorzufinden sind. Basis für die CDM-Methode sind photometrische Daten, welche dank neuer Teleskope und Technologien mittlerweile von einzeln aufgelösten Sternen aufgenommen werden können. Mithilfe dieser Daten ist es eben nun möglich ein Farben-Helligkeits-Diagramm der Galaxie zu erstellen und aus Interpretation der Lage und Anzahl der aufgenommenen Sterne in diesem Diagramm, Schlüsse nicht nur bezüglich der Sternentstehung, aber auch des Alters, der Metallizität oder auch der Initial-Mass-Function zu ziehen (Tolstoy et al. 2009). Gesichert wird diese Interpretation dann schlussendlich durch einen Vergleich mit einem aus Modellberechnungen erstellten Diagramm, daher auch das Synthetisch im Namen, das durch verschiedene Anfangsbedingungen wie die Wahl des Sternentstehungsgesetzes oder der Initial-Mass-Function variiert werden kann, um somit die beste Übereinstimmung mit den gefundenen Daten zu gewährleisten.

Die Genauigkeit, mit der nun die Evolution der jeweiligen Galaxie betrachtet werden kann, hängt nun davon ab, welche Regionen und Merkmale sichtbar sind im Diagramm. Ideal wäre es, immer den ältesten, der möglicherweise mehreren, Abknickpunkt der Hauptreihe zu identifizieren. Damit könnte man eventuell sogar die Sternentstehungsgeschichte der betrachtenden Galaxie über die gesamte Hubble-Zeit bestimmen. Ist dies nicht möglich, was im Moment oft der Fall ist, so kommen andere Indikatoren zum Zug. So besitzen Sterne am Horizontalast, wie zum Beispiel RR Lyr Variable, ein Alter von mindestens 10 Gyrs, Sterne im Red Clump eines zwischen 1-10 Gyrs, Objekte am Asymptotischen Riesenast und Roten Riesenast sind älter als 1 Gyr und Rote Superriesen weisen ein Alter zwischen 10-500 Gyrs auf. Diese ganzen Altersangaben sind aber natürlich mit Vorsicht

zu genießen, da es generell oft zu Überlappungen mehrerer Sternpopulationen kommt, wie zum Beispiel bei Objekten im Red Clump und am Horizontalast. Weiters besteht auch bei AGB-Sternen eine Unsicherheit bezüglich des Alters in Form des Faktors 2-3 und auch RGB-Sterne zeigen bei einer gegebenen Metallizität ein breites Altersspektrum in einem schmalen Bereich im Diagramm. RGB-Sterne sind aber trotz ihrer Unsicherheit auch dahingehend wichtig, als dass ihr Alter und ihre damit verbundenen Eigenschaften sehr eng mit der chemischen Entwicklung verknüpft sind. Falls keine spektroskopischen Daten vorhanden sind, kommt schlussendlich auch noch die Alters-Metallizitäts-Degeneration erschwerend hinzu. Diese besagt, dass eine sehr ähnliche spektrale Energieverteilung besteht, wenn man das Alter eines Objektes um den Faktor 3 erhöht und zugleich die Metallizität halbiert. Somit können nur stellare Evolutionsmodelle für die Metallizitätsbestimmung herangezogen werden (Mateo 1998; Tolstoy et al. 2009). Dieser Effekt kann aber vermindert werden, wenn man mehrere Indikatoren zur Verfügung hat und diese mit genügend großer Genauigkeit misst (Grebel et al. 2003). Generell gilt aber zu sagen, dass die Auflösung der Indikatoren bedauerlicherweise mit zunehmenden Alter rasch abnimmt, was zum Beispiel dann auch dazu führen kann, dass eine Sternentstehung als lang und kontinuierlich interpretiert wird, obwohl diese aus mehreren kurzen Ausbrüchen bestand, aber eben nicht aufgelöst werden kann.



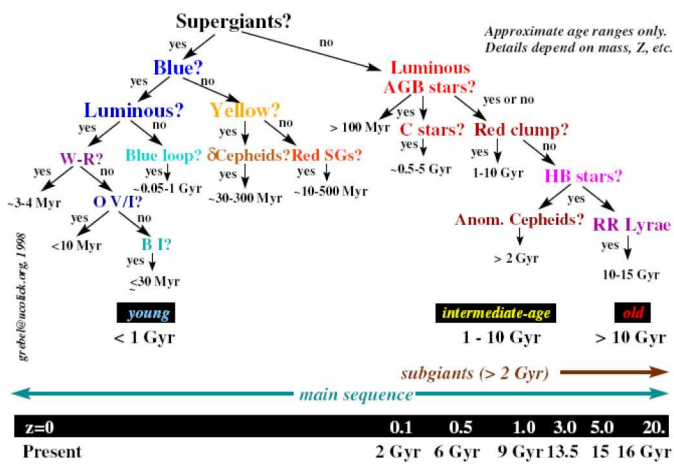
**Abbildung 5.** Farben-Helligkeits-Diagramm für eine hypothetische Galaxie mit verschiedenen Sternentstehungsgeschichten und Metallizitäten. Deutlich erkennbar sind die verschiedenen evolutionären Phasen, wie auch, dank der Markierungen, das Überdecken der verschiedenen Populationen und welche Auswirkungen die Alters-Metallizitäts-Degeneration hat. (Tolstoy et al. 2009)

Abbildung 5 zeigt nun für eine hypothetische Galaxie verschiedene Farben-Helligkeits-Diagramme in Abhängigkeit der Metallizität  $Z$  und der Sternentstehungsrate. In allen Diagrammen ist die Anzahl der Beispielsterne, 50000, gleich und ebenso die Initial-Mass-Function. Im ersten Plot, Abbildung 2a, sind Sterne eines jeden Alters erkennbar und damit auch alle evolutionären Phasen, wie AGB- und RGB-Sterne und auch der Abknickpunkt der Hauptreihe, mit einer deutlich erkennbaren starken Sternentstehung in den letzten 100 Millionen Jahren. Abbildung b und c zeigen beide jeweils eine Sternentstehungsgeschichte mit einer konstanten, kontinuierlichen Sternentstehungsrate mit dem einzigen Unterschied,



dass Abbildung 2c mit einem Zehntel der Metallizität erstellt wurde, was deutlich die Alters-Metallizität-Degeneration veranschaulicht. Die unteren Diagramme legen generell alle eine deutlich ältere Sternpopulation dar. So lässt Abbildung 2d zwei überlappende Sternpopulationen erkennen, eine mit einer konstanten Sternentstehungsrate vor 13-10 Gyrs, die andere vor 9-8 Gyrs, was wieder verdeutlicht, wie schwer es sein, kann Sternpopulationen im Diagramm zu trennen. Abbildung 2e und f illustrieren schlussendlich eine einfache Population mit einer Sternentstehung, die vor 13 Gyrs angefangen und vor 10 aufgehört hat, mit der Differenz, dass in 2f wieder die Metallizität um ein Zehntel reduziert wurde (Tolstoy et al. 2009).

Abbildung 6 zeigt nochmals zusammengefasst einen Entscheidungsbaum, der veranschaulicht, welche Objekte charakteristisch für ein bestimmtes Alter sind. Aufgrund der beendet Sternentstehung in den Satellitengalaxien der Milchstraße, mit Ausnahme der Kleinen Magellanschen Wolken, sind klarerweise junge Objekte kaum bis gar nicht zu finden (Grebel 1999).

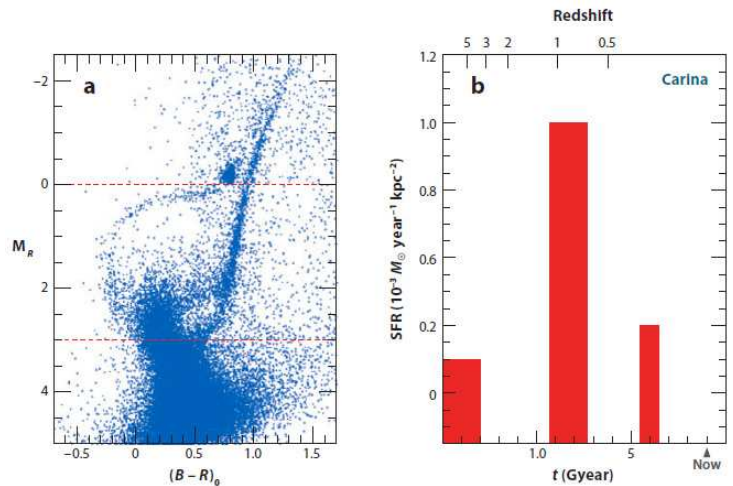


**Abbildung 6.** Entscheidungsbaum um die Sternentstehungsgeschichte einer Galaxie anhand charakteristischer Objekte zu bestimmen. (Grebel 1999)

Hat man nun eine Sternentstehungsrate zu jedem Zeitpunkt und ebenso Häufigkeiten ermittelt, kann man, um die Sternentstehungsgeschichte und chemische Entwicklung zu veranschaulichen, sogenannte Populationsboxen erstellen. Diese sind 3D-Diagramme, deren Achsen Zeit, Häufigkeit und Sternentstehungsrate entsprechen und somit Aussagen über die Evolution einer Galaxie treffen (Mateo 1998).

Zu welchen Ergebnissen kommt man nun bezüglich der Satellitengalaxien der Milchstraße, mit Ausnahme der Magellanschen Wolke? Generell gilt zu sagen, dass keine Sternentstehungsgeschichte einer Galaxie einer anderen gleicht, sondern diese sehr komplex und variierend sind und dass wohl keine Galaxie, mit Ausnahme möglicherweise von Ursa Minor, ausschließlich Objekte enthält, die älter als 10 Gyrs sind. Weiters scheint es, dass alle *dSph* keine Sternentstehung in den letzten 0.1 Gyrs oder sogar noch länger durchlebt haben. Beispielsweise fanden bereits 1983 Mould und Aaronson, dass Carinas dominierende Sternpopulation mit 4-8 Gyrs ein mittleres Alter aufweist und somit schon ein Hinweis darauf war, dass *dSph* nicht gänzlich aus alten Sternen bestehen kann, wie es bei Kugelsternhaufen der Fall ist. Mittlerweile konnte man mithilfe der CMD-Methode drei verschiedene Abknickpunkte der Hauptreihe identifizieren, in Abbildung 7a gezeigt, und dar-

aus die Sternentstehungsrate über die Zeit ableiten, was in Abbildung 7b veranschaulicht wird.



**Abbildung 7.** Abb. 7a zeigt das FHD von Car mit den drei verschiedenen Abknickpunkten, 7b die daraus resultierende Sternentstehungsgeschichte. (Tolstoy et al. 2009)

Weiters konnte man auch zeigen, dass bei einigen der Zwerggalaxien, wie Leo II oder Sculptor, die Sternentstehung nicht gleichmäßig vonstatten gegangen ist, was sich durch einen radialen Populationsgradienten äußert (Mateo 1998).

Auch konnten die *dSph* oberflächlich in zwei Gruppen, alte Galaxien und Objekte mit größtenteils Sternen mittleren Alters, unterteilt werden, auch wenn grundsätzlich zu sagen ist, dass natürlich alle eine Population mit einem Alter größer als 10 Gyrs besitzen und die Differenzierung nur dadurch entsteht, wie dominant diese ist. So zeigen alte *dSph* Sterne die sich am Horizontalast befinden, aber nicht beispielsweise im Red Clump. Begleiter der Milchstraße, die unter diese Kategorie fallen sind etwa Draco, Ursa Minor, Sextans und Sculptor. Trotzdem scheinen diese Objekte um durchschnittlich 1-2 Gyrs jünger als Kugelsternhaufen zu sein, auch wenn es, ausgehend vom ältesten Abknickpunkt der Hauptreihe, schwer fällt, einen Altersunterschied zwischen den Populationen dieser beiden Objekte zu finden. Jedoch weisen diese Galaxien im Vergleich zu Haufen auch eine größere Breite bezüglich Alter und Metallizität auf.

Galaxien, die wiederum von Sternen mittleren Alters dominiert werden, zeigen Objekte, die großteils jünger als 10 Gyrs sind. Beispiele hierfür sind Leo II, Carina oder auch Fornax, wobei bei letzterer die Sternentstehung erst vor relativ kurzer Zeit, 100-200 Myrs, stoppte. Die meisten von ihnen zeigen eine konstante Sternentstehung mit Ausnahme von Carina, was auch deutlich in Abbildung 7b zu sehen ist (Grebel & Gallagher 2004).

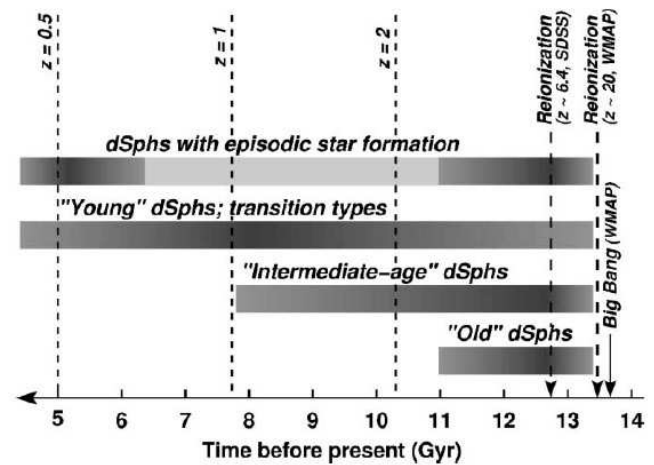
In *UFD* wird aufgrund der Schwierigkeit des Bestimmens der zugehörigen Objekte, der Schwerpunkt auf das Finden von RR Lyrae Sternen beziehungsweise Sternen auf dem Horizontalast gesetzt. Hinzu kommt erschwerend, dass viele dieser Systeme gestört sind.

Bezüglich der Kleinen Magellanschen Wolke gilt zu sagen, dass bedauerlicherweise noch nicht so viele Studien wie erwartet zur Verfügung stehen. Dennoch gibt es natürlich bereits Untersuchungen und so wurden beispielsweise mehrere hundert Haufen mit einem Alter zwischen 11 Gyrs und wenigen Millionen Jahren gefunden, was natürlich auch da-

hingehend zu verstehen ist, dass die Kleine Magellansche Wolke, die am ehesten als eine *dIrr* zu klassifizieren ist, demnach auch noch genug Gasgehalt besitzt, um eine aktive Sternentstehung zu zeigen. Durch neue Instrumente ist, beziehungsweise wird es möglich sein, sowohl die ältesten Abknickpunkte der Hauptreihe zu beobachten, und somit den Beginn der Sternentstehungsgeschichte, als auch Sterne die sich noch nicht auf der Hauptreihe befinden, was dadurch nochmals interessanter wird, als dass diese in einer Umgebung gebildet wurden und werden, die eine deutlich geringere Metallizität aufweist, als in unserer Milchstraße. Nichtsdestotrotz wird das Alter des Großteils der Sterne auf 6-9 Gyrs geschätzt, mit einer gleichmäßigen Verteilung (Tolstoy et al. 2009).

Die Frage aber, die trotz aller Ergebnisse noch immer besteht, lautet: Woher kam das Gas für die Sternentstehung in früheren Zeiten? Einerseits könnte man behaupten, dass das Gas inneren Ursprungs war, und wir einfach „zu spät“ beobachten und somit nur noch das Resultat sehen. Andererseits kann man der Meinung sein, dass das Gas aus einer externen Quelle kommt und akkretiert wurde. Beide Anschauungen werfen aber neue Fragen auf. So stellt sich dann bezüglich der ersten Annahme die Frage, warum die *dSph* keine Gasanreicherung durch Supernovae und die Bildung planetarischer Nebel erfahren, bezüglich der zweiten woher dieses externe Gas kommt. Eine Antwort auf die Fragen könnten eventuell die Vorratstanks sein, die um Sculptor gefunden wurden (Mateo 1998).

Auf jeden Fall kann davon ausgegangen werden, dass die Reionisation des Universums keine Auswirkung auf den Gasgehalt und damit direkt auf die Sternentstehung hatte. Die Epoche der Reionisation bezeichnet jenen Zeitraum, in dem die ersten Strahlungsquellen des Universums, das durch die Rekombination neutrale Medium erneut ionisierten. Dieser Prozess wird in mehrere Phasen unterteilt, abhängig von der Ausdehnung der Ionisationsfronten, und hängt auch vom betrachteten Element ab. So begann die Ionisation des neutralen Wasserstoffes bei einer größeren Rotverschiebung, da im Vergleich zu neutralem Helium, eine geringere Energie nötig ist, die bekannten 13.6eV, um diesen zu ionisieren. Der Zeitraum der Reionisation wird in dieser Arbeit auf einen Zeitraum zwischen Rotverschiebung  $z \approx 6.4$  und  $z \approx 20$  gelegt. Einerseits aufgrund der Nähe und der damit verbundenen Möglichkeit, die Sterne einzeln aufzulösen, was somit eine genaue Altersbestimmung gewährleistet, und andererseits aufgrund der richtigen Massen, die laut dem Lambda-CDM-Modell die Systeme besitzen, die die erste Sternentstehung des Universums aufweisen, sind die Zwerggalaxienbegleiter der Milchstraße die idealen Objekte, um den Einfluss der Reionisation zu untersuchen. Laut Modell sollte auf eine Sternentstehung, aus der ein Großteil der Sternpopulation stammen soll, eine deutliche Pause folgen und erst dann eine erneute Sternbildung möglich sein. Grund hierfür sollte eben die Reionisation sein, die ein Behalten des Gases in massearmen Galaxien, aufgrund des Temperaturanstiegs erschwert bis unmöglich macht. Jedoch ist dieser Effekt, mit Ausnahme von Carina, siehe Abbildung 7, bei keiner Sternentstehungsgeschichte der *dSph* zu beobachten, was darauf schließen lässt, dass die Reionisation nicht Schuld am Gasverlust der Zwerggalaxien sein kann (Grebel & Gallagher 2004). Abbildung 8 veranschaulicht diesen Umstand nochmals, und wie man dieser Grafik entnehmen kann, gibt es keine systematische Pause in der Sternentstehung bezüglich der *dSph*, egal nun welcher Typus genau betrachtet wird.

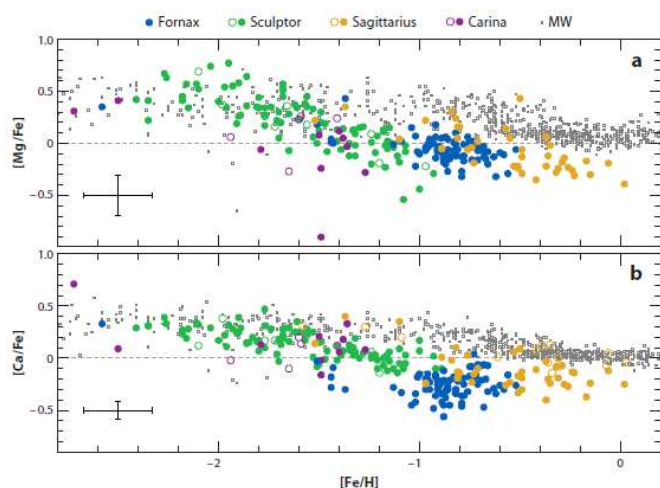


**Abbildung 8.** Bezüglich der *dSph* gibt es keine erkennbare systematische Pause der Sternentstehung innerhalb des Zeitraumes der Reionisation. Umso dunkler der Balken umso stärker war die Sternentstehung zu dem Zeitpunkt. (Grebel, Gallagher 2004)

## 6. Chemische Entwicklung

Stark verwoben mit der Betrachtung der Sternentstehungsgeschichte ist natürlich auch die chemische Evolution der Galaxien. Ermittelt man nun die chemischen Häufigkeiten einzeln aufgelöster Sterne unter Einbeziehung deren Alter, erhält man bei genug großen Stichproben die chemische Entwicklung über verschiedene Zeitskalen der Galaxie. Beachtet muss aber werden, dass die chemische Zusammensetzung der stellaren Oberflächen unbeeinflusst von Prozessen innerhalb der inneren Schichten ist, was zwar bei Hauptreihensternen der Fall ist, jedoch nicht zum Beispiel bei Riesensternen, bedingt durch die stellare Entwicklung.

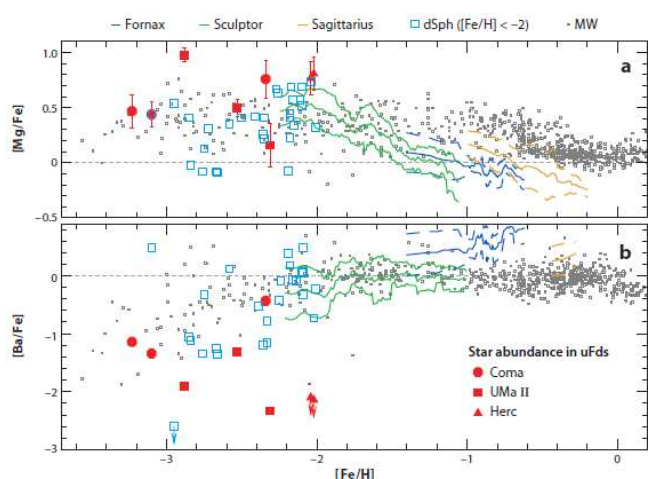
Bezüglich der Häufigkeiten von  $\alpha$ -Elementen, also hauptsächlich O, Mg, Si, Ca, Ti, leicht messbar durch Spektren von Riesen, kann man erkennen, dass es größtenteils einen Mangel an diesen Elementen im Vergleich zum galaktischen Halo und demnach auch galaktischen Scheibe gibt. Nur bei geringen Metallizitäten ähneln die Zwerggalaxien dem galaktischen Halo, was somit ein Indiz für die These sein kann, die bereits am Ende von Kapitel 3 erwähnt wurde, dass das Halo zum Teil aus aufgelösten, alten *dSph* besteht. Die Diskrepanz von  $[\alpha/Fe]$  bei größeren Metallizitäten zwischen den Satellitengalaxien und der Milchstraße wiederum könnte mit einem Abfall der Sternentstehung und damit verbundener Anreicherung hauptsächlich durch Supernovae Ia erklärt werden, was einen Gasverlust voraussetzen würde, der aber durch die zuvor besprochenen Entstehungsszenarien der Satellitengalaxien, sei es nun Staudruck, Winde oder ähnliches gegeben wäre. Gegenargument gegen die Theorie, dass das galaktische Halo aus Verschmelzung von *dSph* gebildet wurde, sind, unter anderem, die Unterschiede in den Metallizitäts-Verteilungs-Funktionen des Halo und der *dSph*. Interpretationen dieser lassen zum Beispiel die Frage aufkommen, woher die metallärmsten Sterne stammen und führen zu dem Schluss, dass eine Bildung des Halos durch Verschmelzung nur in einem sehr kurzem Zeitfenster möglich gewesen wäre. Antwort auf diese Inkonsistenz könnten möglicherweise die *UFD* bieten, die, im Vergleich zu *dSph*, einen größeren Anteil metallärmster Sterne mit  $[Fe/H] < -4$  besitzen, und diese jenen im Halo ähneln (siehe Abbildung 10)(Tolstoy et al. 2009).



**Abbildung 9.** Mg (a) und Ca (b) im Vergleich zu Eisen im Bezug auf die Metallizität für die Satellitengalaxien Fnx, Scl, Sgr und Car. Deutlich erkennbar die Ähnlichkeit mit der Milchstraße bei geringer Metallizität. (Tolstoy et al. 2009)

Abbildung 9 veranschaulicht nun diese Beobachtung durch Darstellung des Verhältnisses von den zwei  $\alpha$ -Elementen Mg und Ca zu Eisen in Abhängigkeit der Metallizität.

Weiters wird aber auch das Verhältnis von  $\alpha$ -Elementen zu Eisen,  $[\alpha/Fe]$ , und daher auch die Verknüpfung mit der Sternentstehungsgeschichte, benutzt, um Zeitskalen die Sternentstehung betreffend zu beobachten, da dieses Verhältnis sensibel auf die chemische Anreicherung durch Supernovae des Typs II beziehungsweise Ia ist. Sobald die ersten Supernovae Ia auftreten, was rund 0.1 - 1 Gyr nach der ersten Sternentstehungsphase der Fall ist, sinkt das bis dahin durch Supernovae II konstant gehaltene Verhältnis  $[\alpha/Fe]$ , da Supernovae Ia das Medium mit deutlich mehr Eisen als  $\alpha$ -Elementen anreichern und kann durch keine Prozesse wieder gesteigert werden, was durch einen Knick, auch in Abbildung 11 erkennbar, bei Betrachtung von der zeitlichen chemischen Entwicklung sichtbar wird.



**Abbildung 10.** Vergleich der Häufigkeiten von Mg (a) und dem in s-Prozess entstehenden Ba (b) in *UFD*, den angeführten *dSph*, weiteren Objekten aus verschiedensten *dSph*, deren Metallizität  $[Fe/H] < -2$  beträgt und dem galaktischen Halo. Erkennbar ist eine Verlängerung der von den *dSph* angefangenen Trendlinien durch die *UFD*. (Tolstoy et al. 2009)

Die Position dieses Knicks ist natürlich von Galaxie zu Galaxie aufgrund der völlig verschiedenen Sternentstehungsgeschichten unterschiedlich und ist bisweilen nur für einige wenige mehr oder weniger bekannt. So liegt der Knick bei Sculptor, welche die Sternentstehung vor 10 Gyr eingestellt hat, bei einer Metallizität von  $[Fe/H] = -1.8$ . Dies ist zugleich der Wert, an dem sich die zwei in dieser Galaxie befindlichen kinematisch nicht verknüpften Sternpopulationen trennen, was darauf hindeutet, dass sich die metallarme Population vor der Anreicherung durch Supernovae Ia gebildet hat. Für weitere Satellitengalaxien fehlen noch genauere Daten und es können nur Grenzen geschätzt werden. So liegt zum Beispiel für Sagittarius der Knick bei  $[Fe/H] = -1$ , was einerseits eine höhere Metallizität als beispielsweise eben angeführte Sculptor Galaxie bedeutet, als auch andererseits konsistent ist mit der bislang bekannten Sternentstehungsgeschichte, die eine kontinuierliche Bildung neuer Sterne über einen Zeitraum von 8-10 Gyr mit einem Ende vor 2-3 Gyr beschreibt. Bezüglich Fornax kann man aufgrund noch zu weniger Daten die metallarmen Sterne betreffend, nur die Lage des Knicks geschätzt werden, und zwar auf eine Metallizität  $[Fe/H] < -1.5$ .

Was sich aber andeutet, ist, dass die Position des Knicks abhängig von der Leuchtkraft und der mittleren Metallizität ist, was wiederum darauf schließen lässt, dass die heute leuchtkräftigsten Galaxien mehr Sterne in frühester Zeit geformt haben und, beziehungsweise oder, der Metallverlust geringer war, als bei leuchtschwächeren Systemen (Tolstoy et al. 2009).

Bezüglich der *UFD* sei zu sagen, dass die bis heute getätigten Beobachtungen eine niedrige spektrale Auflösung bieten und daher noch wenige Studien existieren. Jedoch scheinen diese Art von Galaxien, wie schon bereits angesprochen, sehr metallarme Sterne mit  $[Fe/H] < -3$  zu besitzen und somit die Korrelation zwischen Metallizität und Leuchtkraft hin zu niedrigeren Leuchtkräften fortzusetzen. Abbildung 10 zeigt diesen Umstand, anhand der wenigen Messungen in den *UFD*, namentlich Coma Berenices, Ursa Major II und Hercules, im Vergleich mit den drei *dSph* Fornax, Sculptor und Sagittarius und dem Halo der Milchstraße, sowie auch Aufnahmen von Objekten in anderen *dSph*, deren Metallizität  $[Fe/H] < -2$  beträgt.

## 7. Abschließende Bemerkungen

Wie man schon anhand der Teilgebiete, die in dieser Arbeit vorgestellt worden sind, oder aber auch gänzlich anderen Aufgabenstellungen, die hier nicht aufgeführt wurden, erkennen kann, bilden nicht nur die *dSph*, sondern generell alle Zwerggalaxien ein höchst kontroverses Thema, versetzen uns aber auch in die Lage neue Erkenntnisse zu gewinnen, die uns sonst, zumindest mit heutigen Mitteln, noch verschlossen bleiben.

Es werden auf jeden Fall noch viele weitere Beobachtungsstunden und Hypothesen nötig sein um alle Zusammenhänge und Vorgänge zu verstehen, seien es nun die Sternentstehungsgeschichte, morphologischen Unterschiede oder Distribution, die uns diese interessanten Systeme bieten, da dies uns einerseits die Möglichkeit geben wird Vergleiche mit weiter entfernten Galaxiehaufen zu ziehen, andererseits eine berechtigte Annahme besteht, dass Schlüsse die wir für diese „kleinen“ Systeme ziehen auch relevant sind für größere Galaxien.

*Acknowledgements.* Mein Dank gilt Univ.-Prof. Dipl.-Phys. Dr. Hensler für seine Hilfe, Feedback und Ratschläge, wiewohl auch meiner „besseren Hälfte“, die mich, auch wenn es sich hierbei „nur“ um eine Bakkalaureatsarbeit handelt, in jeglicher Hinsicht unterstützt hat.

**Literatur**

- Belokurov V et al. 2008. *ApJ* 686:L83-L86
- Grebel EK. 1999 *IAU Symp.* 192
- Grebel EK, Gallagher JS III, Harbeck D. 2003. *Astron. J.*125:1926-1939
- Grebel EK, Gallagher JS III. 2004. *ApJ*.610:L89-L92
- Karachentsev ID. 2005. *Astron. J.*129:178-188
- Karachentsev ID, Kashibadze OG. 2006. *Astrophysics* Vol. 49 Is. 1 3-18
- Jerjen H. 2010. *Advances in Astronomy* Article ID: 434390
- Martin N, De Jong J, Rix HW. 2008. *ApJ* 684:1075-1092
- Mateo M. 1998. *Annu. Rev. Astron. Astrophys.* 36:435-506
- Metz M, Kroupa P, Jerjen H. 2007. *MNRAS* 374, 1125-1145
- Metz M, Kroupa P, Jerjen H. 2009a. *MNRAS* 394, 2223-2228
- Metz M, Kroupa P, Theis C, Hensler G, Jerjen H. 2009b. *ApJ* 697:269-274
- Moore B, Ghigna S, Governato F, Lake G, Quinn T, Stadel J. 1999. *ApJ* 524:L19-L22
- Tammann GA. 1994. *ESOC* 49:3-9
- Tolstoy E, Hill V, Tosi M. 2009. *Annu. Rev. Astron. Astrophys.* 47:371-425
- Van den Bergh S. 2000. *PASP* Vol. 112 Is. 770 529-536