
Die Dynamik des Milchstraßen-Andromeda-Systems

Sheila Hieber



München 2011

**Die Dynamik
des
Milchstraßen-Andromeda-Systems**

Bachelor-Arbeit
an der
Ludwig-Maximilians-Universität München

eingereicht von

Sheila Hieber

(Matr. Nr.: 8060816)

geboren am 19.02.1989 in Mindelheim

betreut von
Prof. Dr. Andreas Burkert

München, den 20. August 2011

Evaluator: Prof. Dr. Andreas Burkert

Tag der mündlichen Prüfung: 26. September 2011

Inhaltsverzeichnis

1	Einleitung	1
1.1	Strukturen im Weltall	1
1.2	Kosmische Kollisionen	2
2	Daten zu den Galaxien	3
2.1	Die Milchstraße	4
2.2	Die Andromeda-Galaxie	7
3	Programmdaten	9
4	Die Galaxien-Kollision	11
4.1	Das erste Zusammentreffen	12
4.2	Verschiedene Anfangsbedingungen	18
4.2.1	Massenänderung	18
4.2.2	Transversalgeschwindigkeiten von Andromeda	19
4.3	Der Pas de deux	20
4.4	Entwicklung einer neuen Galaxie	20
5	Was passiert mit unserem Sonnensystem?	21
5.1	Die Zukunft der Sonne	21
5.2	Das Schicksal unserer Erde	22
6	Schluss: Mögliche Entwicklung der Menschheit	23
	Zusammenfassung	25
	Danksagung	27
	Anhang	29
	Anhang 1: Programm "Hello"	29
	Anhang 2: Programm "Fakultät"	30
	Anhang 3: Programm "Kollision Andromeda-Milchstraße"	31
	Literaturverzeichnis	35
	Abbildungsverzeichnis	36
	Selbstständigkeitserklärung	37

1 Einleitung

Um die Tragweite und die Dimension dieses kosmischen Ereignisses ermessen zu können, muss man sich von Vorstellungen und Alltag hier auf der Erde lösen. Denn mit den hier vorherrschenden Zeit- und Entfernungsgrößenordnungen kommt man dort nicht allzu weit. In ferner Zukunft wird nämlich unsere Heimatgalaxie, die Milchstraße, mit ihrer großen Schwester, der Andromeda-Galaxie, zusammentreffen und mit ihr zu einer elliptischen Galaxie verschmelzen. Muss man sich jetzt sorgen, schnell noch Überlebenseinkäufe erledigen und sich im Keller verschanzen? Wann passiert das denn? Antworten darauf können im Rahmen der vorliegenden Bachelorarbeit gefunden werden.

1.1 Strukturen im Weltall

Beide Galaxien, also große Anhäufungen von Sternen wie unsere Sonne, zählen zur lokalen Gruppe, einer Ansammlung von Galaxien, die laut Wissenschaftlern nicht nur eine geometrische Struktur darstellen, sondern auch gravitativ aneinander gebunden sind.

Neben Milchstraße und Andromeda sind noch viele Zwerggalaxien und die Triangulumgalaxie M33 mit von der Partie.

Die lokale Gruppe wiederum ist Teil des Virgo-Superhaufens. Die Entfernung von Milchstraße zu Andromeda wurde mithilfe der Cepheiden-Methode errechnet.

Cepheiden sind veränderliche Sterne, deren Helligkeit streng periodisch schwankt. Wenn die Periode dieser Schwankungen bestimmt werden kann, besteht ein Zusammenhang zur maximalen Helligkeit. In der Andromeda-Galaxie wurde aber auch ein Doppelsternsystem gefunden, deren Partner sich regelmäßig gegenseitig verdecken. Somit bestand die Möglichkeit, auch deren Helligkeit und Größe zu bestimmen. Mithilfe des sog. Entfernungsmoduls konnte dann der Abstand zur Erde ermittelt werden:

$$m - M = 5 \cdot \log_{10} \frac{r}{10pc}$$

Dabei bezeichnet m die scheinbare Helligkeit, also wie hell uns ein Stern erscheint,

und M die absolute Helligkeit, welche als die Helligkeit festgelegt wurde, die ein Stern in einer Entfernung von 10 Parsec hat. 1 Parsec wiederum ist als die Entfernung definiert, bei welcher die Bewegung der Erde um die Sonne unter einem Winkel von einer Bogensekunde erscheint. Die Umrechnung in bekanntere Größen wie Meter und Lichtjahre definiert sich folgendermaßen:

$$1pc = 3.08 \cdot 10^{16}m = 3.26Lj$$

Somit beträgt die Entfernung zu Andromeda ca. 2,5 Millionen Lichtjahre. Das Licht, das Andromeda aussendet, braucht also 2,5 Millionen Jahre bis es bei uns ankommt!

1.2 Kosmische Kollisionen

Die Kollision, die höchstwahrscheinlich bevorsteht, ist natürlich nicht die einzige ihrer Art. Solche Akte von "Kannibalismus" wurden schon häufig beobachtet und werden immer wieder geschehen. Tatsächlich ist unsere Milchstraße selbst so ein Kannibale, denn kleinere Begleitgalaxien wurden von ihr, besser gesagt von ihrer Schwerkraft, sozusagen aufgelöst. Auch Andromeda hat schon mehrere kleinere Galaxien in sich eingesogen und ist jetzt auf dem Weg zu uns.

Kosmische Kollisionen oder ihre Folgeerscheinungen hat jeder von uns schon einmal gesehen oder sogar erlebt. Denn auch Mondkrater, Sternschnuppen oder Polarlichter zählen dazu, auch wenn Zusammenstöße in dieser geringen Größenordnung relativ harmlos sind. Dramatischer verläuft da schon eine Galaxien-Begegnung. Wenn man jetzt allerdings die Vorstellung hat, dass Sterne aufeinanderprallen, überall Explosionen stattfinden und das ganze in ein einziges Inferno ausartet, liegt man falsch. Die Abstände von Sternen innerhalb von Galaxien sind so groß, dass die Wahrscheinlichkeit eines Zusammenstoßes zweier Sterne sehr gering ist. Als kleines Beispiel: Der Stern, der unserer Sonne am nächsten ist, heißt Proxima Centauri und ist 4,2 Lj von uns entfernt, also $43 \cdot 10^{12}km$!

2 Daten zu den Galaxien

Bevor nun die Kollision ausführlich beschrieben werden kann, muss zunächst auf die beiden beteiligten Galaxien eingegangen werden. Denn um die späteren Vorgänge nachvollziehen zu können, muss man auch die Geschichte von Milchstraße und Andromeda verstanden haben.

Die Entstehung dieser kosmischen Gebilde liegt noch weitgehend im Dunkeln, aber sie müssen aus kleinsten Dichtefluktuationen, die ganz am Anfang vorhanden waren, hervorgegangen sein. Außer Sternen beinhalten Galaxien auch Gas, Staub und dunkle Materie und es gibt sie in den verschiedensten Größen und Formen. Andromeda und Milchstraße sind Spiralgalaxien, d.h. sie bestehen aus einem zentralen Bulge, um den sich Spiralarme winden, daher auch der Name. Da sich dies alles in einer Ebene befindet, werden Spiralgalaxien auch zu den Scheibengalaxien gezählt. Auf Bildern erscheint der zentrale Bereich einer solchen rötlich und hell. Das liegt daran, dass in diesem Bereich vorrangig ältere Sterne dicht beieinander sind, während in den Spiralarmen ständig neue Sterne entstehen. Dieser Bereich leuchtet in einer bläulichen Farbe, weil junge, massereiche und heiße Sterne wegen ihrer Oberflächentemperatur blau strahlen. Da eine solche Spiralgalaxie um ihren Bulge rotiert, kommt leicht Verwirrung auf. Müssten sich dann nicht die Spiralarme schon längst aufgewickelt haben? Da dies bei keiner der Fall ist, muss es für die Spiralarme eine Erklärung geben. “In den 1960er-Jahren entwickelten schließlich die beiden amerikanischen Astrophysiker Chia Chiao Lin und Frank Shu die Dichtewellen-Theorie, auch bekannt als Lin-Shu-Theorie. Sie interpretiert die Spiralarme als Wellenphänomen im Sternensee der Galaxis. Wo mehr Materie vorhanden und die Gravitation stärker ist, entstehen Dichtewellen und rotieren als Bögen um den Galaxienkern. Sie komprimieren auf ihrem Weg Materie und verdichten sie zu Dunkelwolken, aus denen Sterne und leuchtende Nebel hervorgehen.”¹

¹siehe scinexx, Spiralarme geben Räsel auf

2.1 Die Milchstraße

Am schwierigsten zu enträtseln war und ist teilweise immer noch unsere eigene Heimatgalaxie, die Milchstraße oder auch Galaxis. Denn da wir uns mitten in ihr befinden, stehen uns keine Aufnahmen senkrecht zur Rotationsebene zur Verfügung, um so relativ leicht ihr Aussehen “ablesen” zu können.

Die Wellenlängen des sichtbaren Lichts reichten zur Aufklärung nicht aus, man saß wortwörtlich im Dunkeln. Erst seit etwa Mitte des 20. Jahrhunderts konnten die neueren Teilgebiete der Astronomie, wie die Radio-, IR- und Röntgenastronomie, zur Entschlüsselung ihrer Struktur den entscheidenden Beitrag leisten. Denn damit konnten auch Signale aus den für das menschliche Auge verborgenen Teilen des Universums empfangen werden. Dabei kam man zu der Erkenntnis, dass, nicht wie ursprünglich angenommen, die Milchstraße eine Schwester der Andromeda-Galaxie ist, also vom Typ her eine Spiralgalaxie, sondern noch einen Zusatz hat: wir leben in einer Balkenspiralgalaxie vom Typ SBc, zugeordnet durch die Hubble Sequenz, die der Astronom Edwin Hubble 1936 zur Zuordnung aller möglichen Galaxienformen aufstellte.

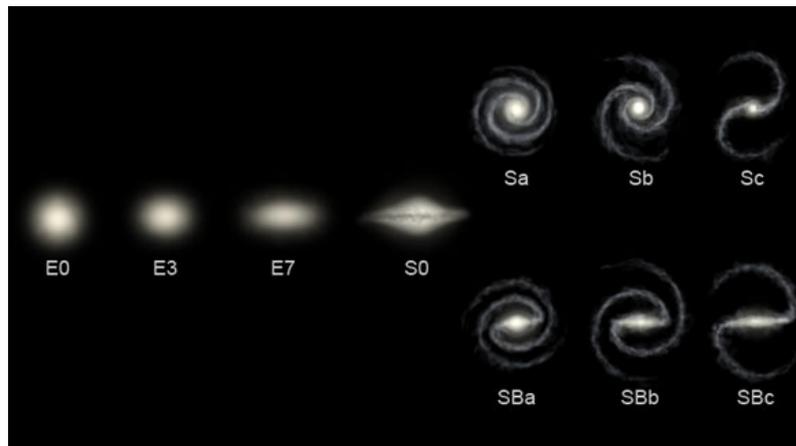


Abb. 2.1: Die Hubble-Sequenz²

Diese hat, wie der Name schon sagt, einen Balken in ihrer Mitte und erst dann folgen die Spiralarme, allerdings nicht eng aufgewickelt, sondern etwas lockerer um sich geschlungen. Weiterhin besteht unsere Galaxie aus ca. 300 Milliarden Sternen und hat ein zentrales schwarzes Loch mit einer Masse von etwa 3,6 Millionen Sonnenmassen.

²siehe [Wikipedia; Die Hubble-Sequenz]

Der Bulge misst etwa eine Ausdehnung von 5kpc, die daran anschließende galaktische Scheibe hat einen Durchmesser von 30kpc, die Dicke der Scheibe misst ca. 1kpc. Mit ihrem Halo, also der eine Galaxie kugelförmig umgebende Raum, hat unsere Milchstraße eine Größe von 100kpc. Daran anschließend folgt noch die Korona mit 200kpc, die wahrscheinlich dunkle Materie enthält. Unsere Sonne befindet sich ungefähr 8,6 kpc vom Zentrum entfernt und umkreist dieses mit einer Geschwindigkeit von 230 km/s.

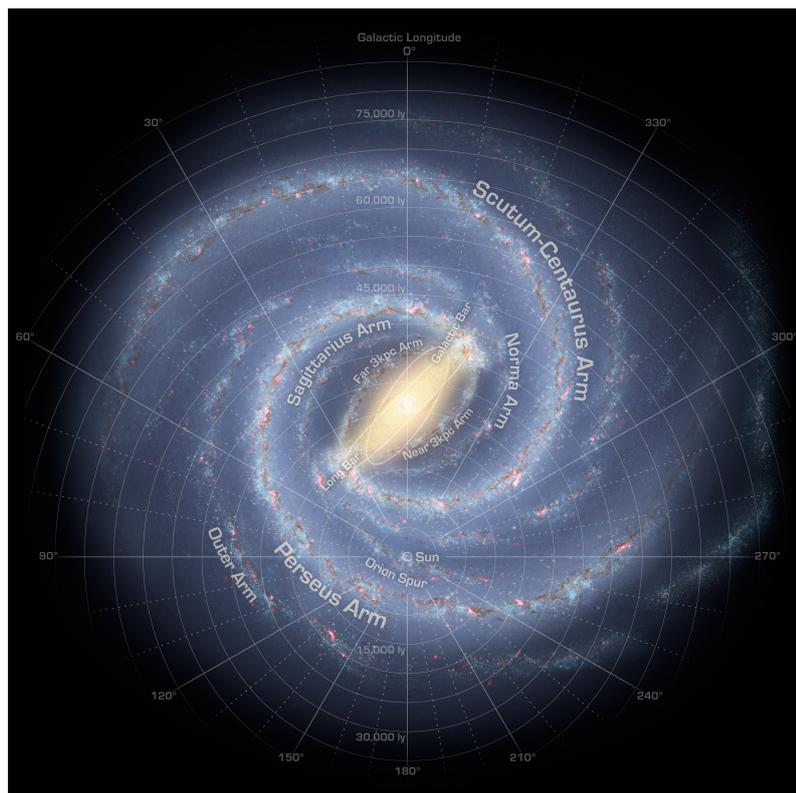


Abb. 2.2: Die Struktur der Milchstraße, auch eingezeichnet die Position der Sonne³

Doch wann ist unsere Galaxis entstanden? Ihr ungefähres Alter kann man aufgrund ihrer begleitenden Kugelsternhaufen festlegen, die als die ältesten Sternansammlungen datiert wurden, die in der Milchstraße entstanden sind. Denn die Kugelsternhaufen, die aus 10000 bis 10 Millionen Sternen bestehen, weisen einen geringen Metallgehalt auf. Und was hat das mit dem Alter zu tun? Da erst durch die Geburt von Sternen, die im Laufe ihres Lebens Elemente mit größeren Kernen, also Metalle, bilden, der Metallgehalt im Universum gestiegen ist, und die Kugelsternhaufen

³siehe [Abenteuer Universum, Die Milchstraße]

noch geringe Werte aufweisen, werden die schon absolvierten Lebensjahre von Kugelsternhaufen auf 11-12 Milliarden Jahre geschätzt. Somit ist die Milchstraße ca. 13,6 Milliarden Jahre alt. [**Abenteuer Universum, Die Milchstraße**].

2.2 Die Andromeda-Galaxie



Abb. 2.3: Die Andromeda-Galaxie⁴

Andromeda ist unserer Galaxie ähnlich, sie ist jedoch größer als die Milchstraße, sowohl in Bezug auf ihre Masse als auch auf ihre Ausdehnung. Wie schon erwähnt, ist Andromeda eine Spiralgalaxie vom Typ Sb. Durch Cepheiden, die Edwin Hubble in ihr entdeckte und ihre Entfernung bestimmte, konnte erstmalig nachgewiesen werden, dass es außerhalb der Milchstraße noch weitere Galaxien gibt.

Während die meisten Nachbargalaxien von uns aus gesehen eine mit der Entfernung wachsende Rotverschiebung aufweisen, ist Andromeda eine der Ausnahmen. Ihr ausgesandtes Lichtspektrum erscheint bei uns blauverschoben, sie bewegt sich also auf uns zu! Sie besteht aus ca. 1 Billion Sternen, ihr zentrales schwarzes Loch besitzt eine Masse von ca. 140 Millionen Sonnenmassen, ist also fast 40 mal schwerer als das unserer Galaxis! Ihre Scheibenausdehnung misst etwa 40kpc, neueren Messungen zufolge sogar 60kpc, ihr Halo hat wahrscheinlich mindestens eine Ausdehnung von 150kpc. Ihr Alter wird auf über 12 Milliarden Jahre geschätzt. In ihrer Geschichte hat Andromeda vermutlich schon einmal eine Galaxie von ähnlicher Größe verschlungen oder mehrere kleinere, denn in ihrem Halo befinden sich außer den üblichen Einzelsternen und alten Kugelsternhaufen auch noch relativ junge Sterne. In ihrer Mitte befindet sich außerdem eine Scheibe um das schwarze Loch, in der sehr heiße Sterne das Zentrum mit großer Geschwindigkeit umkreisen. Diese Ungewöhnlichkeiten lassen sich nur durch eine oder mehrere bereits vergangene Kollisionen erklären. [**Abenteuer Universum, Die Andromeda-Galaxie**].

⁴siehe[**Abenteuer Universum, Die Andromeda-Galaxie**]

3 Programmdaten

Ziel dieser Bachelorarbeit war es, den genauen Zeitpunkt zu berechnen, an dem Andromeda und Milchstraße zum ersten Mal aufeinander treffen. Die erste Schwierigkeit bestand im Umgang mit der Programmiersprache Fortran 95. Also mussten dafür erst einmal Grundlagen geschaffen werden. So wurde mit einfachsten Programmen angefangen, wie der Ausgabe von "Hallo".²

Als Steigerung wurde die Fakultät einer Zahl berechnet. Dabei bestand das Programm nicht nur aus Anfang, Variablendefinition und -ausgabe und Ende, sondern es musste zusätzlich eine Funktion definiert werden, die die Fakultät ausrechnet.³ Für die spätere Berechnung der Gravitationskraft war dies eine gute Übung.

Daran anschließend war das Ziel fast greifbar. Als Zwischenschritt wurde noch die Gravitationskraft zwischen zwei Körpern zu verschiedenen Zeitpunkten kalkuliert, erst danach konnte das Programm für zwei Körper, die sich nur durch ihre Gravitationskraft aufeinander zubewegen, fertig gestellt werden.⁴ Hierzu wurde die Software "Silverfrost Plato" verwendet. Als Näherung wurde das sog. Leapfrog-Verfahren angewandt, welches ein genaueres Ergebnis als die Euler-Methode liefert, da Position und Geschwindigkeit der beiden Galaxien immer jeweils eine halbe Zeitschritteinheit voneinander entfernt berechnet werden. Dieses Verfahren kann man in den sog. "Drift-Kick-Drift"-Algorithmus umformulieren:

$$x' = x(i) + \frac{1}{2} \cdot v(i) \cdot dt$$
$$v(i + 1) = v(i) + F(x') \cdot dt$$
$$x(i + 1) = x' + \frac{1}{2} \cdot v(i + 1) \cdot dt$$

²siehe Anhang 1

³siehe Anhang 2

⁴siehe Anhang 3

Für die y-Koordinaten geht es analog, wobei

$$F_x = \frac{G \cdot m_{Andromeda} \cdot m_{MilkyWay}}{\sqrt{(x_{Andromeda} - x_{MilkyWay})^2 + (y_{Andromeda} - y_{MilkyWay})^2}^3} \cdot (x_{Andromeda} - x_{MilkyWay})$$

und

$$F_y = \frac{G \cdot m_{Andromeda} \cdot m_{MilkyWay}}{\sqrt{(x_{Andromeda} - x_{MilkyWay})^2 + (y_{Andromeda} - y_{MilkyWay})^2}^3} \cdot (y_{Andromeda} - y_{MilkyWay})$$

$$\text{mit } G = 6.67 \cdot 10^{-11} \frac{\text{m}^3}{\text{kg} \cdot \text{s}^2} = 1.56 \cdot 10^{-3} \frac{\text{Lj}^3}{10^{10} M_{\text{Sonne}} \cdot \text{a}^2} = 4.54 \cdot 10^{-4} \frac{\text{pc}^3}{10^{11} M_{\text{Sonne}} \cdot \text{a}^2}$$

Natürlich müssen x- und y-Koordinaten für beide getrennt berechnet werden.

Als Anfangsbedingungen wurden verwendet:

$$m_{Andromeda} = 20.0 \cdot 10^{11} M_{\text{Sonne}}$$

$$m_{MilkyWay} = 10.0 \cdot 10^{11} M_{\text{Sonne}}$$

$$d_{Andromeda, MilkyWay} = 2500000 \text{Lj} = 767000 \text{pc}$$

4 Die Galaxien-Kollision

Was genau in ein paar Milliarden Jahren geschehen wird, weiß niemand. Aber es gibt wahrscheinlichere Szenarien und unwahrscheinlichere. Dass Andromeda und Milchstraße kollidieren, zählt zu den wahrscheinlicheren, da viele Tatsachen dafür sprechen: die radiale Geschwindigkeitskomponente von Andromeda, die in unsere Richtung zeigt, ist schon mal ein guter Hinweis auf das zukünftige Aufeinandertreffen der beiden Spiralgalaxien. Außerdem “spüren” die beiden die Anwesenheit der jeweils anderen schon jetzt, da durch ihre großen Massen ihre Gravitationsfelder sehr weitreichend sind.

Aber was wird während der Kollision geschehen? Wenn sich die beiden Scheiben so weit angenähert haben, dass sie sich berühren, wird noch nichts wirklich Großartiges passieren, lediglich ein paar Sterne werden durch Andromedas Gravitationseinfluss aus ihren Bahnen geworfen werden. Aber erst wenn sie so weit ineinandergetaucht sind, dass ihre Zentren miteinander wechselwirken, kann man wirklich von Kollision sprechen. Denn dort ist die Sterndichte wesentlich größer als in den Randbereichen der Galaxien, sodass hier durchaus Sterne aufeinander treffen könnten. Durch die Druckwelle, die Andromeda mitbringen wird, werden neue Sterne geboren, während viele andere durch die Änderung ihrer Bahnen in den Weltraum geschleudert werden. Die beiden schwarzen Löcher werden sich zu einem einzigen großen vereinigen. Die Masse im Zentrum hat natürlich dann Auswirkungen auf die Größe der neuen Galaxie und vor allem auf die Bahnen und Geschwindigkeit der Sterne, die um die Mitte kreisen. Die Masse des neuen schwarzen Lochs wird größer sein als die der beiden

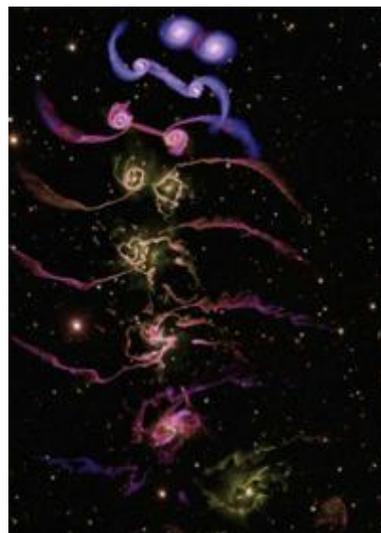


Abb. 4.1: Die verschiedenen Stadien einer Verschmelzung zweier Spiralgalaxien⁵

⁵siehe[MPI, **Kollidierende Galaxien**]

“alten” zusammen, da es noch einiges an Masse absorbieren wird. Die Energie, die dabei frei wird, heizt das umliegende Gas auf und schleudert es in die Weiten des Alls. Zurück bleibt eine elliptische Galaxie. [MPI, Kollidierende Galaxien]

4.1 Das erste Zusammentreffen

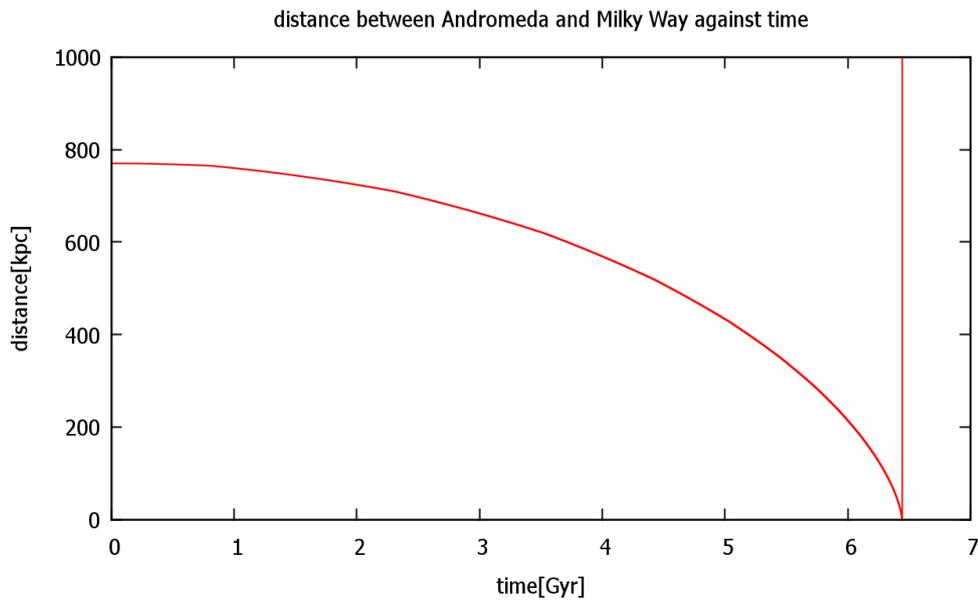


Abb. 4.2: Abstand der beiden Galaxien abhängig von der Zeit

Als erstes wurde die genaue Zeit simuliert, wann das Ereignis stattfinden wird. Das vorläufige Ergebnis kann obiger Graphik entnommen werden: es sind rund 6.4 *Gyr*. Als Bestätigung der numerischen Methode wurde die Zeit bis zur Kollision auch analytisch berechnet.

Anfangsbedingungen:

Anfänglicher Abstand: $R = 770 \text{ kpc}$

Masse Milchstraße: $M_M = 10^{12} \cdot M_{\text{Sonne}} = M$

Masse Andromeda: $M_A = 2 \cdot 10^{12} \cdot M_{\text{Sonne}} = 2M$

Kraft auf M_A :

$$\frac{G \cdot M \cdot 2M}{r^2}$$

Beschleunigung auf M_A :

$$-\frac{GM}{r^2} = v_2 \cdot \frac{dv_2}{dr}$$

analog für M_M :

$$-\frac{2GM}{r^2} = v_1 \cdot \frac{dv_1}{dr}$$

Geschwindigkeiten:

$$\rightarrow v_1^2 = \frac{4GM}{r} - \frac{4GM}{R}$$

$$\rightarrow v_2^2 = \frac{2GM}{r} - \frac{2GM}{R}$$

Relativgeschwindigkeit:

$$v_{rel} = -\sqrt{\frac{4GM}{R}} \left(\sqrt{\frac{R}{r-1}} + \sqrt{\frac{R}{2r} - \frac{1}{2}} \right)$$

⇒ Kollisionszeit

$$T = \int dt = \int_R^0 \frac{1}{v_{rel}} dr = -\sqrt{\frac{R^3}{4GM}} \int_1^0 \frac{1}{\sqrt{\frac{1}{x-1} + \sqrt{\frac{1}{2} - \frac{1}{2x}}}} dx \quad \text{mit } x = \frac{r}{R}$$

Das Integral kann mit -1 abgeschätzt werden, sodass

$$T = \sqrt{\frac{R^3}{4GM}} \approx 5,0 \text{ Gyr}$$

Zur Überprüfung der Qualität des Programms wurde die Gesamtenergie zu jedem Zeitpunkt bestimmt.

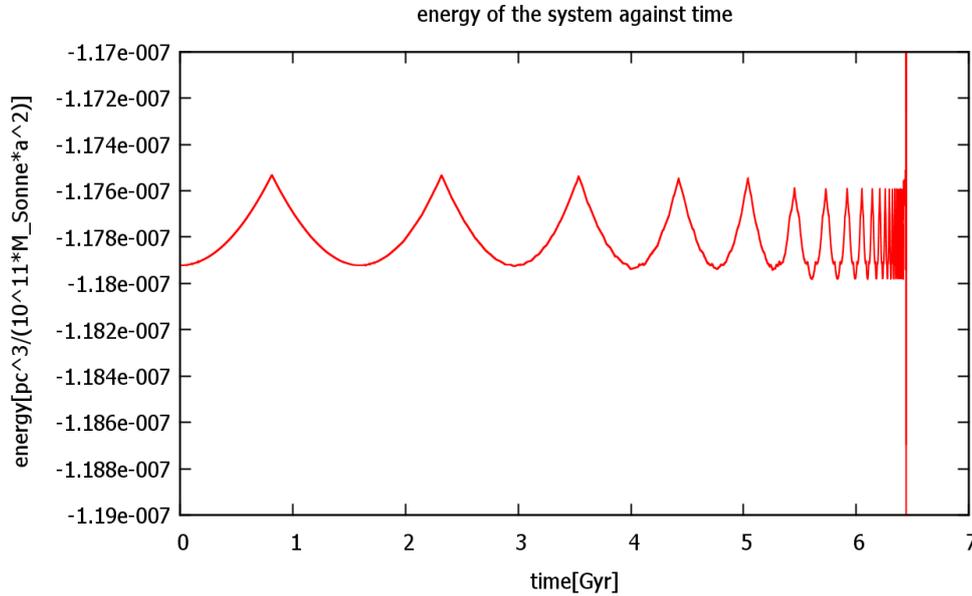


Abb. 4.3: Energie als Funktion der Zeit

Es ist zu erkennen, dass keine Energie vor dem Zusammenstoß verloren geht und sie nur minimal schwankt, die Berechnungsfehler also nicht allzu groß sein dürften. Während und nach der Kollision ist die Energieänderung aber dann so groß, dass sie das Diagramm sprengt. Auf die Abschätzung des Zeitpunktes hat dies aber wenig Einfluss.

Dabei wurde die Gesamtenergie folgendermaßen berechnet:

$$E_{ges} = \frac{1}{2} \cdot m_{Andromeda} \cdot (v_x^2 + v_y^2) + \frac{1}{2} \cdot m_{MilkyWay} \cdot (v_x^2 + v_y^2) - \frac{G \cdot m_{Andromeda} \cdot m_{MilkyWay}}{r}$$

$$\text{mit } r = \sqrt{(x_{Andromeda} - x_{MilkyWay})^2 + (y_{Andromeda} - y_{MilkyWay})^2}$$

Allerdings sind diese Simulationen nicht ganz richtig, da Andromeda bereits eine Geschwindigkeitskomponente in unsere Richtung aufweist, die bisher nicht berücksichtigt wurde. Wenn man diese mit einbezieht, ergibt sich Folgendes:

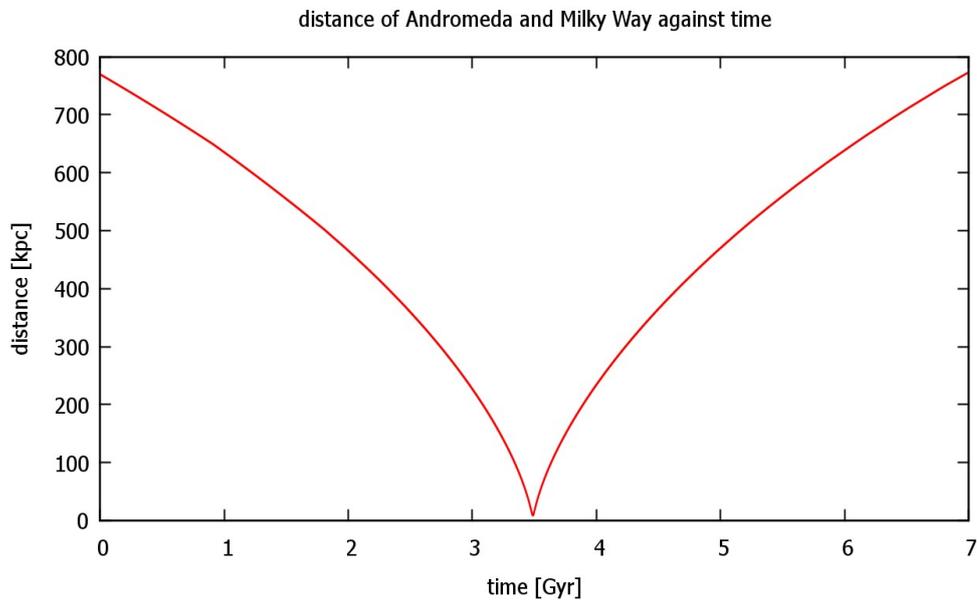


Abb. 4.4: Abstand der beiden Galaxien abhängig von der Zeit, diesmal mit Andromedas radialer Geschwindigkeit

Die aktuellere Kollisionszeit ist also in rund 3.5 Gyr . Da durch die erste nüchterne Kalkulation der Fehler zwischen analytischer und numerischer Verfahrensweise herausgerechnet werden konnte, kann nun die Zeit des Zusammenstoßes ziemlich genau bestimmt werden:

$$\Delta t = T_{\text{numerisch}} - T_{\text{analytisch}} = 6.4 \text{ Gyr} - 5.0 \text{ Gyr} = 1.4 \text{ Gyr}$$

$$\rightarrow \frac{\Delta t}{T_{\text{numerisch}}} = \alpha = 0.22$$

$$\alpha \cdot T_{\text{neu}} = 0.22 \cdot 3.5 \text{ Gyr} \approx 0.77 \text{ Gyr}$$

$$\Rightarrow T_{\text{Kollision}} = 3.5\text{Gyr} - 0.77\text{Gyr} \approx 2.7 \text{ Gyr}$$

Als weiterer Nachweis wurden die Geschwindigkeiten von Andromeda und Milchstraße berechnet. Hierzu wurde wieder das Programm ohne Anfangsgeschwindigkeiten verwendet. Da Andromeda jetzt eine Radialgeschwindigkeit von $-120\text{km/s} = -0.000123\text{pc/a}$ hat, kann somit auch auf diesem Wege die Kollision bestimmt werden.

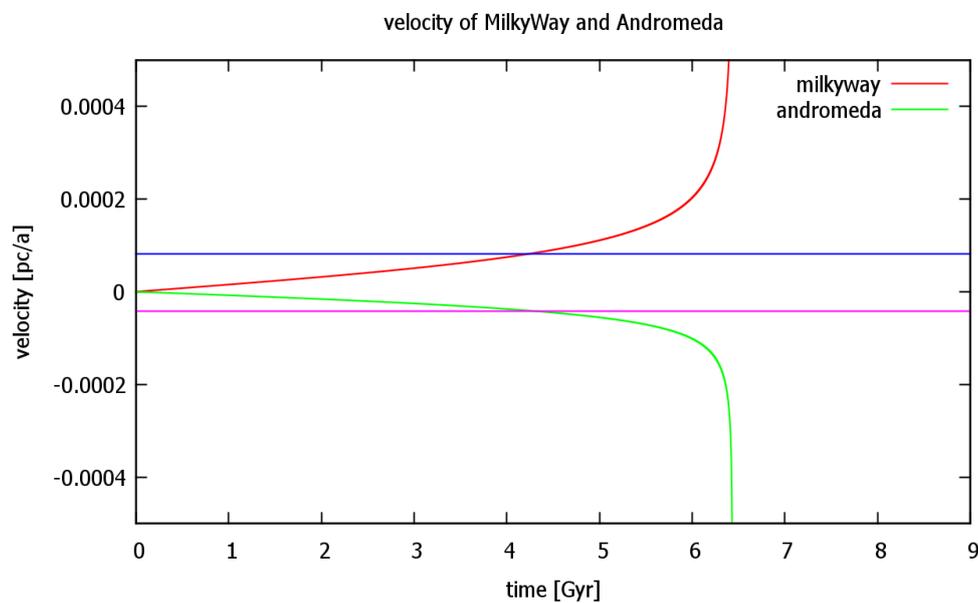


Abb. 4.5: Geschwindigkeiten von Andromeda und Milchstraße als Funktion der Zeit

Die beiden Querstreifen stellen den aktuellen Geschwindigkeitsunterschied dar, die Kollision ist also noch ca. 2.2 Gyr entfernt. Somit werden Andromeda und Milchstraße zwischen 2 und 3 Gyr anfangen zu verschmelzen.

Und auch hier wieder zur Überprüfung der Qualität die Gesamtenergie:

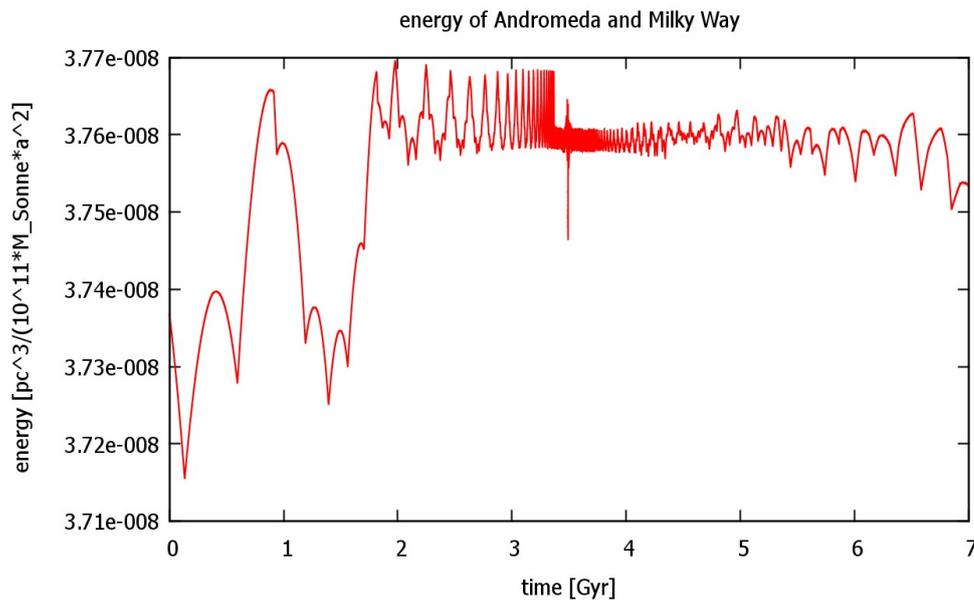


Abb. 4.6: Energie als Funktion der Zeit, diesmal mit Andromedas radialer Geschwindigkeit

Auffällig ist, dass jetzt die Energie > 0 ist, es sich also nicht mehr um ein gebundenes System handelt, jedoch die gravierende Energieänderung während und nach der Kollision im Gegensatz zur vorherigen Energiekalkulation verschwunden ist.

4.2 Verschiedene Anfangsbedingungen

Da sowohl in der genauen Massenbestimmung der beiden Galaxien als auch in der Transversalgeschwindigkeit von Andromeda Unsicherheiten bestehen, müssen verschiedene Szenarien durchgespielt werden.

4.2.1 Massenänderung

Als erstes wurden die Massen von Andromeda und Milchstraße schrittweise vergrößert. Dabei war Andromeda aber immer doppelt so groß wie unsere Heimatgalaxie. Die grüne Linie ist diejenige, mit deren Massen auch die analytische Methode zum Einsatz kam. Dabei bezeichnet m_m die Masse der Milchstraße und m_a die von Andromeda, immer multipliziert mit $10^{12} \cdot M_{\text{Sonne}}$.

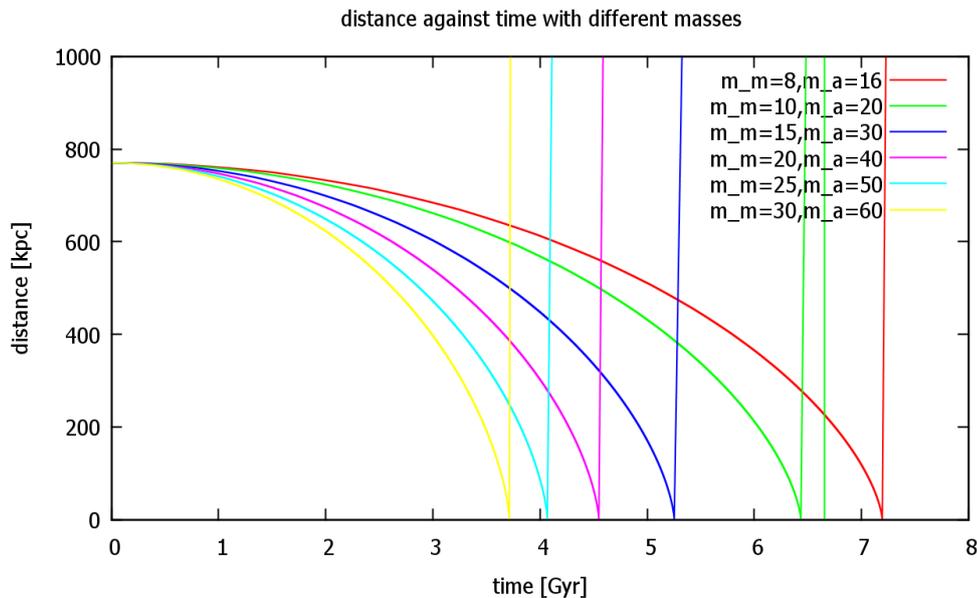


Abb. 4.7: Verschiedene Massen der Galaxien mit Auswirkung auf die Kollisionszeit

Je größer die Massen sind, umso schneller kollidieren Andromeda und Milchstraße. Aber die Änderung der Kollisionszeit im Vergleich zum vorherigen Szenario wird immer kleiner. Hier wurden allerdings wiederum keine schon vorhandenen Geschwindigkeitskomponenten einbezogen. Dies geschieht im nächsten Kapitel.

4.2.2 Transversalgeschwindigkeiten von Andromeda

Die zweite große Unbekannte ist die Transversalgeschwindigkeit von Andromeda. Während die radiale Geschwindigkeitskomponente durch den Doppler-Effekt ziemlich genau bestimmt werden kann, fehlen uns in transversaler Richtung jegliche Informationen. In folgender Simulation hat Andromeda verschiedene Anfangsgeschwindigkeiten in x-Richtung, angefangen bei 50km/s bis hin zu 120km/s . Dabei kann man deutlich erkennen, dass beim großen Betrag (Andromeda in gelb und Milchstraße in türkis dargestellt) sich die beiden wahrscheinlich nicht nahe kommen werden.

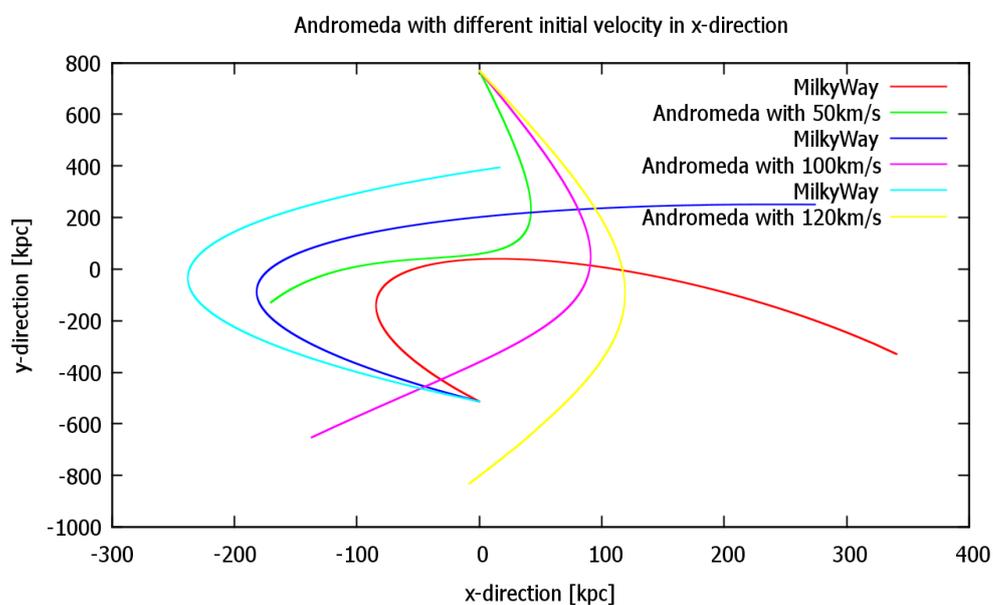


Abb. 4.8: Verschiedene Transversalgeschwindigkeiten mit Auswirkung auf die Bahnen

4.3 Der Pas de deux

Da in dieser Simulation Milchstraße und Andromeda als Punktmassen dargestellt sind, wird dieses Kapitel ohne eigene Grafiken erläutert. Denn beim Zusammenstoß spielen dann auch die Wechselwirkungen zwischen den Sternen im Zentrum eine Rolle, die in dieser Simulation vernachlässigt wurden. Denn dazu müssten sehr viele Einzelsterne miteinbezogen werden und dies kann nur mit einer großen Rechnerleistung bewältigt werden.

Nach dem ersten Aufeinandertreffen werden die beiden Galaxien sich wieder ein Stück weit voneinander entfernen, bis sie an einen Umkehrpunkt kommen, an dem die Gravitationskraft die sich voneinander entfernenden Geschwindigkeitskomponenten wieder aufhebt und sie sich wieder aufeinander zu bewegen. Dieser "Tanz" wiederholt sich einige Male, bis sie dann zu einer einzigen Galaxie fusioniert sein werden.

4.4 Entwicklung einer neuen Galaxie

Das Resultat der Verschmelzung von Milchstraße und Andromeda wird eine elliptische Galaxie sein, die Milkomeda genannt werden soll.

Elliptische Galaxien zeichnen sich durch ihre kreisförmig-elliptische Struktur aus und zählen zu den ältesten und massereichsten Sternsystemen. Auf Bildern erscheinen sie meist leicht rötlich. Diese Farbgebung kommt von den K-Riesensternen, die im roten Bereich strahlen, da ihre Oberflächentemperatur relativ gering ist.

Man unterscheidet zwei Formen von elliptischen Galaxien: boxy und diskly. Während erstere kastenförmig erscheinen und die hellsten und massereichsten Galaxien darstellen, sind letztere lichtschwächer und zitronenförmig. Aber auch im Zentrum einer solchen Galaxie gibt es Spannendes zu entdecken. Manche enthalten "Scheiben oder Kerne, deren Sterne sich unabhängig von den Sternen im äußeren Teil bewegen"⁵ oder sogar gegenrotieren. Dieses Phänomen konnte man sich nur durch eine Verschmelzung zweier Galaxien erklären, womit wir wieder bei unserer zukünftigen elliptischen Heimatgalaxie wären. Bei den verschiedenen Szenarien, die Forscher schon untersucht haben, war meistens eine diskly-Ellipse das Ergebnis. [USM, **Elliptische Galaxien**]

⁵siehe USM, *Elliptische Galaxien*

5 Was passiert mit unserem Sonnensystem?

Auch wenn die zukünftige Entwicklung unserer Milchstraße doch einigermaßen geklärt werden konnte, ist natürlich das Interesse über das Schicksal unserer Sonne und vor allem der Erde um einiges größer.

5.1 Die Zukunft der Sonne

Die Sonne umläuft das Milchstraßenzentrum mit einer Geschwindigkeit von etwa 230km/s . Für eine Umrundung braucht sie ca. 220 Millionen Jahre, ein sog. galaktisches Jahr. Dadurch kann man ausrechnen, an welcher Position sich unser Heimatstern während der Kollision befindet und somit seine Zukunft simulieren. Dabei kam heraus, dass die Sonne womöglich ihren Platz weiter entfernt vom neuen Zentrum der elliptischen Galaxie findet und nicht ins Weltall geschleudert wird. Allerdings ist das nur ein mögliches Szenario. Welches Ende es auch nehmen wird, eines steht fest: der Entwicklungsverlauf der Sonne. Denn sie wird sich einmal zu einem roten Riesen aufblähen und mindestens Merkur und Venus, die beiden innersten Planeten, verschlucken. Wieso wird die Sonne plötzlich so groß? Im Moment strahlt unser Stern, weil in ihrem Inneren Wasserstoff zu Helium fusioniert und der Massenunterschied zwischen Edukten und Produkten in Form von Strahlung abgegeben wird. Dabei besteht sie zur Zeit noch aus etwa 73% Wasserstoff und 25% Helium, der Rest sind schwerere Elemente. Im Laufe der Zeit wird der Wasserstoffanteil kleiner werden, der Heliumanteil steigt dadurch natürlich, bis er im Zentrum ganz verschwunden sein wird. Das Wasserstoffbrennen verlagert sich also in die äußeren Bereiche der Sonne, das hier noch Wasserstoff vorhanden ist. Da hiermit ein Temperaturanstieg verbunden ist, dehnt sich die Sonne aus, je weiter, umso näher die Fusionszone an den Rand rückt. Inzwischen sind Druck und Temperatur im Kern so weit angestiegen, dass höhere Elemente bis hin zu Eisen gebildet werden können. Wenn der Rand

erreicht ist, wird sie ihre nun “ausgebrannte” Hülle abstoßen und als weißer Zwerg zurückbleiben. Die Verwandlung in einen roten Riesen geschieht in etwa $4 - 5Gyr$, also ungefähr in der Zeit, in der Andromeda mit uns verschmilzt. [**Abenteuer Universum, Sterne**]

5.2 Das Schicksal unserer Erde

Die Zukunft der Erde hängt natürlich ganz von der Sonne ab, die uns in die äußeren Bereiche der neuen Galaxie mitzieht. Doch da kann es dann ziemlich ungemütlich werden, da sie uns in ihrem Stadium des roten Riesen ziemlich nahe kommen wird und es auf der Erde sehr heiß wird! Wenn unsere Ur-Ur-Ur...Enkel dieses sicherlich fantastische Spektakel betrachten wollen, müssen sie einen Weg aus dieser Misere finden, vielleicht indem sie auf einen anderen Planeten auswandern?

6 Schluss: Mögliche Entwicklung der Menschheit

In zwei bis drei Milliarden Jahren wird also Andromeda mit uns kollidieren und die Sonne sich zum roten Riesen entwickeln, keine besonders rosigen Aussichten. Wenn bis dahin keine Möglichkeit gefunden wurde, unseren Heimatplaneten zu verlassen und umzusiedeln, wird das das Ende der einzigen bisher bekannten Form von intelligentem Leben sein, vorausgesetzt, der Mensch übersteht die Zeit bis dahin!

Bevor diese Aussage weiter diskutiert wird, sollte noch einmal ein Blick zurück geworfen werden, ganz an den Anfang. Vor 13,6 Milliarden Jahren nämlich passierte etwas, das das Leben in dieser Form überhaupt erst ermöglichte: der Urknall. Das noch junge Universum begann zu expandieren und kühlte dabei kontinuierlich ab. Gas verdichtete sich zu Sternen, Sterne zu Galaxien, Galaxien zu Galaxienhaufen. Aus einer solchen "Staubwolke" wird unsere Sonne geboren, das umliegende Gas bildet die Planeten, die fortan um sie kreisen. Das war vor ca. 4,6 Milliarden Jahren. Der Feuerball Erde verliert langsam seine Temperatur, die Bedingung für irdisches Leben entsteht: Sauerstoff reichert sich in der Atmosphäre an! Erste Kleinstlebewesen bevölkern die Erde, entwickeln sich weiter, werden größer und vielfältiger. Das Auftauchen erster menschenähnlicher Säugetiere wird auf 3,6 Mio Jahre v. Chr. datiert, der homo sapiens erschien vor ca. 30000 Jahren auf der Bildfläche und ist bis heute geblieben. **[kleio, Entwicklung des Menschen]** Im 19. Jhd. steigt die Bevölkerungszahl plötzlich sprunghaft an. Heute leben rund 6,9 Milliarden Menschen auf dem blauen Planeten und die Zahl wird weiter steigen! Laut UNO sind es bis 2050 bereits 9 Milliarden trotz abnehmender Geburtenrate. Diesen Belastungen ist unsere Erde auf Dauer nicht gewachsen!

Eines jedenfalls ist sicher: die Technik wird weiter fortschreiten und Unmögliches möglich machen. Denn die Forscher werden Methoden finden, die menschliche Rasse noch widerstandsfähiger zu gestalten. Da erscheinen dann die Zukunftsvisionen mancher Science-Fiction-Autoren gar nicht mehr so abwegig, sei es ein Fahrstuhl

zum Mond, Roboter, die uns bedienen, nur noch idealisierte Nachkommen mit hohem Intelligenzquotienten oder gar schon halb roboterisierte Mitmenschen. Ob man in letzterem Fall dann allerdings noch von biologischer Schöpfung sprechen kann, sei dahingestellt.

Diese "Weiterentwicklungen" tragen sicherlich dazu bei, dass die Menschheit so lange wie möglich auf der Erde bleiben wird, von unvorhersehbaren und unabwendbaren Naturkatastrophen einmal abgesehen. Aber ob das Fortbestehen über Milliarden von Jahren währt und damit der Evolution und Natur trotzt, bleibt fraglich.

"Ich weiss recht gut, dass man über die menschliche Natur nie alles wissen kann, was man wissen sollte. Nur auf eines kann man sich verlassen: dass sie immer wieder Überraschungen bereithält." (*William Somerset Maugham*)

Zusammenfassung

Um noch einmal alle wichtigen Daten und Fakten in Erinnerung zu rufen, erfolgt nun eine knappe Zusammenfassung aller neuen Erkenntnisse.

Nachdem zu Beginn der Bachelorarbeit kurz auf die Gestalt und die Geschichte der Milchstraße und der Andromeda-Galaxie eingegangen wurde, sind mehrere Methoden zur Berechnung der Kollisionszeit aufgeführt worden. Im Mittel kam dabei heraus, dass die beiden Spiralgalaxien in zwei bis drei Milliarden Jahren zum ersten Mal aufeinander treffen werden. Verglichen mit anderen schon bekannten Simulationen ist das ein gutes Ergebnis. Daran anschließend wurden mit den beiden größten Unsicherheitsfaktoren, der Masse der beiden Sternhaufen und der Transversalgeschwindigkeit von Andromeda, verschiedenste Experimente durchgeführt. Dabei waren folgende Zusammenhänge zu erkennen: je größer die Massen, umso schneller erfolgt die Kollision und je schneller Andromeda, umso unwahrscheinlicher wird die Verschmelzung.

Gegen Ende wurde noch auf die Entwicklung unserer Sonne eingegangen, die einem Ende als weißer Zwerg entgegenstrebt, unabhängig davon, ob Andromeda mit uns zur elliptischen Galaxie Milkomeda fusioniert.

Danksagung

An dieser Stelle möchte ich mich bei all denjenigen bedanken, die mir bei meinem bisherigen Werdegang und bei der Erstellung meiner Bachelor-Arbeit geholfen haben.

Ein besonderer Dank gilt als erstes meinem Betreuer Prof. Dr. Andreas Burkert, der mir während der schwierigen Zeit beigestanden und mir gute Tipps gegeben hat. Seine Begeisterung für dieses Fachgebiet war sehr ansteckend. Danach verdient Evangelia Ntormousi, eine Doktorandin in der Sternwarte, meinen Dank, da sie mir immer bei der Erstellung meiner Programme behilflich war und nie die Geduld verloren hat. Aber auch alle anderen Studenten, die während dieser Zeit auch eine Arbeit unter Prof. Burkert erstellt haben, sollen miteinbezogen werden, da sie mir an den zahlreichen Zusammentreffen mit Rat und Tat zur Seite standen.

Des weiteren verdient in diesem Abschnitt mein Physik-Lehrer StR Andreas Meidert einen Platz. Denn er war es, der mir in meiner Kollegstufenzeit am Maristenkolleg Mindelheim das Interesse und die Freude am Fach Astronomie erst nahe gebracht hat.

Nicht zuletzt möchte ich mich bei meinen Eltern bedanken, die mir mein Physik-Studium erst ermöglicht haben und mir nach manchen “Durchhängern” immer wieder neuen Mut gegeben haben.

Anhang 1 Programm "Hello"

```
program hello_nmal

  integer :: n
  print*, "Zahl eingeben:"
  read (*,*) n
  if (n>=0) then
    do i=1,n
      print*, "Hello table!"
    end do
  else
    print*, "Nicht definiert!"
  end if

end program hello_nmal
```

Anhang 2: Programm "Fakultät"

```
program fakultaet
```

```
    implicit none
    integer :: n
    integer :: nfact
```

```
    print*, "Zahl eingeben:"
    read (*,*) n
    nfact = nfactorial(n)
    write(*,*) nfact
```

```
contains
```

```
    recursive function nfactorial (n) result (fac)
        implicit none
        integer :: fac
        integer :: n

        if (n>1) then
            fac=n*nfactorial(n-1)
        else
            fac = 1
        end if
    end function nfactorial
```

```
end program fakultaet
```

Anhang 3: Programm “Kollision Andromeda-Milchstraße”

```
program leapfrog

implicit none

real :: m_a, m_m, m_ges, a, b, dt
integer*4 :: i
real, dimension (600000) :: t, x1, y1, x2, y2, v_x1, v_y1, &
& v_x2, v_y2, x1_, x2_, y1_, y2_, &
& v1, v2, xs, ys, vs, x1s, y1s, &
& x2s, y2s, u_x1s, u_x2s, u_y1s, &
& u_y2s, E
double precision, parameter :: G = 4.54d-4
!Einheit: pc^3/(10^11*m_sonne*a^2)

open (20, file='nummer4', status='unknown', action='readwrite',
form='formatted')
```

!Anfangsbedingungen:

```
m_m = 10000.0 !Einheit: 10^11 m_sonne
m_a = 20.0
m_ges = m_a + m_m
dt = 15000.0 !Einheit: a

x1(1) = 1.0 !Einheit: pc
y1(1) = 0.0
v_x1(1) = 0.0
v_y1(1) = 0.0
x2(1) = 1.0
y2(1) = 800000.0
v_x2(1) = 0.0 !Einheit: pc/a
v_y2(1) = 0.0
```

```

do i = 2,600000
  t(i)=i*dt

  x1_(i) = x1(i-1)+0.5*v_x1(i-1)*dt
  y1_(i) = y1(i-1)+0.5*v_y1(i-1)*dt

  x2_(i) = x2(i-1)+0.5*v_x2(i-1)*dt
  y2_(i) = y2(i-1)+0.5*v_y2(i-1)*dt

  a = force_x1(x1_(i), y1_(i), x2_(i), y2_(i), m_m, m_a)
  b = force_y1(x1_(i), y1_(i), x2_(i), y2_(i), m_m, m_a)

  v_x1(i) = v_x1(i-1)+dt*a/m_m
  v_y1(i) = v_y1(i-1)+dt*b/m_m

  v_x2(i) = v_x2(i-1)-dt*a/m_a
  v_y2(i) = v_y2(i-1)-dt*b/m_a

  x1(i) = x1_(i)+0.5*v_x1(i)*dt
  y1(i) = y1_(i)+0.5*v_y1(i)*dt

  x2(i) = x2_(i)+0.5*v_x2(i)*dt
  y2(i) = y2_(i)+0.5*v_y2(i)*dt

  v1(i) = sqrt(v_x1(i)**2+v_y1(i)**2)
  v2(i) = sqrt(v_x2(i)**2+v_y2(i)**2)

  xs(i) = (m_m*x1(i)+m_a*x2(i))/m_ges !Schwerpunkt
  ys(i) = (m_m*y1(i)+m_a*y2(i))/m_ges !Schwerpunkt

  vs(i) = (m_m*v1(i)+m_a*v2(i))/m_ges !Schwerpunkts-v

```

```

x1s(i) = x1(i) - xs(i) !Koordinaten im Schwerpunktsystem
y1s(i) = y1(i) - ys(i)

x2s(i) = x2(i) - xs(i)
y2s(i) = y2(i) - xs(i)

u_x1s(i) = v_x1(i) - vs(i) !Geschwindigkeiten im SPS
u_x2s(i) = v_x2(i) - vs(i)

u_y1s(i) = v_y1(i) - vs(i)
u_y2s(i) = v_y2(i) - vs(i)

E(i) =      0.5*m_m*(v_x1(i)**2+v_y1(i)**2) &
          & + 0.5*m_a*(v_x2(i)**2+v_y2(i)**2) &
          & - (G*m_m*m_a)/sqrt((x1(i)-x2(i))**2+(y1(i)-y2(i))**2)

print*, t(i), x1(i), x2(i), y1(i), y2(i), E(i)
write (20,*) t(i), x1s(i), x2s(i), y1s(i), y2s(i)
end do

close (20)

contains

real function force_x1 (x1_, y1_, x2_, y2_, m_m, m_a) !F_x

implicit none

real :: r
real :: m_m, m_a, x1_, x2_, y1_, y2_
double precision, parameter :: G = 4.54d-4

r      = (x1_-x2_)**2+(y1_-y2_)**2
force_x1 = -G*m_m*m_a*(x1_-x2_)/r**1.5

```

```
end function force_x1

real function force_y1 (x1_, y1_, x2_, y2_, m_m, m_a) !F_y

implicit none

real :: r
real :: m_m, m_a, x1_, x2_, y1_, y2_
double precision , parameter :: G = 4.54d-4

r      = (x1_-x2_)**2+(y1_-y2_)**2
force_y1 = -G*m_m*m_a*(y1_-y2_)/r**1.5

end function force_y1

end program leapfrog
```

Literaturverzeichnis

- [1] scinexx - Das Wissensmagazin, "SPIRALARME GEBEN RÄTSEL AUF - EIN WELLENPHÄNOMEN IM STERNENSEE DER GALAXIS?", September 2003, Springer-Verlag, Heidelberg - MMCD NEW MEDIA, Düsseldorf
<http://www.scinexx.de/dossier-detail-260-7.html>

- [2] Wikimedia Foundation Inc., "HUBBLE-SEQUENZ", Juli 2011,
<http://de.wikipedia.org/wiki/Hubble-Sequenz>

- [3] Abenteuer Universum, "DIE MILCHSTRASSE", April 2011,
<http://abenteuer-universum.de/galaxien/milch.html>

- [4] Abenteuer-Universum, "DIE ANDROMEDA-GALAXIE", April 2011,
<http://abenteuer-universum.de/galaxien/andro.html>

- [5] Max-Planck-Institut für Astrophysik, "KOLLIDIERENDE GALAXIEN WECKEN SCHWARZE LÖCHER", Februar 2005,
<http://www.astronews.com/news/artikel/2005/02/0502-008.shtml>

- [6] Universitätssternwarte München, "ELLIPTISCHE GALAXIEN", Juni 2009,
<http://www.usm.uni-muenchen.de/people/saglia/dm/galaxien/alldt/node16.html>

- [7] Abenteuer Universum, "DIE ENTSTEHUNG UND ENTWICKLUNG DER STERNE", Januar 2009,
<http://abenteuer-universum.de/sterne/sternentwick.html>

- [8] Maike Vogt-Lüerssen, kleio.org, "DIE ENTWICKLUNG DER MENSCHHEIT", 1999-2011,
<http://www.kleio.org/de/geschichte/menschheit/index.html>

Abbildungsverzeichnis

2.1	Hubble-Sequenz	4
2.2	MilkyWay	5
2.3	Andromeda	7
4.1	Verschmelzung zweier Galaxien	11
4.2	Abstand der beiden Galaxien abhängig von der Zeit	12
4.3	Energie als Funktion der Zeit	14
4.4	Abstand der beiden Galaxien abhängig von der Zeit, diesmal mit Andromedas radialer Geschwindigkeit	15
4.5	Geschwindigkeiten von Andromeda und Milchstraße als Funktion der Zeit	16
4.6	Energie als Funktion der Zeit, diesmal mit Andromedas radialer Ge- schwindigkeit	17
4.7	Verschiedene Massen der Galaxien mit Auswirkung auf die Kollisi- onszeit	18
4.8	Verschiedene Transversalgeschwindigkeiten mit Auswirkung auf die Bahnen	19

Selbstständigkeitserklärung

Hiermit versichere ich,

dass ich diese Bachelorarbeit zum Thema: „Die Dynamik des Milchstraßen-Andromeda-Systems“ selbstständig verfasst habe. Ich habe keine anderen als die angegebenen Quellen und Hilfsmittel benutzt, sowie Zitate kenntlich gemacht.

Mir ist bekannt, dass Zuwiderhandlung auch nachträglich zur Aberkennung des Abschlusses führen kann.

München, 20. August 2011

Ort, Datum

Unterschrift