

Einfluss retrograder Stöße von Sternen  
auf die protoplanetare Scheibe der Sonne  
Praktikum am  
Max-Planck-Institut für Radioastronomie,  
Bonn

Qi Cheng Hua

Betreut von Dipl.-Phys. Andreas Breslau

Star and planet formation in massive young clusters

Prof. Dr. Susanne Pfalzner

23. September 2012

# Inhaltsverzeichnis

<b>1</b>	<b>Zusammenfassung</b>	<b>1</b>
<b>2</b>	<b>Einleitung</b>	<b>2</b>
<b>3</b>	<b>Methode</b>	<b>3</b>
3.1	Eulerverfahren . . . . .	3
3.2	Auswertung . . . . .	4
<b>4</b>	<b>Ergebnisse</b>	<b>8</b>
<b>5</b>	<b>Diskussion</b>	<b>14</b>

# 1 Zusammenfassung

Die Massendichte (Masse pro Flächeninhalt) in der Staubscheibe um unsere Sonne fällt jenseits des Neptuns nach außen hin drastisch ab, viel stärker als es bei Extrapolation der Massendichte diesseits des Neptuns zu erwarten wäre. Ein Vorbeiflug eines anderen Sterns in der frühen Hauptreihenphase der Sonne ist die wahrscheinlichste Ursache.

Ein solcher naher Vorbeiflug eines anderen Sterns und dessen Auswirkungen auf die sonnenähnliche Scheiben wurden mittels Eulerverfahren numerisch simuliert und ausgewertet. Insbesondere wurde bei der Auswertung der Rand der Scheibe berechnet.

Ein Algorithmus zur Bestimmung diesen Randes ist in einigen Fällen schwierig zu finden. Vor dem Abfall der Teilchenanzahl am Rand steigt die Anzahl der Teilchen nochmals an. In der Scheibe entstehen Ringe mit besonders großer Anzahl an Teilchen. Da sich die Staubscheibe um die Sonne dreht, kann der Stern entlang dieser Rotationsbewegung und entgegen dieser Rotationsbewegung an der Sonne vorbeifliegen. Bei letzterem wirkte sich der Vorbeiflug wesentlich schwächer auf die Scheibe aus. Der Rand entfernt sich bei abnehmender Masse des vorbeifliegenden Sterns und zunehmender Entfernung der Flugbahn von der Sonne.

## 2 Einleitung

Die Massendichte (Masse pro Flächeninhalt) in unserem Planetensystem nimmt mit zunehmendem Abstand zur Sonne ab. Bis hin zum Neptun fällt diese nahezu hyperbolisch ab. Jenseits der Neptunbahn fällt die Flächendichte jedoch drastisch ab und bleibt auch in größerer Entfernung konstant. Nach Pfalzner<sup>1</sup> (2012) ist ein naher Vorbeiflug eines anderen Sternes in der frühen Hauptreihenphase der Sonne die wahrscheinlichste Ursache. Es stellt sich die Frage, welche Rahmenbedingungen für einen solch scharfen Rand der protoplanetaren Scheibe vorliegen müssen. Dies wurde in meinem Praktikum untersucht.

In Zukunft wird bei solchen nahen Vorbeiflügen von einem Stoß gesprochen.

Wird das Koordinatensystem so festgehalten, dass die Sonne den Ursprung bildet, so fliegt der andere Stern stets auf einer elliptischen Bahn vorbei. Ein solcher Stoß eines Sterns hat in Abhängigkeit von einigen Parametern unterschiedlich starke Auswirkungen auf die protoplanetare Scheibe. Die Parameter sind:

$m_s$	Masse des vorbeifliegenden Sterns
$p$	Periastron (nächster Abstand Stern-Sonne)
$e$	Exzentrizität der Bahn des vorbeifliegenden Sterns
$\alpha$	Winkel des vorbeifliegenden Sterns zur Ekliptik

---

<sup>1</sup>Prof. Dr. S. Pfalzner (2012). Der Ursprung der Sonne. Sterne und Weltraum 6/2012, S.34-45

### 3 Methode

Der Vorbeiflug des Sterns wurde numerisch simuliert. In unseren Simulationen setzten wir stets eine Scheibe mit einem Außenradius von  $100AE$  auf. Der Vorbeiflug fand auf einer Parabelbahn statt. ( $e = 1$ ) Wir untersuchten ausschließlich retrograde Vorbeiflüge ( $\alpha = 180^\circ$ ), dh. der Stern fliegt entgegengesetzt zur Rotationsbewegung der Scheibe um die Sonne. (Fliegt der Stern in derselben Richtung an der Sonne vorbei, wie die Scheibe um die Sonne rotiert, so spricht man von prograden Vorbeiflügen. ( $\alpha = 0^\circ$ )) Damit hing jede Simulation ausschließlich von den beiden Parametern  $m_s$  und  $p$  ab. Indem nur retrograde Vorbeiflüge betrachtet wurden, beschränken sich die Simulationen auf die zweidimensionale Ebene, sodass oft allein die Angabe von  $x$ - und  $y$ -Komponenten genügt.

Der gravitative Einfluss der Teilchen der Scheibe auf die Sterne und auf andere Scheibenteilchen wurde vernachlässigt. Die Scheibe wurde so aufgesetzt, dass sich ihre Teilchen ohne Einfluss des vorbeifliegenden Sterns auf runden Bahnen um die Sonne bewegen würden.

Die Scheibe bestand aus Teilchen in einem Abstand von 10 bis  $100AE$  von der Sonne. Die Teilchendichte (Anzahl der Teilchen durch Fläche des Rings) wurde in der Scheibe annähernd konstant gewählt. (ca. 0.3 Teilchen pro  $AE^2$ )

#### 3.1 Eulerverfahren

Die Eigenschaften der Sonne werden mit  $\odot$  indiziert, die des vorbeifliegenden Sterns mit  $s$  und die der Scheibenteilchen gar nicht. Für alle Teilchen der Scheibe gilt:

$$F_x = m\ddot{x} \quad (\text{Nach Newton})$$

$$F_x = F_s \frac{x - x_s}{r_s} + F_{\odot} \frac{x}{r_{\odot}} \quad (\text{Wegen der Ähnlichkeit})$$

$$F_s = Gmm_s r_s^{-2}$$

$$F_{\odot} = Gmm_{\odot} r_{\odot}^{-2} \quad (\text{Nach dem Gravitationsgesetz})$$

$$\ddot{x} = Gm_s r_s^{-3} (x - x_s) + Gm_{\odot} r_{\odot}^{-3} x \quad (\text{Ineinander eingesetzt})$$

$$\ddot{y} = Gm_s r_s^{-3} (y - y_s) + Gm_{\odot} r_{\odot}^{-3} y \quad (\text{Analog})$$

$F_x$  ist die Kraft auf das Teilchen in  $x$ -Richtung

$m$  ist die Masse des Teilchens

$x$  ist die  $x$ -Komponente des Orts des Teilchens

$y$  ist die  $y$ -Komponente des Orts des Teilchens

$F_s$  ist die Kraft des vorbeifliegenden Sterns auf das Teilchen

$F_\odot$  ist die Kraft der Sonne auf das Teilchen

$G$  ist die Gravitationskonstante mit  $G = 4\pi^2 \frac{AE^3}{m_\odot a^2}$ .

$r_s = \sqrt{(x - x_s)^2 + (y - y_s)^2}$  ist der Abstand Teilchen-Stern

$r_\odot = \sqrt{x^2 + y^2}$  ist der Abstand Teilchen-Sonne ( $x_\odot = y_\odot = 0$ )

Bei der Sonne/beim Stern fällt ein Summand weg, und es muss nur die Anziehung zum jeweils anderen Stern betrachtet werden. Somit kann ein Euleralgorithmus geschrieben werden, um die Bewegung der einzelnen Teilchen an jedem Zeitpunkt  $t$  zu simulieren:

$$x(t + \Delta t) = x(t) + \dot{x}(t)\Delta t + \frac{1}{2}\ddot{x}(t)(\Delta t)^2$$

$$\dot{x}(t + \Delta t) = \dot{x}(t) + \ddot{x}(t)\Delta t$$

mit fest gewählten beliebigen Startwerten  $x(0), \dot{x}(0)$ .  $\ddot{x}$  wird wie zuvor beschrieben berechnet. Für  $y$  gilt Analoges.

Zur Erhöhung der Rechengenauigkeit können die Zeitschritte des Eulerverfahrens  $\Delta t$  ggf. verringert werden. Alle Simulationen liefen über einen Zeitraum von ca. 3000 Jahren, wobei die Sonne und der Stern ihren geringsten Abstand voneinander innerhalb der ersten 1000 Jahren einnehmen. Sie wurden mit der Programmiersprache Fortran implementiert und auf den Großrechnern des Max-Planck-Instituts für Radioastronomie ausgeführt. Um einheitliche Dateinamen zu erhalten und optimale Berechnungen und Ergebnisse zu erhalten, wurden bestehende und jahrelang weiterentwickelte Simulationsprogramme der Gruppe „Star and planet formation in massive young clusters“ des Max-Planck-Instituts weiterverwendet. Die damit erstellten Simulationen werden mit eigens mit Fortran geschriebenen Programmen ausgewertet.

## 3.2 Auswertung

Die Auswertung erfolgt in zwei Schritten. Zunächst wird die Anzahl der Teilchen in der Scheibe in Abhängigkeit von der Entfernung zur Sonne bestimmt. Dabei werden die Anzahl der Teilchen in kleinen, gleich großen Intervallen ermittelt, sodass die Teilchen in jedem Ring gezählt werden. Alle diese Ringe ergeben zusammen die gesamte Scheibe. Das Programm kann sowohl die Absolutzahl der Teilchen in jedem Ring, als auch die Teilchendichte ausgeben.

Ein zweites Programm glättet die daraus entstehende Kurve (Teilchendichte in Abhängigkeit vom äußeren Radius des Rings) und ermittelt den Rand der Scheibe anhand verschiedener Kriterien. Eine solche Glättung ist notwendig, da die Anzahl der Teilchen in den einzelnen Ringen starken Schwankungen unterliegt. Sonst könnte ein Algorithmus zur Bestimmung des Rands ein lokales Minimum fälschlicherweise als Rand ausgeben. Auf den folgenden Diagrammen wurde die in grün die geglättete Teilchendichte und in rot die Teilchendichte (in  $\frac{1}{2\pi} \cdot$  Teilchenzahl durch Ringgröße in  $AE^2$ ) gegen die Entfernung zur Sonne (in AE) aufgetragen. Die eingezeichneten senkrechten Linien sind die Scheibenränder, die das Auswertungsprogramm ausgibt.

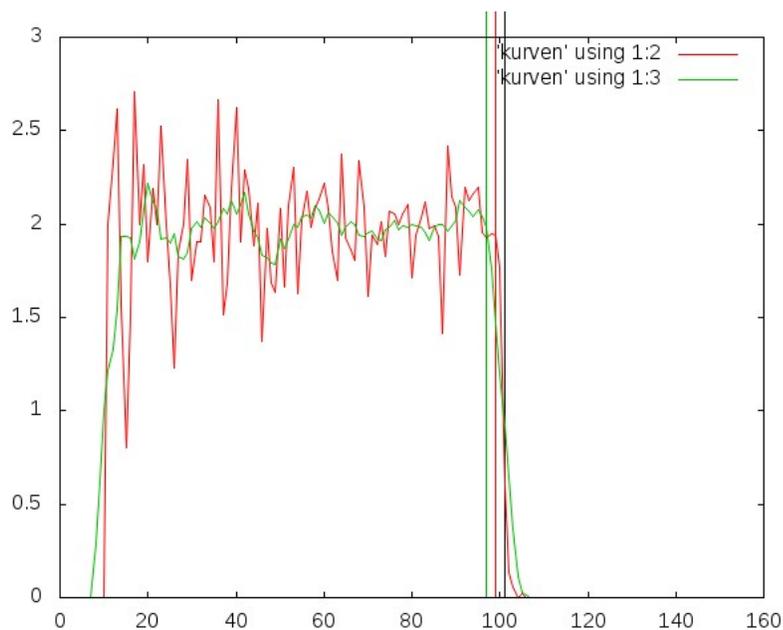


Abbildung 1: Glättung durch Standardglätter,  $m_s = 0.1m_\odot$ ,  $p = 400AE$

Die Glättung erfolgt durch einen Standardglätter. Die geglättete Teilchendichte eines Rings entspricht dem Mittelwert der Teilchendichte desselben und einigen benachbarten Ringen. Die Anzahl der benachbarten Ringe, die miteinbezogen werden sollten, kann angepasst werden. Für unsere Auswertungen betrachteten wir bei jedem Ring die drei benachbarten innereren, die drei benachbarten äußeren Ringe und den Ring selbst.

Der Rand der Scheibe wird anhand der geglätteten Kurve mithilfe verschiedener Kriterien ermittelt. Diese Kriterien liefern annähernd dieselben Ergebnisse. Zum einen kann betrachtet werden, wann die Kurve unter eine festgelegte Grenze fällt. Vor der Grenze ist die Teilchendichte hoch, danach gering. Zum anderen kann ermittelt werden, wann die Kurve am schnellsten fällt. Aus Zeitgründen konnte nur die erste Möglichkeit implementiert werden. Gelegentlich treten Nebenmaxima nach dem eigentlichen Abfall der Teilchendichte auf. Der Auswertungsalgorithmus behebt dieses Problem, indem die Ringe von innen beginnend betrachtet werden und die Auswertung beendet, sobald der erste Ring entdeckt wurde, der das Kriterium erfüllt.

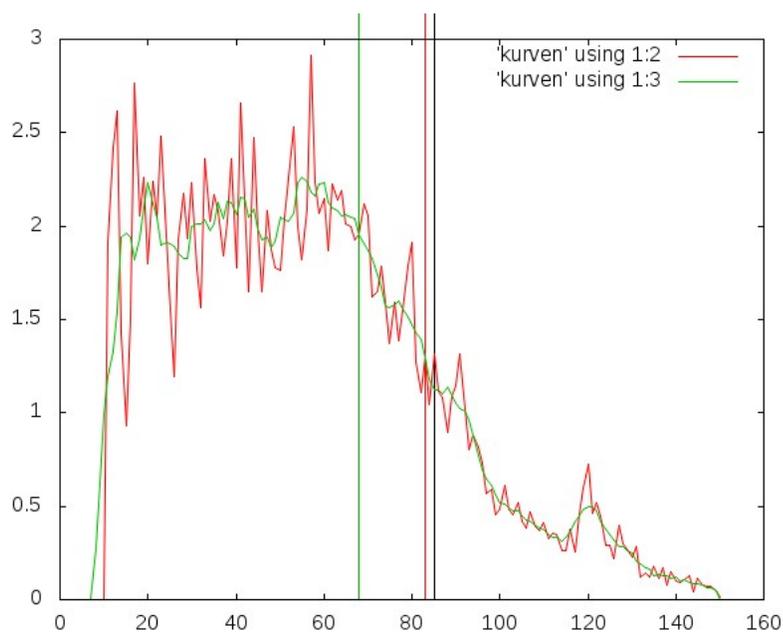


Abbildung 2: Nebenmaximum bei Entfernung von 120 AE zur Sonne,  $m_s = 9m_\odot, p = 200AE$

Dies stellt auch ein Problem des zweiten Kriteriums dar. Wird auch noch das zweite Kriterium betrachtet und nach dem kleinsten (betragsmäßig größten) Wert für die erste Ableitung gesucht, müssen alle Ringe betrachtet werden und statt dem eigentlich gesuchtem Rand kann der Rand des Nebenmaximums ausgegeben werden.

Als Grenze kann der Mittelwert der Teilchendichte aller Ringe, aber auch die Hälfte der maximalen Teilchendichte eines Rings verwendet werden. In den folgenden Diagrammen arbeiten die grüne und die blaue Linie mit dem Mittelwertskriterium, die schwarze Linie mit dem  $\frac{1}{2}$ -Maximum-Kriterium und die rote Linie kombiniert beide Kriterien. Gelegentlich wird eine Linie von einer anderen Linie überdeckt.

Ausgewertet wurde die Scheibe immer nach dem Vorbeiflug. Interessant ist möglicherweise auch die Entwicklung der Scheibe und des Scheibenrandes. Die Bestimmung der Anzahl der Teilchen in Abhängigkeit von der Entfernung des Teilchens zur Sonne wurde bereits erfolgreich für den gesamten Zeitraum in Zeitabständen von je 25 Jahren implementiert, für das zweite Auswertungsprogramm, das die Kurve glättet und den Rand der Scheibe ausgibt, kann dies ebenfalls problemlos nachträglich noch implementiert werden. Dies war in meinem Praktikum jedoch nicht weiter Gegenstand meiner Untersuchungen.

## 4 Ergebnisse

Diese Kriterien werden jedoch problematisch bei Teilchendichteverteilungen, die keinen genügend scharfen Rand aufweisen.

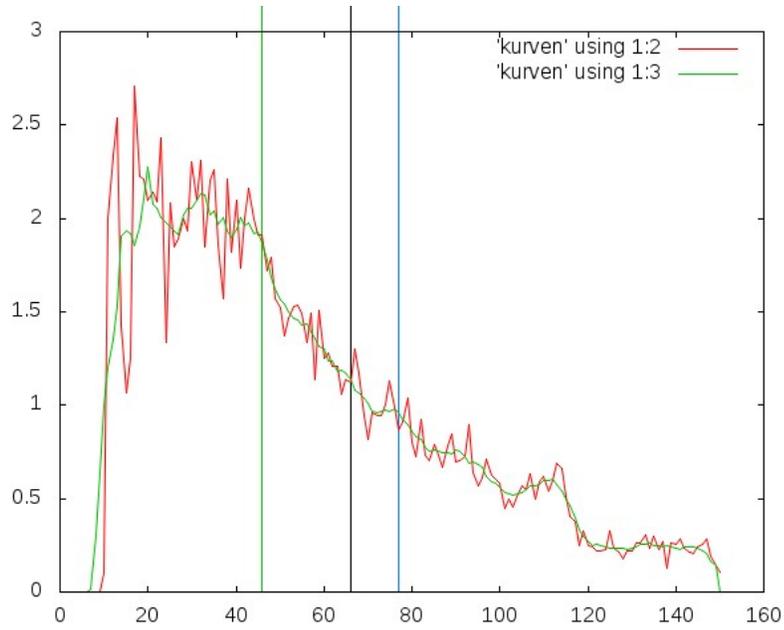


Abbildung 3: langsamer Abfall,  $m_s = 500m_\odot$ ,  $p = 300AE$

Hier ist ein langsamer Abfall der Teilchendichte bei zunehmender Entfernung zur Sonne zu erkennen. Ein Rand ist selbst mit bloßem Auge schwierig zu ermitteln. Werden die Teilchen in der Ebene aufgezeichnet, so erkennt man einen Rand:

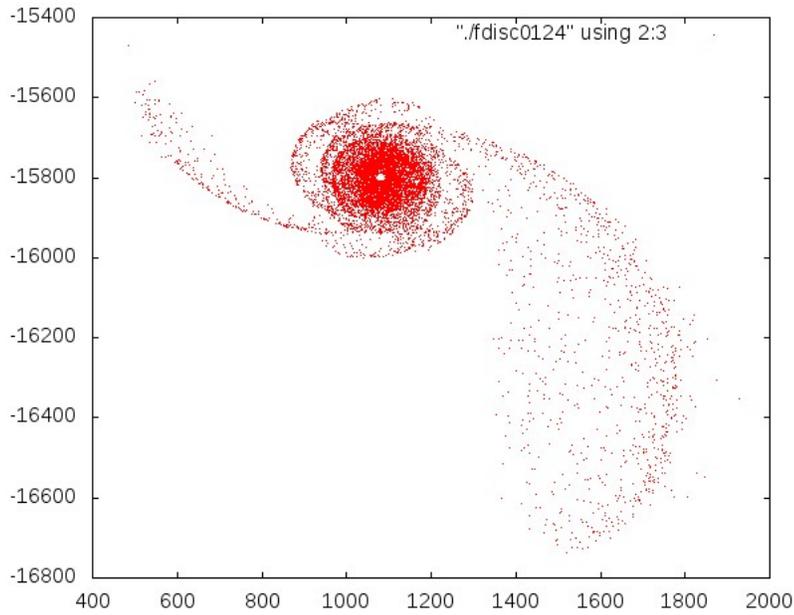


Abbildung 4: Scheibe,  $m_s = 500m_\odot$ ,  $p = 300AE$

Auch wenn der Sonne kaum oder sogar gar keine Teilchen entzogen werden, ist vor dem Abfall der Teilchendichte ein kleines lokales Maximum zu erkennen. Besonders deutlich wurde es bei folgendem Vorbeiflug ( $m_s = 0.3m_\odot, p = 200AE$ ):

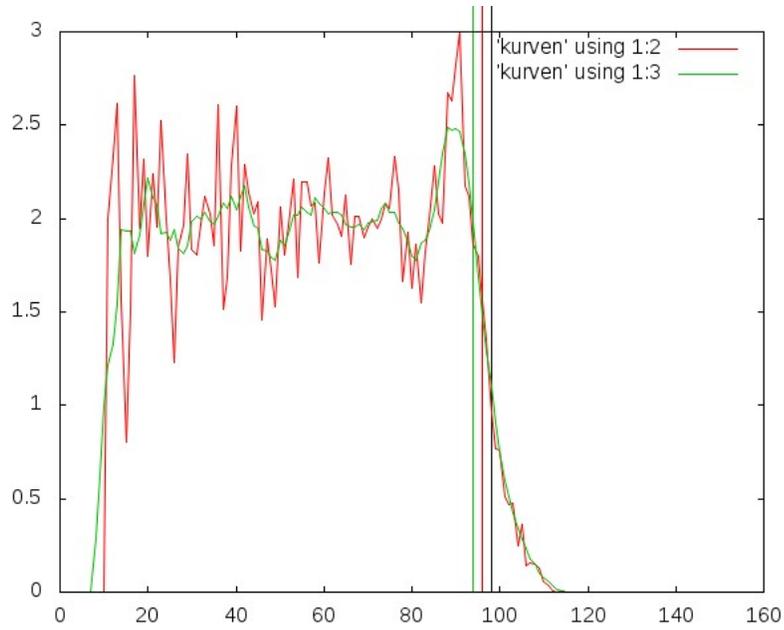


Abbildung 5: Maximum vor Rand in  $90AE$  Entfernung zur Sonne,  $m_s = 0.3m_\odot, p = 200AE$

Ein prograder Vorbeiflug entzieht der Sonne wesentlich mehr Teilchen als ein retrograder Vorbeiflug. Die folgenden vier Bilder wurden allesamt mit einer Simulation eines in  $200AE$  vorbeifliegenden Sterns mit einer Masse von einer Sonnenmasse erzeugt.

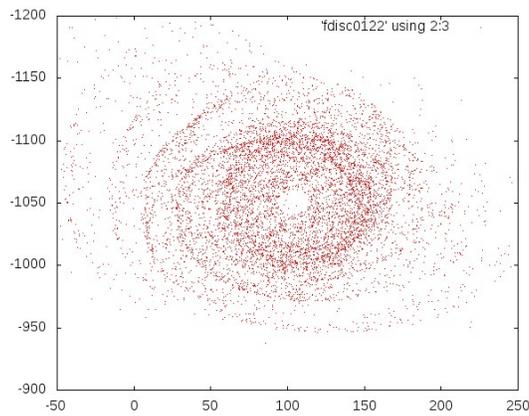


Abbildung 6: Scheibe um Sonne nach progradem Vorbeiflug

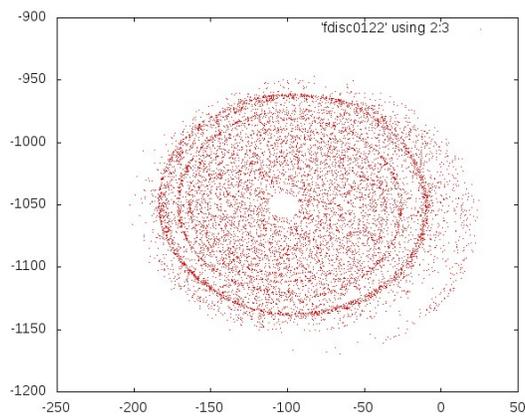


Abbildung 7: Scheibe um Sonne nach retrogradem Vorbeiflug

Zoomt man aus dem Bild heraus, so sieht das so aus:

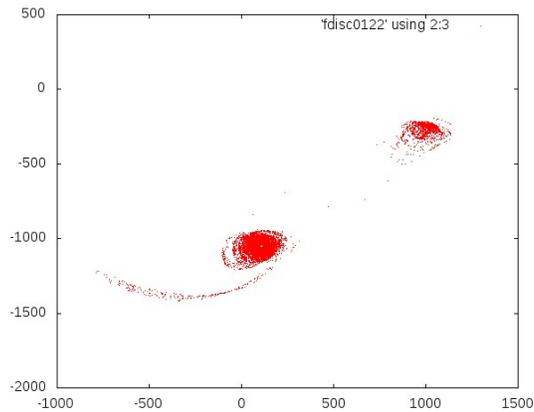


Abbildung 8: Scheibe um Sonne nach progradem Vorbeiflug

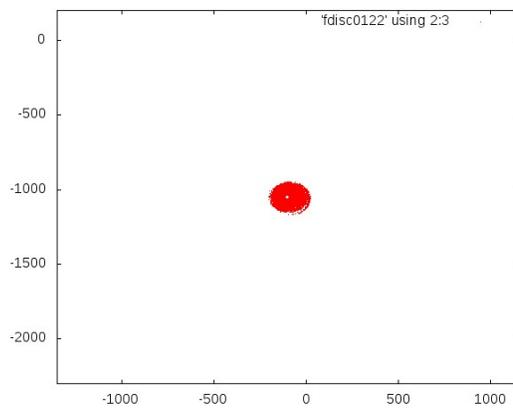


Abbildung 9: Scheibe um Sonne nach retrogradem Vorbeiflug

Man sieht, dass bei prograden Stößen einige Teilchen auf die Scheibe des vorbeifliegenden Sterns (rechts oben) gezogen wurden. Dies ist bei retrograden Vorbeiflügen bei keiner unserer Simulationen geschehen, unabhängig von der Wahl des Periastron und der Masse des zweiten Sterns.

Es ist festzustellen, dass die Entfernung des Rands zur Sonne mit abnehmendem Periastron und zunehmender Masse zunimmt.

Gelegentlich fällt die Massendichte beim Rand nicht genügend schnell ab. Dadurch ergeben sich große Schwierigkeiten, den Rand der Scheibe algorithmisch möglichst exakt zu bestimmen, zumal die Definition eines Randes in diesen Fällen ungenau ist. Insbesondere sind dafür meine Algorithmen nicht so gut geeignet.

In Abbildung 7 sind Ringe mit besonders vielen Teilchen zu erkennen. Auf dem Diagramm nehmen diese durch ihre große Anzahl eine dunklere rötliche Farbe an. Ob diese Ringe ein zufälliges Produkt sind oder langfristig bestehen bleiben, müssen weitere Langzeit-Simulationen zeigen.

## 5 Diskussion

Viele Simulationen liefern tatsächlich einen klar definierten Scheibenrand. Dies kann jedoch auch daran liegen, dass in diesen Situationen die Scheibe weitgehend unbeeinflusst blieb und lediglich der Scheibenrand von der Anfangsverteilung zu sehen war.

Von zentraler Bedeutung für zukünftige Analysen ist die Entwicklung eines guten Algorithmus, um den Scheibenrand zu bestimmen.

Die Entwicklung der Scheibengrenze ist ebenfalls ein interessanter Aspekt für zukünftige Untersuchungen. Die Grundlagen dafür wurden bereits gelegt.

Die Ergebnisse können auf protoplanetare Scheiben beliebiger Sterne verallgemeinert werden. Daher wurden auch Stöße sehr massereicher Sterne simuliert. Werden die Massen herunterskaliert, so können die Ergebnisse auch auf Planetenscheiben kleinerer Sterne übertragen werden.

Momentan liegen etwa 110 verschiedene, ausgewertete Simulationen mit retrograden Vorbeifügen vor. Diese Anzahl kann in der Zukunft erhöht werden. Die Simulationen können auch auf andere Vorbeiflüge erweitert werden, indem zB. der Winkel  $\alpha$  geändert wird oder der Stern mit anderer Exzentrizität den Vorbeiflug vollzieht.

Schließlich können mithilfe der gewonnenen Erkenntnissen die Rahmenbedingungen des nahen Vorbeiflugs eines Sterns in der Frühphase unserer Sonne ermittelt oder zumindest eingeschränkt werden.