

Liebe Leserin, lieber Leser,

die Entdeckung des **d e t e r m i n i s t i s c h e n** Chaos hat die Weltsicht des Naturforschers auf immer verändert. Chaos erscheint ihm als der Normalfall für hinreichend komplexe Systeme. Insbesondere abgeschlossene konservative Systeme wie Kugelsternhaufen und Galaxien, die nicht in der Lage sind, Energie durch Reibung loszuwerden, erweisen sich als chaosanfällig. Die wenigen Erhaltungsgesetze, man denke an Energie- und Drehimpulserhaltung, engen das Reich des Erlaubten und Möglichen nicht wirksam ein. Chaos ist kein Grund, intellektuell zu kapitulieren. Chaosforscher spüren noch im scheinbar Zufälligen Regelmäßigkeiten auf!

Der Mai-Newsletter endete mit der Forderung nach einer Beschreibung galaktischen Sternengewimmels in Begriffen der Gasphysik: Dichte, Druck, Temperatur, ... Das in Rede stehende „Gas“, im folgenden „Sternengas“ genannt, besteht aus Myriaden von Sternen, die unter der Fuchtel der Schwerkraft stehen. Diese Sicht auf die Dinge liegt insbesondere bei elliptischen¹ Galaxien nahe, sog. E-Galaxien. Sie sind nahezu gasfrei, aber voll von Sternen. „Sternengas“ hat seltsame Eigenschaften. Diese sind keine „fake news“, es liegt an unserer mangelnden Erfahrung mit „Sternengas“!

Von einem gewöhnlichen Gas, einem aus Atomen und Molekülen, weiß man, dass es „vergesslich“ ist. Das liegt an den häufigen Stößen zwischen den Gasparkeln. Das Sternengas in den Galaxien aber ist „stoßfrei“. Umso erstaunlicher ist, dass E-Galaxien einen ausgeglichenen (relaxierten) Eindruck machen. Offenbar wurde bei ihnen die Erinnerung an die vorgeburtlichen Umstände getilgt. Es klingt paradox, aber Chaos legt den Grund für ein un-chaotisches, ordentliches Aussehen!

Eines 40. Todestages sei gedacht. Am 17. Juni 1977 starb in den USA der Raumfahrtpionier Wernher von Braun (geb. 1912). Es ist unnötig, hier auf die Lebensleistung des Ingenieurs und Organisators näher einzugehen. Sie dürfte noch hinlänglich erinnerlich sein.

Der Namenspatron für das von-Braun'sche Saturn-Programm der NASA geht für uns in diesem Monat in die Opposition. Mit dem Gott ist die Erinnerung

¹ eigentlich: ellipsoidischen

an ein g o l d e n e s Zeitalter verknüpft. Spaß beim Beobachten des beringten Planeten wünscht

Hans-Erich Fröhlich

Der Himmel im Juni

Venus ist der Star des Morgenhimmels. Anfang des Monats nimmt sie mit fast 46° wieder einmal ihren größten westlichen Winkelabstand zur Sonne ein. Bereits bei kleiner Vergrößerung ist die Halbvenus auszumachen. Danach wird sie naturgemäß zwar voller, aber gleichzeitig scheinbar kleiner. Sie entfernt sich von uns. Am Monatsende geht sie bereits kurz vor 3 Uhr MESZ auf.

Jupiter beendet am 10. Juni mit dem Stillstand den Oppositionsmodus. Am Monatsende geht Jupiter bereits kurz nach Mitternacht unter.

Saturn feiert am 15. Juni Opposition. Wie im Hochsommer nicht anders zu erwarten, muss man sich nicht den Hals verrenken: Der Planet steht tief im Süden und weilt nur gut acht Stunden über dem Horizont! Schauplatz ist der Schlangenträger, 25° unterhalb des Himmelsäquators. Also nichts für Hyperboreer!

Dafür ist den Völkern des Nordens die Sonne günstig gesinnt. Am 21. Juni, 6 Uhr 24 MESZ, sind für einen Augenblick alle Gefilde nördlich des Polarkreises gleichzeitig beleuchtet: Sommersonnenwende!

Infolge der Präzession haben sich die Tierkreiszeichen gegenüber den zugeordneten Sternbildern inzwischen um eine Zeichenlänge verschoben. Mit der Sommersonnenwende verlässt die Sonne das Zeichen der Zwillinge und tritt in das Zeichen des Krebses. Nur zehn Stunden später verlässt sie das Sternbild Stier und wechselt ins Sternbild der Zwillinge.

Stellardynamik (Forts.)

Auch wenn das Sternengewimmel in einem Sternsystem gerne mit dem atomaren bzw. molekularen Gewusel in einem gewöhnlichen Gas verglichen wird, es gibt bemerkenswerte Unterschiede:

1. Gasteilchen kollidieren andauernd, weil der Weg zwischen zwei Stößen normalerweise sehr viel kürzer ist als die Größe des Gefäßes, welches das

Gas umschließt. Es sind diese andauernden Kollisionen, die dafür sorgen, dass (a) ein Gas den zur Verfügung stehenden Raum sofort ausfüllt und (b) sich eine universelle Geschwindigkeitsverteilung (Maxwellverteilung) der Gaspartikeln herausbildet, die allein von der Temperatur abhängt. Der Gleichgewichtszustand ergibt sich, technisch gesprochen, durch Entropiemaximierung², der Forderung nach maximaler Unordnung. Anders Galaxien: Sie sind „stoßfrei“. Zum geometrischen Zusammenprall von Sternen kommt es nie – sie sind viel zu dünn gesät –, und selbst nahe³ Sternbegegnungen gravitativer Art, die zu einer Änderung der Bahnen durch Energie- und Impulsaustausch führen, sind sehr selten. Sie mögen in den dichten Partien von Kugelsternhaufen vorkommen, nicht aber in „luftigen“ Galaxien.

2. Die Gaspartikel spürt die Anwesenheit anderer nur während des Stoßes. Die Bewegung eines Sterns hingegen wird von einer Kraft großer Reichweite diktiert, der Schwerkraft⁴!

Dass ein gewöhnliches Gas seine Geschichte schnell „vergisst“ und einem gestaltlosen Zustand zustrebt (der sich als Mittelung über alle denkbaren Möglichkeiten erweist), leuchtet ein – wegen der „Anrempeleien“⁵ Wieso aber erscheint das Sternengas in E-Galaxien amorph, also ohne „Ecken und Kanten“, und folgt der radiale Flächenhelligkeitsabfall (in Größenklassen pro Himmelsfläche) einem universellen $r^{1/4}$ -Gesetz, wo doch Sternengas „stoßfrei“ ist?

²Von einem gewöhnlichen Gas weiß man, dass es, sich selbst überlassen, den Zustand maximaler Entropie, sprich maximaler Unordnung, anstrebt. Das besagt der 2. Hauptsatz der Thermodynamik, 1865 aufgestellt von Rudolf Clausius (1822–1888). Als Naturgesetz ist der Entropiesatz zwar zweitklassig, weil nur statistisch gültig, dafür zeichnet er als einziges Grundgesetz der klassischen Physik eine Zeitrichtung aus! Alle anderen Grundgesetze sind mit Bezug auf die Zeit symmetrisch: Zeigte ein Planetarium unangekündigt eine Reise in die Vergangenheit, es fiel vermutlich kaum jemandem auf! (Ungewöhnlich wäre allerdings die Verkürzung der Tageslänge durch Gezeitenreibung.)

³Genaugenommen spielen die seltenen nahen Begegnungen nur eine untergeordnete Rolle, verglichen mit den häufigeren Begegnungen mit nicht-ganz-so-nahen Sternen.

⁴Dies trifft gleichermaßen auf Plasmen zu: Die elektrischen Kräfte zwischen geladenen Teilchen, anziehende wie abstoßende, fallen, wie bei der Gravitation, mit dem Quadrat des Abstands. Plasmaphysik (Fusionsforschung) und Stelldynamik profitieren voneinander!

⁵Dank des chaotischen Verhaltens bei Stoßprozessen werden auch entlegene Bereiche im Reich des Erlaubten schnell erreicht.

Auf den Widerspruch zwischen Alter und Aussehen von E-Galaxien (und von Galaxienhaufen, wie dem Coma-Haufen) machte 1939 der Astronom Fritz Zwicky (1898–1974) aufmerksam: Das Universum sei viel zu jung, als dass es in der Kürze der Zeit zu relaxierten Galaxienhaufen und Galaxien hat kommen können! Zwicky war davon ausgegangen, dass es des Austausches von Energie und Impuls mittels gravitativer Zweierstöße⁶ von Sternen bedarf. Sehen also Galaxien lediglich relaxiert aus, ohne es zu sein? Diese Frage muss man bejahen. Da eine deutliche Änderung der Bahnen von Einzelsterne durch gravitative Begegnungen erst nach vielen Weltaltern zu erwarten ist, müssen Sternsysteme einen Großteil ihrer Geschichte bewahrt haben. Sie ist im Bewegungsverhalten der Sterne konserviert. Man muss nur, wie der Astro-Archäologe, genau genug hinschauen! Da verraten sich beispielsweise Sternströme, das sind Gruppen von Sternen gleichen Alters und gleicher Geburtsstätte, dadurch, dass deren Mitglieder *i m m e r n o c h* wie die Fische eines Schwarms durchs Sternengewimmel der Galaxis ziehen.

Dass E-Galaxien einander ähneln wie ein Ei dem anderen, kann nur mit den Umständen ihrer Geburt zu tun haben. Und da scheiden sich die Geister.

Noch vor wenigen Jahrzehnten meinte man, E-Galaxien seien vor nicht ganz zwölf Milliarden Jahren und nahezu schlagartig beim Kollaps einer mehr oder weniger monolithischen Gasmasse entstanden. In einer einzigen intensiven Phase der Sternentstehung wurde nahezu das gesamte Baumaterial (Gas) in Sternen verbaut. Am Himmel muss sich ein wahres Feuerwerk abgespielt haben! Neuere Entstehungsszenarien sehen die Bildung einer E-Galaxie nicht als ein isoliertes Ereignis an. Man versucht vielmehr, die Galaxienbildung in den Kontext der kosmologischen Strukturbildung einzubinden. Danach hat sich die Entstehung über einen längeren Zeitraum hingezogen. Kleine Sternsysteme verschmolzen zu größeren, diese wiederum zu noch größeren. Genaugenommen ist dieser hierarchische Prozess des allmählichen Wachsens auf Kosten der Kleinen noch im Gange, allerdings inzwischen deutlich abgeschwächt. Es gibt ihn noch, den „Kannibalismus“! Gelegentlich verleibt sich eine größere Galaxie eine Zwerggalaxie ein. Uns selbst steht ein Großereignis bevor: Die Galaxis, das Milchstraßensystem, wird sich eines Tages mit dem Andromedanebel zu einer sehenswerten E-Galaxie zusammen tun!

⁶Raumfahrttechniker nutzen den Energie- und Impulsaustausch beim Swing-by aus, um Raumsonden auf Trab zu bringen. Wegen des enormen Masseunterschieds zwischen Sonde und beispielsweise Jupiter fällt nur die Richtungsänderung der Sonde auf.

Warum E-Galaxien relaxiert aussehen und welches Trauma die vorgeburtlichen Umstände hat vergessen lassen, soll weiter unten beispielhaft am traditionellen Szenario erörtert werden.

Heftige Relaxation

Ein Kandidat, der Zwickys Paradoxon lösen kann, heißt „heftige Relaxation“. Egal wie E-Galaxien entstehen, ob monolithisch oder hierarchisch, es kommt stets zu starken Schwankungen des Schwerefeldes. Dann aber ist die Energie (kinetische + potentielle) eines frei-fallenden Körpers keine fixierte Größe mehr. Energie und Impuls werden unter den frei-fallenden Körpern ausgetauscht. Es ist dieses Geben und Nehmen, das zum Ausgleich führt, zur Relaxation! Wir lassen offen, ob es sich bei den Körpern um Sterne oder Mini-Galaxien handelt.

Die kollektiven Schwingungen, die auf den gravitativen Kollaps folgten, wurden schnell gedämpft, geordnete Bewegungen (Strömungen) in Zufallsbewegung der Sterne überführt („thermalisiert“). Die „Temperatur“ des Sternengases stieg. Der Tumult zeitigte Erfolg: Ein paar kurze heftige Oszillationen und schon haben wir ein ausgeglichenes Sternsystem – je irregulärer⁷ die Startkonfiguration war, desto reguläre und überzeugender ist das Ergebnis!

Dabei ging es, was die Bahnbewegung der Sterne anbelangt, chaotisch zu. Chaos aber ist das Mittel, die Erinnerung⁸ an den Anfang zu tilgen. Der Zustand nach dem „Durchschütteln“ ist statistisch gesehen wahrscheinlicher als der Anfangszustand (und deshalb weniger informativ). Die ursprüngliche Hoffnung, der Endzustand sei – wie bei einem ordinären Gas – der wahrscheinlichste, hat sich aber nicht erfüllt⁹.

In dem Maße, in dem das Durchmischen voranschritt und die anfänglichen Inhomogenitäten sich im allgemeinen Sternfeld auflösten, also ihre Individualität verloren, wuchs die charakteristische Zeitspanne, innerhalb derer mit

⁷Eine gewisse „Klumpigkeit“ ist allemal der Relaxation förderlich.

⁸Da es sich um ein konservatives System aus Punktmassen handelt, also eines ohne Reibung, kann die Information über den Anfangszustand *t h e o r e t i s c h* niemals verschwinden. Sie wandert aber in immer feinere Details im Orts- und Geschwindigkeitsraum, bildlich gesprochen, in die zehnte, hunderste, tausendste . . . Stelle hinter dem Komma und ist damit *p r a k t i s c h* verloren.

⁹Schuld daran tragen vermutlich himmelsmechanische Resonanzen, wodurch einige Sterne auf hohe Geschwindigkeiten katapultiert werden. Es entsteht eine Zwei-Komponenten-Struktur: ein Kern, umgeben von einem ausgedehnten Halo.

Strukturänderungen zu rechnen ist, schnell ins Astronomische. E-Galaxien, jedenfalls solche in Isolation, also ohne störende Nachbarn, sind, was nach all dem Gesagten kaum mehr überrascht, *u n f e r t i g e* und in ihrer Vervollkommnung *g e h e m m t e* Gebilde! Die „Unfertigkeit“ erkennt man u. a. daran, dass es bisher nicht zur Energiegleichverteilung kam. Da im Schwerfeld alle Körper gleich schnell fallen, haben nach der Phase der heftigen Relaxation die Sterne, unabhängig von ihrer Masse, beim Fallen vergleichbare Endgeschwindigkeiten erreicht. (In der Luft, die wir atmen, ist das anders: Die schweren Kohlendioxidmoleküle bewegen sich im Schnitt langsamer als die leichten Sauerstoff- oder gar die Stickstoffmoleküle. Bei „richtigen“ Stößen zwischen elastischen Kugeln kommt es zur Energiegleichverteilung.)

Open End

Die Frage, ob Sternsysteme jemals „fertig“ werden, ist rein spekulativ, da die Vollendung, sofern nichts dazwischen kommt, tausende (!) Weltalter auf sich warten ließe. In Analogie zu einem gewöhnlichen Gas erwartete man, auch ein selbstgravitierendes Sternengas strebe einem Zustand maximaler Entropie zu, lässt man ihm nur Zeit. Weit gefehlt! Für *e n d l i c h e* Sternsysteme, solche mit endlicher Masse (aber sehr vielen Sternen), gibt es überhaupt keinen solchen Endzustand der Ruhe¹⁰ – was mit der langen Reichweite der Schwerkraft zu tun hat! Sternsysteme mit ausgeprägter Kern-Halo-Struktur neigen vielmehr zu unbegrenzter Selbstaufheizung und -auflösung. Schrumpft die Kernregion, steigen Sternendichte und „Temperatur“ des Sternengases zunächst allmählich an. Sterne begegnen in der Kernregion einander immer häufiger und werden im Mittel immer schneller (Temperaturanstieg!). Da die Natur stets auf Temperatúrausgleich bedacht ist, strömt Wärmeenergie vom „heißen“ Kern in die umgebende „kühle“ Hülle. Diese dehnt sich aus. (Man kennt das von den Roten Riesensternen.) Einige Sterne erlangen Fluchtgeschwindigkeit und werden wegkatapultiert. Der Energieverlust der Kernregion durch Wärmeabtransport führt indes keineswegs zum Temperatúrausgleich, sondern macht alles nur noch schlimmer! Das Sternengas eines Sternsystems hat nämlich, wie jedes seiner Partikeln übrigens auch, eine seltsame Eigenschaft, eine *n e g a t i v e* Wärmekapazität: Anders als der

¹⁰Die düstere Vorstellung vom „Wärmetod“ des Weltalls beruhte auf der Annahme eines Entropiemaximums. Man hatte vergessen, die Schwerkraft in die Thermodynamik einzubeziehen!

Morgenkaffee in der Tasse wird es durch Wärmeverlust wärmer! Diesen Teufelskreis der Selbsterhitzung nennt man gravo-thermische Katastrophe. Was für die „luftigen“ Galaxien in weitester Ferne liegt, kann bei galaktischen Kugelsternhaufen dank ihrer vergleichsweise kurzen Relaxationszeit bereits heute studiert werden: der gravo-thermale Kernkollaps¹¹.

Die Idee zur „heftigen Relaxation“ hatte der englische Astrophysiker Donald Lynden-Bell (geb. 1935). Sie ist inzwischen ein halbes Jahrhundert alt, Grund genug, daran zu erinnern.

¹¹Nach endlicher Zeit strebt die Sternendichte im Zentrum eines Kugelsternhaufens gen Unendlich. Nur Energiezufuhr, beispielsweise durch Bildung enger Doppelsterne im Zentrum, kann diesen Vorgang stoppen und umkehren. Vergleichbares geschah mit der Protosonne: Die Phase quasi-statischer gravitativer Selbsterhitzung wurde vor 4,6 Milliarden Jahren durch das Einschalten der Kernfusionsheizung beendet. Man muss heizen, damit es nicht noch heißer wird!