

Das System der kleinen Planeten.

Von

Prof. Dr. Adalbert Prey.

Vortrag, gehalten am 14. November 1934.



Im Altertum stellte man sich die Erde als Mittelpunkt des Weltsystems vor, umkreist von sieben Planeten, die, nach ihren Umlaufzeiten geordnet, die folgenden waren: Mond, Merkur, Venus, Sonne, Mars, Jupiter und Saturn. Es waren also Sonne und Mond mitgezählt, so daß von unseren großen Planeten damals fünf bekannt waren, wenn wir die Erde mitrechnen, sechs. Noch Kepler, der schon auf dem Standpunkte des Kopernikanischen Systems stand, nach welchem die Sonne den Mittelpunkt des Systems bildete, baute auf diese sechs Planeten die phantastische Idee seines *Mysterium Kosmographicum* auf. Er fand nämlich folgendes: Wenn man jedem Planeten eine Kugel zuordnet, so daß die Planetenbahn ihren Umfang bildet, so kann man in jede Kugel einen der fünf regelmäßigen Körper der Geometrie so einordnen, daß er mit seinen Ecken in die eine Kugeloberfläche fällt, während seine Seitenflächen die nächstinnere Kugel berühren. Ein Tetraeder zum Beispiel, welcher in die dem Saturn zugehörige Kugel eingelegt wird, berührt mit seinen Flächen die zu Jupiter gehörige Kugel. Nun gibt es aber nicht mehr als fünf regelmäßige Körper: Tetraeder, Oktaeder, Würfel, Ikosaeder und Dodekaeder. Da es nun nur fünf solche Körper gibt, so kann man damit auch nur fünf Zwi-

schenräume ausfüllen. Kepler sah darin direkt den Beweis dafür, daß es nur sechs Planeten geben kann. Diese Idee, an die wohl schon im 18. Jahrhundert kaum jemand mehr geglaubt hat, wurde gründlich zerstört, als im Jahre 1781 durch Herschel der Planet Uranus entdeckt wurde.

Dieser Entdeckung folgte im Jahre 1846 noch die Entdeckung des Neptun. Man vermutete aber schon lange, daß auch zwischen Mars und Jupiter noch ein Planet existieren müßte. Groß konnte er allerdings nicht sein, sonst hätte er längst entdeckt sein müssen. Aber es war gewissermaßen ein Platz frei. Es hatte nämlich Bode im Jahre 1772 gefunden, daß sich die Abstände der Planeten von der Sonne durch die empirische Formel $0.4 + 0.3 \times 2^n$ darstellen lassen. Auch der später entdeckte Uranus fügt sich in diese Reihe. Es ist nämlich

	berechnet		beobachtet			berechnet		beobachtet	
Merkur	0.4	0.39	Jupiter	n=4	5.2	5.20			
Venus	n=0	0.7	0.72	Saturn	n=5	10.0	9.56		
Erde	n=1	1.0	1.00	Uranus	n=6	19.6	19.22		
Mars	n=2	1.6	1.53	Neptun	n=7	38.8	30.11		
	n=3	2.8		Pluto	n=8	77.2	39.60 ¹⁾		

Obwohl nun diese Reihe schon für Merkur nicht stimmt, da man hier das zweite Glied der Reihe ganz weglassen muß, so war es doch naheliegend, an der Stelle $n=3$ noch etwas zu vermuten. Andererseits wäre es aber auch nicht wunderbar gewesen, wenn

¹⁾ Der neuentdeckte Planet Pluto fügt sich besser an die Stelle $n=7$ als Neptun.

diese Lücke tatsächlich vorhanden wäre, denn die beiden Gruppen von Planeten, die oberen und die unteren, sind ihrer ganzen Natur nach keine einfache Reihe. Die unteren sind offenbar eine ganz andere Generation als die oberen. Sie haben eine große Dichte, kleine Halbmesser und lange Umdrehungszeiten, während die oberen kleine Dichte, große Halbmesser und kurze Umlaufzeiten haben. Es wäre also nicht sehr merkwürdig gewesen, wenn zwischen diesen beiden Reihen eine Kluft geblieben wäre.

Wir haben für:

	Masse	Dichte	Umdrehungszeit
Merkur	0.06 Erdmassen	5.65	87.9 Tage
Venus	0.82	5.41	?
Erde	1	5.56	23 ^h 56 ^m
Mars	0.11	3.99	24 ^h 37 ^m
Jupiter	318	1.31	9 ^h 55 ^m
Saturn	95	0.72	10 ^h 29 ^m
Uranus	15	0.80	?
Neptun	17	1.17	7 ^h 45 ^m

Tatsächlich wurde am 1. Jänner 1801 von Piazzi in Palermo ein Objekt 7. bis 8. Größe entdeckt, das man zuerst für einen Kometen hielt, dessen planetarischer Charakter sich aber bald herausstellte und dessen große Bahnachse mit 2.8 gut in die Bodesche Reihe paßte. Diese Entdeckung brachte aber eine neue Schwierigkeit, nämlich: Wie bestimmt man die Bahn eines solchen Körpers? Bei Uranus, der vor kurzem entdeckt worden war und für den man auch eine Bahn brauchte, war es nicht so kritisch. Er ist ein großer

Körper und man brauchte nicht die Angst zu haben, daß man ihn wieder verliert; da konnte man sich Zeit lassen. Bei einem so kleinen Objekt aber mußte man besorgt sein, daß man es bei seinem nächsten Auftauchen aus den Strahlen der Sonne nicht mehr finden würde und daß man es dann neuerdings suchen müßte. Da ist es nun Gauß gelungen, seine berühmte Methode der Bahnbestimmung zu entwickeln und damit die Wiederauffindung im Jänner 1802 zu ermöglichen. Der Planet erhielt den Namen Ceres, und damit schien die Lücke ausgefüllt.

Wider alles Erwarten fand aber am 28. März 1802 Olbers einen zweiten Planeten, der Pallas genannt wurde und auch in die Lücke paßte, so daß man zu der Hypothese neigte, daß es etwa Bruchstücke eines Körpers sein könnten. Nun folgte bald die Entdeckung der Juno (1804, Hardig) und der Vesta (1807, Olbers); damit schien vorläufig ein Ende zu sein.

Erst im Jahre 1845 begann eine neue Ära der Entdeckungen. Die Ausbeute war über alles Erwarten groß. Im Jahre 1890 war die Zahl schon auf 302 gewachsen. Wir fragen zunächst: Wie entdeckt man überhaupt Planeten? Die Methode, die man damals anwendete, war äußerst mühevoll. Zunächst mußte man sich auf jene Gegend des Himmels konzentrieren, wo solche Planeten überhaupt zu erwarten waren. Da alle großen Planeten in der Ekliptik laufen, so war es wahrscheinlich, daß auch hier die Ekliptik bevorzugt sein werde. Da nun die Objekte sehr klein

sind, so daß von einem scheinbaren Durchmesser keine Spur wahrzunehmen ist und sie also genau so aussehen wie Fixsterne, so bleibt nichts übrig, als von der betreffenden Gegend eine Sternkarte aufzunehmen und diese einige Stunden später oder am nächsten Tage wieder mit dem Himmel zu vergleichen. Während die Fixsterne ihre Stellung gegenseitig nicht ändern, ist der Planet gewandert. Das Objekt, welches sich verschoben hat, ist also ein Planet. Mit dieser Methode hat Palisa in Wien über hundert solche Planeten gefunden, wobei gleichzeitig eine große Anzahl guter Sternkarten der betreffenden Gegenden des Himmels entstanden ist. Die Einführung der Photographie durch Wolf in Heidelberg hat die Sache wesentlich erleichtert. Man exponiert nun eine photographische Platte und photographiert die betreffende Gegend des Himmels mit einer Expositionszeit von etwa zwei Stunden. Wenn man nun Sorge trägt, daß sich die Fixsterne als Punkte abbilden, so macht der Planet einen Strich und kann als solcher leicht erkannt werden. Ist der Planet entdeckt, so interessiert uns zunächst seine Bahn. Diese kann aus der Position der Entdeckungsnacht allein nicht berechnet werden. Es muß noch eine Anzahl von weiteren Beobachtungen erfolgen. Wenn mindestens drei Beobachtungen vorliegen, so erfolgt die Bahnbestimmung, das ist die Bestimmung der sogenannten Bahnelemente und die Berechnung einer Ephemeride, das heißt eines Verzeichnisses der Orte, welche der Planet im Laufe

der nächsten Zeit einnehmen wird. Diese Ephemeride erleichtert das Aufsuchen, und die Abweichung von der Ephemeride deutet an, wie weit die Bahn noch zu verbessern ist. Das erste, was man wissen muß, ist, ob das Objekt nicht schon entdeckt ist. Man vergleicht zu diesem Zwecke die neugefundenen Elemente mit denen der schon bekannten Objekte. Findet sich eine Übereinstimmung, so ist es eben ein alter Planet.

Der neuentdeckte Planet wird nun von allen Sternwarten, die sich mit diesen Beobachtungen abgeben und mit entsprechenden Instrumenten versehen sind, so lange als möglich verfolgt. Wie alle Sterne, so rückt auch der Planet mit dem Fortschreiten der Jahreszeiten immer mehr in die ersten Abendstunden und in die Dämmerung hinein und wird endlich unsichtbar, indem er hinter der Sonne vorübergeht. Nach einiger Zeit muß er dann am Osthimmel wieder auftauchen. Soll man nun den Planeten nach dieser Zwischenzeit von einigen Wochen wiederfinden, so muß man schon eine recht gute Bahn haben. Es ist nun begreiflich, daß die Evidenzhaltung der kleinen Planeten, deren Zahl durch die vielen photographischen Entdeckungen auf über 1000 gestiegen ist, eine ungeheure Arbeit geworden ist, und da die Astronomen meist nicht in der Lage sind, zahlreiche Hilfskräfte anzustellen, so wurde das System der kleinen Planeten zu einer Verlegenheit.

Da mußte man nun zunächst den Ausweg wählen und von der sprichwörtlich gewordenen astronomi-

schen Genauigkeit etwas nachlassen. Es war namentlich Brendel, der sich bemühte, abgekürzte Methoden auszudenken, bei welchen man den Planeten immer noch innerhalb eines Bereiches von 20' finden kann. Das von ihm gegründete Planeteninstitut befaßt sich nun mit der Anwendung dieser Methode. Eine große Genauigkeit wird nur bei jenen Planeten angestrebt, die aus irgendeinem Grunde besonders interessant sind.

Wir müssen nun fragen, ob es denn überhaupt notwendig ist, daß wir allen Planeten nachlaufen, daß wir jederzeit von jedem wissen, wo er zu finden ist und ob nicht überhaupt das Entdecken überflüssig ist. Es könnte uns doch tatsächlich gleichgültig sein, ob wir 1000 Planeten kennen oder 1200 oder 1400. Irgend-eine Grenze müssen wir setzen. Alle werden wir ja doch niemals erfassen können. Außer den 1000 größeren Körpern, die wir schon haben, laufen vielleicht noch Millionen kleinerer herum, die wir nie entdecken werden. Wir müssen uns ja auch bei anderen Erscheinungen mit einer qualitativen Feststellung begnügen, zum Beispiel bei den Sternschnuppen. Es fällt uns nicht ein, von jeder einzelnen Sternschnuppe wissen zu wollen, wie ihre Bahn gewesen ist, um so weniger, als gerade die, die wir sehen, die also in der Atmosphäre in glühenden Zustand geraten, hier zugrunde gehen und überhaupt nicht mehr weiterfliegen. Wir begnügen uns hier mit der Feststellung, daß der Sternschnuppenschwarm aus einer großen Anzahl von Körpern besteht, die in beiläufig gleichen Bahnen da-

hinziehen, und wir bestimmen nur eine mittlere Bahn. Warum also sollen wir bei den Planeten so viel weiter gehen? Zunächst ist es klar, daß wir die Grenze unseres Wissens so weit hinausschieben sollen, als wir können. Ferner aber zeigt es sich, daß gewisse charakteristische Eigenschaften des Systems der kleinen Planeten erst zutage kommen, wenn die Zahl der Objekte sehr groß ist. Mit einem Worte, wir müssen das System statistisch behandeln und müssen daher möglichst viele Objekte besitzen, deren Daten wir genau angeben können.

Unter diesem Gesichtspunkt ist es vielleicht nicht uninteressant, zu schätzen, wie viele Entdeckungen wir überhaupt noch bis zu einer gewissen Größe zu erwarten haben. Nach Klose sind die größeren ihrer Anzahl nach schon vollzählig, aber von den kleineren fehlen uns noch etwa 1500.

Wir fragen zunächst, was haben wir überhaupt hier für Objekte vor uns? Was die Helligkeit anbelangt, so liegt die scheinbare Helligkeit zwischen 7 und 17. Kleinere zu entdecken ist noch nicht gelungen. Bringt man die Körper alle in die gleiche Distanz, also in die Entfernung 1, so finden wir eine Anhäufung der Helligkeiten bei 8.5 und eine zweite bei 11.2. Es scheinen also zwei Schwärme vorhanden zu sein, die sich durch die Größe ihrer Bestandteile unterscheiden, und es scheint, daß der innere Ring die kleineren Körper enthält.

Wenn man die absolute Größe der Körper haben

will, so muß man gewisse Hypothesen einführen, denn die Körper erscheinen punktförmig, zeigen also keinen scheinbaren Halbmesser. Wenn man annimmt, daß die Albedo, also das Rückstrahlungsvermögen, etwa so ist wie bei Merkur und Mars, also 0·24, so findet man, daß die meisten dieser Körper 20 bis 40 km Radius haben. Doch kommen auch größere Abweichungen vor. 14 dürften über 100 km haben, der Planet (4) Vesta über 400. Dagegen aber (719) Albert und (1009) etwa 2 bis 3 km. Die gesamte Masse wird auf $\frac{1}{864}$ der Erde geschätzt. Die Masse der einzelnen Körper ist also so klein, daß Störungen durch sie nicht zu erwarten sind.

Die Exzentrizitäten sind im Mittel 0·15, doch kommen Werte vor bis 0·45 (Aethra-Gruppe). Mit einer größeren Exzentrizität ist auch meist eine größere Neigung verbunden. Was die Perihelien anbelangt, so fallen in den ersten und vierten Quadranten im Verhältnis zu Jupiter doppelt soviel Perihelien als anderswohin. In den Knoten spricht sich eine derartige Verteilung nicht aus. Die Neigungen liegen hauptsächlich zwischen 2° und 11°, doch kommen auch größere Neigungen vor, (2) Pallas 34·7, (944) Hidalgo 43·1.

Eine merkwürdige Erscheinung, die man an dem System erkennt, ist das Auftreten von gewissen Lücken in der Verteilung. Wenn man die Planeten nach ihrer Entfernung von der Sonne ordnet, so gibt es Stellen, wo auffallend wenige oder gar keine Planeten sind.

Es zeigt sich nun, daß diese Lücken gerade dorthin fallen, wo die entsprechenden Umlaufzeiten in einem einfachen Verhältnisse zu der des Jupiters stehen. Die wichtigsten sind an den Stellen $1 : 3$, $3 : 7$, $1 : 2$, $2 : 5$. Es ist klar, daß man diese Lücken nie entdeckt hätte, wenn nicht die Zahl der Planeten schon so groß wäre. Die Ursache dieser Lücken ist eben in ihrer Position zu suchen. Man kann sich das etwa so vorstellen, daß durch die einfachen Verhältnisse in bezug auf Jupiter eine Art Resonanzerscheinung in den Störungen entsteht. Durch den gleichmäßigen Rhythmus wachsen die Störungen so an, daß der Planet endlich aus seiner Stellung abwandert, und zwar läßt sich zeigen, daß die Planeten nach der Seite der kleineren Achsen, also nach innen, abwandern. Ob das dauernd ist oder ob diese Planeten nicht nach einiger Zeit wieder zurückkommen, wissen wir nicht. Überhaupt ist das Problem eines der schwierigsten, da die Kommensurabilitäten der Umlaufzeiten die alten, sonst bei den Planeten angewendeten Methoden unbrauchbar macht. Man mußte also neue Methoden erfinden und für die Anwendung brauchbar machen. Den Ausgangspunkt bilden die sogenannten periodischen Lösungen von Poincaré.

Eine andere Anwendung der Statistik der kleinen Planeten, nämlich die Anwendung auf das Fixsternsystem, verdanken wir Oppenheim. Die Sonne befindet sich in einer Sternwolke und alle Mitglieder dieser Sternwolke sowie die Sonne selbst bewegen sich nach

einem uns unbekanntem Gesetz. Wir sehen nur, wie die Sonne gewisse Sterne überholt, gegen andere dagegen zurückbleibt, und die mathematische Behandlung läßt gewisse bevorzugte Richtungen erkennen: jenen Punkt, auf welchen die Sonne hinstrebt, den Punkt, nach welchem sich die Sternwolke als ganzes bewegt, eventuell auch die Richtung, in der wir etwa den Mittelpunkt des ganzen Systems vermuten. Doch ist die Deutung dieser Richtungen nicht ganz einwandfrei. Da hilft nun das System der kleinen Planeten durch eine Analogie. Die kleinen Planeten mit ihren mannigfaltigen Bahnen bilden auch so eine Art Sternwolke, die wir von der Erde, die sich auch nach irgendeinem Punkte hinbewegt, betrachten. Wir können nun dieses System genau so behandeln wie das der Fixsterne und werden auch die bevorzugten Richtungen erhalten. Da wir aber das System der kleinen Planeten genau kennen, auch die Gesetzmäßigkeit ihrer Bewegung, so können wir bei diesem System die Richtungen mit voller Sicherheit deuten und dann daraus schließen, daß es bei dem Fixsternsystem ebenso sein wird. Es gelingt auf diesem Wege wahrscheinlich zu machen, daß sich das ganze Fixsternsystem in einer langsamen Rotation um einen gewissen Mittelpunkt befindet. Auch diese Untersuchungen wären unmöglich gewesen, wenn die Zahl der Planeten nicht so groß wäre.

Unter den zahlreichen Planeten sind einige, deren Bahnen ein besonderes Interesse verdienen. Das sind

z. B. die sogenannten Trojaner. Sie führen ihren Namen nach den Helden des trojanischen Krieges und unterscheiden sich also schon durch den Namen von den übrigen Planeten, welche fast durchwegs Frauennamen tragen: Die älteren noch aus der Mythologie, Göttinnen, Musen, Furien usw.; später aber wurde der ganze christliche Kalender zur Erinnerung an Frauen, Bräute und Töchter der Astronomen an den Himmel versetzt. Kleine Planeten mit außergewöhnlichen Bahnen bekommen einen besonderen Namen. Die Trojaner (Achilles, Patroklos, Hektor, Nestor, Priamus, Agamemnon und noch zwei unbenannte) haben die Eigenschaft, mit Jupiter in der gleichen Bahn zu laufen. Das Verhältnis ihrer Umlaufzeiten ist also 1 : 1. Laplace hat nachgewiesen, daß bei richtiger Wahl der Anfangsbedingungen drei Massen, die in den Eckpunkten eines gleichseitigen Dreieckes stehen, in dieser Situation bleiben. Wenn wir also zur Verbindungslinie Sonne und Jupiter jederseits ein gleichseitiges Dreieck konstruieren, erhalten wir zwei Punkte, die als Librationspunkte bezeichnet werden. In der Nähe dieser Punkte müssen sich die Trojaner immer aufhalten und beschreiben um diese kleine Bahnen. Die Trojaner gehören zu den entferntesten Mitgliedern des Systems, doch haben wir noch ein weiteres, das ist Hidalgo (944). Er hat eine so große Exzentrizität, daß seine Entfernung von der Sonne zwischen 2'0 und 9'4 schwankt. Er erreicht daher fast die Bahn des Saturn.

Den Trojanern entspricht eine Kommensurabilität von 1 : 1. Hier haben wir also das Gegenteil von einer Lücke. Doch können die Planeten nur in der Nähe der Librationspunkte stehen, nicht sonst irgendwo in der Bahn des Jupiter.

Auch die Bahnen, welche dem Verhältnisse 2 : 3 (153, Hilda) und 3 : 4 (279, Thule) entsprechen, verhalten sich anders als die Lücken 1 : 3, 1 : 2, 2 : 5. Es bilden sich Gruppen nahe der Kommensurabilitätsstellen. So gehören zum Hildatypus sieben Planeten. Diese Zahl ist aber so gering, daß die Statistik eigentlich versagt.

Ähnlich wie an dem äußeren Rande des Systems finden sich auch am inneren merkwürdige Objekte. Da ist die sogenannte Albertgruppe, die nach einem Planeten heißt, der von Palisa 1911 entdeckt wurde, der aber infolge widriger Verhältnisse wieder verlorengegangen ist. Andere Vertreter dieser Gruppe sind (887) Alinda und (1036) Ganymed. Es sind sehr kleine Körper, die sich bis auf 0'2 (30,000.000 km) der Erde nähern können. Noch näher aber kommt der Erde der Planet Eros (433). Er nähert sich der Erde bis auf 0'15 (21,000.000 km). Solche Annäherungen haben für die Astronomen doppelten Wert. Einerseits werden die Störungen, die der Körper erfährt, außerordentlich groß und können dazu dienen, die Masse des Systems Erde-Mond zu bestimmen. Notebohm leitet daraus 1 : 328.370 Sonnenmassen ab.

Andererseits dienen solche Objekte dazu, die Son-

nenparallaxe zu bestimmen; darunter verstehen wir den Winkel, unter welchem, von der Sonne aus betrachtet, der Erdradius erscheint. Die Parallaxe ist also ein Maß der Entfernung. Daß es mit Hilfe eines solchen Planeten möglich ist, die Sonnenentfernung zu bestimmen, beruht auf dem dritten Keplerschen Gesetz, nach welchem sich die Quadrate der Umlaufszeiten wie die dritten Potenzen der Entfernungen von der Sonne verhalten:

$$u_1^2 : u_2^2 = a_1^3 : a_2^3.$$

Sind also zwei Umlaufszeiten und eine große Achse gegeben, so kann man die andere bestimmen. Als ersten Planeten nehmen wir z. B. Jupiter mit $u_1 = 12$ Jahren, für den zweiten die Erde mit $u_2 = 1$ Jahr; nehmen wir nun für die Erde $a_2 = 1$, so lautet die Proportion:

$$12^2 : 1^2 = a_1^3 : 1^3.$$

Daraus ergibt sich

$$a_1 = \sqrt[3]{144} = 5.2.$$

Wenn wir nun die Entfernung des Jupiter von der Sonne wissen, so können wir z. B. auch die Entfernung der Erde vom Jupiter in dieser Einheit ausdrücken. So können wir es aber auch mit den anderen Planeten machen, kurz wir können alle Distanzen zwischen allen Planeten untereinander in der gewählten Einheit ausdrücken. Wir können die ganze Planetentheorie aufbauen, alle Vorausberechnungen usw. können wir machen, ohne daß wir überhaupt wissen müssen, wie groß das System ist. Wenn es andererseits möglich ist, irgendeine Distanz im Sonnensystem