

246
WAERDEN, B. L. v. d.
1941

97-163,183

DIE ASTRONOMIE DER PYTHAGOREER UND DIE ENTSTEHUNG DES GEOZENTRISCHEN WELTBILDES

Von Prof. Dr. B. L. van der Waerden, Leipzig

(Mit 8 Figuren)

Als ich auf Grund von Keilschrifttexten und zeitgenössischen griechischen Zeugnissen die Geschichte der älteren griechischen Astronomie studierte, ergab sich mir ein ganz anderes Bild von der Entwicklung als nach den bisherigen Darstellungen. Die Entwicklung ist viel geradliniger und astronomisch vernünftiger verlaufen als man bisher gedacht hat. Den Kernpunkt meiner Überlegungen bildet eine neue Interpretation der vielfach mißverstandenen astronomischen Lehre des Heraklides von Pontus, eines Forschers aus dem Kreise der Platonischen Akademie, der das Weltbild der Pythagoreer in bemerkenswerter Weise modifiziert und vervollkommen hat.

Die ausführliche Begründung dieser Ansichten will ich unter Vorlegung der Quellen an anderer Stelle publizieren. Den Lesern der „Himmelswelt“ aber möchte ich das Bild von der Geschichte der antiken Astronomie, das sich mir erschlossen hat, in großen Zügen zeichnen.

1. Pythagoras und die babylonische Astronomie

Pythagoras von Samos wurde auf seinen Reisen nach Ägypten und Phönizien von den Soldaten des Perserkönigs Kambyzes, der damals (525 v. d. Zr.) gerade Ägypten eroberte, gefangen genommen und nach Babylon gebracht. Dort verkehrte er 12 Jahre lang mit den „Magiern“ (Priester-Astrologen-Astronomen), wurde von ihnen in der Mathematik und Musik aufs höchste vervollkommen und eignete sich ihre religiösen Vorschriften und Übungen vollständig an. Später zog er nach Kroton in Oberitalien und gründete dort unter den vornehmen Griechen den Bund oder Orden der Pythagoreer.

So etwa erzählt es der Phantast Jamblichos in seinem „Leben des Pythagoras“. Ob es sich wirklich so zugetragen hat, weiß man nicht; aber fest steht jedenfalls, daß die Pythagoreer mathematische, astronomische und wohl auch religiöse Lehren aus dem Zweistromland übernommen haben. Die oben erwähnte biographische Notiz ist im Grunde nur ein populärer, anekdotischer Ausdruck dieses heute unbestreitbaren sachlichen Zusammenhangs.

Die babylonischen und assyrischen Priester haben schon seit der 2. Hälfte des 3. Jahrtausends vor der Zeitrechnung Himmelserscheinungen beobachtet und über-

¹ Die Gefangennahme durch Kambyzes wird noch durch eine Inschrift aus Tiberius Zeit bezeugt, die Babylonreise auch durch Strabo. Ältere Quellen sagen bloß, daß Pythagoras von Chaldäern unterrichtet worden sei.

liefert; besonders aber seit 700 v. d. Zr. haben sie systematisch Finsternisse und Planetenpositionen vermerkt, Sternverzeichnisse angelegt, Perioden bestimmt, sogar Finsternisse vorausgesagt und Monderscheinungen zahlenmäßig zu erfassen versucht.

Die wichtigste astronomische Erkenntnis, die den Babyloniern und den ältesten Pythagoreern gemeinsam ist, ist wohl die, daß die Sonne, der Mond und die Planeten zwei Bewegungen haben. Die eine ist die tägliche Umdrehung des ganzen Himmels, die die Planeten mit den Fixsternen gemeinsam haben; die zweite ist den Wandelsternen eigentümlich und entgegengesetzt gerichtet. Bei der zweiten Bewegung durchwandert jeder von ihnen die Sternbilder des Tierkreises der Reihe nach, abgesehen von gelegentlichen Rückläufigkeiten der fünf Planeten. Der Tierkreis ist zum Äquator geneigt. Der Mond, die Sonne und die Planeten beschreiben kreisförmige Bahnen um die Erde, die sich in der Mitte befindet. Die Mond- und Planetenerscheinungen sind periodisch: nach Ablauf von gewissen Perioden wiederholen sie sich. Es gibt ein gemeinsames Vielfaches aller dieser Perioden: ein „großes Jahr“, nach dessen Ablauf alle Planeten wieder genau an derselben Stelle des Himmels stehen und der ganze Lauf von vorne anfängt. So sieht in großen Umrissen das babylonische Weltbild aus, das wir aus den Keilschrifttexten heute einigermaßen kennen, und so stellt auch der Pythagoreer „Timäus“ im gleichnamigen platonischen Dialog die Pythagoreische Lehre dar.

Sonne, Mond und Planeten sind nach pythagoreischer wie nach babylonischer Anschauung beseelte, göttliche, vollkommene Wesen. Der ganze Kosmos ist ein geordnetes Ganzes, das von mathematischen Gesetzmäßigkeiten beherrscht wird. Durch Zahlen wird das Wesen der Dinge im Weltall ausgedrückt: Zahlenverhältnisse beherrschen die Entfernungen der Planeten und ihre Umlaufzeiten. Durch Spekulationen über Quadrat- und Kubikzahlen, vollkommene Zahlen usw. hofften die Pythagoreer in das Wesen der Dinge einzudringen und den Kosmos zu verstehen.

2. Anaxagoras und die Aufklärungszeit

Diese Anschauungen standen in schroffem Gegensatz zu den Ansichten der nüchternen ionischen Aufklärung, die im 5. Jahrhundert immer mehr überhand nahm. Nach Anaxagoras, der besonders in Athen großes Ansehen genoß (er war Ikonoklast, d. h. Gottlosigkeit geschützt), sind die Himmelskörper keine beseelten Wesen, sondern nur glühende Steine, die vom Umschwung des Äthers mit herumgerissen werden. Sie seien einmal zufolge der ursprünglichen Wirbelbewegung hinausgeschleudert worden; aus den sich ausscheidenden Stoffen habe sich die Erde zusammengeballt. Die Planeten haben nach dieser Lehre keine gesetzmäßige Eigenbewegung in bezug auf die Fixsterne, sondern sie bewegen sich nur etwas langsamer als diese; am langsamsten bewege sich der Mond, der uns am nächsten sei und sein Licht von der Sonne erhalte.

Eine Schwierigkeit entsteht dadurch, daß nach dieser Auffassung Sonne und Mond sich eigentlich wie die Fixsterne auf Parallelkreisen bewegen müßten, nur etwas langsamer. Statt dessen entfernen sie sich, wie der Augenschein lehrt, immer mehr vom Äquator bis zur Wende, nähern sich dann wieder dem Äquator und entfernen sich nach der anderen Seite. Aber auch dafür hat Anaxagoras eine mechanistische Erklärung: „Die Wendungen von Sonne (und Mond) werden verursacht durch

den Widerstand der Luft im Norden, die von der Sonne (bzw. dem Mond) zusammengepreßt wird.“ Daß die Sonne nach einem Jahr zum gleichen Tierkreisbild zurückkehrt, ist danach ein reiner Zufall.

Es ist klar, daß diese Auffassung des Weltgeschehens niemals zu einer wissenschaftlichen Astronomie führen kann. Wenn die Planeten nur unbeseelte Steine sind, mitgerissen von der Wirbelbewegung des sie umringenden Äthers und außerdem noch durch den Luftdruck hin und hergestoßen, wie soll da eine mathematische Gesetzmäßigkeit der Bewegung zustande kommen? Die Auffassungsweise des Anaxagoras führt nicht einmal zu der Erkenntnis, daß die Sonne, der Mond und die Planeten sich im Bereich des Tierkreises bewegen. Somit konnten die Astronomen des 4. Jahrhunderts, die eine geometrische Theorie der Planetenbewegung entwarfen (Eudoxos, Kallippos, Heraklides von Pontus), nicht an die Anschauungen der ionischen Physiker, sondern nur an die babylonisch-pythagoreische Lehre anknüpfen.

3. Die Pythagoreer und die Harmonie der Sphären

Die Pythagoreer bildeten nicht so sehr eine Schule als eine religiös-politische Gemeinschaft mit bestimmten Vorschriften und einer auf harmonische Lebensführung gerichteten Ethik. Der Bund dehnte sich bald über mehrere griechische Städte in Oberitalien aus und bildete eine zeitlang den Mittelpunkt der aristokratischen Partei.

Pythagoras hatte eine Unmenge Wissen aus dem Orient mitgebracht: Geometrisches („Pythagoreischer Lehrsatz“), Algebraisches (Lösung quadratischer Gleichungen), Arithmetisches (auch Zahlenmystik), Astronomisches (s. oben), Religiöses, vielleicht auch Musikalisches. Heraklit bespottet ihn: „Vielwisserei bringt noch keinen Verstand. Sonst hätte sie den Hesiod klug gemacht und den Pythagoras.....“ Alle diese Wissenschaften wurden in der pythagoreischen Schule weiter überliefert und gegen Ende des 5. Jahrhunderts zu einem geschlossenen wissenschaftlichen System ausgebaut. Einen Hauptverdienst daran hat der große Mathematiker, Philosoph, Musiktheoretiker, Mechaniker, Stratege und Staatsmann Archytas von Tarent (um 400 v. d. Zr.).

Im Mittelpunkt dieser Lehre steht der Begriff der Harmonie. Ein harmonischer Zusammenhang entsteht nach Archytas dadurch, daß den Tönen gewisse Zahlenverhältnisse aufgeprägt werden. Dem Zahlenverhältnis 2:1 entspricht die Oktave, 3:2 die Quinte usw. Die Seele ist aber nach pythagoreischer Anschauung eine Harmonie, und der Himmel ebenfalls. Was das letztere bedeutet, erklärt uns Aristoteles in einem erhaltenen Fragment seiner Schrift „Über die Meinungen der Pythagoreer“:

„Da die Körper, die sich um die Mitte (des Kosmos) bewegen, von dieser in ganz bestimmten Zahlenverhältnissen entfernt sind, so verursachen die langsameren von ihnen durch ihre Bewegung einen tieferen, die schnelleren einen höheren Ton, und diese Töne, die entsprechend dem Zahlenverhältnis ihrer Entfernungen erfolgen, bringen infolge dieser ein Geräusch hervor, das eine musikalische Harmonie ist.“

Diese Auffassung des Kosmos als eines geordneten, beseelten Ganzen, in dem Harmonie und Zahlenverhältnisse herrschen, hat noch lange nachher die Philosophen, Astronomen und Dichter begeistert; man braucht nur an Keplers *Mysterium cosmographicum* zu denken.

phicum zu denken. Kein Wunder, daß auch Plato, von den materialistischen Lehren des Anaxagoras, des Demokrit und der Sophisten schwer enttäuscht, in den Bann der pythagoreischen Ideen geriet. Er war dreimal in Sizilien, auch in Unteritalien und verkehrte dort mit Archytas und anderen Pythagoreern. Im „Staat“ und im „Timäus“ stellt er das pythagoreische Weltbild dar, allerdings mit eigenen abweichenden Anschauungen so vermischt, daß die spätere Zeit sie oft nicht recht auseinander zu halten vermocht hat. Seine Schüler haben ebenso wie er manchmal ihre eigenen Lehren alten Pythagoreern, dem Philolaos oder gar dem Pythagoras selbst in den Mund gelegt, so daß man spätere Berichte über altpythagoreische Lehren mit der äußersten Vorsicht bewerten muß, wenn man die echte Lehre von späteren Fälschungen trennen will.

4. Das System des „Philolaos“

Die Pythagoreer selbst hatten an dem Weltbild des „Timäus“ noch allerhand auszusetzen. Als schwerer Mangel empfanden sie es, daß die zweite Bewegung der Planeten nicht gleichmäßig stattfindet; denn die Planeten bewegen sich in bezug auf die Fixsterne bald schneller, bald langsamer, manchmal sogar rückläufig. Für die göttlichen und ewigen Himmelskörper kann aber eine solche Unregelmäßigkeit nicht angenommen werden. Denn welche Ursache sollte sie, die ewig gleich bleiben und sich gleich verhalten, wohl veranlassen, sich einmal schneller, einmal langsamer zu bewegen? Nur eine gleichmäßige Kreisbewegung ist ihrer göttlichen Natur angemessen. Die ungleichmäßige Bewegung, die wir wahrnehmen, kann somit nur Schein sein.

Ein solcher Schein findet als perspektivische Täuschung seine Erklärung, wenn man nur annimmt, daß der Beobachtungsort nicht stillsteht, sondern sich bewegt. Von einem anderen Beobachtungsort aus gesehen, erscheint ein jeder Himmelskörper auch an einer anderen Stelle. Die Erde soll also nicht mehr im Mittelpunkt des Weltalls ruhen, sondern sich selber wie die anderen Himmelskörper im Kreise um den Mittelpunkt drehen.

Durch diese Annahme wird der Platz in der Mitte des Weltalls, die vornehmste Stelle, frei für das edelste Element, das Feuer. Daher nehmen die späteren Pythagoreer (im 4. Jahrhundert) an, daß das göttliche Feuer die Mitte einnimmt. Um es drehen sich im Kreise die Erde, die Sonne, der Mond und alle Planeten.

Denkt man sich diese Drehung der Erde in der für die naive Anschauung naheliegendsten Weise, nämlich so als ob die Erde an einem Ende einer Stange befestigt wäre, deren anderes Ende in der Mitte des Feuers festgehalten wird, so ergeben sich zwei bemerkenswerte Folgerungen. Einmal wendet die Erde immer dieselbe Seite dem Zentralfener zu. Befinden wir uns auf der abgewandten Seite, so ist das Feuer uns immer unsichtbar. Zweitens: Indem die Erde sich dreht, wird scheinbar von der Erde aus gesehen, der ganze Himmel sich in entgegengesetzter Richtung um dieselbe Achse drehen. Man erhält also die Möglichkeit, die tägliche Umdrehung des ganzen Himmels als einen nur scheinbaren Effekt zu erklären: In Wirklichkeit dreht sich nur die Erde in fast einem Tag im Kreise um das Zentralfener. Auch der Wechsel von Tag und Nacht wird jetzt, statt durch die tägliche Bewegung der Sonne, durch die Umdrehung der Erde erklärt.

Die Erde, die Sonne, der Mond, die 5 Planeten und die Fixsternsphäre, das sind zusammen 6 Körper. Da das Weltall aber vollkommen ist, muß die Zahl der

Himmelskörper nach pythagoreischer Ansicht eine vollkommene Zahl sein.¹ Also erfanden die Pythagoreer noch einen zehnten Körper, die „Gegenerde“. Daß wir diesen Körper nicht sehen, erklärten sie dadurch, daß die Gegenerde wie die Erde in einem Tag das Zentralfener umkreist und sich dabei immer entgegengesetzt zur

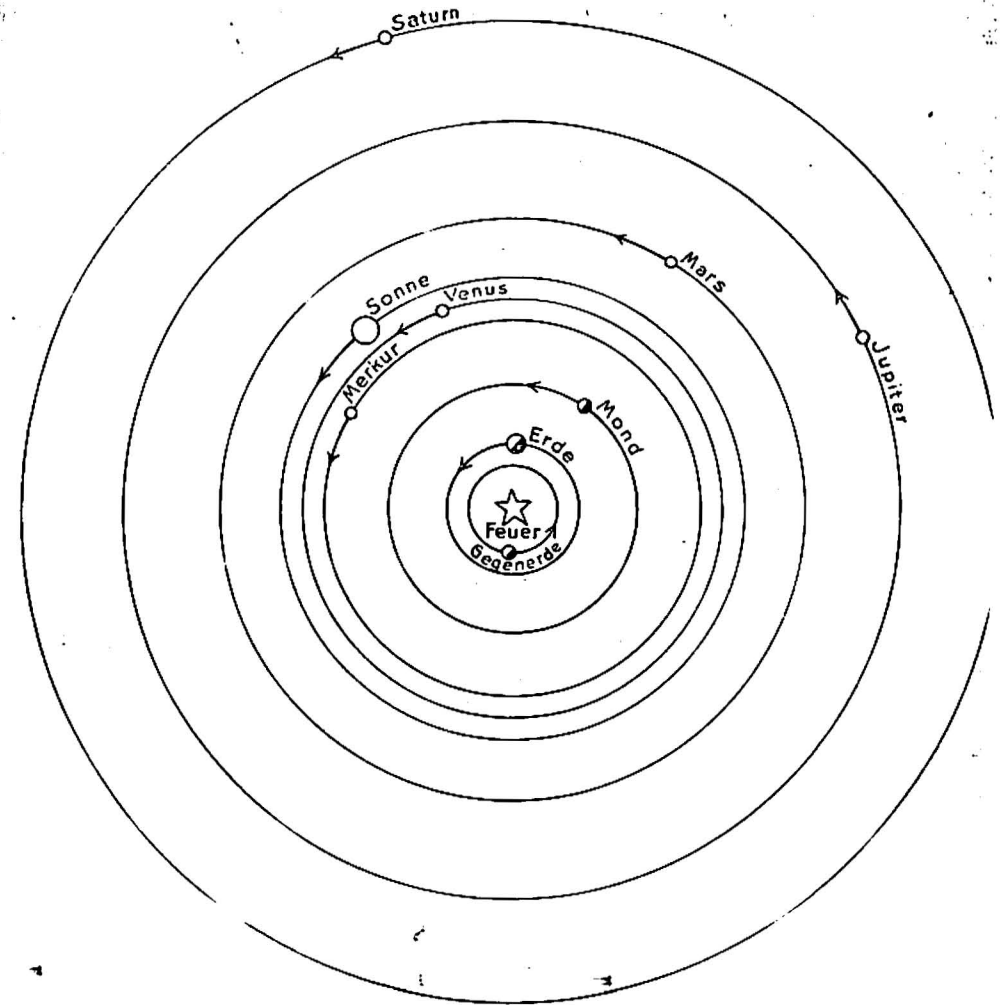


Fig. 1. Das Weltsystem des „Philolaos“

Erde befindet. Die Gegenerde wird also wie das Zentralfener durch die Masse der Erde unseren Augen entzogen.²

Aus dem Vorangehenden sieht man, in wie eigentümlicher Weise das Denken der Pythagoreer sich einerseits auf vorgefaßte Meinungen, die uns heute manchmal lächerlich vorkommen, andererseits aber auch auf sorgfältige Beobachtungen

¹ Die Zehnzahl galt den Pythagoreern als vollkommen.

² Die beigelegte Figur 1 möge das System erläutern. Zur Vermeidung von Mißverständnissen füge ich aber hinzu, daß die Einzelheiten der Figur (Bahnradien, Gestalt des Feuers usw.) keinerlei historische Bedeutung haben, sondern meiner Phantasie entsprungen sind.

aufbaut. Die vorgefaßten Meinungen: daß die Zahl der Himmelskörper eine vollkommene sein müsse, daß dem Feuer der vorzüglichste Platz gebühre, daß die göttlichen Himmelskörper nur ewig dauernde, gleichmäßige Bewegungen haben können, spielen eine große Rolle, aber andererseits werden die empirischen Daten keineswegs vernachlässigt, sondern das Bestreben der Pythagoreer ist ausgesprochen darauf gerichtet „die Erscheinungen zu retten“. Wie weitgehend das möglich ist, werden wir gleich bei der Betrachtung der Mondknoten sehen.

Der Fixsternhimmel steht in diesem System nicht still, wie in unserem modernen Weltbild, sondern er dreht sich ganz langsam im Sinne der Tierkreiszeichen um die Pole der Ekliptik. Die Umlaufzeit beträgt reichlich 18 Jahre. Der Kreis des Mondes ist zum Tierkreis geneigt, liegt aber in einer festen Ebene. Die Schnittpunkte dieses Kreises mit der Ebene der Ekliptik, die Knoten der Mondbahn, sind also im Raum fest. Da die Sternbilder des Tierkreises sich aber in 18 Jahren einmal herumdrehen, so ziehen sie der Reihe nach rechtläufig an dem Mondknoten vorbei, anders ausgedrückt: die Knoten der Mondbahn durchwandern in 18 Jahren rückläufig alle Sternbilder des Tierkreises. So findet die (für die Vorausberechnung von Mondfinsternissen wichtige) Rückwärtsbewegung der Mondknoten im pythagoreischen System eine einfache Erklärung.

Die Umlaufgeschwindigkeiten der äußeren Planeten und der Sonne sind folgendermaßen zu bestimmen: In $29\frac{1}{2}$ Jahren nimmt Saturn jeweils wieder dieselbe Position in bezug auf die Fixsterne ein; im Jahr legt er also $\frac{2}{3}$ Vollkreise mehr als die Fixsterne zurück. Diese selbst laufen in $18\frac{1}{2}$ Jahren einmal herum, legen also jährlich $\frac{2}{3}$ Vollkreise zurück. Also beträgt der jährliche Lauf des Saturn $(\frac{2}{3} + \frac{2}{3}) \cdot 360^\circ$. Ähnlich für Jupiter, Mars und die Sonne. Venus und Merkur haben dieselbe Umlaufszeit wie die Sonne, da sie sich nie weit von ihr entfernen. Die Umlaufszeit des Mondes ist der Drachenmonat, die Zeit der Rückkehr zum gleichen Knoten. Die Reihenfolge der Bahnen von innen nach außen ist: Gegen-erde, Erde, Mond, Merkur, Venus, Sonne, Mars, Jupiter, Saturn, Fixsterne.

Ich zögere nicht, die Grundgedanken des Systems genial zu nennen. Daß die auffallendsten Himmelserscheinungen wie der Wechsel von Tag und Nacht, die tägliche Drehung des Fixsternhimmels, die Stillstände und Rückläufigkeiten der Planeten als bloßen Schein, als Folgen einer wechselnden Perspektive erklärt werden, das ist ein großartiger Gedanke, dessen folgerichtige Durchführung zwangsläufig zum heliozentrischen System führt, wie schon oben gesehen worden. Als Urheber des Systems gilt nach den meisten Doxographen Philolaos von Kroton (Ende des 5. Jahrh.), nach anderen Hiketas von Syrakus (Mitte des 4. Jahrh.).

5. Die Mängel des Systems. Abänderungsversuche

Neben seinen Vorzügen hat das System des „Philolaos“ auch erhebliche Mängel. Die Stillstände und Rückläufigkeiten der Planeten werden zwar im Prinzip erklärt, aber ihre synodischen Perioden kommen falsch heraus. Da nämlich die Erde sich alltäglich einmal um die Mitte dreht, werden die Planeten täglich einmal rückläufig und wieder rechtläufig, im Gegensatz zur Erfahrung. Die Sonne müßte die gleichen Erscheinungen zeigen wie die Planeten, tut es aber nicht. Merkur und Venus müßten, da sie in derselben Zeit wie die Sonne ihre Bahn durch-

wandern, das ganze Jahr hindurch zur gleichen Tageszeit immer die gleiche Lage zur Sonne einnehmen. Wäre also z. B. Venus einmal als Abendstern sichtbar, so müßte sie jeden Abend in derselben Entfernung von der Sonne wieder erscheinen.

Diese Mängel haben die Pythagoreer selber auch eingesehen. Sie haben daher ihr System nicht als endgültige Wahrheit betrachtet, sondern nur als einen Versuch. Sie waren von der Richtigkeit der Grundgedanken des Systems überzeugt (und das mit Recht, denn auch unser heliozentrisches System beruht auf denselben Grundgedanken), aber sie waren durchaus bereit, die Anordnung der einzelnen Kreisbahnen, die Radien und Umlaufzeiten abzuändern, wenn dadurch eine bessere Übereinstimmung mit der Erfahrung zu erreichen wäre. Sie und auch Plato stellten die Frage in der Form: Durch welche Annahme von geordneten, kreisförmigen und gleichmäßigen Bewegungen können die Erscheinungen gerettet werden?

Der erste, der eine einigermaßen befriedigende Antwort auf diese Frage gegeben hat, war Eudoxos (um 370). Seine Theorie der konzentrischen Sphären fällt aber aus dem Rahmen der pythagoreischen Ideen heraus, indem er für jeden Planeten nicht eine einfache Kreisbewegung, sondern eine aus mehreren Kreisbewegungen zusammengesetzte Bewegung annahm. Für Jupiter z. B. dachte er sich vier konzentrische Sphären, von denen die äußere sich so bewegt wie die Fixsternsphäre in ihrer täglichen Umdrehung, während die drei inneren sich je um 2 Pole drehen, die mit der jeweils vorangehenden Sphäre fest verbunden sind. Die zweite Sphäre von außen nimmt also an der Drehung der ersten teil und hat außerdem noch eine eigene Bewegung, die dritte hat ebenso drei und die vierte, die den Planeten trägt, vier Bewegungen. Für weitere Einzelheiten über das System des Eudoxos, das von Kallippos noch verbessert wurde, verweisen wir auf die grundlegende Abhandlung von Schiaparelli.¹

Die Pythagoreer indessen versuchten, ihr System der konzentrischen Kreise zu verbessern. Einige nahmen mehrere solche Körper wie die Gegenerde an und wollten damit erklären, woher es komme, daß Mondfinsternisse häufiger sind als Sonnenfinsternisse. Immer dann nämlich, sagten sie, wenn einer von diesen Körpern oder die Erde selbst sich zwischen das Sonnenlicht und den Mond schiebt, werde der Mond verdunkelt. Vielleicht war Philippus von Opus, ein Schüler Platons, der ein Buch über Mondfinsternisse schrieb, ein Anhänger dieser Lehre. Andere wiederum bemerkten, daß man die Häufigkeit der Mondfinsternisse ebenso gut oder noch besser dadurch erklären könne, daß man statt vieler kleiner, das Zentralfeuer umkreisender Körper eine einzige große Erde annimmt, die hohl ist und das Feuer in ihrem Inneren enthält. Was auf der Erde erkaltet sei, werde von diesem Feuer wieder erwärmt. Die Erde muß sich nun natürlich um ihre eigene Achse drehen. So entstand die Lehre von der Achsendrehung der Erde, die den Syrakusanern Hiketas (um 350) und Ekphantos zugeschrieben wird. Sie gehören zu den letzten pythagoreischen Wissenschaftlern.

Plato hat lange geschwankt, welche von den pythagoreischen Lehren er annehmen sollte. Während im „Staat“ die Erde noch stillsteht, und im „Timäus“ die Achsendrehung höchstens dunkel angedeutet wird, hat er sich in höherem Alter zur Lehre von der Kreisbewegung der Erde bekannt. (Schluß folgt)

¹ Schon Aristoteles wirft den Pythagoreern vor, daß sie nicht von Beobachtungen, sondern von vorgefaßten Meinungen ausgehen und die Erscheinungen nachträglich in den Rahmen ihrer Anschauungen hinein zwingen wollen.

¹ G. Schiaparelli, Die homozentrischen Sphären des Eudoxus, des Kallippos und des Aristoteles, Abhandlungen zur Geschichte der Mathematik, Heft 1, Supplement zur Zeitschr. für Mathematik u. Physik 22, Leipzig 1877.

daß die Erde, gleichlaufend mit der Sonne das Zentrum umkreisend, immer auf der entgegengesetzten Seite steht wie diese. Zur Zeit der Opposition steht dann Jupiter ganz von selbst auch in größter Erdnähe. Im Laufe einer synodischen Periode (13 Monate) legt Jupiter etwas mehr als 30° zurück, während die Erde und die Sonne in derselben Zeit einen vollen Umlauf und noch 30° dazu zurücklegen. Nach Ablauf dieser Periode steht Jupiter also wieder in Opposition und in größter Erdnähe. Während der Periode war der Planet von der Erde aus gesehen zuerst rückläufig, dann stand er still, wurde rechtläufig, verschwand im Licht der Sonne, wurde wieder sichtbar, stand still und wurde wieder rückläufig, genau so wie es die Erfahrung verlangt (s. Fig. 2 u. 3).

Genau so erklären sich die Erscheinungen von Saturn und Mars.

Damit aber auch die tägliche Drehung des Fixsternhimmels und der Wechsel von Tag und Nacht erklärt werden, muß man die Erde außerdem in einem Tag um ihre eigene Achse sich drehen lassen. Der Fixsternhimmel kann dabei als unbeweglich angenommen werden.

Heraklides hat also nichts anderes zu tun brauchen, als den pythagoreischen Grundgedanken der Kreisbewegung der Himmelskörper mit dem ebenfalls pythagoreischen Gedanken der Achsendrehung zu kombinieren. Indem er der Erde beide Bewegungen gleichzeitig zuerkannte, konnte er den Erscheinungen gerecht werden.

Wie steht es nun aber mit den inneren Planeten, Venus und Merkur? Ließe man Venus wie im System des „Philolaos“ sich in einem Jahr zugleich mit der Sonne um das Zentrum drehen, so würde sie, von der Erde aus gesehen, immer dieselbe Lage zur Sonne einnehmen und ihre wechselnden Erscheinungen blieben unerklärt. Eine Änderung der Umlaufzeit würde die Sache nur noch schlimmer machen, da Venus dann auch einmal in Opposition zur Sonne käme! Der einzige Ausweg ist, daß man den Bahnkreis der Venus kleiner macht als den der Erde und ihre Umlaufzeit so einrichtet, wie in unserem heliozentrischen System. Dann nämlich wird Venus einmal östlich, einmal westlich von der Sonne erscheinen, aber

sich nie weiter von der Sonne entfernen als die Tangenten, die man von der Erde aus den ihren Bahnkreis ziehen kann, von dem Durchmesser entfernt sind. (Vgl. Fig. 1). So verlangt es auch die Erfahrung.

Diese Erklärung der Venuserscheinungen stimmt genau mit der überein, die Chalcidius, ein später lateinischer Schriftsteller, an einer Stelle seines Timäus-Kommentars unter Berufung auf Heraklides von Pontus gibt, und auch die den Chalcidius-Handschriften beige-fügten Figuren stützen unsere Deutung, denn in mehreren Codices ist der Bahnkreis der Erde in der Figur zu sehen.

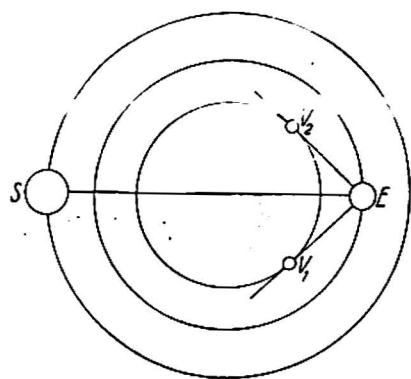


Fig. 4
Bahn der Venus nach Heraklides

Das Zentralfeuer und die Gegenerde müssen in diesem System natürlich wegfallen, während der Mond sich um die Erde drehen muß, damit die Monderscheinungen richtig herauskommen.

7. Das geozentrische System des Aristarch

Der Radius der Sonnenbahn bleibt im System des Heraklides ganz willkürlich und hat keinen Einfluß auf die Erscheinungen. Daher hat Aristarchos von Samos (um 280) den Radius einfach gleich Null gesetzt, d. h. er hat die Annahme gemacht, daß die Sonne im Zentrum der Planetenbahnen und der Erdbahn steht. Es ist auch viel leichter sich vorzustellen, daß die Erde und die Planeten sich nicht um einen mathematischen Punkt, sondern um einen materiellen Mittelpunkt drehen. Das Zentralfeuer der Pythagoreer kommt so in anderer Weise wieder zu Ehren.

Nachdem einmal das heraklidische System vorlag, lag das heliozentrische nahe. Die großen Verdienste des Aristarch liegen auf anderem Gebiet: Er hat die Abstände und Radien von Sonne und Mond genauer bestimmt als irgend einer vor ihm, und er hat bei der Gelegenheit einige geometrische Sätze bewiesen, die für die Entwicklung der Trigonometrie wichtig geworden sind. Er wird wohl auch die Radienverhältnisse der heliozentrischen Planetenbahnen bestimmt haben; jedoch ist darüber nichts überliefert.

Den Radius der Fixsternsphäre nimmt Aristarch als so groß an, daß die ganze Erdbahn sich zu ihr fast wie ein Punkt verhält. Damit erklärt er, daß die Fixsterne keine merkliche Parallaxe zeigen.

Als Anhänger der heliozentrischen Lehre ist uns außer Aristarch noch Seleukos überliefert.

8. Die Rückkehr zur geozentrischen Weltansicht

Nach den Alexanderzügen verlagert sich der Brennpunkt der griechischen Kultur von Athen nach Alexandrien. Von dem Wirken der alexandrinischen Astronomenschule wissen wir leider nicht sehr viel, aber die großen Linien der Entwicklung lassen sich doch rekonstruieren.

Zunächst wissen wir aus dem Zeugnis des Archimedes, daß die meisten Astronomen dieser Zeit die Erde als unbeweglich in der Mitte des Kosmos annahmen. Warum ist man beim heliozentrischen Weltbild oder bei dem des Heraklides nicht stehen geblieben, sondern zum geozentrischen zurückgekehrt? Die Gründe für die Annahme der Unbeweglichkeit der Erde geben Aristoteles (330 v. d. Zr.) und Claudius Ptolemäus (150 n. d. Zr.) fast übereinstimmend an; es sind folgende:

Die Beobachtung lehrt, daß die Abstände zwischen den Fixsternen zu jeder Jahreszeit die gleichen sind und daß die gleichen Sterne immer an der gleichen Stelle des Horizontes auf- und untergehen. Bewegt sich die Erde aber in einem großen Kreise um die Sonne, so werden diese Beobachtungen unbegreiflich: die Fixsterne müßten eine Parallaxe zeigen und der Ort ihres Unterganges müßte von der Jahreszeit abhängen.

Auch mit der Erscheinung der Schwerkraft läßt sich die Lehre von der Kreisbewegung der Erde im Rahmen der damaligen Mechanik nicht vereinbaren. Aristoteles erklärt nämlich die Schwerkraft dadurch, daß alle schweren Körper ihren natürlichen Ort im Mittelpunkt des Weltalls haben und sich von Natur, d. h. solange sie nicht gehemmt oder gestoßen werden, in gerader Linie dorthin bewegen. Für die ganze Erde muß aber dasselbe gelten wie für ihre Teile. Es ist kaum denkbar, daß die natürliche Bewegung der schweren Körper eine gradlinige, die der ganzen Erde aber eine kreisförmige wäre.

zykel ist die Sonne, der Deferent die Sonnenbahn. Die Epizykelhypothese hat sich aus dem ägyptischen System heraus entwickelt.

Mittels der Epizykeltheorie kann man aber nicht nur die Bewegungen der inneren Planeten darstellen, sondern auch die der fünf übrigen Himmelskörper, und zwar ebenso gut wie mittels Exzenter. Wie Claudius Ptolemäus (um 150 n. d. Zr.) erkannt hat, ist die Epizykelhypothese nämlich bei passender Wahl der Umlaufgeschwindigkeiten der Exzenterhypothese mathematisch gleichwertig.

Die Epizykeltheorie ist aber viel älter. Denn Apollonius von Perga, der größte Astronom der Alexandrinischen Schule hat (um 225 v. d. Zr.) einen Satz bewiesen, der dazu dienen kann, nach der Exzenter- oder nach der Epizykelhypothese die Stillstände und die Rückläufigkeitsstrecke der Planeten zu bestimmen. Der Satz heißt für die Epizykelhypothese so:

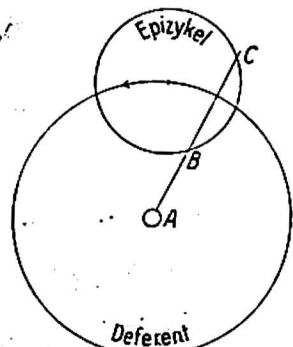


Fig. 7
Konstruktion der Kehrpunkte im
Epizykelmodell

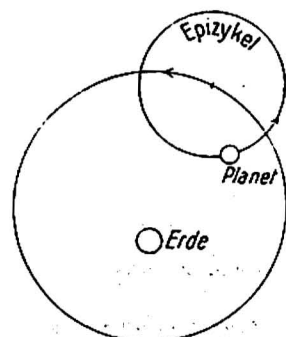


Fig. 8.
Der Epizykel auf dem Exzenter
nach Ptolemäus

Wenn von unserem Auge A eine Gerade ABC gezogen wird, die den Epizykel in B und C so schneidet, daß AB zu BC sich verhält wie die Umlaufgeschwindigkeit des Planeten auf dem Epizykel zu der Umlaufgeschwindigkeit des Epizykels selbst, so bezeichnet der Punkt B die Grenze zwischen Rechtglängigkeit und Rückglängigkeit, d. h. der Planet wird in B angelangt, den Eindruck des Stillstandes machen. Dabei ist vorausgesetzt, daß die Umläufe beide in der Richtung der Zeichen vor sich gehen.

Die Umlaufszeit des Planeten auf dem Epizykel ist die sogenannte synodische Periode, während die Umlaufszeit des Epizykels auf dem Deferenten die siderische Umlaufszeit des Planeten ist.² Kennt man diese Zeiten, so wie das Radienverhältnis von Exzenter und Epizykel, so kann man die Stillstände berechnen; umgekehrt kann man aus beobachteten Stillständen dieses Radienverhältnis ermitteln.

¹ Als Umlaufszeit des Planeten auf dem Epizykel gilt bei den Griechen die Zeit der Rückkehr zum Apogäum oder zum Perigäum des Epizykels, nicht die der Rückkehr zu einer im Raum festen Richtung.

² Dabei ist zu beachten, daß die siderischen Umlaufzeiten von Venus und Merkur nach der geozentrischen Auffassung beide gleich der Umlaufzeit der Sonne sind.

11. Der Epizykel auf dem Exzenter

Nach der einfachen Epizykelhypothese wiederholen sich alle Planetenerscheinungen exakt nach Ablauf einer synodischen Periode, nur in einem anderen Bereich der Ekliptik. Hipparch (um 150 v. d. Zr.) hat aber durch sorgfältige Beobachtungen festgestellt, daß die Erscheinungen sich nicht exakt wiederholen, sondern je nach dem Bereich der Ekliptik, in dem sie stattfanden, verschieden ausfallen. Diese Tatsache war übrigens den Chaldäern längst bekannt und in ihren Planetentafeln¹ berücksichtigt. Eine Tafel aus Uruk z. B., die im Jahre 118 der Seleukiden-Ära (= 194 v. d. Zr.) abgefaßt ist, läßt den Jupiter auf einem Teil der Ekliptik pro synodische Periode 30°, auf einem anderen Teil der Ekliptik aber 36° zurücklegen.

Um diese „zweite Anomalie“ der Planeten zu erklären, hat Ptolemäus in seinem großen Handbuch, dem „Almagest“, die Epizykelhypothese mit der Exzenterhypothese kombiniert, indem er den Planeten einen Epizykel durchlaufen läßt, dessen Mittelpunkt selber auf einem festen Exzenter läuft. Diesen Exzenter hat Kepler bekanntlich durch eine Ellipse ersetzt.

Ich will hier nicht auf weitere Komplikationen der ptolemäischen Theorie eingehen. Es kam mir nur darauf an, die Gründe anzugeben, die die griechische Astronomie ganz zwangsläufig immer weiter vom heliozentrischen System abgeführt haben. Man tut den alexandrinischen Astronomen Unrecht, wenn man diese Entwicklung nur als Verfallserscheinung wertet, wie es manchmal geschehen ist. Wenn die antiken Theorien auch von dem, was wir heute als Wahrheit betrachten, immer mehr abgekommen sind, so bedeutete diese Entwicklung doch, vom griechischen Standpunkt aus gesehen, eine dauernde Vervollkommenung, sowohl was die Einheitlichkeit und Geschlossenheit des theoretischen Weltbildes betrifft, als auch hinsichtlich seiner Leistung für die Erklärung der Phänomene. Und schließlich wäre Keplers Astronomia Nova ohne die Vorarbeiten von Apollonius, Hipparch und Ptolemäus unmöglich gewesen.

*

195. —, Die Astronomie der Pythagoreer und die Entstehung des geozentrischen Weltbildes, *Die Himmelswelt* 51, 1941, 97—103, 114—119.

Babylonische Vorstellungen werden von Pythagoras übernommen, von Philolaos genial umgebildet; von ihm führt die Entwicklung geradlinig über Herakleides zu Aristarch, während Eudoxos eine andere Linie verfolgt. Die Rückkehr zum geozentrischen System war aber das Gegebene, da eine Parallaxe von Fixsternen sich nicht nachweisen ließ, auch aus der geltenden Ansicht über das Wesen der Schwere heraus. Auch das von Vitruv als ägyptisches, heute nach Brahe benannte System befriedigte nicht, so arbeiten Apollonios und Ptolemaios wieder mit Epizykel und Exzenter.

¹ Siehe B. L. v. d. Waerden, Zur babylonischen Planetenrechnung, *Eudemos I* (1941).