

Tycho Brahe: instrumentos e teorias astronômicas

Trabalho de Graduação

Professor: Laerte Sodré Jr.

Aluna: Camilla Magnotti Komatz – 7599359

Orientadores: Professor Dr. Roberto Dell’Aglia Dias da Costa

Professor Dr. Osvaldo Frota Pessoa Junior

Universidade de São Paulo – Instituto de Astronomia, Geofísica e Ciências Atmosféricas
Novembro de 2014

RESUMO

Ao estudar a contribuição científica de alguém para a história é importante analisar o contexto social e econômico da época em que a pessoa viveu e sua própria história de vida. Os acontecimentos que levam a grandes contribuições na ciência estão firmados nas bases do conhecimento e no modo como ele foi adquirido ao longo de experiências na vida da pessoa.

O modo de vida de Tycho Brahe e sua criação são as bases para entender como ele conseguiu assumir certas posições sociais que facilitaram o desenvolvimento de seus estudos e descobertas de resultados importantes para a ciência.

Nesse sentido esse trabalho visa analisar os principais acontecimentos na vida profissional de astrônomo de Tycho Brahe, até a época de sua morte, em 1601, e fazer uma breve discussão da importância do uso de suas observações para a teoria kepleriana do sistema solar (que na época era compreendido como o todo o universo).

No **Capítulo 1** é feita uma introdução ao trabalho realizado. O **Capítulo 2** fornece inicialmente um pequeno relato sobre a infância de Tycho e entrada na vida adulta e mostra o contexto da astronomia na Europa do século dezesseis, que é também revisto por meio das teorias aristotélicas nos **Capítulos 3 e 4**. Ele aborda ainda os primeiros instrumentos utilizados por Tycho em suas investigações astronômicas, que foram uma balestilha, um meio sextante e um grande quadrante. É interessante avaliar a mudança de Tycho de um instrumento para o seguinte, que permite observar sua constante busca por instrumentos mais precisos, capazes de realizar medidas mais exatas das posições das estrelas.

No **Capítulo 3** encontramos Tycho como um jovem adulto com intenções de seguir a astronomia como sua profissão e presenciando um dos maiores eventos astronômicos de sua vida, o surgimento de uma nova estrela no céu, na verdade a explosão de uma supernova. Estudando essa estrela, Tycho tira conclusões que desafiam a teoria de Aristóteles sobre o universo, que ainda era aceita em ampla escala na época. Ainda nesse capítulo, são abordados os usos de um pequeno quadrante e de um sextante e o reconhecimento de Tycho como astrônomo, expresso por um convite de estudantes da Universidade de Copenhague e do próprio Rei Frederico II para que este apresentasse um ciclo de palestras.

No **Capítulo 4** o reconhecimento do rei pelos feitos de Tycho como astrônomo é evidenciado quando esse o presenteia com uma ilha, a ilha de Hven, onde Tycho construiu um grande observatório (Uraniborg) e realizou a maior parte de seu trabalho de vida. O quadrante mural, um dos instrumentos mais utilizados em Uraniborg, é apresentado e sua observação do cometa de 1577 é analisada, bem como seus trabalhos produzidos sobre o evento. Algumas inovações nos instrumentos utilizados por Tycho e em suas descobertas também são apresentadas.

O **Capítulo 5** aborda a criação do sistema tychoniano de mundo e, para efeito de comparação, são explicados resumidamente os sistemas ptolomaico e copernicano. São abordadas opiniões de Tycho quanto a esses sistemas bem como alguns fatores que levaram ao seu sistema final.

O **Capítulo 6** mostra como a morte do rei Frederico II e a ascensão ao trono do príncipe Christian afetaram a vida profissional de Tycho. Como consequência da mudança na política da Dinamarca, o astrônomo busca um novo lar na Boêmia, sob o comando do imperador Rodolfo II. Também são analisados a teoria de Tycho sobre o movimento da Lua e sua descoberta de sua variação, e o início de sua relação com o então jovem astrônomo Kepler.

O **Capítulo 7** mostra como, após a morte de Tycho, Kepler utilizou os resultados de suas observações para desenvolver sua teoria sobre os movimentos dos planetas e descobrir que suas órbitas elípticas ao redor do Sol são descritas pelas Leis de Kepler.

Por fim, a **Conclusão (Capítulo 8)** busca reunir e ressaltar os aspectos mais importantes do texto, fazendo uma última análise do que foi escrito.

SUMÁRIO

Capítulo 1: Introdução

Capítulo 2

2.1 Primeiros Contatos com a Astronomia

2.2 Cross-staff, Balestilha ou Radius

2.3 Meio Sextante

2.4 Grande Quadrante

Capítulo 3

3.1 Supernova de 1572

3.2 Pequeno Quadrante

3.3 Palestras

Capítulo 4

4.1 Uraniborg

4.2 Quadrante Mural (Quadrante de Tycho)

4.3 O cometa de 1577

4.4 Inovações

4.5 Pontos Transversais

Capítulo 5

5.1 Modelo Ptolomaico

5.2 Modelo Copernicano

5.3 O Sistema Tychoniano de Mundo

Capítulo 6

6.1 Mudanças

6.2 Considerações Sobre o Movimento Lunar

Capítulo 7

7.1 Tycho Versus Ursus

7.2 Kepler e as Observações de Tycho

Capítulo 8: Conclusão

Bibliografia

CAPÍTULO 1: Introdução

Apesar de ter realizado importantes contribuições teóricas à astronomia, Tycho Brahe é mais conhecido por suas observações dos astros. Antes dele, outros astrônomos buscaram realizar medições de posições das estrelas mais precisas através da construção de grandes instrumentos, mas foi Tycho que percebeu a necessidade de realizar diversas observações, durante mais tempo e com diferentes instrumentos, para garantir que erros instrumentais e humanos pudessem ser corrigidos no resultado final (Wesley, 1978). Ele também construiu grandes instrumentos, mas aliou a isso o cuidado no design e na construção, que garantiram medidas muito mais confiáveis.

Mesmo quando jovem, utilizando como o seu primeiro instrumento uma balestilha, ele sentiu a necessidade de instrumentos com construções mais robustas, capazes de corresponder a sua necessidade de realizar medições dos astros mais corretas e que também pudessem auxiliar na construção de um modelo de universo mais preciso, superando os desenvolvidos por Ptolomeu e Copérnico. Ele aplicou essa necessidade em seus instrumentos seguintes, um meio sextante e um grande quadrante, mas mesmo assim, o resultado não o satisfazia.

Com sua análise da supernova de 1572, Tycho chamou atenção como astrônomo e conquistou o respeito de outros pesquisadores da área. Seu livro sobre o assunto, apesar de escrito de forma contida, já mostra uma tendência do astrônomo a contestar a teoria aristotélica do universo, que dividia o universo em diversas esferas sobre as quais os astros estariam fixos. Além disso, sua maneira de medir a posição da estrela no céu demonstra sua habilidade como astrônomo.

Tais habilidades foram reconhecidas pelo rei Frederico II da Dinamarca, que lhe deu uma ilha, Hven, na qual Tycho morou grande parte de sua vida e construiu um observatório, Uraniborg, onde realizou algumas de suas mais importantes observações astronômicas. Os instrumentos em Uraniborg foram desenhados e construídos com extremo cuidado, sob a supervisão de Tycho, nada menos do que ele esperaria para que suas observações fossem as melhores possíveis.

Em 1577, Tycho teve a chance de analisar um cometa e suas conclusões foram expressas em dois trabalhos, nos quais ele novamente apresentou provas que refutavam a teoria aristotélica.

As diversas observações realizadas por Tycho em Uraniborg permitiram a construção do modelo tychoniano de universo e seu reconhecimento como um dos astrônomos mais importantes de todos os tempos. Além disso, elas também forneceram a base para Kepler desenvolver suas próprias teorias e o modelo do Sistema Solar aceito atualmente.

Em seu modelo geo-heliocêntrico de Universo, Tycho se baseou nos sistemas ptolomaico e copernicano, já que os tinha em grande estima. Diferentemente de Copérnico, Tycho não acreditava na possibilidade de uma Terra que se movia, mas elogiava bastante o rigor matemático desse autor. Tal rigor matemático ele tentou empregar também em seu próprio sistema.

Sua morte em 1601 não possibilitou que ele testasse a veracidade de seu sistema através de todas as observações dos movimentos dos planetas, tarefa que ficou a cargo de Kepler. Apesar de Kepler não conseguir conciliar os dados observacionais de Tycho com o sistema

tychoniano, foram essas mesmas observações que possibilitaram sua descoberta do movimento elíptico dos planetas ao redor do Sol e de suas outras duas leis.

CAPÍTULO 2

2.1 Primeiros Contatos com a Astronomia

Tycho Brahe nasceu em 1546 na Escânia, uma província que na época pertencia à Dinamarca, filho de Otte Brahe e Beate Bille. Batizado como Tyge, mais tarde ele latinizou seu nome, como era costume na época. Quando ainda muito jovem, foi adotado por seu tio paterno Jørgen Brahe e por sua esposa Inger Oxé, que não possuíam filhos.

A família Brahe fazia parte da nobreza dinamarquesa e, de geração em geração, os membros da família serviram seus reinos, trabalhando na administração, no governo e na proteção da realeza.

Sabe-se que Tycho foi mandado para a escola de gramática aos sete anos. Nessa época na Europa, durante pelo menos duzentos anos, a escola de gramática era o local onde era ensinada a gramática do latim. Essas instituições eram invariavelmente associadas com a Igreja, sendo, em sua maioria, escolas monásticas.

Se o filho de um nobre frequentasse uma delas, era provavelmente porque a escola estava sob a administração de algum nobre governador, que era Luterano, e seu parente. Filhos de nobres estudavam junto com os outros garotos estudantes, mas serviam como pajens nas casas de seus parentes para desenvolver as habilidades aristocráticas apropriadas às suas situações. Entretanto a maioria das crianças nobres ia para as escolas catedráticas, como foi o caso dos irmãos de Tycho.

A transição da escola de latim para a universidade representava a transição de estudar o latim para estudar os trabalhos clássicos escritos nessa língua. Para estudantes como Tycho, era mudar da casa de um bispo para o meio intelectual da casa de um professor universitário, onde os jovens estudantes começavam a se sentar à mesa onde ocorriam discussões, liam e frequentavam palestras sob a supervisão de um estudante mais velho que vivia na mesma casa (Thoren, 1990).

Tycho frequentou a Universidade de Copenhague, iniciando seus estudos talvez em 1559. Logo nos primeiros anos de estudo, ele parece ter começado a desenvolver interesses pelas ciências matemáticas do *quadrivium*: aritmética, geometria, astronomia e música.

Em 1560, Tycho comprou o grande texto astronômico elementar da Idade Média, *Tratado da Esfera*, escrito por Sacrobosco. Em 1561, comprou *Cosmografia*, de Peter Apian e *Trigonometria*, de Regiomontanus (Thoren, 1990).

De um modo geral, pode-se afirmar que um interesse por astronomia era compartilhado pela população intelectual de Copenhague. Esse interesse era influenciado por um movimento chamado Philipismo, que era primariamente uma doutrina teológica desenvolvida pelo tenente chefe de Lutero, Philipp Melanchthon, baseada na concepção de uma Igreja que enfatizava a educação. Ou seja, a Igreja deveria ser uma instituição educacional, buscando ensinar o verdadeiro caminho da salvação. A Igreja deveria ser composta de um clero de professores e estudiosos, sendo necessária a fluência em latim, grego e hebraico para compreender verdadeiramente as sagradas escrituras. Os membros do clero também deveriam possuir familiaridade com história e literatura e conhecimento das quatro disciplinas matemáticas para entender os mundos seculares e espirituais. Nesse contexto, o conhecimento de astronomia era necessário no estabelecimento de cerimônias religiosas, pois levava à contemplação do criador e revelava influências cósmicas (astrológicas) que afetavam a vida das pessoas.

Na época de Tycho, as ideias de Melanchthon tinham ganhado aceitação ampla o bastante na Europa para serem institucionalizadas em várias universidades luteranas. Na Inglaterra, onde as ideias de Melanchthon não se destacaram, não existiu uma cadeira de matemática nas universidades durante todo o século XVI.

Como Tycho frequentava esse ambiente, ele deve ter se sentido encorajado a perseguir seus interesses pelo estudo dos céus. Além disso, o ambiente deve ter proporcionado uma base para todas as ideias que ele viria a desenvolver depois.

Alguns biógrafos afirmam que o eclipse do Sol em 21 de agosto de 1560 foi a fonte do interesse sério de Tycho por astronomia. Entretanto, outros afirmam que talvez Tycho não soubesse do eclipse no momento em que ocorreu, sabendo sobre o acontecido apenas certo tempo depois.

A partir de 1561, quando tinha 15 anos, Tycho passou a frequentar diversas universidades no exterior, como era costume dos membros da família Oxé. O primeiro lugar em que estudou foi a Saxônia. A pedido de seu tio, ele viajava acompanhado de um companheiro e guia, Anders Sorensen Vedel, um jovem de vinte anos da classe média.



Figura 1: Europa na renascença. A linha preta representa a trajetória de Tycho.
Fonte: Thoren, Vitor E., *The Lord of Uraniborg: A Biography of Tycho Brahe*, 1990.

Durante suas viagens, comprava livros astronômicos e outros artefatos, como um globo celeste do tamanho de um punho e mapas de constelações. Já nessa época, começou a fazer medições de efemérides alinhando um planeta e duas estrelas utilizando um barbante e estimando a posição do planeta através das posições das estrelas em seu pequeno globo (Thoren, 1990). Em suas horas vagas, fazia horóscopos de homens famosos.

Tycho também percebeu que as Tabelas Alfonsinas, que computavam as posições do Sol, da Lua e dos planetas em relação às estrelas fixas, construídas utilizando os métodos de

Ptolomeu, que dividia o ano em 365 dias, 5 horas, 49 minutos e 16 segundos, e se apoiava no modelo geocêntrico, e as Tabelas Prussianas, utilizando o modelo heliocêntrico de Copérnico, deixavam a desejar em suas predições (Thoren, 1990).

Em 1563, ao observar uma conjunção de Saturno e Júpiter, ele reparou que as Tabelas Alfonsinas indicavam o acontecimento como tendo que ocorrer um mês antes, enquanto as Tabelas Prussianas erravam por alguns dias (Pannekoek, 1961). Tycho sabia que era necessário desenvolver uma teoria mais correta sobre movimentos planetários.

2.2 Cross-staff, Balestilha ou Radius

Tycho não descreve a balestilha em *Astronomiae Instauratae Mechanica*. Como foi seu primeiro instrumento e devido a ser um tanto rudimentar, dada a precisão almejada por ele, não havia razão para tal.

Em 1563, Tycho começou seu primeiro caderno de anotações. Ele observou a conjunção de Júpiter e Saturno, fenômeno que ocorria em um intervalo de vinte anos e o qual acreditava que supostamente teria um significado astrológico.

Tycho havia abandonado seu barbante por um grande compasso, que era utilizado olhando por seu vértice ao longo de cada perna para os dois objetos observados.

Vedel tentava fazer Tycho se focar nos estudos indicados, mas era complicado controlar um jovem de 18 anos, que tinha amigos que gostavam de astronomia e o influenciavam a perseguir essa atividade (Thoren, 1990). Ele conheceu Valentin Thau, através de Vedel, que era o astrólogo eleito pela corte, astrônomo e matemático, e recebeu instruções de Bartholomew Schultz na universidade, que havia estudado com o famoso professor de matemática Johannes Homilius. Através de Schultz, Tycho se familiarizou com técnicas astronômicas, aspectos matemáticos de geografia e cartografia, práticas de navegação e fabricação de instrumentos.

Homilius e Schultz haviam usado uma balestilha para realizar suas observações e Tycho a escolheu como seu primeiro instrumento verdadeiro. Provavelmente, seu instrumento foi feito comercialmente por um sobrinho de Gemma Frisius, um famoso fabricante de instrumentos, físico, cartógrafo e matemático da época.

De acordo com um tratado de Gemma sobre esse instrumento, a aresta era movimentada ao longo da barra principal até que o ângulo a ser medido estivesse coberto exatamente por seu comprimento. No modelo de Tycho, e no descrito acima, essa barra era equipada com uma mira móvel. Quando o observador tinha ajustado a aresta na barra para que ele pudesse ver suas duas estrelas ao longo das linhas de visada percorrendo o final da aresta até cada mira da aresta, ele podia obter a tangente de seus ângulos de separação lendo as escalas marcadas na barra (Figura 2).

Entretanto, Tycho logo ficou insatisfeito com a rudeza da escala do instrumento e Schultz lhe ensinou um truque que Homilius utilizava para obter melhores precisões, que consistia no uso de pontos transversais, os quais virariam marca dos instrumentos de Tycho.

Logo depois, Tycho começou a notar erros sistemáticos em seus dados que ocorriam devido a erros na construção do instrumento e ele os retificou com uma tabela de correções. Ele também anotou as primeiras observações feitas com sua balestilha em seu caderno.



Figura 2: Modelo de balestilha igual ao utilizado por Tycho Brahe.

Fonte: Cópia de Thoren, Vitor E., *The Lord of Uraniborg: A Biography of Tycho Brahe*, 1990.

Em 1565, com a morte de Jørgen Brahe, Otte Brahe e Beate Bille passaram a ser novamente seus representantes legais até que ele atingisse a maioridade, e Tycho passou a frequentar mais vezes a casa de seus pais e irmãos. Apesar de o pai de Tycho incentivá-lo a seguir uma carreira a serviço do rei, como era esperado de alguém de sua posição social, Tycho não se mostrava inclinado a seguir tal caminho.

Em abril de 1566, Tycho continuou suas viagens indo para Wittenberg, viajando na companhia de dois colegas, onde encontrou diversos outros estudantes dinamarqueses. Em setembro, ele seguiu para Rostock.

Em Rostock, Tycho buscou um significado astrológico para um eclipse lunar que ocorreu em 28 de outubro, e concluiu que ele previa a morte de um sultão turco, Solimão, o Magnífico, que na verdade já havia morrido algumas semanas antes do eclipse. Talvez esse tenha sido o motivo que acabou por levá-lo a uma briga com outro estudante dinamarquês, Manderup Parsberg, que pode ter se aproveitado do erro de Tycho para torná-lo motivo de alguma piada (Thoren, 1990). Durante um duelo, travado com espadas, o que era muito comum naquela época, Tycho perdeu parte de seu nariz, tendo que utilizar uma prótese pelo resto de sua vida.

2.3 Meio Sextante

Tycho se estabeleceu em Augsburgo, na Alemanha superior, por um tempo durante 1569. Lá, ele conseguiu reunir tempo suficiente para desenvolver seu primeiro instrumento, um meio sextante, formado por um compasso gigante, constituído de um arco de latão graduado de 30° e pernas de madeira de aproximadamente 1,5 metros de comprimento. Ele era grande o suficiente para realizar medições razoáveis e leve o suficiente para ser transportado e utilizado sem dificuldades. Por possuir erros sistemáticos de visão, Tycho precisou construir outra tabela de correções. Além disso, o instrumento possuía incertezas variáveis decorrentes de erros na sua leitura, que não possuía uma escala graduada com a precisão desejada por Tycho.

ALIVD INSTRVMENTVM
SIMILE PRIORI, PRŌ DISTANTIIS.

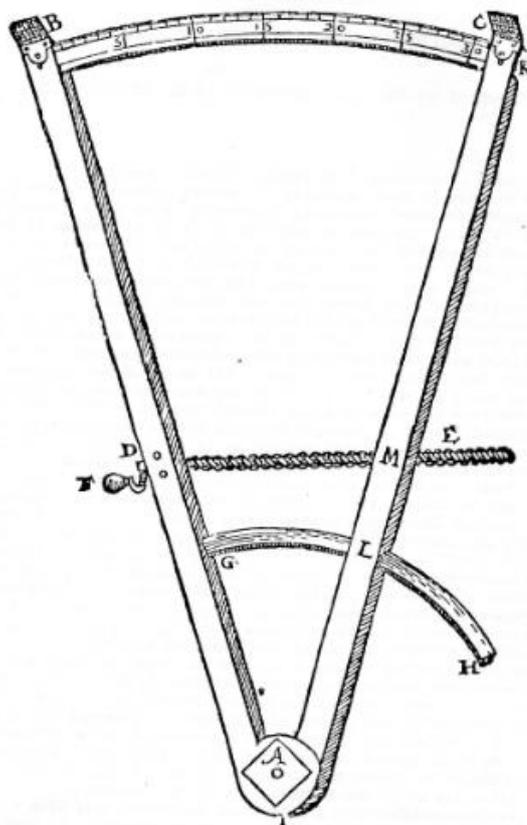


Figura 3: Meio sextante.

Fonte: *Astronomiae Instauratione Mechanica*, de Tycho Brahe, 1978, tradução por Jean Peyroux da edição de 1598.

Tycho descreve esse instrumento em seu livro *Astronomiae Instauratione Mechanica*, explicando que é um instrumento de madeira, colocado sobre um suporte, e manuseável por sua leveza.

Na figura apresentada por Tycho (Figura 3), o arco BC é onde se acham as divisões, constituindo um arco de círculo, com ângulo até 30° , ideal para medir distâncias pequenas. As régua AB e AC se unem ao lado do centro representado por A, e aí rotacionam mutuamente. Possuem o comprimento de 4 cúbitos (aproximadamente 1,5 metros), largura de três dedos e espessura de dois dedos. São feitas de madeira de noqueira, que são menos sujeitas, em comparação a outros tipos de madeiras, a mudanças provenientes da qualidade do ar. O arco é metálico e o ângulo BAC pode ser reduzido ou aumentado como necessário para os intervalos de medidas, movimentando-se o parafuso representado em DE. É possível que o parafuso seja deixado em linha reta, no entanto ele pode ser manuseado de modo a permitir o movimento de outra fração de círculo em madeira, representada de G a H, que está perto de DE, acima do centro A. O arco de circunferência GLH é utilizado para conter as régua em seu plano. O ângulo do instrumento pode ainda ser consolidado sobre o mesmo arco pela parte posterior.

Este arco é distante do centro em quase um terço do comprimento das réguas, afim de que o movimento das réguas possa ser comodamente guiado sobre ele pela outra mão aplicada ali.

Tycho comenta que não construiu nenhum pedestal. Como o instrumento não é muito pesado, ele pode ser virado e mantido com pouco esforço na direção do plano das estrelas.

Sobre seu uso ele diz que, com base no desenho, o olho deve ser posicionado em I e a maçaneta F virada, tal que o ângulo BAC do instrumento possa ser reduzido ou alongado pelo parafuso DE em rotação até que os dois astros dos quais se busca as distâncias estejam distintos exatamente e centralmente no interior das miras localizadas em B e C. Desse modo, o arco interceptado no mesmo lugar pelas miras e pelas réguas, permite que o observador realize suas medições.

O instrumento não pode ser considerado excelente e foi rejeitado logo em seguida por Tycho. Porém, ele menciona que merece ser destacado com os outros instrumentos, pois aqueles inventados alguns anos depois foram construídos através de muito trabalho e com grande custo, enquanto este não.

2.4 Grande Quadrante

Após utilizar durante um tempo os instrumentos acima citados e precisar corrigir os defeitos das medidas através de tabelas de correções, é de se imaginar que Tycho desejasse possuir um instrumento com melhor precisão. Para tanto, ele sabia que precisaria de um instrumento grande o suficiente para possuir uma escala de segundos de arco (Thoren, 1990).

Intrigado pelas ideias de Tycho, Paul Hainzel, um vereador de Augsburg e, assim como seu irmão Johann B. Hainzel, amigo de Tycho e estudioso de astronomia, se ofereceu para cobrir os custos da produção de qualquer instrumento que Tycho pudesse desenvolver e que os artesãos da cidade pudessem fabricar. Esse projeto resultou em um grande quadrante, o maior que Tycho possuiria e veria em sua vida (Thoren, 1990), construído na casa de campo de Hainzel, próximo de Augsburg, provavelmente em 1570.

O instrumento (Figura 4) foi construído inteiramente em madeira, mais especificamente em carvalho, exceto pela graduação de 90°, que foi feita sobre lâminas de latão que recobriam o arco, e de um fio com um peso de chumbo. O arco de círculo continha 5,5m de raio e era muito pesado, sendo necessários 40 homens para colocá-lo no lugar quando completado (Thoren, 1990). Só para rodar o instrumento, posicioná-lo no plano desejado e mexer o arco para que este marcasse a elevação correta do objeto observado era necessário um grande esforço.

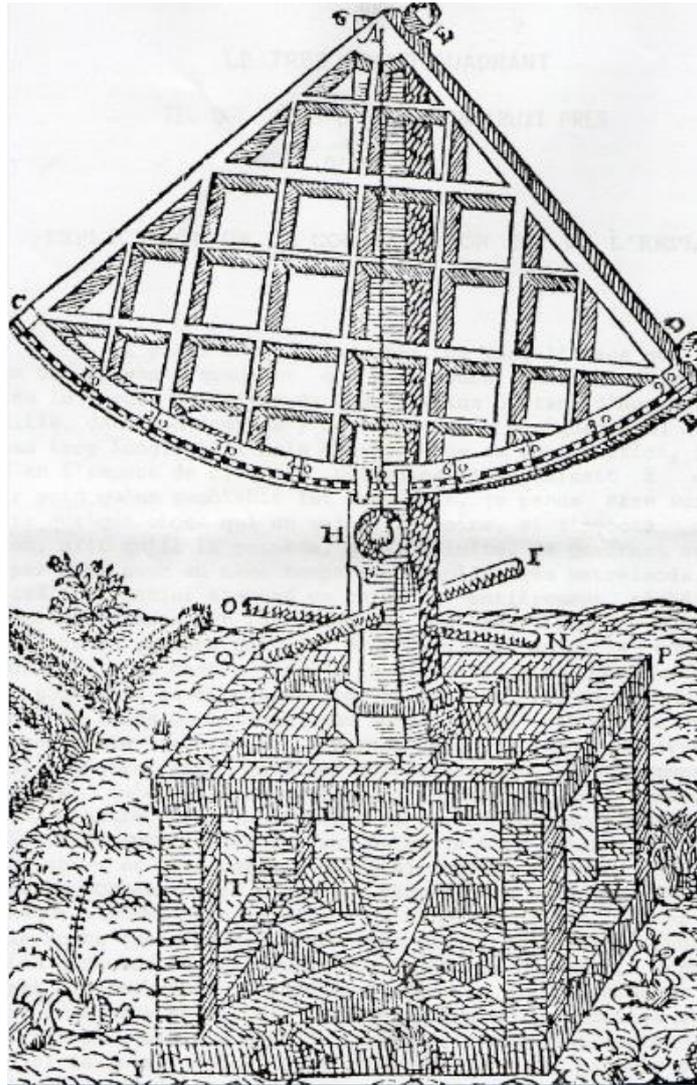


Figura 4: Grande quadrante.

Fonte: *Astronomiae Instauratae Mechanica*, de Tycho Brahe, 1978, tradução por Jean Peyroux da edição de 1598.

Nos catálogos de Tycho, estão marcadas observações feitas com esse instrumento no período de abril a maio de 1570, sendo que cada noite de observação consistia em apenas dados sobre um único objeto, o que prova a dificuldade para manusear o instrumento.

O instrumento, por ser tão grande e possuir boa precisão, chamou a atenção do filósofo Petrus Ramus, que visitou Augsburg em abril de 1570. Um ano depois dessa visita, Tycho encontrou uma menção de seu instrumento em um livro escrito por um jovem nobre dinamarquês chamado Bracheus, que narrava as viagens de Ramus.

Tycho descreve a estrutura, construção e uso desse instrumento em seu livro *Astronomiae Instauratae Mechanica*. Em sua descrição e a partir de seu esquema, os pontos A, B, e C delimitam o arco do quadrante, que é preenchido com vigas que se cruzam, com a finalidade de ajustá-lo firmemente. Cada grau marcado no arco é dividido em sessenta minutos e cada minuto é dividido em seis partes, cada uma representando dez segundos.

Do lado do quadrante havia duas miras, uma representada por D, onde o observador podia olhar através de um pequeno furo e através do qual as estrelas eram vistas através da mais

alta das miras, representada por E. Tycho explica que para que o Sol pudesse ser observado, colocava-se um tubo alongado entre E e D para que a luz fosse menos dissipada e ficasse focalizada.

Ao lado do “centro do círculo” em A, havia um fio fino suspenso, que carregava um peso de chumbo, localizado perto de H, para que esse fio não fosse levado pelo vento. O próprio fio mostrava a medida da altura buscada sobre as divisões.

O quadrante ficava preso a uma larga coluna de carvalho, que por sua vez, ficava presa em sua parte inferior por uma base no chão, representada na figura por XYSPK. A coluna podia rotacionar e uma abertura em forma de cone evitava que ela vacilasse de um lado para outro, de modo que tanto a coluna quanto o quadrante preso a ela pudessem ser mover em todo o plano vertical. A coluna era rodada utilizando-se os cabos Q, O, I e N e o quadrante era mantido imóvel no plano desejado devido ao seu peso.

O instrumento era utilizado para medir alturas de planetas, do Sol e de estrelas. Para tanto, o observador posicionava o olho na mira representada em D e o astro era procurado levantando ou abaixando o quadrante. Se a altura fosse muito pequena (se o astro estivesse muito próximo ao horizonte) o observador precisaria subir em uma escada. Em seguida, o instrumento era deixado imóvel e a altura era mostrada pelo fio com o peso de chumbo, sobre a circunferência.

É interessante pensar, que para obter melhores resultados nas medidas que realizava, Tycho pensou na construção de um instrumento tão grande quanto este. É claro que ele sabia que devido ao peso do instrumento ele teria que ser mantido fixo e seria bem difícil de manusear, entretanto, o grande tamanho facilitava a colocação de uma escala maior de medidas, o que resultaria em dados com maior resolução.

No final de 1571, Tycho conheceu e se apaixonou por uma jovem chamada Kirsten, que era possivelmente filha de um ministro luterano chamado Jørgen Hansen. Ela não era de família nobre e Tycho nunca se casou formalmente com ela, no entanto, de acordo com a lei dinamarquesa da época, se uma mulher “comum” vivesse livremente na casa de um nobre como sua esposa e possuísse as chaves de sua casa eles seriam considerados casados após três anos. E isso foi o que aconteceu com Tycho e Kirsten. Eles viveram juntos como marido e mulher pelo resto de suas vidas e tiveram oito filhos, seis dos quais chegaram à idade adulta. Apesar de seus filhos serem considerados ilegítimos na visão da lei, mais tarde a irmã Sophie de Tycho testemunhou que os filhos eram legítimos.

CAPÍTULO 3

3.1 Supernova de 1572

Em 1570, Tycho se estabeleceu na Abadia de Herrevad (ou Heridsvad), ao nordeste de Knudstrup, propriedade que havia passado ao domínio do irmão de sua mãe, Steen Bille. Lá, ele desenvolveu uma espécie de instituto, onde contava com a ajuda de assistentes para realizar suas pesquisas. Nessa mesma época, ele também começou a usar um novo meio sextante, substituindo o que ele usava anteriormente em Augsburg. Entretanto, dessa vez ele acrescentou um arco de 60°, o que viria a dar o nome de sextante ao instrumento. A importância desse instrumento está no fato de Tycho tê-lo utilizado para medir posições da supernova de 1572, também conhecida como a supernova de Tycho, uma supernova do tipo Ia que explodiu na constelação de Cassiopeia naquele ano.

É importante ressaltar que os interesses de Tycho nessa época não se restringiam apenas à astronomia. Um de seus maiores interesses era a alquimia, que ele praticava em grande extensão, sendo que ele tinha seu próprio laboratório para a realização de experimentos em Herrevad. Mesmo anos depois, quando Tycho se estabeleceu em Uraniborg, na ilha de Hven, ele ainda praticava essa atividade, tendo um laboratório destinado para tal.

Em 11 de novembro de 1572, enquanto retornava de seu laboratório de alquimia, Tycho reparou na existência de uma estrela que ele não conhecia no céu, mais especificamente na constelação de Cassiopeia, localizada próximo às três estrelas que formam o lado direito do W da constelação e descrita por Tycho como formando um paralelogramo com elas. Mais tarde, ele conseguiu determinar a distância da nova estrela com relação às outras três, o que pode ter sido feito com uma balestilha. No entanto, os primeiros dados de Tycho sobre a nova estrela não podem ser analisados, porque suas anotações foram perdidas (Thoren, 1990).

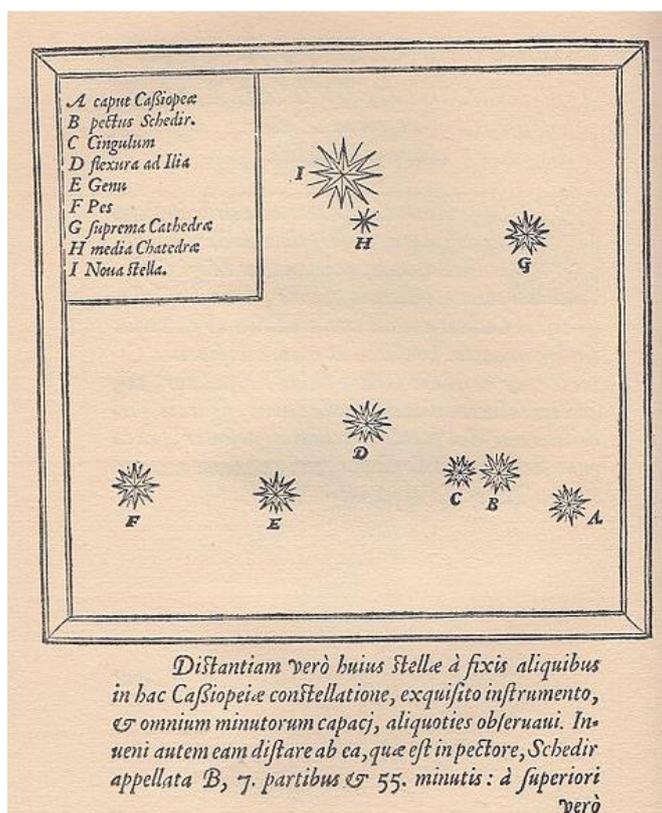


Figura 5: Mapa desenhado por Tycho de parte da Constelação de Cassiopeia com a nova estrela representada pela letra I.

Fonte: Wikipedia, cópia de página de *De Stella Nova*.

Como não se encontrava sobre as constelações do zodíaco, o objeto não poderia ser um planeta. E as características conhecidas por Tycho sobre os cometas, como a presença de cauda, e a ausência de movimento progressivo com relação às estrelas, que pôde ser confirmada após algumas noites de observações, também o fizeram descartar essa hipótese. Além disso, o fato de o objeto ser muito estacionário também ajudava a eliminar essa hipótese, como também a de estar associado à esfera sublunar de Aristóteles.

Na época de Tycho as teorias de Aristóteles sobre o universo ainda eram as mais aceitas. Aristóteles acreditava que existia um tipo de cosmos, do qual os seres humanos faziam parte, sendo que um macrocosmo estava diretamente ligado aos órgãos dos corpos individuais, ou microcosmos. De fato, esse tipo de pensamento foi responsável para justificar a astrologia. Nesse contexto, a Terra se encontrava no centro do cosmos e do universo, inserida até sua atmosfera em uma casca que terminava logo antes da Lua. Toda essa região era conhecida como a esfera terrestre ou sublunar e era caracterizada como uma “esfera de mudança”, ou seja, nessa região as coisas nasciam e morriam e os corpos tinham posições e distâncias determinadas do centro da Terra (Hoskin, 1999).

Em contraste com essa esfera, havia várias esferas celestes, uma após a outra, onde estavam os corpos que as pessoas podiam observar da Terra, como a Lua, os planetas e as estrelas, e que circulavam ao redor dela eternamente, possuindo completa perfeição. Os cometas, por esse raciocínio, como se movimentavam em relação aos outros objetos do céu, eram considerados parte da esfera terrestre e um fenômeno meteorológico (Hoskin, 1999).

Qualquer mudança observada no céu, como o aparecimento de uma nova estrela, deveria ser restrita à esfera sublunar. Outras pessoas que também observaram o aparecimento da estrela afirmavam que ela deveria estar abaixo da Lua, ou diziam que era um cometa, mesmo sem conseguirem obter medidas de paralaxe. A teoria aristotélica era tão fortemente aceita que, mesmo quem concordava que a estrela estava acima da Lua, considerava que a mudança de seu brilho era causada pelo reflexo da mudança de sua distância, ou seja, era um fenômeno extrínseco a ela.

A medida de paralaxe das estrelas era algo impossível de ser obtido no século XVI e isso viria a causar repercussões nos dados obtidos por Tycho e em seu modelo de universo. Medindo-se a distância angular da estrela em dois momentos diferentes da noite é possível determinar se ela mudou de posição e isso pode ter sido feito por Tycho e, após algumas noites de observação ele pode ter eliminado a possibilidade do objeto possuir alguma paralaxe.

Tycho mediu a distância entre a nova estrela e a estrela Shedar (α de Cassiopéia) e obteve o valor de $7^{\circ}55'$ e também obteve uma culminação superior de 6° do zênite (Thoren, 1990). Ele obteve sua declinação através de cálculos trigonométricos, mas também queria obtê-la experimentalmente, o que acreditava poder fazer utilizando um quadrante. No entanto, nessa época, os únicos instrumentos que possuía para uso eram uma balestilha e seu novo sextante.

Como o sextante só poderia medir até 60° , e não alcançava a estrela que estava localizada tão próxima ao zênite, Tycho teve a ideia de virá-lo.

Ele colocou o instrumento na horizontal, apoiado sobre uma janela e sobre uma coluna dentro do quarto. O sextante era movimentado até que o fio contendo o peso de chumbo, que estava preso ao arco graduado, tocasse a marca localizada no meio da perna, o que garantia que ele ficasse na horizontal. Além disso, um arco graduado menor foi marcado no meio da perna, sendo que o fio marcava qualquer correção que deveria ser feita na medida final, causada pela movimentação do instrumento durante a observação.

Naquela época, medidas de declinação das estrelas eram realizadas medindo-se suas altitudes no meridiano quando estavam mais altas (culminação superior) e subtraindo a altitude do equador (latitude do lugar) (Pannekoek, 1961). Tycho obteve o valor de $27^\circ 45'$ para a menor altitude alcançada pela estrela, e como a latitude de Herrevad era de $55^\circ 58'$, ele obteve a declinação de $61^\circ 47'$ para a estrela (Dreyer, 1963).

Em *Astronomiae Instauratae Mechanica*, Tycho registrou esse instrumento e como ele foi utilizado para medir a altura e declinação da estrela (Figura 6). Ele apoiou a régua AB do sextante sobre um muro em uma janela localizada em um lugar alto, que correspondia ao meridiano celeste. O suporte representado por VX, e abaixo de T, foi utilizado para manter a régua AB paralela ao horizonte. Ele colocou o arco KN do instrumento, juntamente com as régua, na direção do plano do meridiano, e suspendeu o fio em N com um peso de chumbo pendurado em sua ponta, representado por NS. A régua AB ficava exatamente paralela ao horizonte e N estava na direção do zênite.

O instrumento possuía um pequeno erro de excentricidade, causado pela posição do olho do observador, que ficava um pouco atrás do centro do círculo da mira. Tycho tabelou esse erro, e ele era considerado em suas medidas.

INSTRUMENTI EIVSDEM
VT ALTITVDINIBVS CAPIENDIS
inſeruiat diſpoſitio.

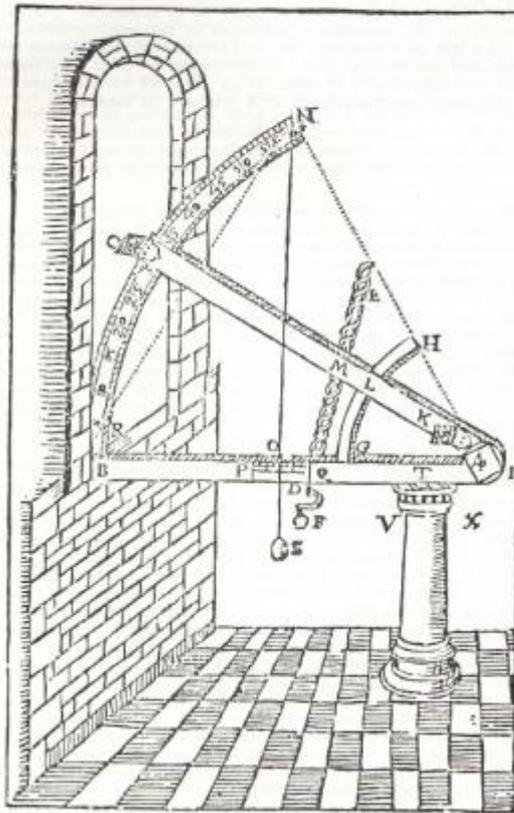


Figura 6: Sextante utilizado por Tycho para medir posição da nova estrela.

Fonte: *Astronomiae Instauratae Mechanica*, de Tycho Brahe, 1978, tradução por Jean Peyroux da edição de 1598.

Tycho escreveu um manuscrito sobre a nova estrela, mas inicialmente não tinha a ambição de publicá-lo. Como comunicou mais tarde, quem o incentivou a publicá-lo foi seu amigo Johannes Pratensis, professor da Universidade de Pádua, que o conhecia desde 1560. Tycho não havia considerado a publicação de seu trabalho porque provavelmente possuía certo receio sobre o preconceito geral da época de que a atividade de escrever livros não era adequada à sua elevada posição social.

Após escutar as ideias do amigo sobre a nova estrela e ler um pedaço de seu manuscrito, Pratensis o incentivou a terminá-lo e publicá-lo, e se ofereceu para ajudá-lo. Entretanto, apesar de Tycho concordar em publicá-lo, inicialmente pediu a Pratensis que omitisse seu nome, pois muitas pessoas considerariam a publicação do livro inapropriada para um nobre. Mas, mais tarde, ele parece ter mudado de ideia, aceitando colocar seu nome no trabalho. Mesmo assim, como para suavizar o fato de ter publicado seu livro, o prefácio foi composto por uma carta de Pratensis pedindo que o autor publicasse o trabalho, seguida de uma carta escrita por ele próprio relutantemente atendendo ao pedido do amigo.

Em seu trabalho, conhecido hoje pelo título de *De Stella Nova*, Tycho reconhece outras possibilidades para o objeto misterioso, mas afirma que apresentará observações que irão contestar qualquer outra possibilidade a não ser o fato de ser uma estrela.

Logo no começo do livro, Tycho escreveu que a nova estrela deveria ter significado divino, sendo que Deus a teria criado para seu próprio propósito, e continuou na análise especulativa sobre seu aparecimento no final quando relacionou o aparecimento da estrela a consequências para a humanidade.

Ele afirmou que suas observações com um ótimo instrumento mostravam que a estrela era estacionária e que através de sua distância com relação a duas das estrelas mais brilhantes por perto e as coordenadas dessas estrelas, a ascensão reta e a declinação da estrela puderam ser determinadas com cálculos trigonométricos. Ele também afirmou não ter encontrado paralaxe para o objeto e que, devido à sua posição, ele devia fazer parte da oitava esfera celeste ou não estar muito abaixo desta, mas muito acima da Lua. Pela ausência de paralaxe e pelo fato de não possuir movimento progressivo, o objeto não poderia ser um cometa ou algum tipo de meteoro, que eram considerados como gerados abaixo da Lua.

O livro foi publicado na metade de 1573 com o título inicial, traduzido literalmente, de *Contemplação matemática de Tycho Brahe da Dinamarca sobre a nova e nunca vista antes estrela agora observada pela primeira vez no mês de Novembro no ano 1572 de nosso Senhor*.

Quando a estrela apareceu pela primeira vez em novembro, ela era tão brilhante quanto Vênus e, para observadores cautelosos, podia ser vista mesmo durante o dia. Em dezembro, seu brilho poderia ser comparado ao de Júpiter. A nova estrela foi diminuindo de magnitude no céu, até que no final de março de 1574 deixou de ser visível.

Após o desaparecimento da supernova, Tycho teve a chance de observar o eclipse lunar que ocorreu em oito de dezembro de 1573, ao qual se refere no final de *De stella nova*. Para fazer medições do eclipse ele utilizou um novo instrumento, um pequeno quadrante. Além disso, ele teve a ajuda de sua irmã Sophie, que era naquela época a única de sua família que apreciava os interesses astronômicos do irmão (Dreyer, 1963).

3.2 Pequeno Quadrante

No final de 1573, Tycho começou a usar um novo quadrante. Apesar de pequeno, o instrumento era feito inteiramente de bronze o que tornava o custo de sua fabricação maior.

Talvez a maior importância desse instrumento seja para ressaltar o nível dos instrumentos que Tycho poderia ter a sua disposição, ou seja, sua posição como um nobre facilitava que ele tivesse acesso a instrumentos de altíssima qualidade.

Adornando esse quadrante, havia uma pintura na qual havia uma árvore que representava a dicotomia entre a vida que Tycho gostaria de levar e a vida que sua posição social de certo modo impunha que ele levasse.

Tycho também faz uma descrição desse quadrante em *Astronomiae Instauratae Mechanica*, explicando a divisão da escala graduada em 90 partes, com cada uma dividida em doze outras partes, sendo que cada subdivisão formava 5'. Ele também ressalta seu uso para fazer medidas de alturas dos objetos celestes. O plano do quadrante era dirigido em direção ao astro a ser observado e a régua AD era abaixada e levantada até o astro aparecer pela abertura pelas quais deve ser enxergado.

Tycho registrou poucas observações realizadas com esse quadrante e ele parece não ter atingido suas expectativas quanto à precisão, dado que sua menor medida era de 5 minutos de arco (Thoren, 1990).

QVADRANS MINOR ORICHALCICUS INAU RATVS.

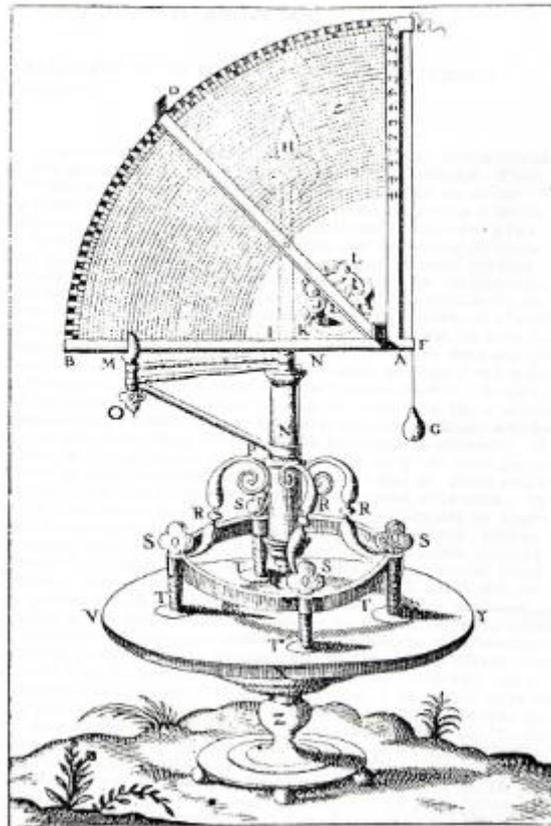


Figura 7: Pequeno quadrante.

Fonte: *Astronomiae Instauratae Mechanica*, de Tycho Brahe, 1978, tradução por Jean Peyroux da edição de 1598.

3.3 Palestras

No primeiro semestre de 1574, Tycho continuou suas observações em Herrevad e passou o resto do ano em Copenhague. Lá, seu sucesso como astrônomo já era parcialmente reconhecido, como é mostrado pelo fato dele ter sido convidado para dar um ciclo de palestras versando sobre temas matemáticos na universidade. Inicialmente, Tycho recusou o pedido, que foi feito por estudantes da Universidade de Copenhague, que se incomodavam com a falta de palestras sobre o assunto. Entretanto, após certa persuasão por parte de seus amigos Charles Dancey, um diplomata francês, e Pratensis e, principalmente, após um pedido feito pelo próprio Rei Frederico II para que ele atendesse ao desejo dos estudantes e contribuísse com a universidade, ele aceitou.

As palestras começaram em setembro de 1574 e tiveram fim no começo de 1575. Nelas, Tycho falou sobre alguns aspectos astronômicos e explicou conceitos de trigonometria, dando início à suas apresentações com um discurso sobre a antiguidade e a importância das ciências matemáticas (Dreyer, 1963). Nesse discurso ele elogiou o conhecimento de Nicolau Copérnico sobre o movimento das estrelas e sobre matemática, mas também ressaltou que sua teoria era contraditória a alguns princípios físicos. Além disso, ele afirmou que a astronomia eleva a mente humana de coisas terrestres e triviais para as celestes e nos permite obter conclusões

sobre o destino da humanidade através dos movimentos dos astros, em uma clara alusão à astrologia (Dreyer, 1963).

Após seu ciclo de palestras, Tycho iniciou uma longa viagem, visitando inicialmente a cidade de Kassel, na Alemanha, em abril de 1575, onde conheceu o astrônomo e *landgrave* (título dado a certos condes da época, que tinham jurisdição sobre um território) Wilhelm IV de Hesse, filho do *landgrave* Philip, o Magnânimo. Tycho se hospedou na casa de seu novo conhecido e os dois se deram muito bem, visto que possuíam várias opiniões comuns. Assim como o jovem astrônomo, o *landgrave* também acreditava na necessidade de observações meticulosas dos astros para obter medidas precisas e havia encontrado erros em catálogos existentes. Ele também havia construído uma torre em sua propriedade, cujo topo permitia a observação de todo o céu. Durante o dia, os astrônomos conversavam sobre ciências e durante a noite, realizavam observações do céu, quando determinaram a posição da estrela Spica (Alfa Virginis) (Dreyer, 1963).

A estadia de Tycho durou pouco mais de uma semana, sendo que sua partida ocorreu após a morte de uma filha do *landgrave*, e os dois nunca mais se encontraram, retomando a amizade apenas anos depois, em 1586, através de cartas.

Em seguida, Tycho visitou as cidades de Frankfurt e Basileia (na Suíça), para onde considerou seriamente mudar-se. A Basileia o atraía por ser um dos centros de conhecimento da Europa e por sua boa localização. Continuou sua viagem passando por Veneza e retornando para Augsburg.

CAPÍTULO 4

4.1 Uraniborg

Enquanto Tycho considerava deixar seu país, algo já estava acontecendo que viria não apenas a impedi-lo, mas que também mudaria sua vida. Suas habilidades como astrônomo haviam impressionado o *landgrave* Wilhelm IV de tal modo que este insistiu ao Rei Frederico II que lhe fizesse uma proposta para que ele pudesse trabalhar como astrônomo em seu próprio país, o que significaria também um avanço para a ciência.

Desta forma, o rei, que não era desprovido de interesses científicos, ofereceu a Tycho diversos castelos, os quais foram recusados. Insistente, pouco tempo depois o rei mandou um mensageiro à casa de Tycho, pedindo que este fosse esperá-lo em Seeland. Nessa reunião, o rei lhe contou sobre a ilha de Hven, localizada no sul do país e um local isolado, que, como afirmava ter ouvido de Steen Bille, Tycho poderia se interessar. Ele lhe ofereceu a ilha e meios para construir uma casa e um observatório, proposta que Tycho, após novamente consultar seus amigos Pratensis e Dancey, aceitou.

Em fevereiro de 1576, o rei repassou certa quantia de dinheiro ao astrônomo e no mesmo mês, no dia 22, este visitou a ilha presumivelmente pela primeira vez. Logo na noite de sua primeira visita, Tycho teve a chance de observar uma conjunção de Marte e da Lua, e no dia seguinte foram assinados os documentos que o tornavam o novo proprietário da ilha e responsável por seus habitantes.

No centro da ilha de Hven, Tycho construiu sua nova casa e seu observatório, o qual chamou de Uraniborg (ou Uraniburgum), sendo a primeira pedra da construção colocada por seu amigo Dancey no dia oito de agosto.

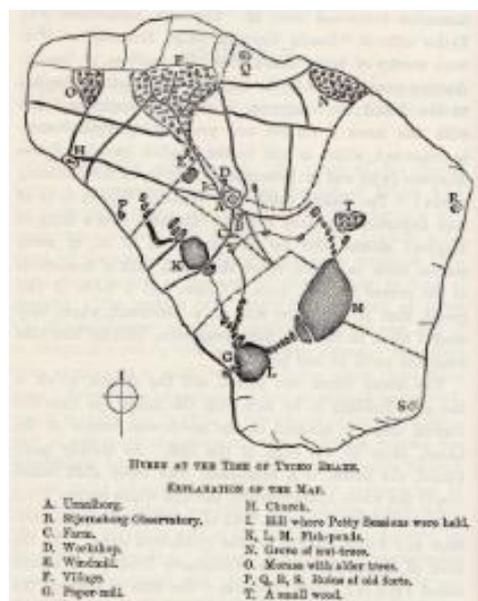


Figura 8: A ilha de Hven.

Fonte: Dreyer, J. L. E. *Tycho Brahe, A Picture of Scientific Life and Work in the Sixteenth Century*, 1963.



Figura 9: Uraniborg vista do leste.

Fonte: Thoren, Vitor E., *The Lord of Uraniborg: A Biography of Tycho Brahe*, 1990.

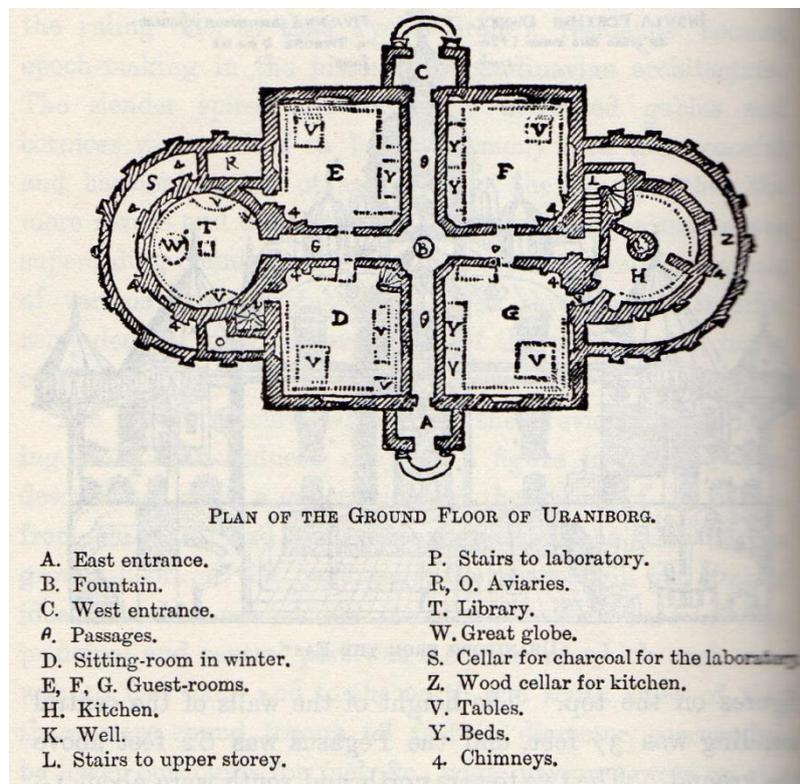


Figura 10: Andar térreo de Uraniborg.

Fonte: Dreyer, J. L. E. *Tycho Brahe, A Picture of Scientific Life and Work in the Sixteenth Century*, 1963.

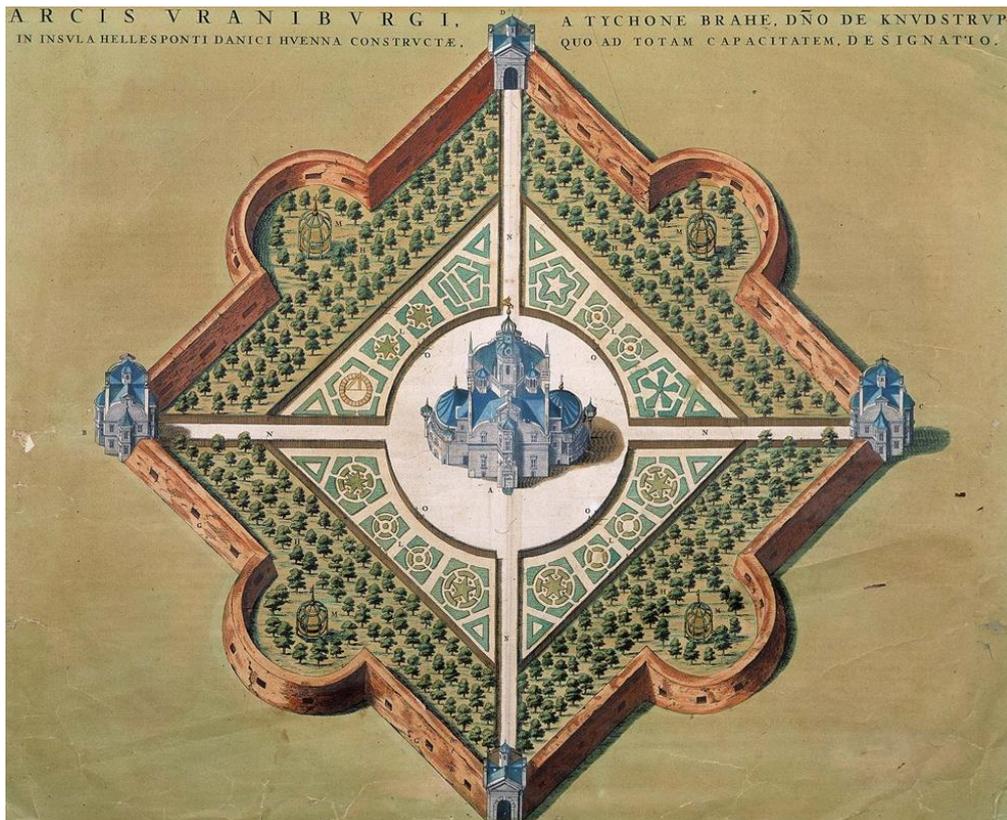


Figura 11: Uraniborg após 1590.

Fonte: Wikipedia, imagem do livro de Tycho Brahe, *Astronomiae instauratae mecânica*, 1598.

O castelo de Uraniborg proporcionava todo o conforto que Tycho e sua família poderiam desejar e possuía a infraestrutura e instrumentos necessários para que Tycho realizasse suas observações astronômicas. Na biblioteca, havia um grande globo, fabricado em Augsburg, que possuía círculos graduados representando meridianos e o horizonte, além de um quadrante móvel para medidas de altitude. Havia também ali, mesas para que seus diversos assistentes pudessem trabalhar e quadros de astrônomos e filósofos.

4.2 Quadrante Mural (Quadrante de Tycho)

Um dos quartos do castelo continha seu grande quadrante mural (Figura 12), que foi um dos instrumentos mais utilizados em Uraniborg. Esse quadrante possuía o arco de 90° feito de latão com pouco mais de dois metros de raio, sendo que o arco possuía uma largura de aproximadamente treze centímetros e espessura de cinco centímetros. Ele era equipado com duas miras que podiam se mover pelo arco.

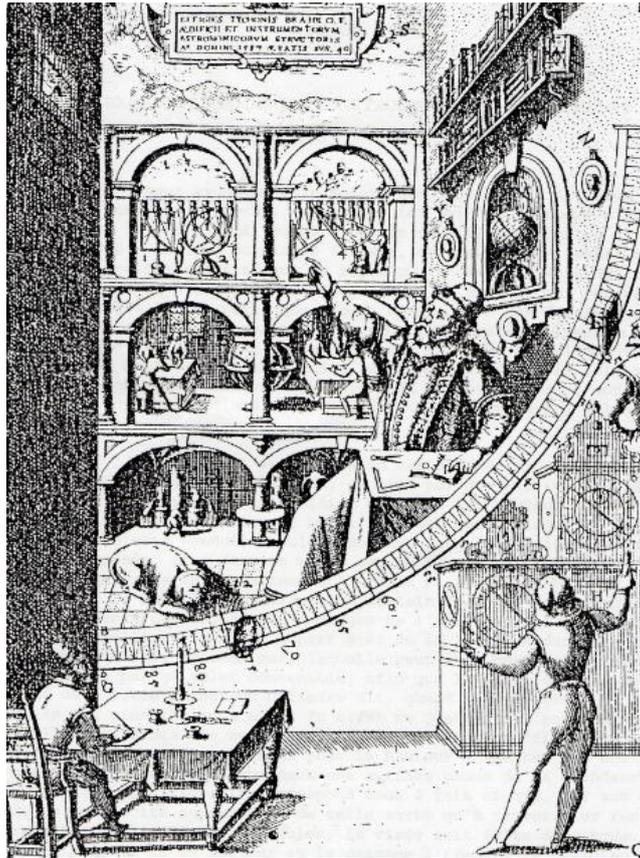


Figura 12: Quadrante mural.

Fonte: *Astronomiae Instauratae Mechanica*, de Tycho Brahe, 1978, tradução por Jean Peyroux da edição de 1598.

Em *Astronomiae Instauratae Mechanica*, Tycho explica que na posição do centro do quadrante, havia um cilindro de latão dourado que se apoiava na alta “janela” representada em A, pelo qual a observação era feita, olhando-se pelas miras em D e E; de fato o cilindro era preso na mira escolhida em uma extremidade e alcançava a janela na outra. A escolha do uso de mira era feita baseada na altura que se desejava medir. F representa uma posição ocupada pelo observador, que pode indicar as alturas lidas no quadrante a uma pessoa sentada à mesa representada em G. Outra pessoa era necessária para a medição do tempo do trânsito no meridiano marcado nos relógios próximos a I e K. Ele ainda cita que o emprego desse quadrante é para a determinação de alturas dos astros e que o instrumento permite realizar medidas mínimas de 10”.

Dentro do arco, havia uma pintura, feita pelo artista Tobias Gemperlin, representando Tycho, com um cão ao seu lado, símbolo de sagacidade e fidelidade (Dreyer, 1963), e atrás deles imagens de seu laboratório, sua biblioteca e seu observatório, além de pequenos quadros do Rei Frederico II e da Rainha Sophia.

O fato de o quadrante estar permanentemente montado, explica a consistência do instrumento, sendo que parte das diferenças nas observações feitas com outros instrumentos pode decorrer da necessidade de realinhá-los após cada medição (Wesley, 1978).

4.3 O Cometa de 1577

Em 1577, ainda que a construção do castelo e arredores não estivessem completamente terminada, Tycho conseguiu realizar observações importantes. Com um quadrante, ele observou dois eclipses lunares que ocorreram em abril e setembro e, no dia treze de novembro, Tycho observou um cometa. Nesse dia, no final da tarde, Tycho notou a presença de um objeto muito brilhante desconhecido por ele no céu. O único objeto observável no céu naquela hora era o planeta Saturno, entretanto o novo objeto era muito brilhante para ser o planeta (Thoren, 1990). Ao escurecer, ele observou a presença de uma cauda longa no objeto, o que lhe permitiu ter a certeza de estar observando um cometa. Apenas cinco anos após observar o aparecimento de uma supernova, ele teve a chance de observar outro grande evento celeste.

Tycho observou o cometa, medindo a distância de sua cabeça com relação a outras estrelas usando uma balestilha e um sextante. Ele também usou um quadrante com um círculo azimutal para medir a altitude e o azimute do cometa (Dreyer, 1963).

Ele observou que o cometa possuía um diâmetro de 7' ou 8' e uma cauda avermelhada (Thoren, 1990). O cometa era visto próximo ao Sol, então só era visível por aproximadamente uma hora após o pôr-do-sol, o que dificultava a medição de sua paralaxe. Medindo as posições do cometa em um intervalo de três horas e cinco minutos, ele observou que o cometa se moveu doze minutos de arco. Durante os dez dias anteriores, ele havia se movido aproximadamente três graus por dia, o que correspondia a sete minutos e meio de arco por hora. Portanto, o que parecia era que estavam faltando aproximadamente onze minutos de movimento, o que só podia ser atribuído à paralaxe. No entanto, após mais observações que o levaram à conclusão de que o cometa se movia de fato dois graus por dia ao invés de três, a hipótese de uma paralaxe de onze minutos de arco foi descartada, ou seja, as observações indicavam uma ausência de paralaxe (Thoren, 1990).

Já em dezembro a cauda do cometa começou a se extinguir e Tycho conseguiu vê-lo pela última vez em janeiro. Nesse momento, ele já havia coletado informações suficientes para começar a escrever um relato sobre o objeto.

Tycho afirmou que a estrela de 1572 não poderia ser um cometa porque se encontrava na região das estrelas fixas e, no caso do cometa de 1577, ele logo no início o tratou como um corpo astronômico, ao invés de um fenômeno atmosférico, como defendia a teoria aristotélica (Hellman, 1944).

Independentemente disso, uma conclusão importante que Tycho obteve foi a comprovação de que o cometa era de fato um corpo celeste, o que contradizia a teoria de Aristóteles, que o considerava um objeto da esfera terrestre. Ele observou que a paralaxe horizontal do cometa era de no máximo quinze minutos, o que colocava o cometa a pelo menos 230 raios terrestres distante da Terra (Thoren, 1990). De acordo com a teoria aristotélica a "barreira" que separava o limite inferior da esfera lunar do limite superior da esfera terrestre se encontrava a uma distância de 52 raios terrestres, o que colocava o cometa bem acima da esfera terrestre.

Outra conclusão importante foi a de que o cometa realizava uma órbita ao redor do Sol. Isso foi descoberto através de uma análise minuciosa do movimento do cometa. O que ele observou foi que o cometa parecia se mover na direção de movimento dos planetas. Logo na primeira semana, o cometa se aproximou rapidamente do Sol, mas depois seu movimento ficou mais lento, sendo que durante esse tempo, ele começou a sumir progressivamente (Thoren, 1990). Entretanto, Tycho não se afastou da ideia bem aceita de que o cometa realizava uma órbita circular.

Antes mesmo de o cometa desaparecer, Tycho começou um catálogo contendo coordenadas de estrelas a partir de suas próprias observações, para que ele não tivesse que se basear em medidas já catalogadas. Ele também observou o Sol no solstício de inverno para determinar o valor da obliquidade da eclíptica, e utilizou essa informação em cálculos de coordenadas do cometa (Thoren, 1990).

Tycho decidiu publicar um livro com os resultados de suas observações sobre o cometa, que deveria ser mais ambicioso que seu trabalho sobre a nova estrela de 1572 (Thoren, 1990). Antes disso ele teve que relatar a observação do cometa ao Rei Frederico II. Ele escreveu um relato sobre suas descobertas entre 1577 e 1578, no qual detalhou aspectos técnicos e descritivos do cometa e fez discussões astrológicas.

Tycho completou um ensaio sobre o cometa no ano de 1578, mas seu grande trabalho só foi publicado em 1588, com o título de *De Mundi Aetherei Recentioribus Phaenomenis*. Durante esse tempo, ele pôde comparar suas próprias medidas com as de outros astrônomos da Europa. Isso está evidenciado no décimo capítulo de seu trabalho, no qual ele comenta sobre observações do cometa feitas por outros astrônomos. Inicialmente, Tycho discutiu as observações feitas por astrônomos que consideravam o cometa supralunar, como o *landgrave* de Hesse Kassel, Mästlin, Gemma e Roeslin, e, em seguida, discutiu o trabalho feito pelos astrônomos que o consideravam sublunar (Hellman, 1994).

No início de seu trabalho, Tycho descreve a maior parte de suas observações e deduz sua posição com relação a doze estrelas fixas. Ele menciona que considerou o cometa no plano do meridiano e pôde determinar a declinação do cometa e, pelo seu tempo de trânsito, obtido pela Lua e uma tabela da posição do Sol, também obteve sua ascensão reta. Depois, ele deduz a longitude e a latitude do cometa para cada dia de observação pela sua distância de outras estrelas, mas não mostra seus cálculos trigonométricos. Ele também calcula a declinação e a ascensão reta através da latitude e da longitude e fala sobre a inclinação e os pontos de intersecção com a eclíptica (Dreyer, 1963).

Em seguida, ele trata da distância do cometa em relação à Terra e tenta determinar sua paralaxe. Ele também mostra que o cometa se movia em um grande círculo, com velocidade não uniforme, que diminuía gradualmente, o que não aconteceria se ele fosse um objeto em nossa atmosfera, sendo que sua velocidade não se aproximava de metade da velocidade da lua (Dreyer, 1963).

Tycho ainda analisa a posição da cauda do cometa, dizendo que ela nunca passava pelo Sol, mas sim muito mais perto de Vênus, e discute a órbita do cometa, onde seu sistema de mundo, ainda não completamente desenvolvido, é utilizado para explicá-la. No restante do livro, ele analisa as observações feitas por outros astrônomos (Dreyer, 1963).

Além desse trabalho, Tycho também escreveu outro em alemão que, apesar de ter sido finalizado provavelmente pouco tempo após o desaparecimento do cometa, só foi publicado em 1922, séculos após sua morte. O autor considerava seus dois trabalhos como diferentes tipos de tratado, apesar de fazerem considerações semelhantes, como a ausência de paralaxe e a incompatibilidade de suas descobertas com a teoria aristotélica.

O trabalho em alemão é dividido em dez seções e não se aprofunda em questões matemáticas. Na primeira seção, Tycho escreve sobre a origem dos cometas e diferentes teorias desenvolvidas por filósofos antigos e dentre estes, Tycho aprecia o fato de Pitágoras, Anaxágoras e Demócrito acreditarem que os cometas se originam no céu. Ele ressalta que suas

próprias observações e demonstrações do cometa afirmavam que ele estava localizado no céu, assim como a estrela de 1572, e se locomovia acima da Lua (Hellman, 1994).

Na segunda seção, ele trata sobre o aparecimento do cometa e sua duração. Apesar dele só ter conseguido observar o cometa na noite do dia 13 de novembro, existem relatos de seu aparecimento no dia nove. Sobre sua duração, Tycho afirma que ele ficou visível por mais de dois meses, apesar de seu brilho diminuir com o passar do tempo. Já na terceira seção ele dá detalhes de sua posição nas primeiras noites em que foi observado e conclui que ele deve ter surgido no dia nove, próximo da eclíptica, abaixo da constelação de Sagitário, de onde ele afirma que a maioria dos cometas se origina.

Na quarta seção, ele escreve sobre a cauda do cometa, descrevendo que, no início, ela era longa, atingindo 22° e foi diminuindo de tamanho até ser dificilmente visível no final de janeiro (Hellman, 1994). A cauda do cometa sempre se virava contra o Sol, assim como a dos cometas previamente observados por outros astrônomos. Tycho acreditava que isso indicava que a cauda era de fato formada pelos raios do Sol brilhando sobre o próprio corpo do cometa que, por não ser opaco nem denso, detinha apenas parcialmente os raios de Sol.

A quinta seção, voltada para a posição do cometa, travou uma crítica sobre a teoria aristotélica. A única maneira de determinar a posição a partir da Terra era através de sua paralaxe, uma vez que, se o cometa possuísse uma paralaxe maior do que a da Lua, ele deveria estar mais próximo de nós do que ela, como propunha Aristóteles (Hellman, 1994).

A sexta seção tratava sobre o tamanho do cometa, e Tycho argumentava sua diminuição gradual com o passar do tempo. Na sétima seção, ele falou sobre o significado do cometa e sua influência astrológica. Na oitava, foi abordado novamente o significado do cometa e, na nona, as regiões e pessoas que seriam mais afetadas pelo seu surgimento. A décima seção tratou sobre quando a influência do cometa começaria a ser percebida e o quanto iria durar.

O fato de Tycho ter escrito um trabalho em alemão atesta sobre a maneira que ele queria expor sua obra. Mesmo sem ter sido publicado durante sua vida, um trabalho escrito nessa língua e que não entra em discussões matemáticas profundas, poderia alcançar um maior número de leitores não especializados, o que um trabalho em latim não conseguiria fazer.

Sem dúvida, as observações feitas por Tycho foram as que se demonstraram mais precisas, tanto que foram utilizadas para computar a órbita do cometa no século XIX (Hellman, 1994).

O castelo de Uraniborg foi palco de algumas das mais importantes observações astronômicas feitas por Tycho Brahe. Ele continha vários observatórios localizados em diferentes partes do castelo e uma grande quantidade de instrumentos.

Os instrumentos maiores ficavam nos observatórios localizados nas extremidades norte e sul de Uraniborg e, em cada um dos pequenos observatórios, havia uma esfera armilar. No observatório maior, na parte sul do castelo, havia um semicírculo vertical que se virava ao redor de um eixo vertical e era acompanhado de um círculo horizontal para medir azimutes, um triquetrum, conhecido também como instrumento paralático, usado para determinar a altura de objetos celestes, e um quadrante com um círculo azimutal. Já no grande observatório ao norte havia outro triquetrum, acompanhado de um círculo azimutal, um sextante, e um arco duplo para medir pequenas distâncias, além de outro triquetrum utilizado e construído por Copérnico (Dreyer, 1963).



Figura 13: Castelo de Uraniborg em pintura de Henrik Hanson, 1862, com base em um modelo de madeira do século XVI.

Fonte: http://allposters.com/-sp/Tycho-Brahe-s-Observatory-Unariborg-Posters_i9229765_.html

Em 1584, Tycho construiu outro observatório em uma colina ao sul de Uraniborg, chamado de *Stellaeburgum*. Os instrumentos utilizados nesse observatório ficavam em quartos subterrâneos e, no teto, estava representado o sistema tychoniano de mundo (Dreyer, 1963).

Durante sua residência em Hven, Tycho recebeu vários visitantes que desejavam ver seus instrumentos e conhecê-lo. A Rainha Sophia, de quem a mãe de Tycho, Beate Bille, virou dama dos robes substituindo Inger Oxe após sua morte, o visitou duas vezes no ano de 1586, sendo que, na segunda, levou seus pais e um primo junto com ela.

Nesse tempo, o interesse de Tycho em fazer previsões astrológicas parece ter diminuído significativamente (Dreyer, 1963). Apesar de ainda continuar escrevendo previsões astrológicas em ocasiões como o nascimento dos filhos do rei, ele começara a dedicar seu tempo para o trabalho astronômico, para o qual ele agora tinha amplas condições de se dedicar.

4.4 Inovações

Um dos melhores resultados das observações minuciosas feitas por Tycho com instrumentos de ótima qualidade, foi a criação de um catálogo de estrelas, capaz de substituir o catálogo publicado por Ptolomeu em seu *Almagesto*.

Nesse catálogo, ele incluiu tabelas de precessão e substituiu valores previamente calculados por Ptolomeu, Hiparco, Copérnico e outros, e concluiu que as variações nas taxas de precessão ocorriam devido a erros de observações, sendo que a taxa de precessão era sempre de 51'' por ano (Evans, 1998). Talvez esse tipo de erro já pudesse ter sido corrigido por outros astrônomos antes de Tycho, mas muitos antes dele não se devotavam tanto às observações quanto a propor novas teorias que se encaixassem melhor em observações já realizadas.

Outra descoberta de Tycho foi que a mudança das latitudes das estrelas ocorria como esperado se a diminuição da obliquidade da eclíptica fosse causada por um movimento da própria eclíptica.

Na época, era aceita a ideia de que a diminuição dessa obliquidade era causada por um deslocamento da oitava esfera celeste, que, pela teoria aristotélica, continha as estrelas e a eclíptica, em relação ao equador.

4.5 Pontos Transversais

A acurácia dos instrumentos de Tycho é um fator que o destaca entre tantos astrônomos de sua época e épocas anteriores, pois possibilitou medidas de posições dos astros muito mais exatas. O tamanho e a forte estrutura de seus instrumentos possibilitaram em parte esse feito, mas o uso de divisões transversais nos arcos graduados dos instrumentos também teve um papel importante.

Antes da época de Tycho, a melhor maneira de fazer divisões em frações de graus em um instrumento era garantir que este fosse o maior possível (Dreyer, 1963). Tycho também se aproveitou disso e construiu instrumentos grandes, como seu grande quadrante construído na casa de Paul Hainzel, próximo de Augsburg, em 1570. Entretanto, como já foi mencionado, ele também já havia possivelmente utilizado divisões transversais em sua primeira balestilha, seguindo a sugestão de Schultz que havia aprendido essa técnica com seu mestre Homilius. Também se sabe que ele utilizou esse método em seu meio sextante, construído em 1569 e que, mais tarde ele o aplicou a todos os seus instrumentos (Pannekoek, 1961).

De qualquer maneira, Tycho nunca se proclamou como o inventor da técnica, apesar de ela lhe ter sido atribuída anos mais tarde. Além disso, o próprio Schultz afirma que o método já era conhecido por Purbach e Regiomontanus anos antes e o nome da técnica também aparece relacionado ao fabricante de instrumentos Richard Chanzler, em um livro de Thomas Digges, e escrito em um livro de geometria de Puehler, como afirma Reymers Bär (Dreyer, 1963).

Em seus instrumentos, Tycho utilizava fileiras de pontos transversais, ao invés de linhas transversais, como passou a ser utilizado em ampla escala mais tarde. Ele mostrou que o erro ao utilizar esses pontos para a divisão dos arcos não seria superior a 3'' e cada ponto utilizado por ele tinha cerca de 1' (Figura 14) (Dreyer, 1963).

Esses pontos transversais eram na verdade fileiras de dez pontos subindo e descendo com distâncias constantes entre si e entre os círculos exterior e interior do arco, e colocados entre as marcações de graus, utilizados para ler as graduações em minutos de arco (Pannekoek, 1961).

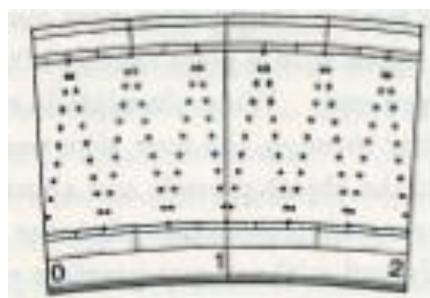


Figura 14: Divisões transversais utilizadas por Tycho.

Fonte: Dreyer, J. L. E. *Tycho Brahe, A Picture of Scientific Life and Work in the Sixteenth Century*, 1963.

CAPÍTULO 5

Com o avanço das construções em Hven, Tycho foi capaz de começar a fazer observações importantes. A partir de 1578 e até pouco depois de 1590, Tycho realizou centenas de observações anuais de alturas do meridiano do Sol, mas suas medições de estrelas e planetas foram escassas nos três anos que seguiram a 1578. A partir de 1581, ele passou a regularizar sua frequência de observações do céu noturno, que passou a ser de cerca de oitenta e cinco sessões de observações por ano, sendo que grande parte de suas observações era realizada quando era possível observar algum planeta no céu (Thoren, 1990).

Nesses anos, Tycho dedicou-se a desenvolver teorias relacionadas às observações realizadas anteriormente, como da supernova de 1572 e do cometa de 1577, e a realizar novas observações das quais as conclusões teóricas foram adiadas para a década seguinte (Thoren, 1990).

Já na metade de 1580, Uraniborg passou a receber a visita de diversos candidatos a assistentes, além de pesquisadores e membros do meio intelectual europeu, entre eles um matemático chamado Paul Wittich, que permaneceu em Hven por cerca de quatro meses. Apesar de Wittich não possuir quase nenhuma experiência com instrumentos astronômicos, sua importância para o trabalho de Tycho em Uraniborg se deu principalmente de maneira teórica.

Ele apresentou a Tycho as fórmulas de *prostaférese*, relacionando o produto com a soma e a diferença de senos e cossenos (por exemplo, $\text{sen}a.\text{sen}b=(1/2).(\cos(a-b)-\cos(a+b))$), originalmente descobertas pelo matemático Johannes Werner e apresentadas em uma obra cujo manuscrito havia permanecido na obscuridade na cidade de Nuremberg até que Rheticus, um pupilo de Copérnico, fez uma visita à cidade para preparar a obra de seu mestre, *De Revolutionibus*, em 1542. Apesar de Rheticus não ter publicado o manuscrito, algumas pessoas que trabalharam com ele tiveram acesso à obra, o que parece ter sido o caso de Wittich.

Tycho encarregou Wittich de preparar um manual de trigonometria (que acabou permanecendo incompleto) que pudesse ajudar seus assistentes durante a resolução de problemas observacionais que resultavam em triângulos planos e esféricos.

Além disso, eles realizaram observações de um cometa que apareceu em outubro de 1580, mas durante essas observações Wittich teve de encerrar sua visita para coletar a herança deixada por um tio.

Apesar de Wittich ter realizado poucos estudos astronômicos, ele estudou matematicamente os sistemas copernicano e ptolomaico, desenvolvendo teorias que misturavam os dois. Nessa mesma época, Tycho também estava trabalhando em seu sistema de mundo, o que proporcionou aos dois discussões importantes sobre semelhanças, diferenças e incongruências de seus dois sistemas.

De qualquer maneira, para o desenvolvimento de seu sistema de mundo, Tycho trabalhou em grande parte sobre sistemas pré-existentes, em particular os modelos ptolomaico e copernicano e, a partir deles, fazendo modificações.

5.1 Modelo Ptolomaico

Vários modelos foram inventados para explicar o movimento dos planetas e do Sol. Entretanto, grande parte foi deixada apenas para especulações filosóficas, sem nenhuma conclusão de fato física ou matemática ser realmente desenvolvida.

Aristarco, na Grécia antiga, propôs um modelo de universo no qual a Terra realizaria uma rotação ao redor de seu eixo diariamente e uma revolução anual em uma órbita ao redor do Sol. Entretanto, esse modelo perdeu espaço para outros que posicionavam a Terra no centro do universo e das órbitas planetares e do Sol.

Na antiguidade, Hiparco e Ptolomeu desenvolveram sistemas astronômicos que posicionavam a Terra no centro do universo, com explicações matemáticas que possibilitaram calcular as posições e os movimentos dos planetas. Desses dois sistemas, o de Ptolomeu é o mais preciso e conhecido e o qual perdurou por mais tempo.

No modelo ptolomaico de universo cada planeta se move em um epiciclo, cujo centro se move em um círculo maior, chamado deferente. O equante e a Terra são pontos simetricamente opostos, sendo que o centro do círculo deferente está entre eles. A velocidade dos planetas pareceria uniforme para um observador que se encontrasse sobre o ponto equante.

Uma combinação do movimento do planeta ao redor do epiciclo e do deferente resulta em mudanças de distância para um observador no centro C (Figura 15). Enquanto o planeta se move ao redor do círculo deferente centrado em C, o centro deste círculo pode se mover ao redor de um pequeno círculo. A combinação desses movimentos, apesar de não produzir o movimento retrógrado dos planetas, tem o efeito de “levantar” o círculo, provocando um movimento elíptico (Figura 16) (Cohen, 1992).

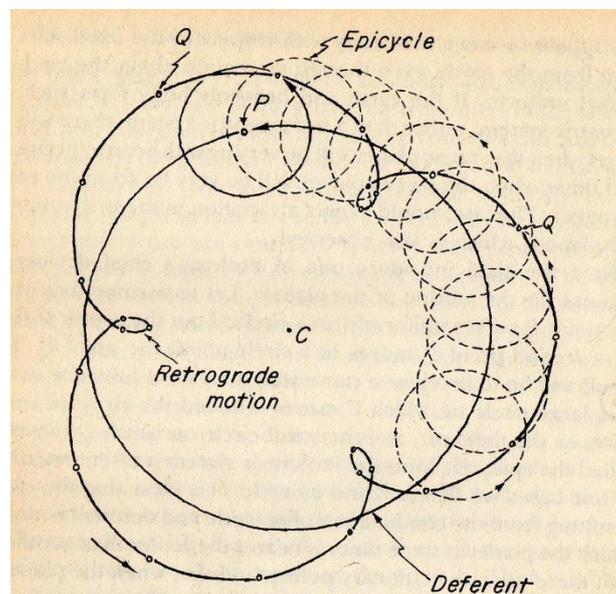


Figura 15: O modelo ptolomaico assumia uma combinação de movimentos. O planeta Q viajava ao redor do ponto P em um círculo, enquanto P se movia em um círculo ao redor de C.

Fonte: Cohen, I. Bernard, 1992, *The Birth of a New Physics*

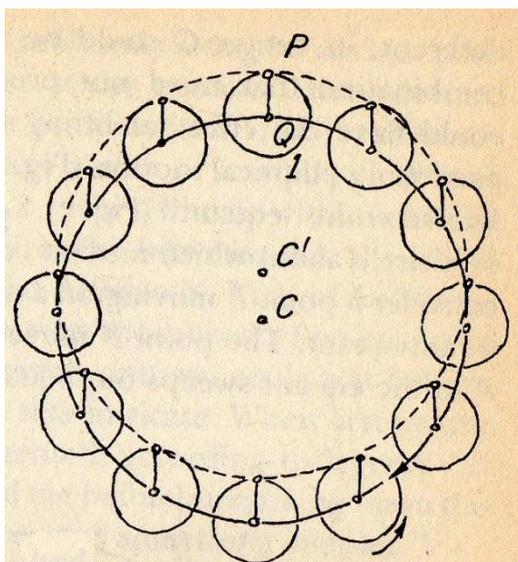


Figura 16: A combinação do deferente e do epiciclo tinha o efeito de levantar o centro da órbita de P de C para C'.

Fonte: Cohen, I. Bernard, 1992, *The Birth of a New Physics*

O ponto equante, representado na Figura 17, foi adicionado por Ptolomeu para explicar as mudanças aparentes na velocidade dos planetas. Como mencionado, o movimento do planeta não era uniforme com relação ao centro do deferente, mas sim em relação ao ponto equante. Uma linha conectando o planeta (P) ao equante (T) varre ângulos iguais em intervalos de tempo iguais (Figura 17) (Cohen, 1992).

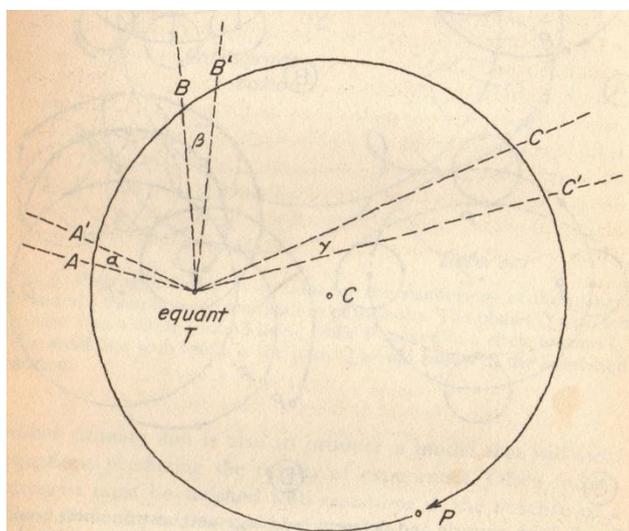


Figura 17: O ponto equante explica as mudanças aparentes na velocidade do planeta.

Fonte: Cohen, I. Bernard, 1992, *The Birth of a New Physics*

É importante ressaltar que esse modelo, ao contrário do que algumas pessoas acreditavam na época em que foi proposto, não fornecia uma explicação física para os movimentos dos planetas. De fato ele era uma representação matemática que possibilitava calcular as posições dos planetas.

Além disso, esse sistema respeitava a física aristotélica, sendo que os planetas, o Sol, a Lua e as estrelas se moviam ao redor da Terra em órbitas circulares, ou combinações de círculos, e a Terra não precisava se mover.

5.2 Modelo Copernicano

Ao final do século XV, a complicação de um sistema que envolvia diversos epiciclos influenciou a proposição de outros sistemas, em particular o sistema copernicano (Figura 18). Em seu modelo, Copérnico não apenas estabeleceu que a Terra se movia ao redor do Sol, mas também desenvolveu a geometria dos movimentos de cada planeta, possibilitando a construção de novas tabelas de seus movimentos (Dreyer, 1963).

Copérnico não realizou muitas observações e utilizou vários dados de observações anteriores. Sua quantidade de instrumentos era escassa, mas entre os anos de 1497 e 1529 ele observou o suficiente para obter dados sobre as órbitas dos planetas (Dreyer, 1963).

No sistema copernicano de universo a geometria com órbitas circulares ainda permanece. O Sol está no centro do universo, fixo e imóvel, enquanto os planetas orbitam ao seu redor. O movimento diário aparente do Sol, da Lua, das estrelas e dos planetas como observamos da Terra é explicado pela rotação diária da Terra ao redor do próprio eixo e por sua revolução ao redor do Sol. Cada planeta possui um período de revolução e, quanto mais longe o planeta estiver do Sol, maior esse período (Cohen, 1992).

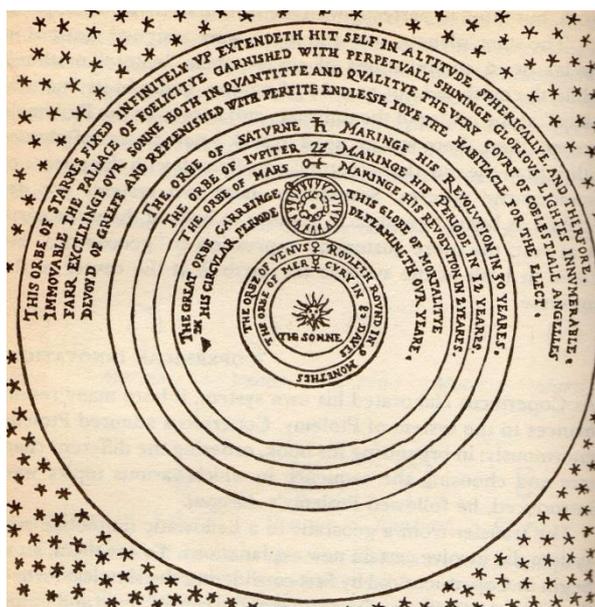


Figura 18: Diagrama do modelo copernicano.

Fonte: Cohen, Bernard I., 1992, *The Birth of a New Physics*

O movimento retrógrado dos planetas também pode ser explicado por esse modelo. No caso de Marte (Figura 19), por exemplo, é possível traçar seu movimento como o vemos da Terra comparando os momentos em que ela passa por Marte e quando este planeta está em oposição a nós, ou seja, quando é possível traçar uma linha do Sol a Marte atravessando a Terra. Traçando uma linha da Terra a Marte para cada posição sucessivamente, vê-se que ele se move, inicialmente, para frente e para trás, e depois para frente de novo (Figura 17). Desta forma, o movimento retrógrado é devido às velocidades relativas: um planeta mais distante do

Sol do que a Terra parece reverter sua direção porque se move mais lentamente ao redor da nossa estrela (Cohen, 1992).

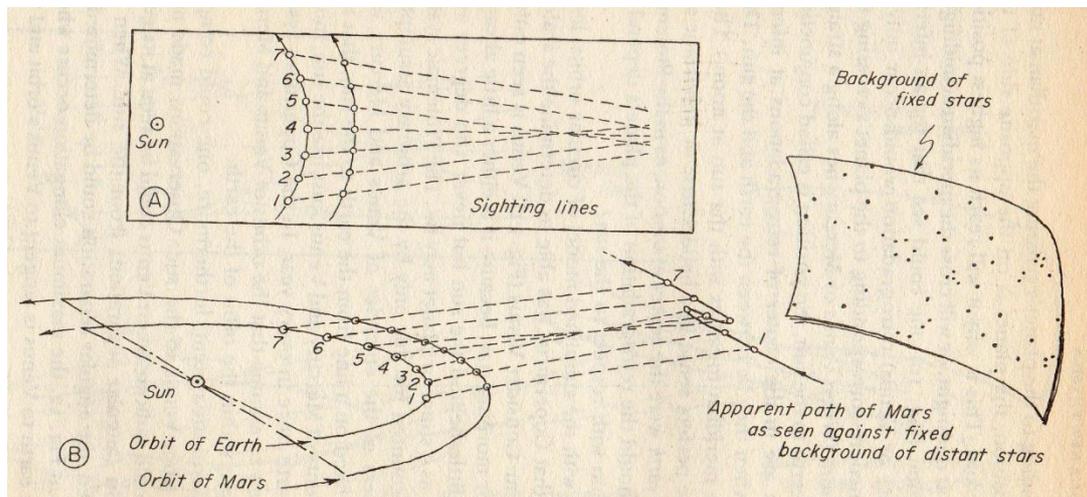


Figura 19: Movimento retrógrado de Marte como explicado pelo modelo copernicano.

Fonte: Cohen, I. Bernard, 1992, *The Birth of a New Physics*

Quando Marte se encontra em oposição a Terra está entre ele e o Sol e, desta forma, ele atinge sua posição mais alta no céu, ou cruza o meridiano, à meia-noite, e isso faz parte da explicação do movimento de retrogradação (o movimento reverso aparente do planeta). Já para um planeta inferior, ou seja, Mercúrio e Vênus, a retrogradação ocorre apenas na conjunção inferior, quando o planeta cruza o meridiano ao meio dia (Cohen, 1992).

O modelo copernicano, ao assumir que as órbitas de Vênus e Mercúrio estavam dentro da terrestre, era capaz de explicar o modo como observamos esses planetas no céu. Vênus, por exemplo, pode ser visto no céu durante a manhã ou começo da noite porque está sempre um pouco atrás ou um pouco à frente do Sol (Figura 20) (Cohen, 1992).

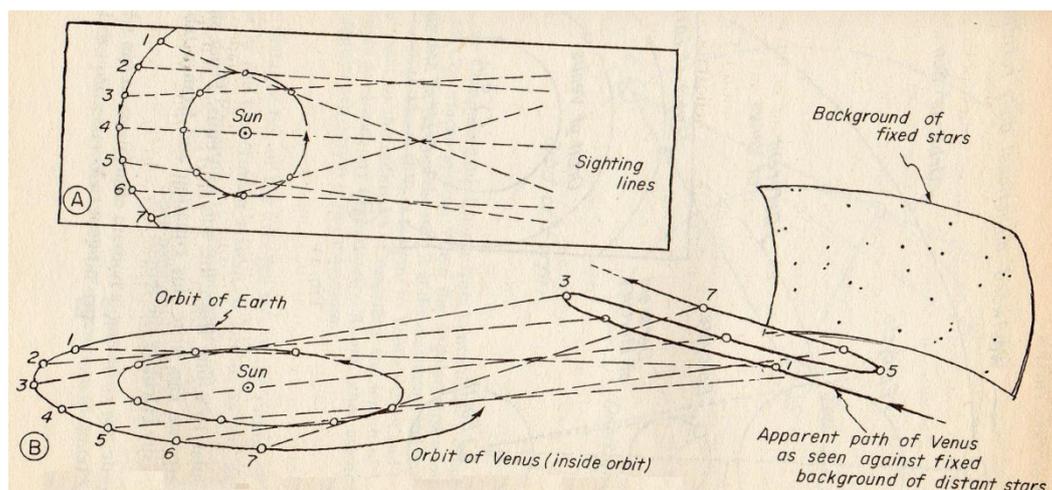


Figura 20: Movimento retrógrado de Vênus explicado pelo modelo copernicano.

Fonte: Cohen, I. Bernard, 1992, *The Birth of a New Physics*

Esse modelo permitia calcular as distâncias planetárias com grande precisão, além do tempo necessário para um planeta realizar uma revolução completa ao redor do Sol.

Entretanto, um modelo com movimento circulares ao redor do Sol não concordava muito bem com as observações. Copérnico sabia que a Terra não podia se mover ao redor do Sol em um movimento circular uniforme a não ser que o Sol não se encontrasse no centro dessa órbita, e sim, afastado de certa distância.

Dessa forma, o centro do sistema copernicano é representado por um “Sol médio” que se encontra no centro da órbita terrestre (Cohen, 1992). Além disso, para que as órbitas planetárias combinassem com as observações, Copérnico teve que introduzir outros círculos em seu sistema. Como no modelo ptolomaico, os planetas se moviam em círculos menores que circulavam outros círculos, mas, diferentemente desse mesmo modelo, esses círculos menores não eram necessários para explicar o movimento retrógrado dos planetas. Dessa forma, as órbitas de Mercúrio, de Vênus, da Terra, da Lua e dos três planetas exteriores requeriam combinações de sete, cinco, três, quatro e cinco círculos respectivamente (Dreyer, 1963).

Tanto o sistema ptolomaico quanto o copernicano possuem grande complexidade. Ambos fazem uso de epiciclos. Os pontos na parte interna dos raios dos deferentes dos planetas representam os centros de suas órbitas em relação ao centro da órbita do Sol no modelo ptolomaico (Figura 21) e em relação ao Sol no copernicano (Figura 22) (Cohen, 1992). De certa forma, o sistema copernicano era uma adaptação do sistema ptolomaico para um modelo heliocêntrico (Dreyer, 1963).

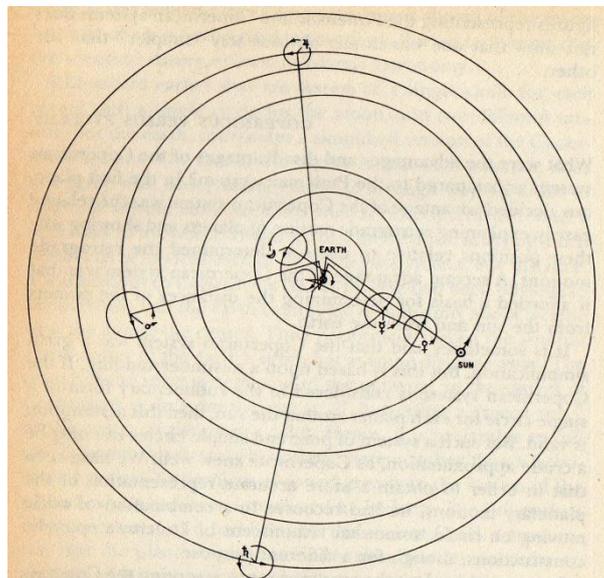


Figura 21: Modelo ptolomaico.

Fonte: Cohen, I. Bernard, 1992, *The Birth of a New Physics*

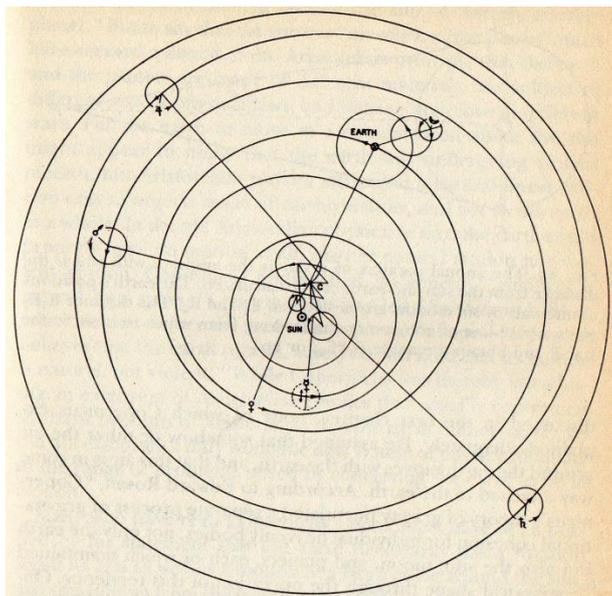


Figura 22: Modelo copernicano.

Fonte: Cohen, I. Bernard, 1992, *The Birth of a New Physics*

Uma grande diferença entre esses dois sistemas está no fato de que Copérnico discordava fortemente com o sistema de equantes utilizado por Ptolomeu. Assim como se acreditava na Grécia antiga, ele achava necessário que os planetas se movessem uniformemente ao longo dos círculos. Entretanto, como foi citado, a introdução de outros círculos, além dos principais, tiveram que ser acrescentados às órbitas dos planetas.

Talvez o maior problema com o modelo copernicano de universo seja a ausência de paralaxe das estrelas fixas. Na época de Copérnico não era possível medir a paralaxe dessas estrelas, sendo que, para que fosse possível um modelo no qual a Terra girasse ao redor do Sol, as estrelas deveriam estar extremamente distantes.

Apesar disso, o modelo copernicano foi o primeiro sistema de universo a ser desenvolvido de maneira completa desde a época de Alexandria e o primeiro que permitia determinar corretamente as distâncias relativas dos planetas. O movimento circular da Terra ao redor do Sol explicava as irregularidades nos movimentos planetários, como as retrogradações, que podiam ser bem explicadas pelo fato de o observador estar se movendo juntamente com a Terra (Dreyer, 1963).

Antes de Kepler descobrir suas leis, as variações das velocidades dos planetas ao longo de suas órbitas não podiam ser explicadas por um sistema que assumia movimentos circulares sem a introdução de epiciclos e excentricidades nas órbitas.

5.3 O Sistema Tychoniano de Mundo

Desde a época de Hiparco, assumia-se que o movimento do Sol, considerado como sendo ao redor da Terra, podia ser bem descrito por um círculo, perfeitamente circular e uniforme com o centro deslocado da Terra.

As medições do Sol feitas por Tycho Brahe tinham implicações diretas com dois de seus objetivos, ou seja, a determinação da latitude de Hven e a obliquidade da eclíptica. Ele já havia se aventurado a descobrir esses valores logo de sua mudança para a ilha, mas apenas após uma nova série de observações e após considerar os efeitos da refração atmosférica, ele

conseguiu chegar a um valor satisfatório para a latitude da ilha, de $55^{\circ}54 \frac{1}{2}'$, que apresenta uma grande proximidade com o valor conhecido atualmente de $55^{\circ}54'26''$.

Com suas observações do Sol e através de análises geométricas, Tycho comparou seus resultados com os previstos pelas tabelas Alfonsina e Copernicana. Suas análises o levaram a desenvolver seu próprio sistema de mundo, que foi explicado pela primeira vez em seu livro sobre o cometa de 1577, no oitavo capítulo, quando considerações sobre a órbita do cometa o levaram a explicar seu próprio modelo de universo.

Em seu livro *De Mundi*, Tycho explica em parte sua teoria sobre o universo (na época, o Sistema Solar até Saturno). Ele estimou que a distância até Saturno fosse de 235 vezes a distância até o “mundo elementar”, que compreendia até a Lua, e assumiu que a distância até esta era de 52 vezes o semi-diâmetro da Terra. Entretanto, mas tarde ele corrigiu este valor para 860 milhas alemãs. A distância do Sol a Terra foi considerada de 20 vezes à da Lua à Terra. O diâmetro considerado para a Terra provavelmente foi retirado do livro *Cosmotheoria*, de Fernel (Dreyer, 1963). Esses valores forneceram a base para a formulação de seu modelo, conhecido também como um modelo geo-heliocêntrico do universo.

Nessa época, a teoria de Tycho considerava uma Terra estacionária circulado pelo Sol, com Mercúrio e Vênus orbitando ao redor deste. Ele argumentava que o sistema ptolomaico era muito complicado e o copernicano estava em oposição às leis da física, uma vez que ele acreditava que a Terra não deveria se mover, apesar de ser correto matematicamente. Entretanto, Tycho parece ter considerado o sistema ptolomaico como base para mudanças capazes de eliminar os equantes.

Em um primeiro sistema tychoniano, a Terra era o centro do universo e das órbitas do Sol, da Lua e da esfera das estrelas fixas. Essa esfera dava uma volta ao redor do Sol a cada 24 horas e levava os planetas com ela. Mercúrio e Vênus se moviam em órbitas com os raios menores do que o da órbita solar, enquanto as órbitas de Marte, Júpiter e Saturno circulavam a Terra.

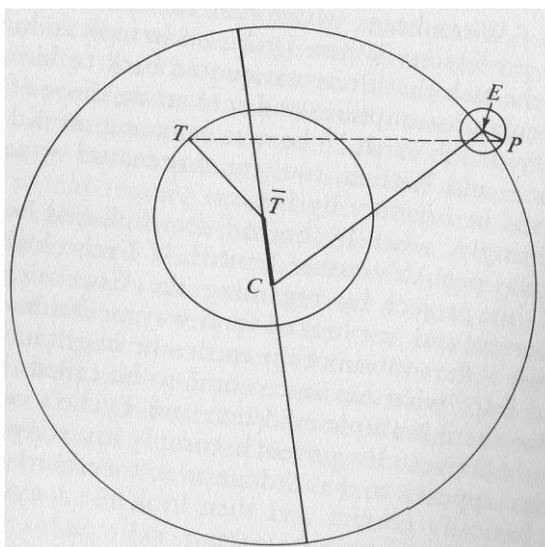


Figura 23: Os planetas superiores representados no modelo copernicano.

Fonte: Thoren, Victor E., 1990, *The Lord of Uraniborg: A Biography of Tycho Brahe*

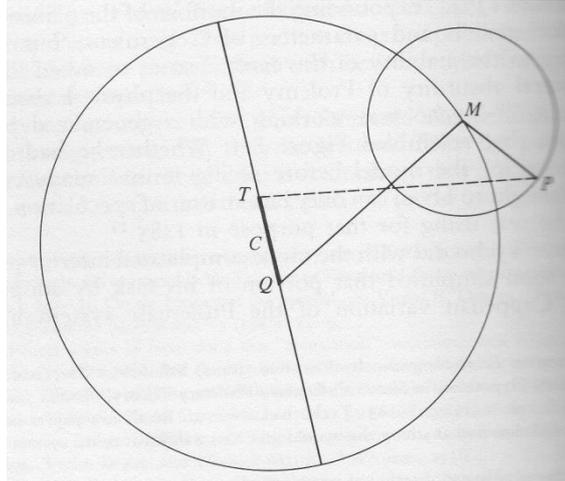


Figura 24: Os planetas superiores representados no modelo ptolomaico.
 Fonte: Thoren, Victor E., 1990, *The Lord of Uraniborg: A Biography of Tycho Brahe*

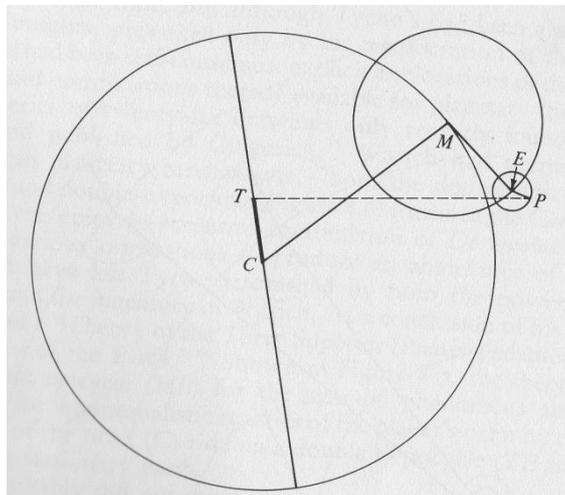


Figura 25: Os planetas superiores representados no modelo tychoniano.
 Fonte: Thoren, Victor E., 1990, *The Lord of Uraniborg: A Biography of Tycho Brahe*

Um pouco depois, novas modificações foram feitas em seu sistema. Juntando os sistemas copernicano e ptolomaico, Tycho formulou uma teoria para as órbitas dos planetas superiores (Marte, Júpiter e Saturno), permitindo que a Terra (T) permanecesse estável ao modificar sua distância ao centro das órbitas (C) (Figuras 23, 24 e 25).

Quanto aos planetas inferiores (Mercúrio e Vênus), Tycho adotou a chamada *variação cappelanna*, já antes utilizada por Ptolomeu, na qual esses planetas orbitavam o Sol, ao invés de ter uma órbita atravessando o Sol e a Terra.

Um modelo tychoniano mais completo parece ter surgido durante os anos de 1583 e 1584, quando novas medições, em especial dos movimentos dos planetas, permitiram uma teoria mais complexa.

Para desenvolver seu sistema de mundo, Tycho também se dedicou a medir paralaxes planetárias. De acordo com o sistema ptolomaico, quando Marte estava em oposição ao Sol ele se movia no sentido anti-horário pelo perigeu (ponto mais próximo da Terra) de seu epiciclo, o que produziria seu movimento retrógrado e sua máxima aproximação com a Terra. Além disso, Ptolomeu considerava que a distância de Marte à Terra era apenas um pouco

maior do que a máxima distância do Sol à Terra, uma vez que ele acreditava que a órbita deste planeta estava completamente fora da solar. Já no sistema copernicano, o movimento retrógrado de Marte e sua máxima aproximação eram causados pelo movimento orbital da Terra quando ela se aproxima da órbita de Marte (Thoren, 1990)

Assumindo uma paralaxe solar de 3', também adotada por Ptolomeu, Tycho esperava que a paralaxe de Marte fosse de 4,5'. Entretanto, mesmo com seus instrumentos de medida, ele não conseguiu encontrar esse valor elevado para a paralaxe de Marte, o que o levou a rejeitar a hipótese de Copérnico para o movimento do planeta e considerar sua paralaxe como nula (Thoren, 1990).

Durante 1584, Tycho detalhou seu esquema considerando suas novas medidas e conclusões e assumindo a proporção correta de raios das órbitas dos planetas e do Sol. O que ele percebeu foi que, para que esse sistema ficasse geometricamente correto, a órbita de Marte deveria interceptar a órbita do Sol. Entretanto, naquela época, muitos astrônomos, inclusive Tycho, acreditavam que os planetas se moviam pelos céus carregados por algo semelhante às esferas celestes, o que impossibilitaria uma intersecção entre órbitas, já que duas esferas teriam que atravessar uma à outra (Figura 26).

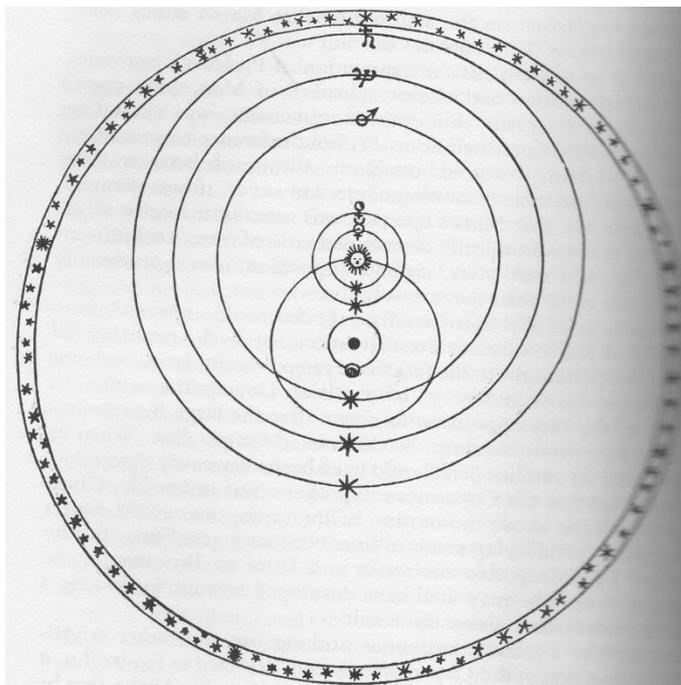


Figura 26: O sistema tychoniano de mundo.

Fonte: Thoren, Victor E., 1990, *The Lord of Uraniborg: A Biography of Tycho Brahe*

Nesse mesmo ano, Tycho recebeu em Uraniborg a visita de um matemático chamado Nicolai Reymers Ursus (também conhecido como Nicolai Reymers Baer), que vinha acompanhado de um amigo de Tycho, Erik Lange. De origem humilde, Ursus teve que trabalhar para promover sua educação e alcançou êxito ao ser nomeado matemático imperial de Rodolfo II, sacro imperador romano de 1576 a 1612, rei da Hungria, Croácia e Boêmia, posto que seria ocupado depois por Tycho e Kepler.

Logo no início de sua relação, Ursus e Tycho parecem ter tido algum tipo de desentendimento que fez com que Tycho ficasse desconfiado do novo conhecido, passando a

excluí-lo das discussões que tinha com Lange e com outros convidados sobre seu sistema e por fim, expulsando-o de Hven após encontrá-lo mexendo em livros de sua biblioteca (Thoren, 1990).

Mas os problemas entre os dois não parou por aí. Quatro anos depois, Ursus publicou um sistema de mundo muito semelhante ao sistema que Tycho havia desenvolvido naquela época, de modo que Tycho teve certeza de que havia sido plagiado. No entanto, os sistemas tinham suas diferenças: o sistema de Ursus considerava a Terra em rotação, enquanto Tycho não acreditava que isso de fato ocorria, embora afirmasse que poderia ser concebível; além disso, a órbita de Marte no sistema de Ursus era totalmente externa à do Sol, não a interceptava como Tycho havia concluído.

Tycho escreveu para vários de seus colegas correspondentes criticando o sistema de Ursus, afirmando que ele não era capaz de descrever o movimento de Marte com sua retrogradação, e ainda afirmando que este sistema era um plágio de um sistema de sua autoria desenhado erroneamente. Tycho de fato parece ter utilizado esse sistema em Hven, antes de conseguir corrigir seus problemas e criar um sistema que acreditava ser plausível, e que seria publicado em seu livro sobre o cometa de 1577, em 1588.

Já em 1579, Tycho havia recebido por correspondência confirmações do astrônomo Michael Mästlin, professor de Johannes Kepler, sobre suas próprias medidas do cometa de 1577, além de dados sobre as distâncias diárias do cometa. Esses dados indicavam que o cometa havia atravessado o que se considerava como as esferas de Mercúrio e Vênus postuladas por Ptolomeu. Entretanto, apenas sete anos depois, em 1586, Tycho parece ter dado atenção à hipótese de que, como o cometa “atravessava” essas esferas, elas não deveriam de fato existir como objetos sólidos. Outro fator que pode ter contribuído para essa conclusão pode ter sido o fato de Tycho estar lendo um manuscrito escrito por um de seus amigos, Christoph Rothmann que afirmava que o movimento dos cometas era um forte argumento de que as esferas planetárias não deveriam ser corpos sólidos (Thoren, 1990).

A importância de desconsiderar as órbitas planetárias como presas às esferas sólidas é que, se essas esferas não existissem, então a órbita de Marte poderia de fato atravessar a do Sol, como indicavam seus resultados. Mas para que seu sistema fosse plausível, a paralaxe de 4,5' para Marte deveria ser encontrada e em 1587, Tycho tentou computar novamente a paralaxe do planeta. Analisando as incertezas de suas medidas anteriores, influenciadas por refração, posição da estrela fixa de referência e movimento próprio do planeta, ele conseguiu atingir o valor esperado. Logo, a publicação de seu sistema em 1588 em seu livro sobre o cometa, *De Mundi Aetherei Recentioribus Phaenomenisse*, se tornou possível.

O sistema tychoniano conseguia explicar de modo satisfatório o movimento aparente dos planetas e suas variações de altitude e Tycho acreditava que ele era o trabalho mais importante de toda sua carreira (Thoren, 1990).

CAPÍTULO 6

6.1 Mudanças

A morte do rei Frederico II, em 1588, trouxe mudanças governamentais que, ao longo do tempo, iriam afetar fortemente a vida de Tycho. O filho mais velho e sucessor de Frederico II, príncipe Christian, tinha apenas onze anos e, ao invés do poder passar às mãos da rainha até a maioridade de seu filho, o governo ficou a cargo de quatro conselheiros privados até que o príncipe completasse vinte anos. Esses conselheiros eram o chanceler, Niels Kass, o chefe do tesouro, Christopher Valkendorf, o almirante Peder Munk e o governador de Jutland, Jörgen Rosenkrands.

Para Tycho, a presença do chanceler Kass, com quem possuía uma boa relação de amizade, era algo positivo. Mesmo assim, talvez para se acertar da posição do governo com relação ao seu trabalho e poder sobre a ilha de Hven, Tycho redigiu um memorial para o jovem rei no qual expunha seus gastos com as pensões do governo na construção de prédios em Hven e a contração de uma dívida, pedindo ao rei que o indenizasse, uma vez que tinha gasto seu dinheiro de acordo com os desejos do falecido rei e em honra ao seu país (Dreyer, 1963). Como conclusão, Kass e Rosenkrands fizeram uma visita à Tycho em Heven, depois da qual o jovem rei, interessado pelo trabalho do astrônomo e com a permissão do conselho privado, pagou o valor referido à dívida.

Sem sofrer alterações em sua pensão e com o encorajamento do governo para que continuasse seu trabalho, Tycho continuou suas observações em Hven, recebendo visitas frequentes de seus amigos mais próximos, Vedel e Erik Lange, sendo que esse último acabou por ficar noivo da irmã de Tycho, Sophie, que também era uma visitante frequente.

Entretanto, o poder que Tycho detinha em Uraniborg não viria a durar por muito tempo, e em grande parte isso seria causado pelo temperamento forte e incisivo de Tycho. Ele teve desentendimentos com seus inquilinos e com nobres próximos ao rei Christian.

Após a morte de Niels Kass, em 1594, Tycho deve ter começado a sentir insegurança quanto às suas posses e pensões. Também nessa época, notícias do grande interesse do imperador Rodolfo II por astronomia e alquimia chegaram à Tycho. Com a probabilidade de ter que deixar a Dinamarca, Tycho vendeu sua parte da propriedade de Knudstrup, a qual dividia com seu irmão Steen desde a morte de seu pai e que seus filhos não poderiam herdar, pois sua mãe não era de linhagem nobre (Dreyer, 1963).

Apesar desses problemas, os anos de 1594 e 1595 foram bem produtivos em seu trabalho astronômico. Antes de 1592, Tycho havia terminado uma série de observações de posições de estrelas fixas, que foram publicadas em um catálogo com 777 estrelas impresso postumamente em seu livro *Progymnasmata*. Na década de 1590, várias observações dos planetas foram computadas e, em 1593, ele realizou diversas observações de Marte, Júpiter e Saturno (Dreyer, 1963).

Em 1595, Tycho preparou para publicação uma coleção de cartas trocadas entre ele, o já falecido *landgrave* de Hesse e Rothmann, nas quais discutiam seus trabalhos astronômicos. Impressas em seu próprio escritório em Hven, essas cartas demonstram a mudança na prática da astronomia operada por Tycho. Logo no prefácio de seu *Epistolae*, Tycho se refere à quantidade de tempo necessária para fazer uma série de observações para que seja possível uma restauração na astronomia (Dreyer, 1963).

Para observar a órbita solar, são necessários quatro anos de observações, a da Lua, diversos anos e as de Marte, Júpiter e Saturno, cerca de doze a quatorze anos (Dreyer, 1963). Apesar de Tycho ter começado suas observações aos dezesseis anos, em seus primeiros dez anos de observações, os instrumentos que utilizou eram menos precisos.

Em 1596, o último amigo de Tycho no poder, Jörgen Rosenkrands, faleceu e o jovem rei havia atingido seus vinte anos, sendo coroado em agosto desse mesmo ano. Entre seus primeiros atos governamentais, o novo rei impôs reduções econômicas em vários ramos de sua administração. Decorrente desse fato, parte da pensão anual de Tycho foi imediatamente retirada. Tycho tentou reverter a situação escrevendo uma carta para Christian Friss, novo chanceler do governo, apontando a importância de seu trabalho e o interesse do falecido rei Frederico II por ele.

Ao saberem sobre seus problemas com a corte, os camponeses de Hven redigiram uma carta na qual reclamavam dos maus tratos e da opressão expressa por Tycho a eles (Dreyer, 1963). Tycho também foi acusado de que seu ministro da igreja de Hven não estava cumprindo com os rituais da igreja Luterana. Os eventos foram investigados pelo rei e Tycho sentiu a necessidade de se mudar, juntamente com a maior parte de seus instrumentos e sua máquina de impressão para uma residência temporária em Copenhague.

Em junho de 1597, Tycho deixou Copenhague e se mudou com sua família e alguns de seus assistentes para Rostoque, na Alemanha. De lá, Tycho enviou uma carta para o rei, apelando sua causa, para a qual recebeu uma resposta severa, talvez pelo fato de Tycho ter escolhido buscar refúgio em outro país antes de se dirigir a ele (Dreyer, 1963).

Sem motivos para continuar em Rostoque, onde a peste negra havia aparecido, Tycho aceitou um convite de seu amigo Heinrich Rantzov para residir por um tempo em um de seus castelos, em Wandsbek, próximo à Hamburgo. Lá, além de seu trabalho astronômico, Tycho preparou descrições e ilustrações de seus instrumentos, que acabou por publicar em 1598 com sua própria máquina de impressão no livro *Astronomiae Instauratae Mechanica*, dedicado ao imperador Rodolfo II, o qual ganhou uma reimpressão em 1602.

Em 1599, Tycho partiu para Praga, onde esperava servir o imperador Rodolfo II, um patrono das artes e ciências. Em seu primeiro encontro com o imperador, Tycho pediu permissão para trazer sua família com ele para Praga e presenteou o rei com uma coleção de seus trabalhos. Em troca do trabalho de astrônomo, o imperador forneceu a Tycho um alto salário e lhe prometeu uma propriedade que, após sua morte, seria herdada por sua família. Pouco depois, ao saber que Tycho não gostaria de residir em Praga, o imperador pediu que escolhesse entre três castelos, dentre os quais Tycho escolheu e se estabeleceu no castelo de Benatky, onde instalou parte dos instrumentos que havia levado consigo.

Durante sua estada na Boêmia, Rodolfo II mostrou grande interesse pelo trabalho de Tycho. Em uma carta escrita em 1600 para sua irmã Sophie, Tycho comenta o interesse do imperador pelo seu trabalho, contando que ele havia lido o inacabado *Progymnasmata* e consentido em tê-lo dedicado ao seu nome (Dreyer, 1963).

Como em Benatky e em sua casa em Praga Tycho possuía poucos assistentes e grande parte de seus instrumentos só chegou durante os últimos meses de 1600, suas observações nesses anos não podem ser comparadas em quantidade com as realizadas em Hven (Dreyer, 1963).

Por volta dessa época, Tycho conheceu o jovem astrônomo Johannes Kepler (pupilo do astrônomo amigo de Tycho, Mästlin), através de uma carta que este lhe enviou juntamente com seu recente trabalho, *Mistério Cosmográfico*, no qual relacionava os cinco poliedros regulares de Platão com as distâncias entre os planetas e o Sol no sistema copernicano. Apesar de Tycho ressentir o fato de Kepler defender o sistema copernicano, em sua resposta a Kepler ele afirmou ter esperanças de que ele ainda viesse a adotar um sistema tychoniano. Dessa forma, uma relação por cartas se estabeleceu entre Tycho e Kepler e um encontro entre os dois astrônomos não tardaria a acontecer.

Em 1599, um nobre de nome Hoffmann, que era um dos conselheiros do imperador Rodolfo II e conhecia Tycho Brahe, havia se impressionado com o trabalho de Kepler e se ofereceu para apresentá-lo a Tycho.

A visita de Kepler ao castelo de Tycho, que seria de curta estadia, se prolongou e Kepler passou a trabalhar com cálculos de algumas observações. Mais tarde, foi feito um acordo entre os dois, no qual Tycho se dispunha a pagar por parte das despesas de Kepler e o ajudaria a se estabelecer em Praga, até que fosse possível conversar com o imperador e lhe oferecer um salário anual. A relação entre Tycho e Kepler tinha seus problemas e Kepler se ressentia pelo modo como era tratado por Tycho, como apenas mais um assistente ao invés de um colega, enquanto ele gostaria de poder estudar a fundo os dados de suas observações.

Em 1601 Kepler começou a investigar teorias sobre os movimentos de Mercúrio, Vênus e Marte e concluiu que o movimento aparente desses planetas não podia ser explicado assumindo as órbitas solar ou terrestre como compostas apenas por um círculo excêntrico com movimento uniforme. Para que esses movimentos fossem explicados seria necessário introduzir equantes no sistema. Ele parece ter consultado Tycho quanto a esse assunto, perguntando-lhe se isto deveria ser incluído em seu *Progymnasmata*, mas Tycho rejeitou a ideia, pois gostaria que o livro fosse publicado o mais rápido possível. Entretanto, Kepler comenta o assunto em um apêndice adicionado após a morte de Tycho no final do livro (Dreyer, 1963).

No mesmo ano, um assistente de Tycho de nome Longomontanus havia completado as tabelas da teoria lunar de Tycho, que seriam publicadas no mesmo livro.

6.2 Considerações Sobre o Movimento Lunar

A teoria lunar postulada por Hiparco no século II a.C. conseguia determinar a duração de eclipses lunares de maneira satisfatória e prever seu início com uma indeterminação de uma hora. Apenas com estudos de Tycho Brahe sobre a Lua essa incerteza no momento de início desses eventos foi melhorada de maneira apreciável (Thoren, 1990).

Ptolomeu alterou a teoria lunar de Hiparco determinando as posições da Lua em situações onde não ocorriam eclipses, mas seus cálculos erravam muito ao determinar sua distância. Do mesmo modo, Copérnico fez variações a essa teoria que foram capazes de diminuir esse erro.

Até o começo de 1587 Tycho havia realizado centenas de observações da Lua e, após esse ano, ele realizou estudos sobre a latitude do satélite. A observação de eclipses lunares era algo de grande importância para ele e, em Uraniborg, seus assistentes anotavam diversos dados sobre esses eventos e se empenhavam para criar uma série de desenhos representando cada eclipse (Figura 27). Assim, eram computados dados como o primeiro e último “contato”, a máxima obscuridade e ângulo de travessia da luz.

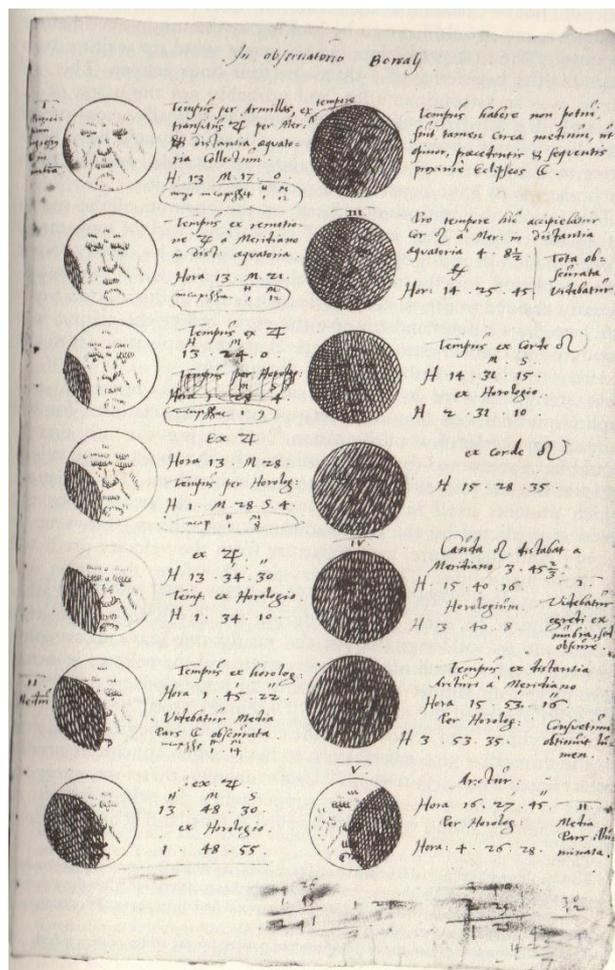


Figura 27: Parte do catálogo de Tycho sobre o eclipse lunar de dois de março de 1588.

Fonte: Thoren, Victor E., 1990, *The Lord of Uraniborg: A Biography of Tycho Brahe*

Antes de cada eclipse previsto, Tycho realizava uma observação da posição da Lua dois dias antes e estimava sua chegada à oposição ou conjunção pela velocidade teórica da Lua no tempo que restava (Thoren, 1990).

No entanto, para o a determinação de sua velocidade média, Tycho considerava uma aceleração anomalística da Lua, que era um desvio do movimento uniforme devido ao movimento da Lua no epiciclo.

Entretanto, quando a Lua estava em oposição ou em conjunção, sua velocidade era sempre maior do que a tabelada por Tycho, de modo que, nos dois dias entre a observação preliminar da Lua e o eclipse, ela teria se movimentado quase 30 minutos de arco.

No dia 28 de dezembro de 1590, Tycho observou a Lua à espera de um eclipse que ele previu que ocorreria às 18h40min. Mas, diferentemente do esperado, o eclipse começou uma hora antes do esperado e, quando Tycho começou sua observação, às 18h05min, a sombra já havia coberto metade da Lua.

Em outubro de 1594, Tycho teve outra chance de observar um eclipse lunar. Observando a Lua antes e durante o eclipse, ele parece ter suspeitado que ela se movia mais rapidamente durante a Lua cheia do que o previsto pela teoria. Ele notou que a variação na velocidade causaria um deslocamento acumulativo em seu movimento, de modo que a teoria deveria sofrer alterações para que a Lua acelerasse quando estivesse em oposição ou conjunção e se

demorasse de uma mesma quantidade entre sua posição de quadratura e oposição ou conjunção (pontos 3 e 7 na Figura 28), após desacelerar quando em quadratura.

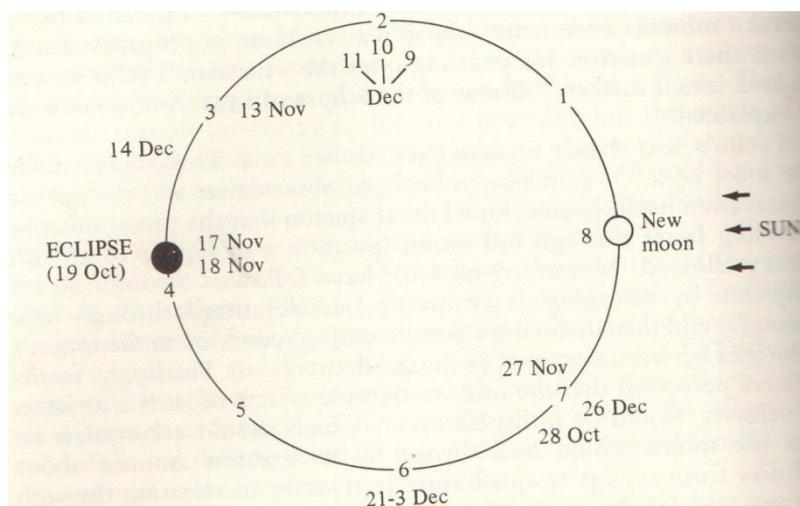


Figura 28: Efeitos de variação.

Fonte: Thoren, Victor E., 1990, *The Lord of Uraniborg: A Biography of Tycho Brahe*

Nove dias após o eclipse (dia 28 de outubro), Tycho observou a Lua em seu sétimo octante (ponto 7 na Figura 28) e concluiu que ela estava na metade entre a posição de quadratura e conjunção. Quatro dias depois, ele investigou a velocidade da Lua cheia por dois dias. Observando-a novamente no dia 18 de novembro, quando ela deixava a oposição, ele percebeu que ela viajava meio grau mais rápido durante esse intervalo do que o previsto pela teoria. Por fim, ele completou um circuito de observações com a realização de outra observação no sétimo octante e em primeira quadratura nos dias 9, 10 e 11 de dezembro (Figura 28) (Thoren, 1990).

A “variação” da Lua, como é chamado esse fenômeno, afeta o modo como a observamos no céu. Assim, durante cada mês, nos octantes das fases da Lua que seguem a oposição (Lua cheia ou nova), ou seja, na metade do caminho entre a Lua cheia ou nova e o quadrante, a Lua se encontra cerca de dois terços de um grau adiantada do que se esperaria pelo seu movimento médio. Nos octantes que precedem a oposição ou a conjunção, ela está cerca de dois terços de um grau atrasada. Nas fases em que ela está em oposição ou em conjunção ou nos quadrantes, o que é possível observar de fato é uma mudança na velocidade da Lua.

O efeito da variação da Lua foi uma das descobertas mais importantes da carreira de Tycho. Apesar de ele não ter apresentado sua análise sobre esse fenômeno em nenhuma publicação, a maneira como ele o estudou indica que essa não era sua intenção primordial, mesmo porque a compreensão desse efeito poderia possuir de certa forma um ar esotérico em uma época anterior as teorias de movimento descobertas por Galileu (Thoren, 1990).

Durante 1600 e 1601, a saúde de Tycho começou a deteriorar, tanto que Kepler comentou sobre a “fraqueza da idade” que o atingia (apesar de Tycho ter apenas 53 anos). Em treze de outubro de 1601, Tycho foi convidado para um jantar na casa do barão de Rosenberg, ao qual foi acompanhado do conselheiro imperial, Ernfried Minawitz. Durante o jantar, Tycho se sentiu mal e, ao retornar para casa, a doença se agravou por mais cinco dias após os quais ele continuou em um estado febril.

Durante a noite de 24 de outubro ele foi ouvido proclamar diversas vezes a esperança de que sua vida não tivesse sido em vão (“ne frustra vixisse videar”). Na manhã seguinte, suas forças haviam se exaurido e Tycho deixou a cargo de seu filho mais novo, que estava presente, e de seus pupilos a continuação de seu trabalho e pediu a Kepler que terminasse suas tabelas rudolfinas e as aplicasse para comprovar o sistema tychoniano (Dreyer, 1963).

Tycho Brahe faleceu na manhã de 25 de outubro de 1601 e seu corpo foi enterrado no dia quatro de novembro na Catedral Tyen de Praga.

CAPÍTULO 7

7.1 Tycho Versus Ursus

Quando Longomontanus, assistente de Tycho que o havia auxiliado na composição de sua teoria lunar, o deixou em 1600, Tycho passou a necessitar mais da ajuda de Kepler para o desenvolvimento de seu trabalho.

Desde 1598, Tycho planejava entrar com um processo na justiça contra Ursus devido à publicação de seu livro em que ele tratava de um modelo de universo pertencente à Tycho e defender sua prioridade com relação a esse modelo. Desde a publicação do livro em que expunha seu sistema e da afirmação de plágio por parte de Tycho, a autoria do sistema ainda gerava dúvidas.

Em 1600, quando Kepler realizava uma visita à Benatky, Tycho abordou o assunto com Kepler e em março desse ano este escreveu um documento intitulado “Discussão entre Tycho e Ursus sobre a Hipótese”. Um discurso escrito por Tycho que acompanhava esse documento deixava claro que este havia sido escrito apenas em função do processo (Thoren, 1990).

No entanto, com a morte de Ursus em quinze de agosto de 1600 e o conseqüente cancelamento do processo, Tycho decidiu que deveria tomar alguma outra medida para defender a honra de seu trabalho. Como resultado, Kepler escreveu um livro chamado “Defesa de Tycho Brahe contra Ursus”. Apesar de escrever no prefácio deste livro que ele havia se voluntariado para escrever este livro com o intuito de transferir a tarefa imposta a Tycho para seu encargo, em uma carta escrita para Mästlin, Kepler afirma ter escrito contra Ursus a comando de Tycho (Thoren, 1990). De fato, nessa época Kepler esperava ter trabalhos astronômicos delegados a ele e acesso aos dados de Tycho, enquanto ainda esperava por um salário e um cargo oficial delegado pelo imperador.

Ao que parece, Kepler nunca terminou este livro e quando foi incitado a publicá-lo, ele declinou com a justificativa de que ainda era necessário fazer mais pesquisas históricas sobre a “hipótese” e que, como Ursus era um predecessor do cargo de matemático imperial, qualquer publicação deste tipo deveria ser adiada até que suas repercussões causassem menos mal (Thoren, 1990).

7.2 Kepler e as Observações de Tycho

Em agosto de 1600, quando Kepler retornou à Praga, Tycho o levou para conhecer o imperador Rodolfo. Para talvez garantir um salário para Kepler, Tycho negociou um acordo no qual se dispunha a publicar sua teoria planetária com o nome de *Tabelas Rudolfinas* e Kepler o auxiliaria nesse trabalho como seu assistente oficial.

Quando Tycho faleceu algumas semanas depois, o trabalho passou a cargo de Kepler, mas com um salário de cerca de um sexto do proposto a Tycho. Quando completou as tabelas em 1627, muito depois da morte do imperador em 1612, Kepler se pronunciou como assistente de Tycho no trabalho.

Com a morte de Tycho, além de publicar seus trabalhos inacabados, Kepler teve acesso aos dados de suas observações, com os quais ele foi capaz de revolucionar o modo como as pessoas viam e compreendiam o universo.

Kepler acreditava fortemente em um sistema de mundo copernicano e devotou parte de sua vida tentando explicá-lo através de leis e compreender como os planetas se movimentam do jeito previsto por este sistema.

Em 1596, quando tinha vinte e cinco anos, ele publicou seu livro chamado *Prodromus Dissertationum Cosmographicarum continens Mysteriorum Cosmographicum*, conhecido como *Mistério Cosmográfico*. Nesse livro, ele afirma sua grande consideração pela tradição platônica-pitagórica ao buscar regularidades na natureza semelhantes às regularidades matemáticas (Cohen, 1992). Ele intercalou às órbitas planetárias de Mercúrio, Vênus, Terra, Marte, Júpiter e Saturno os cinco poliedros regulares de Platão: octaedro, icosaedro, dodecaedro, tetraedro e cubo, contendo cada um oito, vinte, doze, quatro e seis lados respectivamente.

Geometricamente, um cubo pode ser circunscrito por apenas uma esfera e apenas uma esfera pode ser inscrita nesse sólido. À esfera interna a este cubo Kepler associou um tetraedro, dentro do qual está contida outra esfera. Dentro desta última esfera, está contido um dodecaedro, e assim por diante, sendo que as próximas esferas contêm um icosaedro e um octaedro.

Associando essa geometria com os planetas, Kepler reparou que os raios de cada esfera sucessiva possuem tamanhos semelhantes aos das distâncias médias dos planetas no sistema copernicano, exceto no caso de Júpiter, que está a uma distância muito maior do que os outros planetas. Com essa associação, Kepler argumentou que, ao criar o universo, Deus teria acomodado sua proporção aos cinco sólidos regulares tão bem conhecidos por Pitágoras e Platão (Cohen, 1992).

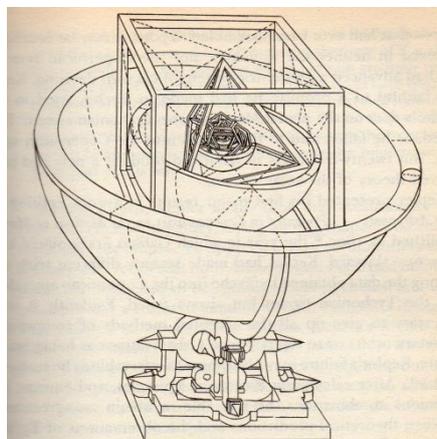


Figura 29: Os cinco sólidos regulares no modelo de Kepler.

Fonte: Cohen, I. Bernard, 1992, *The Birth of a New Physics*

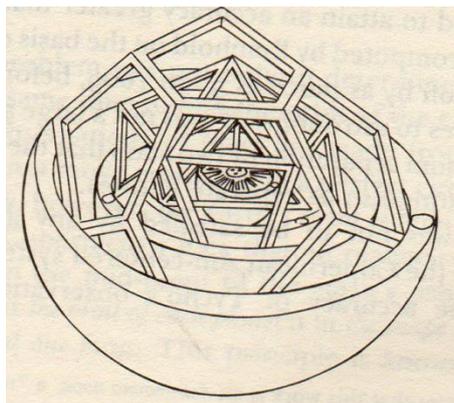


Figura 30: Modelo de Kepler com as esferas se localizavam entre cada sólido.

Fonte: Cohen, I. Bernard, 1992, *The Birth of a New Physics*

Este livro estabeleceu a reputação de Kepler como matemático, tanto que Tycho Brahe ofereceu-lhe um trabalho como seu assistente. E, como sucessor de Tycho, Kepler herdou a maior parte de seus dados sobre observações planetárias, como, por exemplo, importantes observações sobre Marte. Mas, além disso, Kepler ficou encarregado a pedido de Tycho de provar o sistema tychoniano, aplicando os dados de Tycho a ele.

No entanto, Kepler não conseguiu encaixar os dados de Tycho no modelo geo-heliocêntrico e, ao tentar encaixá-los no sistema copernicano, também não conseguiu. Kepler conhecia a grande habilidade de Tycho como observador, logo, assumir que suas observações estavam incorretas seria uma medida extrema. E, assim como ele acreditava na precisão dos dados de Tycho, ele também acreditava em um sistema copernicano, com o Sol como centro do universo.

Após calcular excentricidades, epiciclos e equantes em combinações complicadas, ele encontrou um acordo entre as precisões teóricas e observacionais que diferia de oito minutos de arco para o sistema tychoniano (Cohen, 1992). Apesar dessa diferença não ser muito grande, Kepler não estava satisfeito com a aproximação.

Então, ele tomou a decisão ousada de abandonar o sistema de círculos perfeitos e optou pelo uso de elipses; uma decisão que foi de fato revolucionária na história da astronomia. Platão e Aristóteles insistiam na combinação de círculos para as órbitas planetárias e Ptolomeu e Copérnico, em seus sistemas, partiram desse mesmo princípio. Ao optar pelo uso de elipses, Kepler foi capaz de eliminar a combinação de diversos círculos para as órbitas, sendo que apenas uma elipse passou a ser necessária para explicar os movimentos planetários. Além disso, ele acabou por derivar relações entre a posição dos planetas, suas velocidades e períodos de rotação em três leis empíricas que ficaram conhecidas como leis de Kepler.

É importante ressaltar que essas leis foram derivadas empiricamente, ou seja, eles não são apenas leis matemáticas, mas sim, resultados das observações feitas por Tycho. Isso quer dizer que, ao serem inferidas, elas já estavam comprovadas, pois seu processo de inferência partiu dos dados experimentais.

A primeira lei de Kepler afirma que “as órbitas dos planetas tem a forma de uma elipse com o Sol centrado em um dos focos”. A segunda lei diz que “uma linha ligando o planeta ao Sol varre áreas iguais em intervalos de tempo iguais”. De acordo com essa lei, os planetas se movimentam mais rapidamente quando estão mais próximo do Sol e mais lentamente quando estão mais distantes. O ponto da elipse mais próximo do Sol é chamado periélio e o ponto

mais distante, afélio. Essa lei também indica que as irregularidades aparentes nas velocidades com as quais os planetas se movem em suas órbitas ocorrem devido à geometria de suas órbitas (Cohen, 1992).

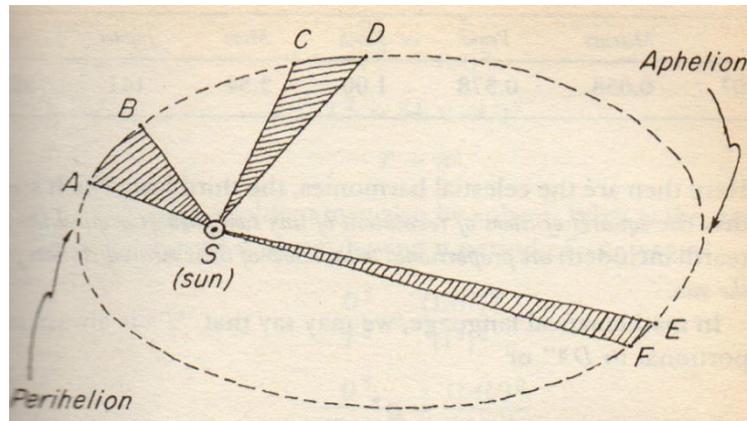


Figura 32: Primeira e segunda lei de Kepler.

Fonte: Cohen, I. Bernard, 1992, *The Birth of a New Physics*

A terceira lei de Kepler é também chamada de lei harmônica, já que Kepler afirmava que ela demonstrava a verdadeira harmonia celeste (Cohen, 1992). Anunciada em seu livro *Harmonia do Mundo*, publicado em 1619, essa lei relaciona o período da órbita do planeta com sua distância média ao Sol. Ela afirma que “os quadrados dos tempos de revolução de quaisquer dois planetas ao redor do Sol são proporcionais aos cubos de suas distâncias médias ao Sol”. Mais especificamente, ela afirma que o quadrado do período de revolução de um planeta dividido pelo cubo de sua distância média ao Sol é uma constante, cujo valor deve ser igual para todos os planetas.

Um modelo de universo no qual as órbitas planetárias são elípticas era uma grande discordância do modelo copernicano. Além disso, para chegar a um modelo de órbitas elípticas ele em algum momento no desenvolvimento de sua teoria introduziu pontos equantes, que era a maior crítica de Copérnico ao modelo ptolomaico. Desde a época da publicação das três leis de Kepler (as duas primeiras foram publicadas em 1609 e a terceira em 1619) até a publicação do *Principia* de Newton em 1687, os resultados de Kepler sofreram grande rejeição e foram mencionados em poucos livros. Galileu, que recebeu cópias dos livros de Kepler e estava ciente da proposta de órbitas elípticas, parece ter continuado a acreditar em um sistema com órbitas circulares (Cohen, 1992).

O mérito da derivação das três leis de Kepler sem dúvida pertence unicamente a Kepler, que trabalhou grande parte de sua vida desvendando-as. Mas, como essas leis foram derivadas empiricamente, as observações feitas por Tycho ajudaram de maneira profunda na possibilidade da criação de um sistema elíptico de universo (do sistema solar) naquela época e por alguém que teve acesso direto a essas observações.

Apesar disso, mesmo sem considerar os trabalhos que foram possibilitados postumamente pelas observações de Tycho, essas próprias observações e as teorias desenvolvidas pelo astrônomo com base nelas já seriam suficientes para que seu nome fosse destacado na história da astronomia como um dos astrônomos mais brilhantes de seu tempo e, de fato, da história.

CAPÍTULO 8: Conclusão

Tycho Brahe se destaca na história da astronomia como um experiente e esforçado observador dos céus e por seu extremo cuidado na construção e desenho de instrumentos capazes de fazer medidas de posições dos astros com alta precisão. Sua contribuição para a astronomia foi honrada pelo sistema de mundo de Kepler e pelos instrumentos mais confiáveis antes do surgimento da primeira luneta.

Suas medidas mostram resultados nunca antes alcançados por outros observadores, se afastando de uma tendência geral da época de uma preocupação maior com o desenvolvimento de novas teorias baseadas em dados de observações já existentes, ao invés da busca por resultados mais precisos. A acurácia de suas medidas foi apreciada por Kepler, que utilizou seus dados para construir seu famoso modelo de universo.

Com a observação da supernova de 1572, Tycho ganhou seu espaço na astronomia da época e mostrou suas habilidades como observador e certa ousadia ao desafiar teorias bem aceitas. O cometa de 1577 também mostra a busca de Tycho por teorias que explicassem melhor o funcionamento dos céus, além de atestar suas habilidades.

O castelo de Uraniborg, na ilha de Hven, pode ser considerado um dos primeiros institutos de pesquisa modernos na Europa, sendo notável pelo seu intenso programa de observação. Os instrumentos ali presentes, todos construídos com extremo cuidado e devidamente alinhados para atingir as expectativas de Tycho, foram usados por ele e seus assistentes e estudantes para realizar medidas de posições das estrelas, dos planetas e da Lua, com um alto nível de precisão.

O modelo tychoniano de universo desenvolvido nesse período ressalta como suas próprias observações o levaram a contestar os sistemas já existentes e a sua busca por uma teoria mais precisa do que a ptolomaica e copernicana que explicasse o movimento dos astros no céu.

De acordo com relatos de pessoas que o conheciam, Tycho não era uma pessoa fácil de se lidar e seu forte temperamento contribuiu para que, com a morte do rei Frederico II em 1588, que apreciava fortemente seu trabalho e lhe concedeu a ilha de Hven, Tycho tivesse que deixar sua casa e país e buscar por um novo lar em outro império. Nos anos em que viveu na Boêmia, atual República Tcheca, ele continuou seu trabalho como astrônomo, mas suas maiores realizações ocorreram com certeza no período de sua estadia em Uraniborg.

Após a morte de Tycho em 1601, coube a Kepler fazer uso de suas observações e desvendar a mecânica do sistema solar. As três leis de Kepler, derivadas empiricamente através dos dados observacionais de Tycho, são um elogio por si só ao trabalho deste astrônomo que entrou merecidamente para a história e cuja vida, como ele mesmo tanto desejou, não foi vivida em vão.

BIBLIOGRAFIA

- Brahe, Tycho, *Astronomiae Instauratae Mechanica*, 1978, traduzido como *Mécanique de L'Astronomie Rénovée*, por Jean Peyroux da edição de 1598
- Cohen, I. Bernard, *The Birth of a New Physics*, Penguin Books, 1992
- Dreyer, J. L. E., *Tycho Brahe, A Picture of Scientific Life and Work in the Sixteenth Century*, Dover Publications, 1963
- Evans, James, *The History and Practice of Ancient Astronomy*, 1998, Oxford University Press
- Gribbin, John, *Science: A History*, Penguin Books, 2003
- Hellman, C. Doris, *The Comet of 1577: It's Place in the History of Astronomy*, AMS Press, 1944
- Hoskin, Michael, editado por, *The Cambridge Concise History of Astronomy*, Cambridge University Press, 1999
- Pannekoek, A., *A History of Astronomy*, tradução do original em alemão, Interscience Publishers, 1961
- Thoren, Victor E., *New Light on Tycho's Instruments*, Journal for the History of Astronomy, Vol. 4, p. 25-45, 1973
- Thoren, Victor E., *The Lord of Uraniborg: A Biography of Tycho Brahe*, Cambridge University Press, 1990
- Wesley, Walter G., *The Accuracy of Tycho Brahe's Instruments*, Journal for the History of Astronomy, Vol. 9, p. 42-53, 1978