

Robert P. Crease

Os Dez Mais Belos Experimentos Científicos

Tradução:
Maria Inês Duque Estrada

Jorge ZAHAR Editor
Rio de Janeiro

Às coisas selvagens, em todos os lugares

Título original:
The Prism and the Pendulum
(*The Ten Most Beautiful Experiments in Science*)

Publicado com autorização do autor, a/c Baror International, Inc.,
de Armonk, Nova York, EUA. Tradução autorizada da edição norte-americana,
publicada em 2003 por Random House, de Nova York, EUA

Copyright © 2003, Robert P. Crease

Copyright da edição brasileira © 2006:
Jorge Zahar Editor Ltda.
rua México 31 sobreloja
20031-144 Rio de Janeiro, RJ
tel.: (21) 2108-0808 / fax: (21) 2108-0800
e-mail: jze@zahar.com.br
site: www.zahar.com.br

Todos os direitos reservados.
A reprodução não-autorizada desta publicação, no todo
ou em parte, constitui violação de direitos autorais. (Lei 9.610/98)

Capa: Sérgio Campante

CIP-Brasil. Catalogação-na-fonte
Sindicato Nacional dos Editores de Livros, RJ.

C933d Crease, Robert P.
Os dez mais belos experimentos científicos / Robert P. Crease; tradução,
Maria Inês Duque Estrada. — Rio de Janeiro: Jorge Zahar Ed., 2006
16 x 23 cm; il.

Tradução de: *The prism and the pendulum: (the most beautiful experiments
in science)*
ISBN 85-7110-946-X

1. Ciência – História. 2. Ciência – Experiências. I. Título.

Sumário

Lista de ilustrações, 7

Introdução

O momento de transição, 9

1

A medida do mundo

Eratóstenes mede a circunferência da Terra, 17

Interlúdio 1

Por que a ciência é bela?, 27

2

Deixe a bola cair

A lenda da Torre Inclinada de Pisa, 31

Interlúdio 2

Experimentos e demonstrações, 43

3

O experimento alfa

Galileu e o plano inclinado, 47

Interlúdio 3

A comparação Newton-Beethoven, 56

4

O experimentum crucis

Newton decompõe a luz do Sol com prismas, 61

Interlúdio 4

A ciência destrói a beleza?, 74

5

O peso do mundo

O austero experimento de Cavendish, 79

Interlúdio 5

Integrando ciência e cultura popular, 91

6

A luz como onda

A lúcida analogia de Young, 95

Interlúdio 6

Ciência e metáforas, 104

7

A Terra gira

O sublime pêndulo de Foucault, 109

Interlúdio 7

A ciência e o sublime, 120

8

Observação do elétron

O experimento de Millikan com a gota de óleo, 123

Interlúdio 8

A percepção na ciência, 137

9

Beleza nascente

A descoberta do núcleo atômico por Rutherford, 141

Interlúdio 9

Artesanato na ciência, 152

10

O único mistério

A transferência quântica de elétrons isolados, 157

Interlúdio 10

Quase vitoriosos, 169

Conclusão

A ciência ainda pode ser bela?, 173

Notas, 179

Agradecimentos, 193

Índice onomástico, 195

A medida do mundo

Eratóstenes mede a circunferência da Terra

No século III a.C. o sábio grego Eratóstenes (276-c.195 a.C.) fez a primeira medição conhecida do tamanho da Terra. Suas ferramentas eram simples: a sombra projetada pelo ponteiro de um relógio de Sol, mais um grupo de medidas e suposições. Mas essas medidas foram tão engenhosas que seriam citadas com autoridade por centenas de anos. É um cálculo tão simples e instrutivo que é refeito anualmente, quase 2.500 anos depois, por crianças de escolas em todo o mundo. E o princípio é tão gracioso que seu simples entendimento nos faz querer medir o comprimento de uma sombra.

O experimento de Eratóstenes combinou duas idéias de grande importância. A primeira foi imaginar o cosmo como um grupo de objetos (a Terra, o Sol, planetas e estrelas) no espaço tridimensional comum. Isso pode parecer óbvio para nós, mas não era uma crença comum naquela época; foi uma contribuição grega para a ciência insistir em que, sob a miríade de movimentos sempre em mutação do mundo e do céu noturno, havia uma ordem impessoal e imutável, uma arquitetura cósmica que poderia ser descoberta e explicada pela geometria. A segunda idéia foi aplicar práticas comuns de medição para entender o escopo e as dimensões da arquitetura cósmica. Ao combinar essas duas idéias, Eratóstenes chegou à audaciosa idéia de que as mesmas técnicas desenvolvidas para construir casas e pontes, abrir estradas e campos e prever alagamentos e monções poderiam fornecer informações sobre as dimensões da Terra e de outros corpos celestes.

Eratóstenes começou presumindo que a Terra era aproximadamente redonda. Porque, apesar da crença generalizada em nossos dias de que Co-



Primeiro contador de horas conhecido é do século III a.C., em que Eratóstenes viveu.
A peça está praticamente intacta, mas perdeu o ponteiro, ou gnômon,
que projetava a sombra do Sol sobre a tigela.

lombo decidiu provar que a Terra não era plana, muitos dos gregos antigos que haviam refletido cuidadosamente sobre o cosmo já haviam concluído que ela não só deveria ser redonda, mas também que deveria ser relativamente pequena se comparada ao restante do Universo. Entre esses sábios estava Aristóteles, que, no livro *Sobre os céus*, escrito um século antes de Eratóstenes, propôs vários argumentos diferentes, alguns lógicos, outros empíricos, para explicar por que a Terra deveria ser esférica. Aristóteles assinalou por exemplo que, durante os eclipses, a sombra da Terra na Lua é curva – algo que poderia ocorrer apenas se a Terra fosse redonda. Ele também notou que viajantes observam diferentes estrelas quando vão para o norte ou para o sul (o que seria improvável se a Terra fosse plana), que certas estrelas visíveis no Egito e em Chipre não podem ser vistas em terras ao norte, e que certas outras, sempre visíveis no norte, surgem e se põem no sul, como se fossem vistas a distância, a partir da superfície de um objeto redondo. “Isso indica não apenas que a massa da Terra é esférica em sua forma”, escreveu Aristóteles, “mas também que, comparada às estrelas, não é grande em tamanho.”¹

Mas o versátil pensador também ofereceu argumentos mais criativos. Pelos contos de viajantes estrangeiros e expedições militares, ele sabia que os elefantes eram encontrados tanto a leste (África) quanto a oeste (Ásia). Portanto, disse ele, essas terras estariam provavelmente unidas – uma dedução esperta, porém incorreta. Outros sábios gregos sugeriram argumentos adicionais para a forma esférica da Terra, inclusive a diferença no tempo do nascer ao pôr-do-sol em diferentes países e o modo como os navios desaparecem gradualmente no horizonte, do casco para cima.

Mas nada disso respondia à questão básica: que tamanho tem essa Terra redonda? Seria possível descobrir isso sem que os pesquisadores tivessem de viajar por toda a circunferência?

Até Eratóstenes, conhecíamos apenas estimativas do tamanho da Terra. A mais antiga é de Aristóteles, que escreveu: “os matemáticos que tentam calcular o tamanho da circunferência terrestre chegam ao resultado de 400 mil estádios”. Mas ele não revelou suas fontes nem explicou seu raciocínio.² Também é impossível converter esse resultado em números modernos. Um estádio se referia ao comprimento de uma pista de corrida grega, que variava de cidade para cidade. Usando a estimativa aproximada de um estádio, os pesquisadores de hoje calcularam o resultado de Aristóteles em pouco mais de 64.372 quilômetros (o número real é mais ou menos 40 mil quilômetros). Arquimedes, que construiu modelos do cosmo nos quais os corpos celestes giravam um ao redor do outro, chegou a uma estimativa ligeiramente menor que Aristóteles: 300 mil estádios, ou pouco mais de 48 mil quilômetros. Mas ele também não deu qualquer pista a respeito de suas fontes ou de seu raciocínio.

Entra Eratóstenes. Contemporâneo de Arquimedes, porém mais jovem, Eratóstenes nasceu na África do Norte e foi educado em Atenas. Era um polímata, um especialista em várias áreas, desde crítica literária e poesia até geografia e matemática. Mas não o consideravam capaz de chegar ao primeiro lugar em nenhuma delas, o que levou seus companheiros a lhe dar o apelido sarcástico de “Beta”, a segunda letra do alfabeto grego, uma piada indicando que ele era sempre o segundo melhor. Apesar das brincadeiras, sua inteligência era tão renomada que, em meados do século III a.C., o rei do Egito o convidou para ser professor de seu filho, e depois o indicou para dirigir a famosa biblioteca de Alexandria. Essa foi a primeira e maior biblioteca de seu tipo, e havia sido estabelecida pelos Ptolomeu, soberanos do Egito, como parte da elevação de Alexandria ao posto de capital cultural do mundo grego. Essa biblioteca se tornou um ponto de encontro para os sábios do mundo inteiro. Em Alexandria, os bibliotecários conseguiram reunir uma enorme coleção de manuscritos sobre uma ampla variedade de temas que qualquer um com as credenciais necessárias poderia utilizar. (A biblioteca de Alexandria também foi a primeira de que se tem notícia a organizar os manuscritos por autor e em ordem alfabética.)

Eratóstenes escreveu dois livros de geografia que foram de particular importância no mundo antigo. *Geográfica*, um conjunto de três volumes, foi o primeiro a mapear o mundo usando paralelos (linhas paralelas ao equador) e meridianos (linhas longitudinais, que passam por ambos os pólos e por um determinado local). O seu *Medidas do mundo* continha a primeira descrição conhecida de um método para medir o comprimento da Terra. Infelizmente, as duas obras se perderam, e temos de reconstituir seu pensamento por meio de comentários de outros autores da Antigüidade que conheciam seu trabalho.³ Felizmente, estes eram muitos.

Eratóstenes partiu do raciocínio de que se a Terra fosse um corpo pequeno e esférico em um vasto universo, então os outros corpos, como o Sol, deveriam estar muito distantes – tão distantes que seus raios estariam essencialmente em paralelo, não importa onde atingissem a Terra. Também sabia que, à medida que o Sol sobe no céu, as sombras se tornam progressivamente menores – e sabia, por meio de relatos de viajantes, que no solstício de verão, na cidade de Siena (hoje Assuã), o Sol paira diretamente sobre a cidade, e as sombras desaparecem ao redor de objetos verticais, até mesmo colunas, mastros e até nos gnômons, os indicadores verticais ou ponteiros de relógios de Sol, cuja única função é projetar sombras. As sombras desapareciam até de dentro do poço da cidade quando a luz o banhava de modo uniforme, “como uma tampa que se encaixa exatamente em um buraco”, de acordo com uma fonte antiga.⁴ (Exagero um pouco: elas não desapareciam por completo, ape-

nas se projetavam diretamente abaixo dos objetos, em vez de se projetarem para o lado, como em geral acontece.)

Além disso, Eratóstenes sabia que Alexandria ficava ao norte de Siena e mais ou menos no mesmo meridiano. E, graças aos pesquisadores que o faraó enviava para viajar pelo rio Nilo e mapear as terras todo ano depois das enchentes periódicas, Eratóstenes sabia que as duas cidades estavam separadas por cerca de cinco mil estádios (o número foi arredondado, então não podemos usar essa informação para estabelecer o equivalente preciso de um estádio em unidades de medida moderna).

Em termos atuais, Siena estava no trópico de Câncer, uma linha imaginária que corta o globo terrestre passando pelo norte do México, sul do Egito, da Índia e da China (ela aparece na maioria dos mapas). Todos esses pontos no trópico possuem uma mesma característica incomum: o Sol se posiciona diretamente acima deles apenas uma vez por ano, no dia mais longo do ano – 21 de junho, o solstício de verão (para o hemisfério norte). Aqueles que vivem ao norte do trópico de Câncer nunca vêem o Sol diretamente acima de suas cabeças, e ele sempre projeta uma sombra. Aqueles que vivem no hemisfério norte, porém ao sul do trópico de Câncer, vêem o Sol diretamente acima de suas cabeças duas vezes por ano, uma antes do solstício e outra depois, e o dia exato varia segundo o lugar.

A razão para isso tem a ver com a posição da Terra, cujo eixo é inclinado em relação ao Sol. Mas isso não preocupava Eratóstenes. O que importava para ele era que o Sol, quando estava diretamente acima de Siena, não estaria diretamente acima nem ao norte nem ao sul – até em Alexandria –, e um gnômon projetaria uma sombra nesses locais. O comprimento da sombra dependeria da grandeza da curvatura terrestre; se a curvatura fosse grande, a sombra em um lugar como Alexandria seria maior do que se a curvatura da Terra fosse pequena.

Graças ao seu conhecimento de geometria, Eratóstenes sabia o suficiente para criar um experimento inteligente que lhe diria o tamanho exato da curvatura e, portanto, da circunferência terrestre.

Para apreciar a beleza deste experimento não precisamos saber nada sobre o modo específico pelo qual Eratóstenes o realizou. Sorte nossa, pois não temos sequer sua descrição do que fez. Sabemos apenas do experimento por breves descrições deixadas por seus contemporâneos e sucessores, muitos dos quais evidentemente não entendiam todos os seus detalhes. Não precisamos saber nada sobre o percurso de sua investigação – o que especificamente motivara seu interesse por esse problema, quais foram seus primeiros passos, os retrocessos, se houve algum, como chegou à conclusão final, e para que outras direções essa conclusão apontava. Azar o nosso, pois isso pode dar

a impressão de que a idéia lhe chegou como um raio em um céu azul, do nada, mas não é um obstáculo à nossa capacidade de entender o experimento. Também não precisamos nos engajar em saltos de lógica especulativa, seguir um raciocínio matemático complexo ou empregar argutas adivinhações empíricas baseadas em coisas como a demografia de elefantes. A beleza desse experimento está no modo como permite descobrir uma dimensão de proporções cósmicas medindo o comprimento de uma simples sombra.

Sua simplicidade e graciosidade empolgantes podem ser captadas em dois diagramas, as FIGURAS 1.1 e 1.2.

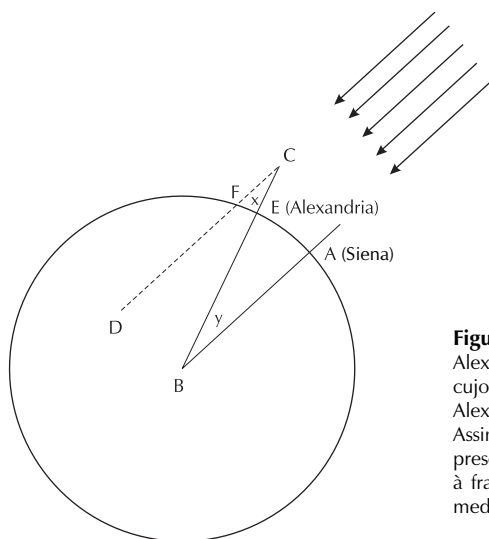


Figura 1.1. O ângulo (x) projetado pelas sombras em Alexandria é igual ao ângulo (y) criado pelos dois raios cujo vértice está ao centro da Terra e que passa por Alexandria e Siena (o desenho não está em escala). Assim, a fração que o arco de uma sombra (EF) representa, em Alexandria, um círculo completo é igual à fração que a distância (AE) de Siena a Alexandria mede na circunferência da Terra.

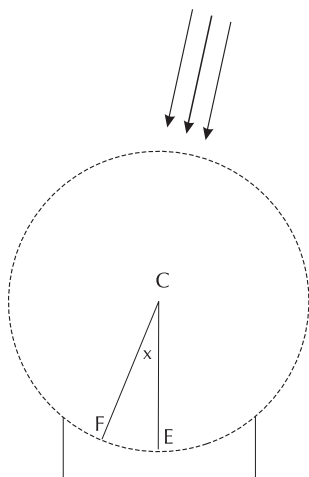


Figura 1.2. Eratóstenes obteria o mesmo resultado medindo tanto a fração do comprimento da sombra (EF) com relação à circunferência do círculo descrito pelo gnômon em torno do relógio de Sol, quanto a fração do ângulo da sombra (x) em relação ao círculo completo.

Durante o solstício, quando o Sol está diretamente acima de Siena (A), as sombras desapareciam – elas se projetavam diretamente na direção do centro da Terra (linha AB). Enquanto isso, as sombras em Alexandria (E) também se projetavam na mesma direção (CD) porque os raios de Sol são paralelos; mas, como a Terra é curva, eles caíam com um pequeno ângulo, que chamaremos de x . Um ângulo estreito ou uma sombra curta significaria que a curvatura da Terra era relativamente plana e que sua circunferência era grande. Um ângulo largo ou uma sombra longa significariam uma curvatura pronunciada e uma pequena circunferência. Existiria uma forma de descobrir a circunferência apenas pelo comprimento de uma sombra? A geometria proporcionou esse meio.

De acordo com Euclides, são iguais os ângulos interiores de uma linha em interseção com duas linhas paralelas. Portanto, o ângulo (x) projetado pelas sombras em Alexandria é igual ao ângulo (y) criado pelos dois raios cujo vértice está no centro da Terra e que passa por Alexandria e Siena (BC e BA). Isso significa que a razão entre o comprimento do arco de um gnômon (FE) e o círculo completo ao redor do gnômon (VER FIGURA 1.2) é a mesma que a razão entre a distância entre Siena e Alexandria (AE) e a circunferência da Terra. Quem medisse essa fração, percebeu Eratóstenes, poderia calcular a circunferência terrestre.

Embora Eratóstenes possa ter feito essa medição de várias maneiras, os historiadores da ciência têm bastante certeza de que ele a realizou usando um contador de horas, a versão grega de um relógio de Sol, pois o arco da sombra desse objeto seria perfeitamente definido. Um contador de horas, ou *skaphe*, consistia em uma tigela de bronze equipada com um gnômon, cuja sombra deslizava lentamente sobre as linhas de horas marcadas na superfície da tigela. Mas Eratóstenes empregou esse equipamento de uma nova forma. Ele não estava interessado na posição da sombra sobre as linhas de horas para medir a passagem do tempo, e sim no ângulo da sombra projetada pelo gnômon ao meio-dia no solstício de verão. Ele mediria a fração daquele ângulo em relação ao círculo completo (a prática de medir o ângulo em graus obtidos pela divisão do círculo em 360 partes iguais só se tornaria comum mais de um século depois). Ou, no que termina sendo a mesma coisa, ele pode ter medido a razão do comprimento do arco projetado pelo gnômon na tigela para a circunferência completa da tigela.

Naquele dia, às 12 horas, Eratóstenes teve a certeza de que o ângulo da sombra era $1/50$ de um círculo completo (nós diríamos que tinha 2,2 graus). A distância entre Alexandria e Siena era, portanto, um quinquagésimo da distância através de todo o meridiano. Multiplicando cinco mil estádios por 50, ele chegou a 250 mil estádios como a circunferência da Terra; mais tarde,

ajustou esse número para 252 mil estádios (ambas as medidas equivalem a pouco mais de 40 mil quilômetros). O motivo desse ajuste não é claro, mas provavelmente tem a ver com seu desejo de simplificar o cálculo de distâncias geográficas. Pois Eratóstenes tinha o hábito de dividir círculos em 60 partes, e uma circunferência de 252 mil estádios forma um número inteiro de 4.200 estádios para cada uma das 60 partes do círculo. Mas tanto faz usarmos 250 mil ou 252 mil estádios, e, seja qual for a medida empregada para converter estádios em unidades modernas de distância, sua estimativa estará sempre a poucos por cento do número aceito hoje, de 40 mil quilômetros.

A representação que Eratóstenes fazia do cosmo foi vital para o sucesso de seu experimento. Sem essa representação particular, a medida da sombra não daria a circunferência terrestre. Por exemplo, um antigo texto cartográfico chinês, o *Huainanzi*, ou “Livro do Mestre de Huaianan”, observa que gnômons da mesma altura, mas em diferentes distâncias (ao norte ou ao sul) um do outro, projetam sombras de comprimentos diferentes no mesmo momento.⁵ Partindo do princípio de que a Terra era plana, o autor atribuiu essa diferença ao fato de que o gnômon que projetava a sombra mais curva estava mais diretamente abaixo do Sol, e sugeria que essa diferença no comprimento das sombras podia ser usada para calcular a altura do céu!

As informações e medidas de Eratóstenes eram aproximações. Ele provavelmente sabia que Siena não estava precisamente no trópico de Câncer nem se situava exatamente ao sul de Alexandria. A distância entre as duas cidades não é exatamente de cinco mil estádios. E como o Sol não é um ponto de luz, mas um pequeno disco (de aproximadamente meio grau de largura), a luz de um lado do disco não atinge o gnômon no mesmo ângulo que a luz do outro lado, borrando ligeiramente a sombra.

Mas com a tecnologia que Eratóstenes tinha à sua disposição, o experimento foi bem-sucedido o bastante. Seu resultado de 252 mil estádios foi aceito, por centenas de anos, pelos gregos antigos como um valor confiável para a circunferência da Terra. No século I d.C. o autor romano Plínio aclamou Eratóstenes como uma “grande autoridade” a respeito da circunferência da Terra, reputou seu experimento como “audacioso”, seu raciocínio como “sutil” e seu resultado como “universalmente aceito”.⁶ Cerca de um século depois de Eratóstenes, outro sábio grego tentou usar a diferença entre o ângulo do qual a estrela brilhante Canopus era visível em Alexandria e o ângulo da mesma estrela vista em Rodes (onde, dizia-se, a estrela repousava exatamente no horizonte) para medir a circunferência da Terra, mas o resultado não foi muito confiável. Mesmo um milênio depois, os astrônomos árabes foram incapazes de aprimorar o seu trabalho, embora tenham usado métodos tais como medir o horizonte visto do topo de uma montanha de altura conhecida

e calcular a distância de uma estrela em relação ao horizonte de dois lugares diferentes, simultaneamente. O cálculo de Eratóstenes não foi aprimorado até os tempos modernos, quando se tornaram possíveis medidas muito mais exatas das posições dos corpos celestes.

Esse experimento transformou a geografia e a astronomia. Primeiro, permitiu a qualquer geógrafo estabelecer a distância entre dois lugares quaisquer cuja latitude seja conhecida – entre Atenas e Cartago, por exemplo, ou entre Cartago e a foz do Nilo. Permitiu a Eratóstenes descobrir o tamanho e a posição do mundo habitado conhecido. E proporcionou aos sucessores um parâmetro para tentar determinar outras dimensões cósmicas como as distâncias da Lua, do Sol e das estrelas. Em resumo, o experimento de Eratóstenes transformou a visão que os seres humanos tinham da Terra, da posição da Terra no Universo (ou pelo menos no sistema solar), e do papel da humanidade nisso tudo.

O experimento de Eratóstenes, como todo tipo de procedimento é abstrato, no sentido de que não depende de nenhum modo específico de percepção e pode ser realizado de várias formas. Seus ingredientes são simples e familiares: uma sombra, um instrumento de medida, geometria de ginásio. Não precisamos estar em Alexandria para usar o *skaphe*; nem precisamos fazê-lo durante o solstício. Centenas de escolas de todo o mundo têm o experimento de Eratóstenes em sua grade curricular. Algumas usam as sombras projetadas por relógios de Sol improvisados, outras usam mastros ou torres. Frequentemente essas réplicas são feitas em colaboração com outras escolas, via e-mail, usando uma página de geografia da Internet para determinar latitudes e longitudes e o MapQuest para determinar a distância. Réplicas do experimento de Eratóstenes não são como réplicas, digamos, da Batalha de Gettysburg feitas por entusiastas da Guerra Civil dos Estados Unidos, nas quais o objetivo é a precisão histórica ou pelo menos uma simulação interessante. Os estudantes não copiam ou simulam o experimento – eles o executam, como pela primeira vez, e o resultado fica bem visível diante de seus olhos, tão diretamente que não deixa margem a qualquer dúvida.

O experimento de Eratóstenes também ilustra com expressividade a natureza da própria experimentação. Como podem os cientistas saber algo como a circunferência da Terra sem medi-la fisicamente? Nós não somos incapazes, nem precisamos depender de métodos rudimentares como fitas métricas com dezenas de milhares de quilômetros de comprimento. Um procedimento preparado de forma inteligente, usando os objetos certos, pode induzir até mesmo coisas efêmeras e fluidas como as sombras a mostrar-nos as dimensões fixas e imutáveis do céu. O experimento mostra o modo como podemos estabelecer a forma a partir do caos, ou até mesmo de sombras, usando dispositivos de nossa própria criação.

A beleza do experimento de Eratóstenes vem de sua incrível amplitude. Alguns experimentos dão ordem ao caos pela forma como analisam, isolam e dissecam algo à nossa frente. Esse experimento dirige a nossa atenção para a direção oposta, medindo a grandeza em pequenas coisas. Ele expande a nossa percepção, oferecendo-nos novos modos de enfrentar uma pergunta aparentemente simples: “O que são as sombras, e como se formam?” Faz com que percebamos que a dimensão *dessa* sombra particular e efêmera está conectada com o fato de a Terra ser redonda, com o tamanho e a distância do Sol, com as posições constantemente mutáveis desses dois corpos, e com todas as outras sombras no planeta. A vasta distância que o Sol está de nós, a progressão cíclica do tempo e a forma arredondada da Terra adquirem uma presença quase palpável nesse experimento. Ele, então, afeta a qualidade da experiência que temos do mundo.

Experimentos nas ciências físicas tendem a ser vistos como impessoais, parecendo minimizar a importância da humanidade no Universo. Imagina-se que a ciência remova a humanidade de sua posição privilegiada – e muitos compensam essa perda imaginária ao se engajar em pensamentos mágicos, fantasiando que o Sol, os planetas e as estrelas têm uma ligação mística com seus destinos. Mas o experimento aparentemente abstrato de Eratóstenes nos humaniza de um modo mais genuíno ao dar-nos uma sensação mais realística de quem somos e de onde estamos. Enquanto quase tudo ao nosso redor celebra a grandeza, o imediatismo e a dominação, este experimento cria uma valorização do poder explicativo do pequeno, do temporal e da forma pela qual coisas de todas as dimensões estão intimamente conectadas.