

## HÁ UMA TEORIA FÍSICA EM DESCARTES? O ESTUDO DO ARCO-ÍRIS

Samuel Simon\*

Universidade de Brasília  
samuell@unb.br

Almir Serra

Universidade de Brasília

Ruslane Bião

Instituto de Ciências Sociais e Humanas de Goiás/CESB-GO

**Resumo:** O presente trabalho utiliza a chamada “concepção semântica” das teorias físicas para examinar o estudo realizado por Descartes sobre o fenômeno do arco-íris. Essa concepção parece ser a mais adequada para esse caso, tendo em vista o privilégio dos modelos na abordagem cartesiana. Nesse sentido, não parece ser possível concluir que esse estudo se configure como uma teoria física, como estimam alguns autores, embora Descartes tenha obtido valores corretos para o raio do arco-íris, ao fazer uso da lei de refração.

Palavras-chave: modelos, Descartes, concepção semântica, teoria física, arco-íris.

### 1. INTRODUÇÃO

Um conhecido e importante artigo de Charles Boyer (1958) sobre o estudo que Descartes faz acerca do fenômeno do arco-íris tem como título “The theory of the rainbow: medieval triumph and failure”. No entanto, não está entre as preocupações centrais do artigo discutir se Descartes possui uma teoria física, mesmo porque, como se vê, Boyer adota esse ponto de vista. Além disso, o termo “teoria” é empregado num sentido bastante amplo.<sup>1</sup> Parece ser possível então perguntar em que medida e se há uma teoria física em Descartes. Para responder adequadamente a essa questão, parece-nos importante analisar o estudo de Descartes sobre o arco-íris e examinar se esse estudo configura-se com uma “teoria física”. Nesse sentido, nas partes II e III do presente artigo serão apresentados os resultados do estudo desse fenômeno feito em *Os meteoros*.<sup>2</sup> Sendo o uso de modelos um aspecto central no método cartesiano, a relação entre modelos e teoria é, portanto, relevante.

Nesse sentido, a chamada “concepção semântica” de teorias parece ser a abordagem mais adequada,<sup>3</sup> e seus pressupostos serão apresentados na parte 4. Ainda nessa seção, tomando como base a abordagem de Da Costa e French (1990), a importância dos modelos será examinada diretamente no que se refere ao estudo cartesiano. Na conclusão, apresentaremos as dificuldades para considerar o estudo do arco-íris como uma teoria física.

## 2. O ARCO-ÍRIS: INTUIÇÃO E MODELOS

É em *Os meteoros*, obra dedicada ao estudo da luz e de alguns dos fenômenos por ela causada, que se tem, pela primeira vez na história da ciência, uma determinação quantitativa correta a partir de um modelo geométrico de um fenômeno conhecido e examinado desde o período clássico. De fato, Anaxágoras já havia proposto o arco-íris como um fenômeno de reflexão da luz.<sup>4</sup> Aristóteles<sup>5</sup> também examina o problema do arco-íris, mas propõe uma *esfera meteorológica*, bastante próxima de seu sistema das esferas celestes. No entanto, além da dificuldade de determinar os pontos em que os raios são refletidos para formar o arco, Aristóteles coloca, em seu modelo, o Sol e as nuvens numa posição equidistante do observador, contrastando com seu sistema cosmológico.

A explicação de Aristóteles e de seus seguidores vigorou durante treze séculos. Apenas com Robert Grosseteste e Witelo que uma nova explicação para o fenômeno do arco-íris, fundamentada na idéia de refração,<sup>6</sup> será conhecida. Tanto Grosseteste quanto Witelo consideram a formação do arco-íris como o espalhamento da luz por gotas de chuva. Teodorico de Freiberg, em 1304, tornará esse modelo mais preciso, antecipando Descartes e utilizando, provavelmente pela primeira vez na história da ciência, um globo cheio de água para estudar a formação das cores.<sup>7</sup> Também antecipando Descartes, Teodorico explica qualitativamente a formação do primeiro e do segundo arcos. No entanto, será

Descartes que fornecerá os resultados corretos no que se refere à posição das cores, visto por um observador na Terra.

O exame do procedimento de Descartes na determinação quantitativa do fenômeno do arco-íris é um claro exemplo do método científico cartesiano. Como é bem conhecido, o modelo da luz para Descartes é bastante controverso. Se, por um lado, ele considera a ação dos raios de luz na matéria sutil do céu como instantânea,<sup>8</sup> por outro lado, seu modelo para a reflexão e refração nos objetos admite uma velocidade finita. Descartes tinha um claro conhecimento desse problema e a defesa da ação instantânea, que ele faz numa carta a Beeckman,<sup>9</sup> parece relacionar-se com a luz natural, através da qual Deus coloca em nossa mente as idéias inatas. Também como Descartes mesmo afirma, isso não impede seu detalhado modelo mecânico da luz, particularmente da produção das cores em função da velocidade rotacional das partículas de luz.<sup>10</sup> A luz teria, assim, duas componentes: uma linear e outra rotacional, estando a primeira vinculada à direção do raio, expressa como uma reta. Dessa forma, a produção da cor é explicada, embora não haja um valor quantitativo associado a esses modelos.<sup>11</sup> No que se refere aos valores das posições das cores no arco-íris, o método cartesiano é bem-sucedido.

Os pontos de partida para a determinação desses valores são a observação e a experiência. Descartes segue o que foi estipulado em seu comentário à Regra II: o conhecimento das coisas se dá pela experiência e pela dedução.<sup>12</sup> Entretanto, ele precisa encontrar inicialmente as causas do fenômeno para, em seguida, determinar os elementos quantitativos. No caso do arco-íris, a distribuição das cores no céu deve ser encontrada da mesma maneira que em outros domínios científicos, tendo como fundamento os produtos da intuição: as idéias inatas. Encontrando seu correspondente no mundo, o trabalho da ciência seria, como Descartes afirma no *Discurso*, encontrar as leis que Deus estabeleceu no mundo.<sup>13</sup> Como dissemos acima, Descartes utiliza a observação e a experiência, mas estas não bastam. A correspondência entre o mundo e as idéias

inatas resulta da exata correspondência entre cada fenômeno e essas idéias. Ou seja, as relações entre as idéias deverão corresponder às relações no mundo.

O procedimento cartesiano para estabelecer essa relação utiliza-se ainda da analogia e dos modelos em duas etapas, por assim dizer. A dispersão da luz por um prisma e pela bola de vidro<sup>14</sup> constituirá o primeiro nível da analogia, que situaríamos no nível experimental. Ou seja, o que ocorre no prisma, na formação das cores, ocorrerá também na bola de vidro, no que se refere aos mecanismos internos. Aqui entra o segundo nível de analogia. O estudo da dispersão da luz no prisma, entendido como uma relação de figuras (um triângulo, nesse caso) e retas – os raios de luz (ver Figura 1), autorizará Descartes estendê-la a uma relação de circunferência e retas.<sup>15</sup> Isso porque a gota de chuva é considerada como uma esfera e os raios de luz como retas. E a justificativa de Descartes para manter o último nível de analogia é que, em ambos os casos, a lei de refração opera da mesma maneira: temos a passagem da luz de um meio menos denso para um meio mais denso. Essa lei foi desenvolvida no Discurso II da *Dióptrica*, no qual Descartes expressa a relação entre o  $\sin i$  e  $\sin r$  dos raios que atravessam o meio transparente para medir o índice de refração.<sup>16</sup>

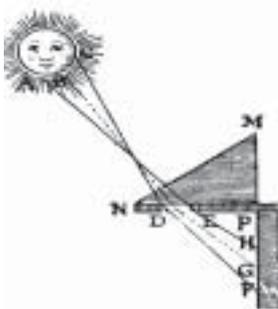


Figura 1

O esquema abaixo resume as etapas enunciadas anteriormente:

DISPERSÃO DA LUZ (cores observadas num anteparo)



Luz e prisma →→→→ Triângulos e retas + Lei de Refração →→→ Posição das Cores



Luz e bola de vidro →→→ Circunferência e retas + Lei de Refração →→ Posição dos arcos



(LUZ E GOTAS DE CHUVA)



ARCO-ÍRIS (CORES NO CÉU)

Os procedimentos acima são obtidos por Descartes mediante as duas vias do método: a via analítica, que vai dos efeitos às causas, e a via sintética, que vai das causas aos efeitos.<sup>17</sup> É importante esclarecer que, nessa última via, encontradas as causas, os efeitos são agora explicados quantitativamente, o que se tornou possível com o uso de modelos e leis (nesse caso a lei de refração). Os modelos são, para Descartes, suposições; essas são, num primeiro momento, aproximações da verdade, como ele afirma nos *Princípios*:

Desejarei escrever o que tomei unicamente por uma hipótese, que talvez é muito distante da verdade; mas ainda que fosse, acreditaria ter feito muito se todas as coisas que forem deduzidas estiverem inteiramente de acordo com as experiências.<sup>18</sup>

Serão, porém, elevadas à categoria de princípio se permitirem deduzir os efeitos (quantitativamente): “O pouco de suposições me parece bastar para servir-me como causas ou princípios, das quais deduzirei todos os efeitos que aparecem na natureza por leis únicas acima explicadas”.<sup>19</sup>

O procedimento experimental de Descartes, no caso do prisma, é bastante detalhado. Inicialmente, ele observa a posição das cores e a região de formação delas:

Se se tira o corpo escuro que está sob NP, as cores FGH cessam de aparecer; se se faz a abertura DF muito maior, o vermelho, o laranja e o amarelo, que estão na direção F, não se estendem mais distantes por isso, não mais que o verde, o azul e o violeta, que estão na direção H, mas todo o excesso de espaço que está entre os dois, em direção a G, permanece branco [...] a refração, a sombra e a luz concorrem do mesmo modo.<sup>20</sup>

A produção das cores é explicada em função das diferentes velocidades de rotação das partículas que compoariam a luz (Figura

2). Mais uma vez, Descartes faz uso de modelos, mas preservando a noção de figura, que encontra seu correspondente nas idéias inatas.

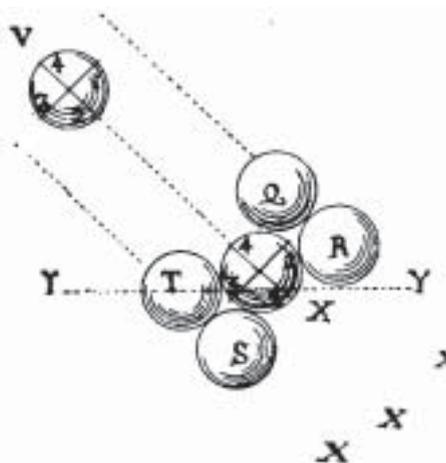


Figura 2

- V - caminho da bola 1234 que segue em linha reta
- YY - superfície da gota ou prisma
- X - meio
- Q,R,S,T - esferas que tendem em linha reta

No modelo de esferas giratórias, as partes que giram com maior velocidade em torno de seu próprio eixo causam em nós a sensação de vermelho e aquelas com menor velocidade causam a sensação de violeta.

E se demonstro tudo isso muito evidentemente, me parece que a natureza das cores que aparecem na direção F consiste apenas nas partes da matéria sutil, que transmite a ação da luz, tendem a girar com mais força que se mover em linha reta; de modo que aquelas que *tendem a girar muito mais* causam a cor vermelha, e aquelas que *tendem menos* causam o amarelo.<sup>21</sup>

Embora alguns autores insistam na fraqueza desse modelo,<sup>22</sup> não podemos deixar de notar que Descartes possuía uma clara noção da composição da luz em cores, do vermelho ao violeta.

### 3. A DETERMINAÇÃO DOS ARCOS

Tendo proposto uma explicação para a cor, Descartes parte agora para a explicação da posição dos arcos observados no céu. O arco-íris pode, em certas ocasiões, ser visto como dois arcos denominados primário e secundário; neste último, as cores têm suas posições invertidas em relação ao primeiro. Supondo a gota esférica e os raios de sol como retas, a posição dos arcos é facilmente explicada (Figura 3). Resta agora encontrar a explicação para os valores dos ângulos encontrados – entre  $40^\circ$  e  $42^\circ$ , para o primeiro arco, e entre  $50^\circ 30'$  e  $52^\circ$ , para o segundo arco –, tendo em vista o modelo utilizado.

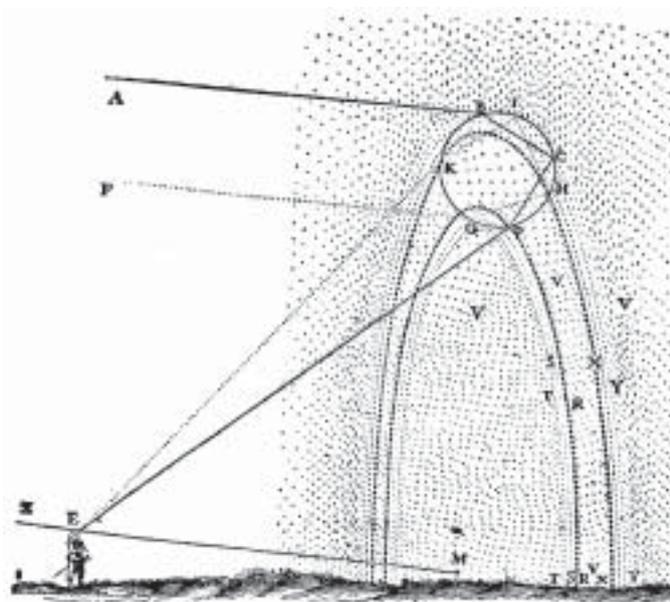


Figura 3

Nesse momento, a lei de refração não somente será fundamental, como permitirá um acordo com os modelos utilizados, mesmo porque na própria lei de refração os raios já são considerados como retas. Ou seja, temos, até o momento, pela via analítica, a determinação do modelo que deverá corresponder aos fatos observados. Os procedimentos para encontrar a explicação quantitativa adequada correspondem então à via sintética. Com o modelo geométrico e a lei de refração, Descartes poderá encontrar esses valores. Para isso, Descartes emprega a lei de refração,  $k = (\sin i / \sin r)$ , onde, tendo em vista a Figura 4,  $k = (HF/CI)$ , que é a proporção pela qual se mede o índice buscado.<sup>23</sup>

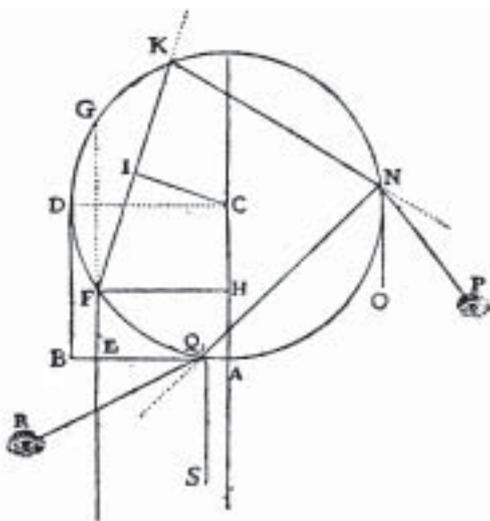


Figura 4

A proporção encontrada<sup>24</sup> para a relação  $HF/CI$  é de  $4/3$ , que servirá para determinar os ângulos dos arcos  $FG$  e  $FK$ , na medida em que fazem emergir os raios visíveis sob os ângulos  $ONP$  (arco-íris primário) e  $SQR$  (arco-íris secundário).

[...] todos os raios que caem sobre os diversos pontos de uma gota de água, para saber sob qual ângulo, após duas refrações e uma ou duas reflexões, podem vir na direção de nossos olhos, descobri que, após uma reflexão e duas refrações, há mais raios que podem ser vistos sob o ângulo de 41 a 42 graus que sob algum menor; e que não há algum que possa ser visto sob um maior. Pois descobri que, após duas reflexões e duas refrações, há muito mais raios que vêm na direção do olho sob o ângulo de 51 a 52 graus, que sob um maior; e que não há nenhum que venha sob um menor.<sup>25</sup>

Em termos dos ângulos, temos a Tabela 1,<sup>26</sup> onde  $q = 4r - 2i$ , cuja relação é obtida da Figura 5,  $q$  definindo o raio do arco-íris, que corresponde aos valores observados (nesse caso, para o primeiro arco).

Tabela 1

$i$	$\theta$
10°	12°
20°	22°
30°	30°
40°	36°
50°	40°
60°	42°
70°	42°
80°	40°
90°	36°

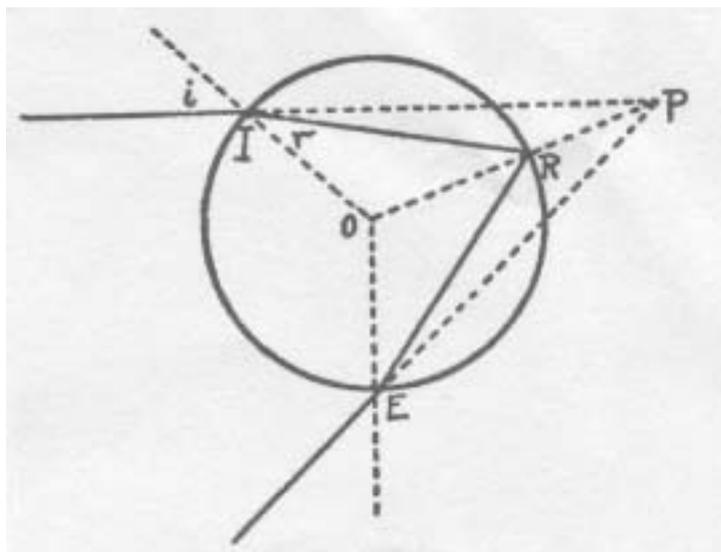


Figura 5

Ou seja, há uma concentração de raios espalhados entre  $40^\circ$  e  $42^\circ$ , para uma variação contínua de raios incidentes.

#### 4. HÁ UMA TEORIA FÍSICA EM DESCARTES?

Podemos agora retomar nossa questão inicial: há uma teoria física em Descartes? Ou mais especificamente, podemos considerar sua explicação do fenômeno do arco-íris como uma teoria? Para Suppes (1969), uma teoria é uma classe de modelos determinada por meio de um predicado (*set theoretical*); para Van Fraassen (1980) e Suppe (1989), a classe de modelos é definida em termos de uma estrutura topológica (*phase space* ou *state space approach*). Na concepção semântica, a classe de modelos é uma entidade extralingüística, altamente abstrata e afastada do fenômeno ao qual se aplica (THOMPSON, 1989, p. 71). A relação entre a teoria e um sistema empírico particular é de isomorfismo; o isomorfismo não é estabelecido inteiramente na teoria – como é o caso das regras de

correspondência na concepção sintática, as quais fazem parte do conjunto de axiomas da teoria –, mas sim por meio do emprego de um leque de outras teorias científicas e metodológicas.

Mesmo que o isomorfismo entre a teoria e o fenômeno não possa ser estabelecido e, portanto, a teoria não tenha uma aplicação empírica, no sentido de previsão, explicação e descrição, ela será empiricamente plena de significado, uma vez que, a partir da teoria, é possível saber qual é a estrutura e o comportamento do fenômeno, se este fosse isomórfico à teoria.<sup>27</sup> Um modelo de uma teoria T, na concepção semântica, expressa como um conjunto de axiomas numa linguagem L, é qualquer estrutura na qual os axiomas de T são verdadeiros. Uma estrutura para L é um conjunto de objetos O, e uma função que liga subconjuntos de O a predicados de L, pares ordenados de objetos a relações de dois lugares, e assim por diante. Cada modelo de T requer determinações independentes da verdade dos axiomas; isto pode ser feito matematicamente, se O é um conjunto de entidades matemáticas, como os inteiros, ou empiricamente, se O é um conjunto de objetos físicos, como os planetas. Em ambos os casos, modelos são entidades extralingüísticas, ou seja, são certos construtos, e não proposições. De toda maneira, os objetos do modelo, embora possam ser identificados isoladamente, são sempre acompanhados das propriedades que o definem e correspondem à estrutura axiomática.<sup>28</sup>

Para cada teoria expressa como um conjunto de axiomas numa linguagem formal qualquer, há um conjunto de estruturas que define os modelos dessa teoria. Essa maneira de apresentar os modelos pode fazer parecer que eles são derivados da linguagem em que os axiomas foram formulados; isto se deve ao fato de se ter começado a análise a partir de axiomas formulados numa linguagem particular e só depois se evidenciarem as estruturas correspondentes. Mas desde que modelos são entidades extralingüísticas, eles podem ser caracterizados de muitas formas diferentes; portanto, é possível identificar a teoria, não com uma formulação particular, mas com

o conjunto de modelos, ou classe, resultante de todas as diferentes formulações lingüísticas possíveis.

Essa independência da teoria a uma determinada expressão dela em alguma linguagem qualquer tem como consequência direta o fato de não ser necessária uma reconstrução da teoria em termos de cálculo axiomatizado de primeira ordem, tal como acontece numa análise puramente sintática como a do positivismo lógico; é possível usar qualquer linguagem suficientemente rica, incluindo a dos próprios cientistas, ao se analisarem as teorias de uma determinada ciência. Para Suppes, teorias complexas, como as encontradas nas ciências empíricas, são mais bem axiomatizadas por meio da definição de um predicado para essa teoria em termos de teoria dos conjuntos; um exemplo desse tipo de axiomatização dado pelo próprio Suppes, embora tirado da matemática, e sem o grau de complexidade encontrado nas ciências empíricas, é o da teoria dos grupos, que pode ser axiomatizada em termos do predicado “é um grupo”, de forma que esse predicado seja definido em termos da teoria dos conjuntos.

Suppes apontou ainda para um importante papel dos modelos<sup>29</sup> na investigação filosófica das teorias empíricas. Segundo ele, os modelos são fundamentais para se entender a relação entre a teoria e o dado experimental. Ou seja, entre uma determinada teoria e o dado fenomênico ao qual ela se refere, há uma intrincada cadeia de modelos, tendo no topo um modelo da teoria ou modelo teórico, e na base, um modelo definido como uma possível realização do dado; todos esses modelos devem ser isomórficos, de modo a se estabelecer a aplicação empírica da teoria. Uma importante consequência disto é que, ao passar do nível mais teórico para o experimental, não há necessidade de abandonar os métodos formais de análise (SUPPES, 1962).

Dentro dessa concepção, é de se supor que as noções teóricas que não possuem uma referência direta no dado experimental adquirem significado a partir das diversas teorias correspondentes aos modelos que constituem a cadeia formal entre a teoria

propriamente dita e o dado empírico, e não sintaticamente, como se supunha na concepção sintática.

Segundo Da Costa e French (1990), que examinam a relação entre teorias e modelos, seguindo a concepção semântica, os modelos são estruturas que possuem a forma:

$$U = \langle A, R_k, P \rangle_{k \in K}$$

onde  $A$  é um conjunto não-vazio,  $R_k$  é uma família de relações e  $P$  é o conjunto de sentenças de  $L$ , a linguagem referida acima.

Um modelo icônico (“empobrecimento”<sup>30</sup> da teoria) pode ser dado por:

$$U' = \langle A', R'_k, P' \rangle_{k \in K}$$

Ou seja, é possível estabelecer uma relação entre  $U$  e  $U'$ . Há, dessa maneira, um grau de aproximação que pode ser mensurável pela diferença entre  $R_k$  e  $R'_k$ ,  $k \in K$  (ver Figura 6), embora os autores alertem sobre a necessidade de atenção com as aproximações.

Deve-se sempre ser cuidadoso com aproximações, naturalmente, desde que elas possam fornecer soluções radicalmente diferentes da equação original.<sup>31</sup>

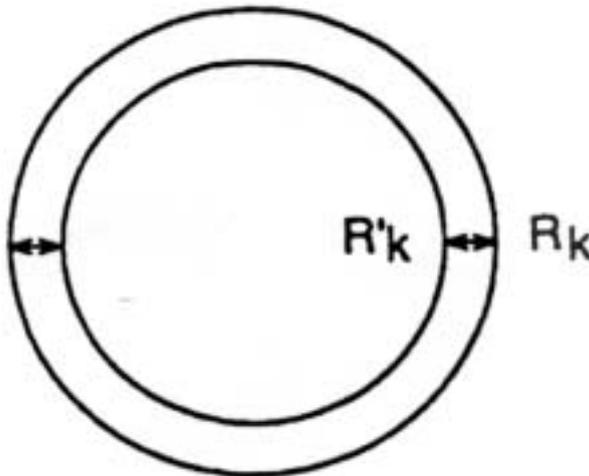


Figura 6

Dessa forma, considerando que, em certos casos, objetos relacionados em  $U$  e  $U'$  possuem propriedades relacionadas, então  $U$  e  $U'$  exibem uma estrutura isomórfica. Esse isomorfismo permite o desenvolvimento e o tratamento adequado da teoria. Embora “empobrecido”, o modelo icônico permite, nessas situações, determinações quantitativas importantes.

## 5. CONCLUSÃO

Parece ser possível afirmar que, no estudo cartesiano do arco-íris, os modelos empregados para a explicação desse fenômeno podem ser explicitados em termos de uma geometria elementar, e as interpretações associam os parâmetros do modelo ao fenômeno observado. No entanto, utilizando-se da formulação proposta acima por Da Costa e French,  $U'$  não garante que tenhamos  $U$ . Ou seja, dado um modelo icônico, podemos afirmar com segurança que há uma teoria física? Não parece ser possível fazer tal afirmação com tamanha generalidade e necessitamos de outros critérios para assegurar que estamos diante de uma teoria física quando examinamos certos modelos para os fenômenos. Descartes desenvolve uma análise parcialmente quantitativa do fenômeno do arco-íris, mas limita-se a um modelo geométrico bastante particular; estaríamos, assim, utilizando apenas a parte “empobrecida” da teoria.

Podemos afirmar que possuímos, na explicação cartesiana para o arco-íris, um único modelo teórico, no sentido de correspondência entre o modelo do fenômeno empírico e o modelo geométrico adotado, justificado por uma lei física e por valores numéricos corretos do fenômeno observado, embora não em toda sua amplitude. O modelo não é oriundo de uma teoria, mas construído com base em certas suposições qualitativas, como apontadas anteriormente, incluindo a concepção da luz como uma ação instantânea, que não possui conexões diretas com o modelo utilizado. Além do mais, como é bastante claro e como observam

inúmeros autores, não temos uma adequada explicação da formação das cores, também examinadas apenas qualitativamente.

No contexto das relações entre qualitativo e quantitativo, ou mais especificamente entre a passagem do primeiro ao segundo, deve-se, segundo Suppes (1967, p. 57) satisfazer três condições: a presença de uma álgebra visando a uma axiomatização, relações experimentalmente verificáveis e, finalmente, um isomorfismo entre o modelo empírico e algum modelo matemático. As duas últimas exigências – o isomorfismo e as relações empíricas verificáveis – colocam a possibilidade de o estudo cartesiano ser um modelo possível; no entanto, a primeira exigência, a presença de uma álgebra, com vistas a uma axiomatização, não pode ser satisfeita nesse caso, pois os inúmeros elementos qualitativos – como a instantaneidade da luz e as “partículas” de extensão em rotação – não apontam para qualquer álgebra possível.

#### IS THERE A PHYSICAL THEORY IN DESCARTES? THE STUDY OF THE RAINBOW

**Abstract:** This work uses the so called semantic conception of physical theoris in order to examine Descartes' study on the rainbow phenomenon. This conception seems to be the best fitted for this case given the privilege of models in the Cartesian approach. In this sense, it does not appear to be possible to conclude that this study may be set out as a physical theory, as some writers propose, although Descartes obtained right values for the rainbow radius by employing the refraction law.

Key words: models, Descartes, semantic conception, physical theory, rainbow.

### Notas

1. “The very natural idea that the rainbow is a reflection of solar rays (or of visual rays) was held during the Hellenic Age of science, and such a theory was espoused in particular by Anaxagoras” (BOYER, 1958, p. 378).
2. Particularmente no *Discurso VIII*.

3. Não vamos considerar as concepções sintáticas e estruturalistas de teorias, pois são bem mais restritivas no que se refere a essa relação, bastante importante em nosso caso.
4. Cf. Boyer (1958).
5. Parece que, num período anterior, um dos discípulos de Platão teria proposto a existência de uma relação entre o fenômeno do arco-íris e a refração dos raios de luz. Cf. Boyer (1958, p. 383).
6. O título da obra de Grosseteste já deixa isso claro: *Sobre o arco-íris ou sobre refração e reflexão*.
7. Também no século 14, al-Fârîsî realizou experiências com um globo cheio de água. (RASHED, apud PATY, 1998, p. 23).
8. “La lumiere n’en’t autre chon’e, dans les corps qu’on nomme lumineux, qu’vn certain mouuement, ou vne action fort prompte & fort viue, que panne vers nos yeux, par l’entrem’in’e de l’air & des autres corps trann’parens, en men’m’e façon que mouuement ou la ren’in’tence des corps, que reencontré cet aueugle, panne ver la main, par l’entrem’in’e de n’on ban’ton [...] cen’t’e lumiere puinne en’tendre n’es rayons en vn inn’tant” (Descartes, *La dioptrique*, AT VI, p. 84). Os autores do presente artigo preferiram mencionar a obra de Descartes em que se encontra uma determinada citação, diferindo um pouco do padrão normalmente utilizado, o qual se limita a citar o volume e página da edição de Adam e Tannery (AT). Consideramos que esse procedimento poderá ajudar o leitor a localizar a referida citação em uma outra edição das obras de Descartes.
9. *Descartes a Beeckman*, lettre du 22 Aout 1634, AT I, p. 308.
10. Descartes, *Les meteoires*, AT VI, p. 329. Ver nota 21.
11. Descartes estava ciente das possíveis dificuldades de sua hipótese. No entanto, o importante, segundo ele, seria obter os valores decorrentes da dedução matemática: “[...] i’ay den’iré qu’on receun’t de men’m’e façon ce que i’ay écrit en la Dioptrique de la nature de la Lumiere, afin que la force des demonn’tations

- mathématiques, que j'ay tan'ché d'y mettre, ne dependin't d'acune opinion Physique” (Descartes, *Correspondance*, AT II, p. 197).
12. “[...] je den'ire que ce que $\frac{1}{2}$  j'écriray n'eulement pris pour vne hypother'e, laquelle en't peut en'tre fort éloignée de la verité; mais encore que cela fun't, je croiray auoir beaucoup fait, n'i toutes les chon'es qui en n'eront déduites, n'ont entierement conformes aux experiences [...]” (Descartes, *Principes*, IV, AT IX-2, p. 123).
  13. AT VI, p. 41.
  14. “Et ayant rempli d'eau, a cet effect, vne grande fiole de verre toute ronde & fort trann'patent, i'ay trouué que, le n'oleil venant, par exemple, de la partie du ciel marquée AFZ, & mon oeil en'tant au point E, lorn'que ie mettois cete boule en l'endroit BCD, n'a partie D me paroinnoit tout rouge & incomparablement plus en'clatant que le ren'te” (Descartes, *Les Meteores*, AT VI, p. 325-326).
  15. “[...] car, ne receoir point de rayons de lumiere en n'es yeux, ou en receoir notablement moins d'vn obiet que d'vn autre qui luy en't proche, c'en't voir de l'ombre. Ce qui monn'tre clairement qui les couleurs de ces arcs n'ont produits par le men'me caun'e que celle qui paroinnent par l'ayde du crin'tal MNP” (Descartes, *Les meteores*, AT VI, p. 336).
  16. Cf. *La Dioptrique*, AT VI, p. 100. Rigorosamente, Descartes anuncia a lei de refração – em sua forma matemática – numa carta a Mersenne, em 1632. Cf. AT I, p. 255.
  17. Rigorosamente, essa relação é mais complexa. Pode haver um caminho das causas para os efeitos também na via analítica. Quando se vai das causas aos efeitos na via sintética, opera-se com vários elementos da intuição – há, portanto, uma síntese– e com outros elementos, que podem ser inclusive empíricos, quando se trata do estudo da natureza.

18. “[...] je den’ire que ce que j’écriray n’eulement pris pour vne hypothen’e, laquelle en’t peut en’trefort éloignée de la verité; mais encore que cela fun’t, je croiray auoir beaucoup fait, n’i toutes les chon’es qui en n’eront déduites, n’ont entierement conformes aux experiences [...]” (Descartes, *Principes*, IV, AT IX-2, p. 123).
19. “Ce peu de +”uppo+”itions me n’emble n’uffire pour m’en n’eruir comme de caun’es ou de principes, dont je déduiray tous les effets qui paroinnent en la nature, par les n’eules loix cy-dennus expliquées”. (Descartes, *Principes*, IV, AT IX-2, p. 125).
20. “N’i on on’t le cors obn’cur qui en’t sur NP, les coleurs FGH cennent de paroin’tre; & n’i on fait l’ouerture DF annés grande, le rouge, l’orange & le iaune, qui n’ont vers, ne s’en’tendent pas plus loin pour cela, non plus que le verd, le bleu & le violet, qui n’ont vers H, mais tout le n’urplus de l’en’pace qui en’t entre deux vers G demeure blanc [...] la refraction & l’ombre & la lumiere y concourent e men’mé n’orte” (Descartes, *Principes*, IV, AT IX-2, p. 331).
21. “Et il n’e demonn’tre, ce me n’emble, tres auidement de tout cecy, que la nature des couleurs qui paronnient vers F ne conn’in’té qu’en ce que les parties de la matiere n’ubtile, qui trann’met l’action de la lumiere, tendent a tournoyer avec plus de force qu’a n’e mouuoir en linge droit; en n’ort que celles qui tendent a tourner beaucoup plus fort, caun’ent la couleur rouge, & celles qui n’y *tendent qu’vn peu plus fort*, caun’ent la iaune” (Descartes, *Principes*, IV, AT IX-2, p. 333. O grifo é nosso para indicar o movimento das partículas que transmitem a ação da luz como um recurso auxiliar para a determinação da sombra, sendo a cor vermelha mais próxima da luz que o amarelo).
22. “One of his weaknesses was the wholesale postulation of microcosmic particles with complicated qualitative properties modeled on the observed properties of the macrocosm” (BOYER, 1959, p. 218).

23. “Et ayant tiré CI a angles droits n’ur FK, ie connois, de ce qui a en’té dit en la Diptrique, qu’AE, ou HF, & CI ont entre elles la proportion par laquelle la refraction de l’eau n’e men’ure. De façon que, n’i HF contient 8000 parties, telles qu’AB en contient 10000, CI en contiendra enuiron de 5984, | pourceque la refraction de l’eau en’t tant n’oit peu plus grande que de trois e quatre, & pour le plus iun’tement que i’aye pû la men’urer, elle en’t comme le 187 a 250” (BOYER, 1959, p. 337).
24. Na verdade, Descartes não esclarece a obtenção desse valor. Mas, como se trata de um valor empírico, diferente dos modelos geométricos empregados – considerados representações *a priori* do fenômeno –, ele deve ter sido obtido experimentalmente em alguma outra ocasião.
25. “[...] tous les rayons qui tombent, nur les diuers poins d’vne goutte d’eau, pour nçaouir nous quels angles, après deux refractions & vne ou deux reflexions, ils peuuent venir vers nos yeux, i’ay trouué qu’après vne reflexions & deus refractions, il t en a beaucoup plus qui peuuent entre veus nous l’angle de 41 a 42 degrés, que nous aucun moindre; & qu’il n’y en a aucun qui puinne entre nous vn plus grand. Puis, i’ay trouué aunny qu’après deux reflexions & deux refractions, il y en a beaucoup plus qui viennent vers l’oeil nous l’angle de 51 a 52 degrés, que nous aucun plus grand; & qu’il n’y en a point qui viennent nous vn moindre” (BOYER, 1959, p. 336).
26. Essa tabela, bem como a Figura 5, é apresentada por Boyer (1958).
27. Tanto no caso de um isomorfismo quanto no caso de uma relação mais fraca (isomorfismo parcial) entre a teoria e um determinado sistema empírico, as leis não descrevem o comportamento de objetos no mundo; elas especificam a natureza e o comportamento de um sistema abstrato.
28. “[...] a model is an entity that satisfies an axiomatic structure and by so doing provides an interpretation for that structure. A

model satisfies an axiomatic structure if it renders the theorems of the structure true” (THOMPSON, 1989, p. 71).

29. “[...] a model of a theory may be defined as a possible realization in which all valid sentences of the theory are satisfied, and a possible realization of the theory is an entity of the appropriate set theoretical structure” (SUPPES, 1962).
30. Na verdade, esse termo é de Redhead, citado por Da Costa and French (1990, p. 260).
31. “One must always be careful with approximations, of course, since they may give radically different solutions from the original equations” (DA COSTA; FRENCH, 1990, p. 261).

## Referências

- AT-ADAM, C.; TANNERY, P. *Oeuvres de Descartes*. Paris: J. Vrin, 1973-1978. 11 v.
- BOYER, C. Theory of the rainbow: medieval triumph and failure. *Isis*, v. 49, n. 4, 1958, p. 378-390.
- \_\_\_\_\_. *The rainbow: from myth to mathematics*. New York: Sagamore Press, 1959.
- DA COSTA, N.; FRENCH, S. The model-theoretic approach in the philosophy of science. *Philosophy of Science*, v. 57, p. 248-265, 1990.
- MORGENBESSER, S. (Ed.). *Philosophy of science today*. New York: Basic Books, 1967.
- NAGEL, E. et al. *Logic, methodology and philosophy of science*. Stanford: Stanford University Press, 1962.
- PATY, M. Mathesis universalis e inteligibilidade em Descartes. *Cadernos de História e Filosofia da Ciência*, v. 8, p. 9-57, 1998.
- SUPPE, F. *The semantic conception of theories and scientific realism*. Chicago: University of Illinois Press, 1989.

SUPPES, P. Models of data. In: NAGEL et al. *Logic, methodology and philosophy of science*. Stanford: Stanford University Press, 1962.

\_\_\_\_\_. *Studies in the methodology and foundations of Science*. Dordrecht: Reidel, 1969.

\_\_\_\_\_. What is scientific theory? In: MORGENBESSER, S. (Ed.). *Philosophy of science today*. New York: Basic Books, 1967. p. 55-67.

THOMPSON, P. *The structure of biological theories*. New York: New York Press, 1989.

VAN FRAASSEN, B. C. *The scientific image*. Oxford: Clarendon Press, 1980.