

Uma Abordagem Analítico-Dialética para Flutuações do Vácuo a partir da Filosofia Natural Aristotélica

Everson G. Quirino

Universidade Federal do Norte do Tocantins

Academia Atlântico/Uningá

Brazil

E-mail: eversonacademico@gmail.com

(Accepted December 2024)

Resumo

No presente trabalho, propõe-se uma abordagem que visa fornecer novos *insights* para o aprofundamento da compreensão da noção de matéria na física contemporânea. Defende-se que o conceito de flutuação do vácuo pode ser interpretado como matéria no sentido da Filosofia Natural Aristotélica (FNA). Para tanto, sugere-se um conjunto de proposições que relacionam analogicamente os conceitos de flutuação do vácuo, no sentido da Teoria Quântica de Campos (TQC), matéria e potencialidade aristotélicas. Essa abordagem será realizada por meio do uso da lógica dialética aristotélica e da análise conceitual.

Palavras-chave: Analogia. Dialética. Flutuação do vácuo. Teoria Quântica de Campos. Matéria. Aristóteles.

[AN ANALYTICAL-DIALECTICAL APPROACH TO VACUUM FLUCTUATIONS FROM ARISTOTELIAN NATURAL PHILOSOPHY]

Abstract

In the present work, an approach is proposed that aims to provide new insights into the understanding of the notion of matter in contemporary physics. It is argued that the concept of vacuum fluctuation can be interpreted as matter in the sense of Aristotelian Natural Philosophy (ANP). To this end, a set of propositions is suggested that relate analogically the concepts of vacuum fluctuation, in the sense of Quantum Field Theory (QFT), and Aristotelian matter and potentiality. This approach will be carried out through the use of Aristotelian dialectical logic and conceptual analysis.

Keywords: Analogy. Dialectic. Vacuum fluctuation. Quantum Field Theory. Matter. Aristotle.

1. Introdução

É amplamente reconhecido que o desenvolvimento da física contemporânea marcou uma ruptura com as teorias presentes na Filosofia Natural Aristotélica (FNA). Em particular, existe uma lacuna conceitual significativa entre a física contemporânea e a FNA no que diz respeito ao entendimento da noção de matéria. Enquanto a Teoria

Quântica de Campos (TQC) descreve as flutuações do vácuo como o surgimento espontâneo e temporário de partículas virtuais do vácuo, a FNA considera a matéria como potencialidade para a formação de objetos concretos. Diante disso, surge a questão: seria possível esboçar uma relação entre o conceito de flutuação do vácuo da TQC e a noção de matéria na FNA?

O presente trabalho defende que, em certos casos, o conceito de flutuação do vácuo pode ser entendido como matéria em sentido aristotélico. Para tanto, será sugerido um conjunto de proposições que relacione analogicamente os conceitos de flutuação do vácuo, matéria e potencialidade aristotélicas.

Antes de expor os conceitos fundamentais desta pesquisa e o argumento que os relaciona, é importante notar que Aristóteles discute suas noções de matéria e potencialidade ao longo de seus diversos tratados de forma assistemática.¹ Em vista disso, além das obras do filósofo grego, será utilizado o opúsculo “Sobre os Princípios da Natureza”, escrito por Tomás de Aquino,² como apoio para a presente exposição.

Na próxima seção, serão apresentados detalhadamente alguns conceitos importantes da FNA. Na seção 3, serão apresentados detalhadamente os mais relevantes conceitos da TQC para o presente trabalho. Na seção 4, para fins de objetividade, será apresentado o *axioma da flutuação do vácuo* (denotado por A_0), onde por *axioma* pode-se entender uma proposição cuja veracidade de seu conteúdo é bem estabelecida³ e o argumento propriamente dito, assim como sua defesa, nomeadamente a Hipótese da Flutuação Aristotélica (HFA), cujo objetivo é conectar analogicamente o conceito de flutuação do vácuo da TQC com a noção de matéria no sentido da FNA.

2. Conceitos da Filosofia Natural Aristotélica

Para a realização da proposta da presente pesquisa, serão apresentadas a seguir conceitos importantes da FNA segundo Tomás de Aquino (2017):

Def. 1. (Ato): Entende-se por ato aquilo que já é.

Pode-se entender como *ser em ato, atualização e atualidade* aquilo que já é.⁴ Para o entendimento da noção de ato, é possível considerar o seguinte raciocínio: na realidade, pode haver tanto uma árvore quanto uma semente. Pode-se dizer que a semente é *potencialmente* uma árvore, enquanto a árvore totalmente determinada é a atualização da semente. Em outras palavras, a árvore totalmente determinada tem seu modo de ser em ato. Enquanto semente, a árvore tem seu *ser em potência*, podendo *vir a ser* uma árvore em ato. Enquanto árvore totalmente determinada, a árvore tem seu ser em ato. Por sua vez, a semente não é somente potencialmente uma árvore; a semente também possui seu ser em ato, pois já é totalmente determinada como semente. A partir desse raciocínio, depreende-se que o modo de ser em ato precede *ontologicamente*⁵ o modo de ser em potência, ou que, ontologicamente, a potência depende do ato.

¹ Cf. Barnes (2015).

² Filósofo e teólogo medieval de tradição escolástica e comentador de Aristóteles.

³ Nos *Analíticos Posteriores*, Aristóteles entende por *axioma* “(...) Uma proposição que se recomenda à aceitação geral; um princípio bem estabelecido ou universalmente concedido; uma máxima, regra, lei”. O entendimento de axioma proposto trata-se somente de uma derivação do entendimento aristotélico de axioma. Cf. Aristóteles (2010).

⁴ Tomás de Aquino, p. 23.

⁵ O termo *ontologicamente* é derivado do termo *ontologia*. Entende-se por *ontologia* a doutrina que estuda os caracteres fundamentais do ser: os que todo ser tem e não pode deixar de ter. Cf. Abbagnano (2007).

Def. 2. (Potência): Entende-se por potência aquilo que pode ser.

Pode-se entender como *ser em potência*, *potencialmente* e *potencialidade* aquilo que pode ser.⁶ Os membros do par ato-potência são geralmente mencionados juntos. No raciocínio do par semente-árvore, tanto a potencialidade da semente quanto sua atualização foram consideradas. Enquanto ser em ato significa estar totalmente determinado, ser em potência, por sua vez, significa que, embora um objeto não esteja totalmente determinado, ele possui a capacidade real de ser totalmente determinado, ou seja, possui a capacidade real de ser em ato. Enquanto sua potência não estiver atualizada, ou seja, enquanto não tiver seu modo de ser em ato, o objeto estará em um estado de *privação*.⁷ A noção de *privação* pode ser entendida em um sentido mais geral: o estado em que um objeto se encontra quando não possui um bem que, por sua natureza, deveria possuir.⁸ Na ausência de obstáculos que impeçam a total determinação da semente, ocorrerá uma atualização de sua capacidade real, ou seja, uma atualização da potência de um objeto. Esse processo de atualização de uma potência é aquilo que Aristóteles chamou de *mudança* ou *movimento*. Segundo a definição da doutrina clássica da FNA, entende-se por *mudança* o ato do ente em potência enquanto está em potência.⁹ Para uma compreensão mais clara, pode-se entender por mudança a passagem da potência ao ato. No raciocínio do par semente-árvore, a mudança não ocorrerá exatamente quando a árvore estiver totalmente determinada, mas sim enquanto a árvore estiver sendo totalmente determinada. É possível notar que Aristóteles trata da mudança em um nível ontológico, propondo a noção de potência como uma capacidade real que um objeto possui. Portanto, segundo Aristóteles, a mudança é algo real, não uma ilusão.

Def. 3. (Matéria): Entende-se por matéria aquilo que está em potência ou para o *ser substancial* ou para o *ser accidental*.¹⁰

Entende-se classicamente por *substância*, ou *ser substancial*, aquela entidade cuja essência compete ser em si mesma e não em outro.¹¹ Entende-se classicamente por *acidente*, ou *ser accidental*, aquilo cuja essência compete ser em outro.¹² Algumas substâncias são os próprios sujeitos, enquanto outras substâncias são ditas dos sujeitos. No primeiro caso, são conhecidas como *substâncias primeiras*; no segundo caso, *substâncias segundas*. Por *substância primeira* entende-se aquela que é dita, no sentido mais fundamental, primeiro e absoluto, a que não é dita de nenhum sujeito, nem está em algum sujeito.¹³ Por *substância segunda* entende-se as espécies em que subsistem as substâncias ditas no sentido primeiro.¹⁴ O *sujeito* Sócrates é um exemplo de substância primeira, pois Sócrates não é predicável de um sujeito; ele é o próprio sujeito individual. Do sujeito individual Sócrates pode-se predicar algo mais geral, a saber, uma substância segunda. Considere a seguinte sentença:

(S1). Sócrates é homem.

⁶ Tomás de Aquino, p. 23.

⁷ Tomás de Aquino, p. 27.

⁸ Tomás de Aquino, p. 29.

⁹ Cf. Aristóteles (2023).

¹⁰ Nota-se que [Def. 3] é uma disjunção mutuamente exclusiva. Os conceitos de *ser substancial* e *ser accidental* estão ligados a, respectivamente, *substância* e *acidente*. São conceitos importantes na doutrina da FNA, no entanto, não será necessário abordá-los profundamente no presente trabalho. Porém, breves noções desses dois conceitos serão apresentadas ainda na discussão sobre [Def. 3].

¹¹ Cf. Mariano (2005).

¹² Mariano, p. 55.

¹³ Cf. Aristóteles (2019).

¹⁴ Aristóteles. Categorias, V, 2a, II.

Em (S1), há uma relação entre a substância primeira, a saber, Sócrates, e sua predicação “homem”, a saber, a substância segunda. Segundo Aristóteles, na ausência de substâncias primeiras, é impossível que existam substâncias segundas, pois as substâncias segundas são predicadas das substâncias primeiras.¹⁵ Segundo Mariano (2005), é possível dizer que o modo de ser da substância é dado a partir de três notas:¹⁶

Def. 4. (Subsistência): Entende-se por subsistência a definição clássica de substância.¹⁷

Def. 5. (Sujeitualidade): Entende-se por sujeitualidade o sujeito a partir do qual predica-se as substâncias segundas e os acidentes.¹⁸

Def. 6. (Unidade): Entende-se por unidade a unidade própria da substância e aquilo que permanece o mesmo nas mudanças accidentais.¹⁹

No que tange à noção aristotélica de acidente, dizer que sua essência compete ser em outro significa dizer que ele está em uma coisa, não como sua parte, mas que não pode estar fora daquilo em que está.²⁰ Em outras palavras, compete à essência do acidente inerir na substância. Para um melhor entendimento, considere a seguinte sentença:

(S2). Sócrates tem cabelo grisalho.

Em (S2), a coloração do cabelo de Sócrates é um acidente, pois a coloração grisalha só é dita como tal ao inerir na substância primeira, a saber, Sócrates. Segundo a FNA, tanto aquilo que está em potência para o ser substancial quanto aquilo que está em potência para o ser accidental podem ser chamados de matéria.²¹ Precisamente, o que está em potência para o ser accidental se denomina sujeito, enquanto aquilo que está em potência para o ser substancial se denomina matéria.²² No entanto, segundo a FNA, seja um objeto ou um acidente ou uma substância, tudo aquilo que está em potência pode ser chamado de matéria.²³ Portanto, constata-se que a FNA identifica a matéria como ser em potência, ou seja, com aquilo que pode ser. Embora se constate essa conexão entre potência e matéria que Aristóteles estabelece, ainda será necessária, com a finalidade de alcançar maior clareza de expressão, uma discussão minuciosa sobre a noção de matéria na FNA. Para isso, tal discussão será realizada na seção 4 do presente trabalho.

3. Conceitos da Teoria Quântica de Campos

Na literatura científica contemporânea, não há uma definição canônica da TQC. No entanto, de modo geral, a TQC pode ser entendida como a estrutura matemática e conceitual que consiste na aplicação dos princípios da mecânica quântica aos campos; portanto, a essência dessa teoria está relacionada à quantização de campos e à descrição das interações fundamentais em termos de campos quânticos.²⁴

¹⁵ Aristóteles. *Categorias*, V, 2a, II.

¹⁶ Mariano, p. 55.

¹⁷ Mariano, p. 55.

¹⁸ Mariano, p. 55.

¹⁹ Mariano, p. 55.

²⁰ Aristóteles. *Categorias*, II, 1a, XX.

²¹ Tomás de Aquino, p. 23.

²² Tomás de Aquino, p.23.

²³ Tomás de Aquino, p. 23-25.

²⁴ Historicamente, o primeiro exemplo conhecido de uma TQC costuma ser atribuído a uma descoberta realizada pelo matemático e físico teórico inglês Paul Dirac, quando aplicou os princípios da mecânica quântica ao campo eletromagnético, em vez de aplicá-los às partículas. Fisicamente, um campo é entendido como uma entidade dispersa no espaço-tempo. A principal diferença entre uma partícula e um campo é que uma partícula possui um número finito de graus de liberdade (maneiras independentes em que seu estado

As definições a seguir serão dadas segundo Polkinghorne (2019):²⁵

Def. 7. (Flutuação do vácuo): Entende-se por flutuação do vácuo o surgimento espontâneo e temporário de *partículas virtuais* do vácuo.

Pode-se entender por *flutuação do vácuo* ou *flutuações quânticas* o surgimento espontâneo e temporário de *partículas virtuais* do vácuo. Na física contemporânea, distingue-se entre *partículas reais* e *partículas virtuais*. Entende-se por *partículas reais* as excitações energéticas de campos subjacentes, que podem ser diretamente detectadas por instrumentos adequados.²⁶ Por exemplo, um elétron é uma partícula real que pode ser experimentalmente observada. Nesse sentido, a energia de uma partícula real, E_{real} , pode ser associada a um estado estacionário de um campo subjacente e será expressa por:

$$E_{real} = \hbar\omega,$$

onde $\hbar$ denota a *constante de Planck reduzida*²⁷ e ω a frequência do campo subjacente.

Entende-se por *partículas virtuais* excitações de altas energias que surgem espontânea e temporariamente de campos subjacentes.²⁸ Partículas virtuais não podem ser diretamente detectadas devido à sua existência efêmera, sendo assim previsões teóricas. Apesar disso, partículas virtuais geram efeitos mensuráveis no vácuo, como o *efeito Casimir*.²⁹ Para partículas virtuais, as excitações de energia $E_{virtual}$ não correspondem a estados estacionários, mas a flutuações temporárias que obedecem à relação de incerteza energia-tempo.³⁰

Def. 8. (Vácuo quântico): Entende-se por vácuo quântico o menor estado de energia em que há excitações correspondentes às partículas virtuais.

Pode-se entender por *vácuo quântico*, *estado de vácuo quântico* ou *estado de vácuo* o menor estado de energia em que há excitações correspondentes às partículas virtuais.³¹ O estado de vácuo de um campo quântico subjacente pode ser entendido como uma

pode se alterar), ao passo que um campo possui um número infinito de graus de liberdade. Quando quantizamos um campo, tal processo implica em tratar as variações dessa entidade física como pacotes de energia discretos, nomeadamente *quanta* (cujo termo no singular é *quantum*). No formalismo da TQC, as excitações energéticas de um campo quantizado, ou simplesmente campo quântico, correspondem precisamente ao que se nomeia por partículas, que podem ser observadas experimentalmente (e.g., em aceleradores de partículas). A TQC é a base para a teoria física conhecida como Modelo Padrão, que descreve todas as partículas fundamentais e suas interações (exceto a gravidade) de forma unificada. As noções de partícula e campo quântico são essenciais para a proposta do presente trabalho, então receberão minuciosa atenção. Cf. Polkinghorne (2019).

²⁵ As definições conforme se seguem podem ser apresentadas de maneiras diferentes em outros livros, no entanto encontram-se em consonância com a literatura aceita sobre esses tópicos. Como sugestões de leituras adicionais acerca de [Def. 7] e [Def. 8], pode-se conferir Feynman (1998) e Weinberg (1995), sendo essa última sugestão um livro-texto padrão sobre TQC.

²⁶ Polkinghorne, p. 91.

²⁷ Lê-se $\hbar$ como “h cortado”. A constante de Planck reduzida pode ser nomeada tanto dessa maneira quanto constante de Dirac. É possível obter $\hbar$ por meio da seguinte razão: $h/2\pi$, onde h é a constante de Planck.

²⁸ Polkinghorne, p. 91.

²⁹ O *efeito Casimir* (ou *força de Casimir*) está ligado à existência de flutuações do vácuo. Tal efeito resulta da pressão exercida pelas flutuações do vácuo entre duas placas metálicas descarregadas próximas no vácuo. Este efeito é geralmente considerado uma consequência das partículas virtuais.

³⁰ A relação de incerteza energia-tempo será tratada em [Def. 8].

³¹ Polkinghorne, p. 90-91.

coleção infinita de osciladores harmônicos quantizados.³² Assim, o estado de vácuo de um campo, denotado por $|0\rangle$, pode ser entendido como o produto tensorial dos estados de vácuo de cada modo de oscilação do campo. Formalmente, pode-se expressar tal entendimento da seguinte maneira:

$$|0\rangle = \otimes_k |0_k\rangle,$$

onde $\otimes_k$ denota o produto tensorial usado para combinar os estados de vácuo de todos os modos de oscilação k , e $|0_k\rangle$ é o estado de vácuo do oscilador harmônico quantizado associado ao modo de oscilação k .

Na mecânica clássica, um oscilador harmônico é entendido como um sistema físico que exibe um movimento periódico em torno de uma posição de equilíbrio, em que a força de restauração é proporcional ao deslocamento a partir da posição de equilíbrio, com a mesma proporcionalidade em todas as direções.³³ Matematicamente, isso pode ser expresso pela seguinte equação:

$$F = -kx,$$

onde F é a força de restauração, k é a constante de proporcionalidade (também conhecida como constante de mola), e x é o deslocamento da posição de equilíbrio.

Cada oscilador harmônico possui uma frequência natural específica ω_0 , dada por:

$$\omega_0 = \sqrt{\frac{k}{m}},$$

onde m é a massa do oscilador.

O comportamento do oscilador harmônico é análogo ao de um pêndulo simples, cuja frequência natural pode ser descrita por uma expressão similar. Assim, podemos afirmar que um oscilador harmônico com uma frequência natural ω_0 específica se comporta de maneira semelhante a um pêndulo com a mesma frequência natural. Segue-se, então, que se um oscilador harmônico possui um comportamento semelhante ao de um pêndulo, e dado que um pêndulo exibe comportamento dinâmico, o oscilador harmônico também se comporta dinamicamente. Portanto, se o vácuo de um campo quântico é entendido como um estado em que cada oscilador harmônico possui um comportamento semelhante ao de um pêndulo, então conclui-se que o vácuo se comporta dinamicamente. Em outras palavras, do ponto de vista da TQC, o vácuo não é um estado estático, mas sim um estado dinâmico. O comportamento dinâmico do vácuo pode ser entendido em termos das flutuações quânticas, nas quais os osciladores harmônicos virtuais estão constantemente surgindo e desaparecendo. Isso reforça a ideia de que o vácuo na TQC é um estado de atividade contínua e flutuante, refletindo a natureza intrinsecamente dinâmica do campo quântico subjacente.

No formalismo da TQC, o estado de vácuo de um campo quântico está associado a uma descrição quantizada dos operadores de criação e aniquilação, $\hat{a}_k^\dagger$ e $\hat{a}_k$, respectivamente.³⁴ O operador de criação $\hat{a}_k^\dagger$ aumenta o número de partículas em um determinado estado de vácuo, enquanto o operador de aniquilação $\hat{a}_k$ reduz o número

³² Cf. Griffiths (2011) e Polkinghorne (2019).

³³ Cf. Taylor (2013).

³⁴ Cf. Feynman (1998).

de partículas no mesmo estado. Para fins de clareza de expressão, considere um campo quântico onde o estado de vácuo $|0\rangle$ corresponde à ausência de estados de excitações energéticas. Aplicando o operador de criação $\hat{a}_k^\dagger$ ao estado de vácuo $|0\rangle$, obtém-se o estado $|1\rangle$, que descreve a presença de uma excitação energética:

$$\hat{a}_k^\dagger|0\rangle = |1\rangle.$$

De maneira análoga, ao aplicar o operador de aniquilação $\hat{a}_k$ ao estado $|1\rangle$, retorna-se ao estado de vácuo $|0\rangle$:

$$\hat{a}_k|1\rangle = |0\rangle.$$

Nesse sentido, tais operações descrevem a criação e aniquilação de estados de excitações energéticas, que correspondem precisamente às flutuações do vácuo.

Retomando a exposição sobre osciladores harmônicos e pêndulos, dado que se trata de um contexto em que a TQC é regida pelas leis e princípios da mecânica quântica, deve-se abordar a noção de pêndulo de acordo com a mecânica quântica. Para uma melhor compreensão das noções de vácuo quântico e flutuação do vácuo, uma breve discussão sobre a noção de *pêndulo quântico*³⁵ será realizada. Na mecânica clássica, o menor estado de energia do pêndulo ocorre quando ele está em repouso na posição inferior. Isso implica que, em repouso, os estados de momento e posição do pêndulo estão bem definidos. Matematicamente, se x denota a posição e p denota o *momentum*³⁶ de um determinado objeto, então torna-se possível detectar tais estados x e p de maneira precisa e simultânea:³⁷

$$x = 0 \text{ e } p = 0.$$

No entanto, no cenário da mecânica quântica, essa precisão simultânea não é possível devido ao princípio da incerteza de Heisenberg. Esse princípio estabelece que há uma limitação fundamental na precisão com que os pares de propriedades conjugadas, como posição e momento, podem ser conhecidos. A expressão matemática do princípio da incerteza é dada pela seguinte inequação:³⁸

$$\Delta x \cdot \Delta p \geq \hbar/2,$$

onde Δx denota a incerteza na posição e Δp a incerteza no momento. Tal relação de incerteza implica que, quanto mais precisamente se conhece a posição de uma partícula, menos precisamente se conhece seu momento, e vice-versa. Dessa forma, para evitar a violação de tal relação de incerteza, a noção de pêndulo clássico será substituída pela de pêndulo quântico. Nesse sentido, mesmo em seu menor estado de energia, o pêndulo

³⁵ Entende-se por *pêndulo quântico* um sistema físico que exibe um comportamento oscilatório, mas cuja dinâmica é descrita pela mecânica quântica, em vez da mecânica clássica. Assim, a noção de pêndulo quântico não apresenta uma correspondência perfeita com a noção de pêndulo clássico (sistema físico que também exibe um comportamento oscilatório, mas cuja dinâmica é descrita pela mecânica clássica).

³⁶ Entende-se por *momentum*, *quantidade de movimento* ou *momento linear* uma grandeza vetorial utilizada na descrição de sistemas físicos. O *momentum* é classicamente descrito da seguinte maneira: $p = mv$, onde p é o *momentum*, m é a massa e v a velocidade. Cf. Halliday et al (2016).

³⁷ Nesse caso, as seguintes equações denotam que os estados $x = 0$ e $p = 0$ de um determinado objeto representam, respectivamente, um estado de repouso e momento linear iguais a 0 de tal objeto.

³⁸ Cabe citar que a expressão matemática presente no artigo original de 1927 de Werner Heisenberg, autor do princípio da incerteza, difere-se da utilizada no presente trabalho, mas o raciocínio na relação de incerteza continua sendo o mesmo para ambos os casos.

quântico no vácuo ainda apresentará um leve movimento, nomeadamente *movimento de ponto zero*.³⁹ Dada a consideração do vácuo de um campo como um estado onde cada oscilador harmônico se comporta como um pêndulo quântico, depreende-se que o próprio vácuo também exhibe movimento de ponto zero. Adicionalmente, as relações de incerteza não se aplicam apenas aos estados de posição e momento, mas também são aplicáveis ao estado de energia e ao tempo.⁴⁰ A relação de incerteza entre energia e tempo é expressa pela seguinte inequação:

$$\Delta E \cdot \Delta t \geq \hbar/2,$$

onde ΔE denota a incerteza na energia e Δt o intervalo de tempo da partícula.

A partir da relação de incerteza $\Delta E \cdot \Delta t$ serão depreendidas as noções de partículas virtuais e, conseqüentemente, flutuações do vácuo.

Em resumo das noções presentes na atual seção, o estado de vácuo quântico representa o menor estado de energia, ou estado fundamental, em que há excitações correspondentes às partículas virtuais, cujas excitações são matematicamente descritas pelo operador $\hat{a}_k^\dagger$, nomeadamente operador de criação, que aumenta o número de partículas no estado de vácuo $|0\rangle$, obtendo assim o estado $|1\rangle$, e pelo operador $\hat{a}_k$, nomeadamente operador de aniquilação, que diminui o número de partículas no estado de vácuo $|1\rangle$, retornando assim ao estado $|0\rangle$. Flutuações do vácuo são matematicamente descritas por meio da relação de incerteza energia-tempo $\Delta E \cdot \Delta t \geq \hbar/2$, permitindo que partículas virtuais surjam espontânea e temporariamente de um estado de vácuo.

4. A Hipótese da Flutuação Aristotélica

Nesta seção, será apresentado e defendido o argumento cujo objetivo é conectar analogicamente o conceito de flutuação do vácuo, no sentido da TQC, com a noção de matéria da FNA. Inicialmente, proponho a consideração de A_0 , onde A_0 é o axioma de origem que denotará [Def. 7], sendo [Def. 7] a partir deste momento nomeada como o *axioma da flutuação do vácuo*:

A_0 . (Axioma da flutuação do vácuo): Entende-se pelo axioma da flutuação do vácuo a proposição cuja veracidade do conteúdo da noção de flutuação do vácuo é bem estabelecida.

Apresento o elenco sistemático da HFA:

A_0 : Entende-se por flutuação do vácuo o surgimento espontâneo e temporário de partículas virtuais do vácuo.

P1: Do ponto de vista da Teoria Quântica de Campos, em alguns casos partículas virtuais podem se tornar partículas reais.

P2: Se (P1) é verdadeira, então, em alguns casos, partículas virtuais são potencialmente partículas reais e em alguns casos partículas reais são a atualização de partículas virtuais.

P3: Se (P2) é verdadeira, então, em alguns casos, flutuação do vácuo pode ser entendida como potencialidade aristotélica.

P4: Do ponto de vista da Filosofia Natural Aristotélica, tudo aquilo que está em potência pode ser entendido como matéria.

³⁹ Polkinghorne, p. 90.

⁴⁰ Polkinghorne, p. 73.

P5: Em alguns casos, flutuação do vácuo pode ser entendida como potência.

P6: Portanto, em alguns casos flutuação do vácuo pode ser entendida como matéria.

Apresento as *provas*⁴¹ das premissas da HFA:

P1: *Do ponto de vista da Teoria Quântica de Campos, em alguns casos partículas virtuais podem se tornar partículas reais.*

Prova. Em um primeiro momento, será necessário entender a afirmação em (P1) por meio da recapitulação da discussão realizada em [Def. 7]. Dado que o termo “virtual” se refere precisamente à vida própria da partícula, limitada pelo princípio da incerteza, uma partícula virtual é um objeto que surge a partir dos cálculos matemáticos, mas produz efeitos mensuráveis. Por outro lado, partículas reais têm suas vidas próprias maiores quando comparadas com partículas virtuais. Precisamente pelo fato de uma partícula real possuir uma vida própria maior, ela pode se tornar um objeto capaz de ser detectado por meio de dispositivos de mensuração. Para um entendimento claro de (P1), consideremos o seguinte diagrama de Feynman:

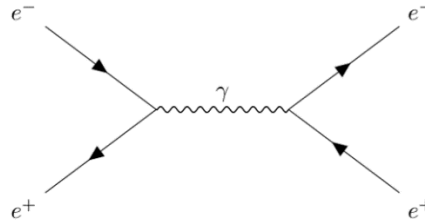


Figura 1 – Diagrama de Feynman para a interação elétron-pósitron via fóton. Fonte: o autor

O lado esquerdo do diagrama na figura 1 ilustra a aniquilação de um par elétron-pósitron ($e^- + e^+$), seguida pela mediação da interação por um fóton virtual (γ), culminando na criação de um novo par $e^- + e^+$, representado no lado direito. As linhas retas indicam as trajetórias das partículas reais (ou seja, e^- e e^+), enquanto a linha ondulada simboliza o fóton virtual (ou seja, γ), que atua como mediador da interação.

As partículas virtuais são criadas e destruídas devido às interações quânticas.⁴² A função das partículas virtuais é precisamente permitir que uma dada interação quântica ocorra. Nesse sentido, o evento ilustrado no diagrama é um caso de interação quântica. Como o evento ilustrado no diagrama é um caso de interação quântica, tal evento envolve partículas virtuais. Logo, o diagrama ilustrado mostra um caso particular em que partículas virtuais se tornam partículas reais. Dessa forma, parece que (P1) pode ser sustentada a partir desse diagrama específico de Feynman.

P2: *Se (P1) é verdadeira, então, em alguns casos, partículas virtuais são potencialmente partículas reais e em alguns casos partículas reais são a atualização de partículas virtuais.*

Prova. A afirmação em (P2) apresenta uma conexão razoável entre o processo de transformação de partículas virtuais em partículas reais e as noções de potencialidade e

⁴¹ Nos sub-argumentos de cada uma das premissas, o termo *prova* está sendo entendido como sendo uma *prova dialética*. Conforme sua acepção presente no tratado aristotélico *Tópicos* (I. 1, 100a30-100b20) e na tradição filosófica medieval, uma *prova dialética* é um tipo de argumentação lógica que visa estabelecer a plausibilidade de uma proposição ou a consistência de uma posição a partir do uso de premissas prováveis ou amplamente aceitas. Cf. Aristóteles (2010).

⁴² Cf. Aguilar (2018).

atualidade da FNA. Tendo em vista a discussão realizada em (P1) e o tratamento dado em [Def. 2] sobre os membros do par ato-potência serem normalmente ditos juntos, parece consistente que as noções de ser em potência e ser em ato da FNA possam ser aplicadas à compreensão do processo de transformação das partículas virtuais em reais na TQC, como considerado no diagrama de Feynman. Nesse sentido, (P2) pode ser sustentada a partir das discussões empreendidas em [Def. 1], [Def. 2] e (P1). Portanto, (P2) segue-se logicamente de (P1).

P3: *Se (P2) é verdadeira, então, em alguns casos, flutuação do vácuo pode ser entendida como potencialidade aristotélica.*

Prova. A afirmação em (P3) estabelece uma conexão clara entre a noção de potencialidade aristotélica, ou seja, uma capacidade real passível de ser atualizada que um objeto possui, e a noção de flutuação do vácuo, entendida como o surgimento espontâneo e temporário de partículas virtuais do vácuo. A afirmação em (P3) pode ser sustentada pela conexão razoável e consistente estabelecida em (P2). Nesse sentido, (P3) pode ser sustentada diretamente pela conexão estabelecida em (P2) e pelas discussões realizadas em [Def. 1], [Def. 2] e [Def. 7]. Portanto, (P3) segue-se logicamente de (P2).

P4: *Do ponto de vista da Filosofia Natural Aristotélica, tudo aquilo que está em potência pode ser entendido como matéria.*

Prova. Em (P4), apresenta-se uma concepção bem aceita na FNA. Como discutido em [Def.3.], segundo Tomás de Aquino:

“(...) E tanto aquilo que está em potência para o ser substancial (como o sêmen, em relação ao homem) quanto o que está em potência para o ser accidental (como o homem, em relação à brancura) podem ser chamados de matéria”. (Tomás de Aquino, 2017, p. 23)

Em outras palavras, a FNA identifica a matéria como ser em potência, ou seja, com aquilo que pode ser. Na sua Física, Aristóteles elenca a matéria como um dos três princípios da natureza, sendo os outros dois a noção de privação, que foi brevemente discutida em [Def. 2], e a noção de *forma*.⁴³ Segundo Tomás de Aquino, entende-se por *forma* aquilo pelo qual o ente (ou objeto) é posto em ato.⁴⁴ De acordo com o entendimento de Fabro (2010), a noção de forma pode assumir a acepção de ato da matéria; isto é, a forma é ato da matéria. Nesse sentido, tal como entendida por Aristóteles, o conceito de potencialidade está intimamente ligado à noção de matéria; no entanto, na perspectiva da FNA, a noção de matéria é dotada de grande riqueza de detalhes. Dado que Aristóteles considera a potência como uma *propriedade* – isto é, aquilo que é próprio de algo – subjacente ao processo de mudança inerente à natureza, o Estagirita não a reputa apenas como uma capacidade *passiva*, ou seja, um agente de recepção, mas também como uma capacidade *ativa*, ou seja, um agente de ação. Para esclarecer o papel da capacidade de ser em potência dos objetos da natureza e da própria natureza, embora tenhamos assumido tal tarefa no raciocínio do par semente-árvore em [Def. 2], consideremos o seguinte exemplo dado por Tomás de Aquino (e por Aristóteles):

“(...) Deste modo, quando, a partir do cobre, é feito um ídolo, o cobre (que está em potência para a forma do ídolo) é a matéria; que este cobre particular esteja desfigurado, indisposto, é a privação; e a figura a partir da qual ele é chamado

⁴³ Aristóteles, Física, I, 12.

⁴⁴ Tomás de Aquino, p. 27.

‘ídolo’ é a forma, a qual no entanto não é substancial, mas accidental – uma vez que o cobre, anteriormente ao advento de tal forma ou figura, já tem ser em ato, e seu ser não depende daquela figura”. (Tomás de Aquino, 2017, p. 27)

Em resumo, Tomás diz que o cobre tem a capacidade real, ou uma potência, para se tornar uma estátua (ou “figura”), mas tal potencialidade será atualizada somente se uma *causa eficiente* (ou seja, um agente capaz de realizar uma ação), como um escultor ou artesão, exercer a atividade adequada de moldar o cobre. Outra conexão estabelecida por Aristóteles acerca da noção de potência, e que também é aceita por Tomás de Aquino, foi com a noção de *materia prima*, nomeadamente *yle*.⁴⁵ Entende-se por *materia prima* o primeiro sujeito de todo ser corpóreo.⁴⁶ Tomás de Aquino denominará por *materia prima* o seguinte:

“(...) Já aquela matéria que inteligimos sem qualquer forma ou privação – mas que é sujeita à forma e à privação – denominamos materia prima, porque antes dela não existe outra matéria”. (Tomás de Aquino, 2017, p. 31)

Dessa maneira, como toda definição e toda cognição se dão pela forma, a *materia prima* não pode ser conhecida ou definida por si mesma; mas, por comparação, pode ser entendida como aquilo que está para todas as formas e privações, assim como o cobre está para a estátua e o desfigurado.⁴⁷ Retomando [Def. 4] e [Def. 5], nesse sentido, na FNA, a *materia prima* é entendida como o substrato subsistente de todos os objetos da natureza, caracterizada por ser absolutamente potencial, pois ela é essencialmente apenas potência passiva. Em outras palavras, essencialmente, a *materia prima* não possui forma alguma. Portanto, nada que esteja em ato pode ser chamado de *materia prima*.⁴⁸ Nesse sentido, tal discussão fornece um quadro consistente, embora já bem estabelecido, da identificação da noção de potência com a noção de matéria na FNA, tornando, portanto, (P4) consistente.

P5: *Em alguns casos, flutuação do vácuo pode ser entendida como potência.*

Prova. A afirmação em (P5) é coerente com a discussão empreendida até o presente momento. A afirmação em (P5) de que, em alguns casos, a noção de flutuação do vácuo pode ser entendida como potencialidade é sustentada pela identificação de que, em casos especiais, partículas virtuais podem se transformar em partículas reais. Logo, em casos especiais, é coerente assumir que partículas virtuais possuem capacidades reais ou potências para transitarem para o estado de partículas reais. Dado (**A₀**) e lembrando a conexão estabelecida em (P3), portanto, (P5) se segue logicamente.

P6: *Portanto, em alguns casos flutuação do vácuo pode ser entendida como matéria.*

Prova. A afirmação em (P6) conclui definitivamente uma relação analógica entre os conceitos de flutuação do vácuo e matéria do ponto de vista da FNA. Em outras palavras, se (**A₀**) for assumido e a valoração de cada conteúdo das sentenças do conjunto das proposições anteriormente defendidas for verdadeira, então, em alguns casos, flutuações do vácuo poderão ser entendidas como matéria aristotélica. Embora tenhamos discutido a noção de *materia prima* na exposição de (P4), é imprescindível notar que (P6) não conclui que flutuações do vácuo podem ser entendidas como *materia prima*. Pressupondo a exposição empreendida em (P4), *materia prima* é uma entidade

⁴⁵ Hyle, do grego ὕλη.

⁴⁶ Aristóteles, Física, I, 9.

⁴⁷ Tomás de Aquino, p. 33.

⁴⁸ Tomás de Aquino, p. 35.

absolutamente potencial. Embora flutuações do vácuo possam assumir um conjunto de potências, elas não são absolutamente potenciais, pois já são flutuações do vácuo plenamente determinadas, atualizadas, em ato; e, como discutimos, nada que esteja em ato pode ser dito como *materia prima*. Portanto, a afirmação em (P6) conclui apenas que flutuações do vácuo, em alguns casos, podem ser entendidas como objetos x que possuem capacidades reais para se atualizarem para objetos y . Dado que partículas virtuais são um conjunto de objetos que, em alguns casos, possuem um conjunto de potências que podem ser atualizadas para partículas reais, então, em alguns casos, a noção de flutuação do vácuo (assumindo A_0) pode ser entendida como matéria segundo a FNA.

5. Observações finais

No presente trabalho, foi apresentado e defendido um argumento que busca estabelecer uma relação analógica entre o conceito de flutuação do vácuo, no sentido da TQC, e a noção de matéria entendida do ponto de vista da FNA, nomeadamente a Hipótese da Flutuação Aristotélica (HFA). A proposta da HFA tem como seu modesto objetivo alcançar uma clareza de expressão nas discussões acerca da noção de flutuação do vácuo e dos processos de transição de partículas virtuais para partículas reais. Um caso hipotético em que a transição de partículas virtuais para partículas reais se faz presente é na situação teórica da *Radiação Hawking*, proposta por Stephen Hawking. Ele sugeriu que os buracos negros, que são objetos dos quais a luz não pode escapar devido à intensa deformação geométrica no espaço-tempo que os próprios buracos negros geram e, portanto, classicamente estão no zero absoluto, irradiam temperatura quando os efeitos da mecânica quântica são levados em consideração.⁴⁹ Nesse sentido, teoricamente, radiação é emitida fora do *horizonte de eventos*⁵⁰ de um buraco negro. Segundo Hawking (1975), tal efeito de irradiação de temperatura por um buraco negro pode ser imaginado da seguinte maneira:

“(...) Poderíamos imaginar esse fluxo de energia negativa da seguinte maneira. Fora do horizonte de eventos haverá pares virtuais de partículas, uma com energia negativa e outra com energia positiva. A partícula negativa está em uma região que é classicamente proibida, mas pode atravessar o horizonte de eventos até a região dentro do buraco negro onde o vetor Killing, que representa as translações do tempo, é semelhante ao espaço. Nesta região, a partícula pode existir como uma partícula real com um vetor de momento semelhante ao tempo, embora sua energia relativa ao infinito, medida pelo vetor Killing de translação no tempo, seja negativa. A outra partícula do par, tendo energia positiva, pode escapar para o infinito onde constitui parte da emissão térmica descrita acima”. (Hawking, 1975, p. 202) (Tradução nossa)

Portanto, tal efeito deve-se ao surgimento de pares de partículas virtuais nos arredores de um buraco negro, ou seja, flutuações do vácuo surgindo naturalmente próximas a um buraco negro, onde um membro x do par virtual (x, y) pode atravessar o horizonte de eventos do buraco negro, enquanto o membro y do par virtual (x, y) poderá transitar para o estado de partícula real. Embora seja um cenário hipotético, talvez seja possível que a modesta proposta da HFA proporcione clareza de expressão em discussões sobre a radiação Hawking.

⁴⁹ Cf. Fredenhagen (2012).

⁵⁰ O *horizonte de eventos* de um buraco negro é um limite matemático que demarca a fronteira entre o espaço exterior ao buraco negro e o espaço interior do buraco negro. No horizonte de eventos, a *velocidade de escape* (a velocidade necessária para um determinado objeto escapar de um centro gravitacional de atração sem sofrer uma aceleração adicional) é igual à velocidade da luz.

Em resumo, não é afirmado no presente trabalho que flutuações do vácuo podem ser univocamente entendidas como matéria no sentido da FNA, mas a proposta da HFA é que, em alguns casos, flutuações do vácuo podem ser analogicamente entendidas como matéria no sentido da FNA.

6. Agradecimentos

Expresso minha profunda gratidão a todos que contribuíram significativamente para a realização deste trabalho.

Em primeiro lugar, agradeço ao Prof. Dr. Fábio Maia Bertato, cuja dedicação à clareza de expressão e à precisão no pensamento lógico-filosófico foram fontes constantes de inspiração, e ao Prof. Dr. Fábio Matos Rodrigues, cujo rigor metodológico e orientação foram fundamentais para o desenvolvimento desta pesquisa. Sou igualmente grato ao Prof. Dr. Fernando Lessa Carneiro e ao Prof. Dr. Matheus Pereira Lobo, por suas valiosas discussões sobre TQC e pelo suporte em física teórica, que enriqueceram substancialmente as ideias apresentadas neste trabalho.

Minha gratidão se estende ao Prof. Me. Gesiel Borges da Silva, pela leitura e revisão do argumento e dos conceitos envolvidos, e ao Prof. Mateus Coelho Belinello, cuja revisão, especialmente dos conceitos da FNA, permitiu-me realizar as correções necessárias.

A todos os mencionados, sou sinceramente grato não apenas pelo suporte acadêmico, mas também pela inspiração e pelo encorajamento que me ofereceram ao longo deste percurso.

Bibliografia

ABBAGNANO, N. *Dicionário de filosofia*. São Paulo: Martins Fontes, 2007.

AGUILAR, A. C.. Diagramas de Feynman: O poder de uma imagem. *Revista Brasileira de Ensino de Física*, v. 40, n. 4, p. e4205, 2018.

ARISTÓTELES. *Categorias*. Trad. José Veríssimo Teixeira da Mata. São Paulo: Editora Unesp, 1ª ed., 2019.

ARISTÓTELES. *Física*. Trad. Carlos Humberto Gomes. Coimbra: Edições 70, 1ª ed., 2023.

ARISTÓTELES. *Órganon*. Trad. de Edson Bini. São Paulo: Edipro, 2ª ed, 2010.

BARNES, Jonathan. *Aristotle: A Very Short Introduction*. Oxford: Oxford University Press, 2015.

FABRO, C. *Partecipazione e Causalità*, Roma, Casa Editrice dell' Instituto del Verbo Incarnato (EDIVI), 2010, Cap 2.

FEYNMAN, R.P. (1998). *Statistical Mechanics: A Set Of Lectures* (1st ed.). CRC Press. <https://doi.org/10.1201/9780429493034>.

FREDENHAGEN, K. et al. SEMINAR ON MATHEMATICAL ASPECTS OF THEORETICAL PHYSICS. [s.l: s.n.]. Disponível em: <https://www.physik.uni-hamburg.de/th2/ag-fredenhagen/dokumente/hawking-radiation.pdf>. Acesso em: 17 mar. 2024.

GRIFFITHS, David J., Mecânica Quântica. 2ª Ed. Pearson Education (2011).

HALLIDAY, David; RESNICK, Robert; WALKER, Jean. Fundamentos de física: gravitação, ondas e termodinâmica. Trad. Ronaldo Sérgio de Biasi. – 10. Ed. Vol. 2. – Rio de Janeiro: LTC, 2016.

HAWKING, S.W. Particle creation by black holes. Commun.Math. Phys. 43, 199–220 (1975). <https://doi.org/10.1007/BF02345020>.

HEISENBERG, W. Über den anschaulichen Inhalt der quantentheoretischen Kinematik und Mechanik. Z. Physik 43, 172–198 (1927). <https://doi.org/10.1007/BF01397280>.

MARIANO, Artigas. Filosofia da natureza. Trad. José Eduardo de Oliveira e Silva. – São Paulo: Instituto Brasileiro de Filosofia e Ciência “Raimundo Lúlio” (Ramon Llull), 2005.

POLKINGHORNE, J.C. Teoria Quântica: Uma Breve Introdução. Trad. de Iuri Abreu. Porto Alegre, RS: L&PM, 2019.

TAYLOR, J. R. Mecânica Clássica. [s.l.] Bookman Editora, 2013.

TOMÁS DE AQUINO, Santo Tomás de. Opúsculos sobre a natureza. Trad. Luiz Astorga. Porto Alegre, RS: Editora Concreta, 2017.

WEINBERG, S. The Quantum Theory of Fields – Foundations (Volume 1). Cambridge: Cambridge University Press, 1995.

* * *