

UNIVERSIDADE FEDERAL DE ALFENAS

Mateus Jesus de Oliveira Rodrigues

**Discussão do conceito de espaço absoluto: uma análise acerca do
experimento do balde de Newton**

Alfenas/MG

2023

Mateus Jesus de Oliveira Rodrigues

**Discussão do conceito de espaço absoluto: uma análise acerca do
experimento do balde de Newton**

Trabalho de conclusão de curso apresentado como parte dos requisitos para obtenção do título de licenciatura em Física pela Universidade Federal de Alfenas. Área de concentração: Física geral.

Orientador: Prof. Dr. Artur Justiniano Roberto Júnior

Alfenas/MG

2023

Sistema de Bibliotecas da Universidade Federal de Alfenas
Biblioteca Unidade Educacional Santa Clara

Rodrigues, Mateus Jesus de Oliveira.

Discussão do conceito de espaço absoluto: uma análise acerca do experimento do balde de Newton / Mateus Jesus de Oliveira Rodrigues. - Alfenas, MG, 2023.

55 f. : il. -

Orientador(a): Artur Justiniano Roberto Júnior.

Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação em Física) - Universidade Federal de Alfenas, Alfenas, MG, 2023.

Bibliografia.

1. Espaço absoluto. 2. Força gravitacional. 3. Balde de Newton. 4. Mecânica Relacional. 5. Informação. I. Júnior, Artur Justiniano Roberto, orient. II. Título.

Mateus Jesus de Oliveira Rodrigues

**Discussão do conceito de espaço absoluto: uma análise acerca do
experimento do balde de Newton**

A Banca abaixo-assinada, aprova o trabalho de conclusão de curso apresentado como parte dos requisitos para obtenção do título de licenciatura em Física pela Universidade Federal de Alfenas. Área de concentração: Física geral.

Aprovada em: 14 de abril de 2023

Prof. Dr. Artur Justiniano Roberto Júnior
Universidade Federal de Alfenas

Assinatura:

Prof. Dr. Péerson Pereira Neves
Universidade Federal de Alfenas

Assinatura:

Prof. Dr. Tiago José Arruda
Universidade Federal de Alfenas

Assinatura:

Ofereço essa monografia aos meus familiares e aos professores que pacientemente escutam minhas indagações e ajudam a torná-las melhores.

O que observamos não é a natureza em si, mas a natureza exposta ao
nosso método particular de questionamento.

(HEISENBERG, 1971)

RESUMO

Isaac Newton (1643 – 1727) no livro ‘Princípios Matemáticos de Filosofia Natural’, antes de definir as três leis da dinâmica, se preocupou em discutir o conceito de espaço absoluto. O espaço absoluto é, segundo ele, em sua própria natureza, sem relação com qualquer coisa externa, homogêneo em qualquer ponto e imóvel, sendo impossível determinar sua velocidade em relação a nenhum outro referencial inercial. Sendo assim, o espaço absoluto é uma entidade que se encontra parada em relação a qualquer coisa no Universo, sendo a inércia dos corpos, através dos referenciais inerciais, medida em relação a ele. Em defesa da existência de um sistema de referência inercial absoluto, Newton apresenta o famoso experimento do balde, do qual os resultados e análise a partir de suas teorias poderiam distinguir o movimento absoluto do relativo. Influenciados por essa definição de Newton e pelas críticas a ela, realizadas por Ernst Mach (1838 – 1916) em sua obra: A ciência da mecânica (1883) e por André Koch Torres Assis em seu livro Mecânica Relacional (1998), desenvolvemos uma simulação computacional 3D do experimento do balde de Newton, em linguagem Python, com o programa UPBGE Blender; um programa avançado para criação de jogos. Mostraremos que a simulação pode ser utilizada como uma ferramenta para a visualização do experimento do balde de Newton e para uma discussão a respeito da validade do conceito de espaço absoluto a partir dos trabalhos de Newton, Mach e Assis.

Palavras-chave: espaço absoluto; força gravitacional; mecânica relacional; princípio de Mach; teoria do movimento; balde de Newton; informação; simulação

ABSTRACT

Isaac Newton (1643 - 1727) in the book 'Mathematical Principles of Natural Philosophy', before defining the three laws of dynamics, was concerned with discussing the concept of absolute space. Absolute space is in its very nature, unrelated to anything external, homogeneous at every point, and immovable; being an inertial reference frame, but impossible to determine its speed in relation to any other inertial reference frame. Thus, absolute space is an entity that is stationary in relation to anything in the universe and the inertia of bodies, through inertial references, would be measured in relation to it. In defense of the existence of an absolute inertial reference system, Newton presents the famous bucket experiment, whose results and analysis from his theories could distinguish absolute from relative motion. Influenced by Newton's definition and by the criticisms made by Ernst Mach (1838 - 1916) in his work: The science of mechanics (1883) and by André Koch Torres Assis in his book Relational Mechanics (1998), we developed a 3D computational simulation of Newton's bucket experiment, in Python language, with the UPBGE Blender software – advanced software for game creation. We are going to show that the simulation can be used as a tool for the visualization of Newton's bucket experiment and for a discussion about the validity of the concept of absolute space based on the works of Newton, Mach and Assis.

Keywords: absolute space; gravitational force; relational mechanics; Mach's principle; theory of motion; Newton's bucket; information; simulation

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	10
2	DESENVOLVIMENTO	13
2.1	REFERENCIAIS INERCIAIS E FORÇAS FICTÍCIAS NA MECÂNICA NEWTONIANA	13
2.2	O EXPERIMENTO DO BALDE DE NEWTON E SUAS CONSEQUÊNCIAS	16
2.2.1	O balde de Newton e a Mecânica Relacional	21
2.2.2	Uma simulação sobre o experimento do balde de Newton	27
3	CONSIDERAÇÕES FINAIS	34
	REFERÊNCIAS	54
	APÊNDICES	55

1 INTRODUÇÃO

É importante salientar que o autor irá expor suas próprias ideias através de um diálogo com aquelas já bem estabelecidas na comunidade científica, objetivando chegar a resultados, ou pelo menos convencer o leitor a partir de passos lógicos e uso de leis e fenômenos físicos bem conhecidos. No decorrer da graduação, na análise e tratamento de sistemas físicos importantes, chega-se num dilema que ainda se encontra na base da física clássica ou talvez de toda a ciência física que justifica ser explorado aqui: o espaço é ou não absoluto? Ao falarmos sobre o Universo, e seu desenvolvimento, é necessário primeiramente, dentro desse domínio, falar sobre essa entidade, ou pelo menos buscar entender melhor o que é aquele referencial privilegiado invocado por Isaac Newton para amenizar a ansiedade que a falta de um lhe causava quando tentava analisar medidas entre os vários sistemas do Universo. Ansiedade que Ernst Mach (1838 – 1916), progenitor da teoria de movimento hoje chamada de Mecânica Relacional, também teve, mas que não o fez teorizar uma entidade imutável quase que independente do Universo.

Albert Einstein (1879 – 1955), por sua vez, tentou combinar totalmente suas ideias com as de Mach não obtendo o sucesso que buscava, apesar de que ainda continua usando do espaço absoluto de Newton e consegue desenvolver uma teoria essencialmente relativística. A razão para iniciarmos aqui é bastante simples; toda medida exige um referencial, seja para a medida de um comprimento, ou a medida de um intervalo de tempo, medidas em relação ao quanto um pulso luminoso percorre num certo intervalo de tempo e quantas transições os relógios atômicos realizam, respectivamente. Fazemos isso para que ao tirarmos medidas de um mesmo corpo em qualquer parte do mundo, todos tenham o mesmo resultado que é um múltiplo ou fração do referencial padrão estabelecido.

No entanto, quando estamos falando de medidas baseadas no movimento de corpos, não é possível estabelecer um referencial padrão em relação ao qual todas as medidas possíveis de serem realizadas tenham um mesmo resultado, ou seja, nesse caso não é possível ter um consenso sobre qual movimento é de facto e pode ser medido como tal ou não é. Para isso teríamos que ter certeza de que todos os referenciais que realizaram tais medidas estavam num estado de movimento ou repouso tal que não influenciasse em qualquer medida, ou que, através de algum parâmetro, todos estivessem parados uns em relação aos outros e em relação ao

corpo de medida.

Poderia existir, no Universo, um referencial privilegiado em relação ao qual qualquer corpo poderia manifestar sua inércia ou capacidade de movimento, apesar de outros referenciais aleatórios não concordarem com sua medida? Ou qualquer medida de movimento precisa ser sempre relativa, ou seja, não existem movimentos absolutos? Para afinar e sintetizar o que será discutido, pode-se invocar um experimento mental comum: sabemos que a Terra gira ao redor de seu próprio eixo com uma velocidade de aproximadamente 1700 km/h e que tal movimento causa um leve achatamento nos polos, porque a massa tende a se afastar mais do centro do planeta na região do equador pela ação das chamadas forças centrífugas e o volume total precisa ser mantido constante.

Podemos facilmente afirmar que tal rotação, e medida de manifestação de inércia, é em relação às estrelas fixas lá longe ou em relação a um corpo parado em relação a um referencial que, assim como as estrelas fixas, aparenta não mudar seu estado de movimento para que assim obtenhamos comparações confiáveis. Além disso, como poderíamos saber ou medir isso? Existe alguma interação nesse caso que nos permite diretamente inferir que ela gira e mantém seu estado de movimento? E se, numa situação hipotética, todos os corpos do Universo desaparecessem menos a Terra? Alguém poderia dizer que a Terra seguiria seu caminho na tangente da órbita para o infinito sem a influência gravitacional do Sol ou de qualquer corpo, mas ainda teria que existir o achatamento nos polos? Ou melhor, nesse caso ainda teria sentido falar em rotação ou movimento retilíneo uniforme tal qual podemos medir? Tal rotação seria em relação a quê? Ao nada, ao espaço vazio? Existe um espaço vazio como entidade física real em relação ao qual os corpos podem manifestar inércia? Por fim, a Terra ainda teria inércia?

Os escritos no Principia (1687) de Isaac Newton nos permitem vislumbrar qual seria sua resposta para essa pergunta: ainda existiria o achatamento, uma vez que o movimento verdadeiro é aquele que se dá em relação ao próprio espaço vazio. No entanto, após as ideias de Newton, naturalmente outras foram surgindo, e nem todas elas concordam com a hipótese de o espaço ser absoluto. Para Ernst Mach, físico e filósofo austríaco que contribuiu também nas áreas da Ótica, mecânica e dinâmica das ondas, o achatamento não poderia mais ocorrer, pois a inércia de qualquer corpo se deve a uma interação holística mútua com todos os corpos ou massas do Universo, não existindo movimentos absolutos, mas apenas

relativos à alguma coisa.

Tais concepções vão influenciar cientistas como Gustav Holzmüller (1844 – 1914), François Tisserand (1845 – 1896), Wilhelm Eduard Weber (1804 – 1891), Albert Einstein e o brasileiro André Koch Torres Assis (1962) na implementação e desenvolvimento da Mecânica Relacional. Seria então o espaço um meio que participa ativamente da dinâmica de processamento do movimento dos corpos ou apenas um plano de fundo inerte e sem existência física independente que só observa a interação entre os corpos criarem toda a dinâmica? Será o espaço uma entidade que manifesta a existência e dinâmica dos corpos ou são os corpos que dão significado físico ao espaço? Até onde a nossa linguagem de medida é realmente capaz de ir para nos ajudar a alcançar alguma conclusão verdadeiramente coerente acerca da real natureza do espaço e seus componentes?

Podemos afirmar negativamente que não muito longe, mas com as descobertas mais recentes, obtemos pistas que nos levam a crer que o espaço não pode ser considerado de todo como inerte ou passivo na zona da manifestação do mundo físico, mas sim como um meio banhado por campos e potencial infinito de criações e aniquilações momentâneas de energia, observável na teoria quântica de campos proposta no século XIX. Além disso, uma entidade flexível, capaz de sofrer transformações, deformações e mudanças de estrutura e expansão como na Relatividade Geral (1915, Albert Einstein).

Mas numa análise fisicamente mais profunda, que fenômeno ou processo físico poderia estar por trás do achatamento dos polos da Terra devido ao seu movimento absoluto em relação ao espaço vazio de Newton, ou devido ao seu movimento relativo em relação aos corpos do Universo em Mach? Seria possível chegar em um denominador comum entre elas? Que propriedade o espaço vazio poderia ter para que a Terra, na ausência de outros corpos, sofresse achatamento? Ou que propriedade teria de ter as massas do Universo a fim de serem elas e, somente elas, a causa ou referencial verdadeiro para o achatamento?

Para os adeptos da Mecânica Relacional, a propriedade que pode ser usada para se escolher a segunda hipótese é a gravidade, pois para eles a interação gravitacional entre corpos em movimento se dá de maneira diferente da interação gravitacional entre corpos em repouso; sendo essa interação universal de grande escala a tal interação mútua entre todos os corpos do Universo, proposta por Mach, a responsável pela inércia de qualquer corpo (Mecânica relacional, 1998).

Apesar dessas perguntas espelharem a profundidade das indagações aqui, o nível desse trabalho teria de ser outro para abarcar tais áreas de pesquisa, assim como uma metodologia experimental e teórica bem mais avançada do processo; por isso usa-se uma dinâmica de indagações mais simples de lógica e recorrência dedutiva de ideias que buscam vislumbrar a sombra de um fenômeno físico mais complexo. Respostas para essas perguntas podem ajudar a responder à pergunta magna desta seção e também descobrir possíveis cenários para a dinâmica geral de nosso Universo, mas que não serão explorados nesse trabalho.

2 DESENVOLVIMENTO

2.1 REFERENCIAIS INERCIAIS E FORÇAS FICTÍCIAS NA MECÂNICA NEWTONIANA

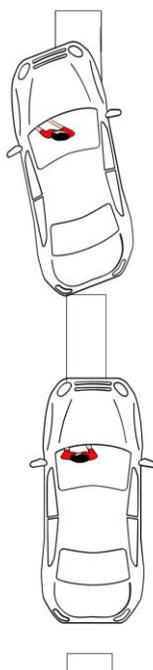
Isaac Newton na formulação de sua mecânica em 1687 no livro 'Princípios Matemáticos de Filosofia Natural', antes mesmo de definir as três leis da Dinâmica, se preocupa em discutir sobre a distinção entre as noções absolutas e relativas de espaço, tempo e movimento. Isso é naturalmente justificável, pois para incorrer sobre grandezas tais como aceleração e velocidade, essencialmente relativísticas, precisaria esclarecer como escolher o referencial em relação ao qual poderiam ser medidas corretamente ou sem complicações adicionais. Newton chamou tal referencial de inercial; trata-se de um sistema de referência que está em movimento retilíneo uniforme, ou em repouso, em relação ao referencial daquilo que chamou de espaço absoluto ou espaço vazio.

O espaço absoluto é, segundo ele, *em sua própria natureza, sem relação com qualquer coisa externa, homogêneo em qualquer ponto, imóvel e sempre similar; sendo um referencial inercial, mas impossível de determinar sua velocidade em relação a nenhum outro referencial inercial*. Sendo assim, o espaço absoluto é uma entidade que se encontra parada em relação a qualquer coisa no Universo e a inércia dos corpos, também através dos referenciais inerciais, deveria manifestar-se em relação direta a ele.

Para determinar se um sistema pode ser ou não considerado inercial, é necessário analisar todas as acelerações presentes no sistema e determinar se suas causas podem ser explicadas por agentes físicos de força como massas(gravidade),

cargas elétricas, molas, atritos, magnetismo, etc. Se houver alguma aceleração ou tendência que não possa ser explicada através de uma interação física conhecida, pois para existir aceleração é necessário existir uma força na Mecânica Newtoniana, então o referencial é considerado não inercial, ou seja, está acelerando em relação ao referencial do espaço absoluto; nesse caso surgem as chamadas forças fictícias cuja aceleração associada é igual à aceleração do sistema em relação ao tal espaço absoluto. Para tornar isso mais claro, podemos imaginar a seguinte situação ilustrada na figura 1:

Figura 1 – Um carro fazendo curva e acelerando em relação ao espaço absoluto de Newton.



Fonte: Adaptado pelo autor.

Imagine o sistema composto de um carro em MRU (movimento retilíneo uniforme) com seu motorista, prestes a realizar uma curva. Invoquemos dois referenciais para analisar o fenômeno: um referencial fixado no próprio motorista dentro do carro, e um fora dele, com uma visão superior, assim como mostrado na figura 1. Na perspectiva do motorista, ao realizar a curva para a esquerda, uma força parecerá o impelir para o sentido contrário, ou seja, para a direita do carro; se por algum motivo lhe faltasse a memória de que acabou de entrar numa curva, ou que, numa outra situação hipotética, fosse um passageiro incapaz de enxergar ou escutar do lado de fora do veículo, poderia muito bem afirmar que um fantasma ou impulso desconhecido o puxou de repente naquela direção.

Mas temos o referencial do lado de fora do carro que nos permite privilegiadamente inferir que a aceleração que o passageiro teve para direita pode ser facilmente explicada pela força de atrito que impeliu o carro a se manter na pista apesar da curva para a esquerda, e também pela inércia do motorista que o tende a manter em movimento retilíneo uniforme como estava antes com o carro. Sendo assim, o sistema carro não pode ser considerado um referencial inercial, pois qualquer um que esteja dentro dele não pode determinar ou prever a causa de certos movimentos e acelerações sem considerar interações ou dinâmicas externas ao sistema analisado.

De maneira mais formal, o carro acelera para fazer a curva em relação a um referencial inercial, que neste caso é a Terra¹: é um referencial que não sofre uma aceleração em relação ao referencial absoluto, ou se encontra parado em relação a ele e, conseqüentemente, não influencia na dinâmica de movimento do sistema de medida. Por isso, pode ser considerada uma extensão do próprio espaço absoluto ou uma réplica referencial “dinâmica” dele para qualquer medida coerente e previsível do movimento. Em síntese, a aceleração para a direita que o motorista sofre é igual à aceleração que o sistema carro tem em relação ao espaço absoluto ou algum referencial inercial cuja Terra pode ser considerada; tornando tal aceleração puramente fictícia ou causada por uma força com o mesmo adjetivo.

Apesar de no tempo de Newton não existirem veículos velozes, ele certamente invocaria essa explicação se estivesse dirigindo um, porém a aceleração sentida por ele não precisa necessariamente, nesse caso, ser explicada dessa forma. Pode-se afirmar, quase sem nenhum problema de ordem prática, que a causa da aceleração para a direita é devida à força de atrito entre a Terra e os pneus do carro, sem precisar necessariamente invocar um espaço absoluto ou referenciais privilegiados. Além disso, que o passageiro apenas tende a manter seu movimento retilíneo e inércia em relação às estrelas fixas ou corpos com massa e não em relação a um espaço absoluto.

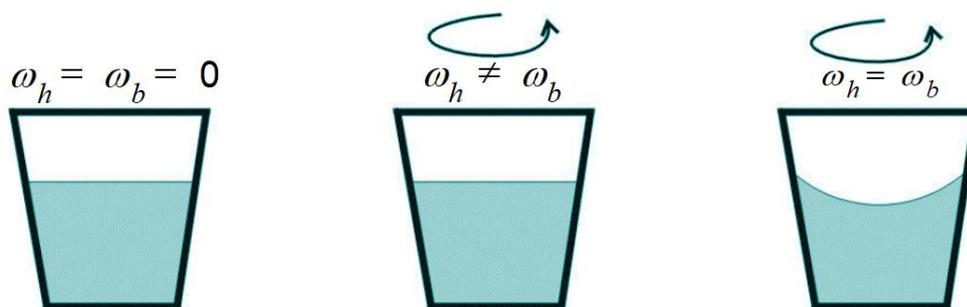
¹ É importante evidenciar que, apesar da Terra possuir movimento de rotação e translação, para essa situação, ela pode ser considerada um referencial inercial, pois tais movimentos não influenciam em quase nada na dinâmica do carro. No entanto, existem situações em que tais movimentos e aceleração devem influenciar diretamente nas medidas que realizamos, sendo o caso dos fenômenos de grande extensão como ciclones e correntes atmosféricas ou marítimas.

No entanto, aceitar essa última hipótese significa aceitar também que a força para a direita que o motorista observa é uma força tão fisicamente real quanto a força de atrito entre o solo e os pneus (A ciência da mecânica, 1893), uma vez que não pode ser considerada fictícia pela justificativa de existir uma entidade imóvel em relação ao qual o referencial que mede pode acelerar. Mas, a fim de dar luz sobre tais situações, Newton pensa a respeito de baldes com água. Nesses não há forças de atrito e processos tão evidentes que expliquem as dinâmicas presentes, assim como nos permite inferir que se um referencial absoluto não existe, as coisas começam a ficar contraintuitivas. Sendo assim, a favor da existência de um sistema de referência absoluto, Newton apresenta a famosa experiência do balde, do qual resultados e análise a partir de suas teorias poderia ajudar a distinguir o movimento absoluto do relativo.

2.2 O EXPERIMENTO DO BALDE DE NEWTON E SUAS CONSEQUÊNCIAS

O experimento consiste em um balde com água suspenso por uma corda onde três situações instantâneas distintas podem ser analisadas desse sistema, como mostra a figura 2:

Figura 2 – o experimento do balde de Newton. ω_h é a velocidade angular da água e ω_b é a velocidade angular do balde.



Fonte: Adaptado de Filosofia da Física Clássica – Prof. Osvaldo Jr. Cap. 12, pág. 89. Figura 12.2.

A primeira situação representa o balde e a água naturalmente em repouso com relação à superfície terrestre e a superfície da água é plana; caso em que a velocidade angular da água é igual à velocidade angular do balde e igual a zero ($\omega_h = \omega_b = 0$). Na segunda situação em sequência da figura 2, ainda em relação à Terra

ou um observador parado nas proximidades, o balde é posto a girar com velocidade angular constante, mas nesse primeiro momento, enquanto começa a compartilhar da velocidade do balde através do atrito e pouca viscosidade, a água continua parada, estando em movimento apenas camadas de moléculas em contato com as paredes do balde, o que é desprezado, pois ainda não pode gerar concavidade. Nesse caso, a velocidade angular média da água é diferente da velocidade angular do balde ($\omega_h \neq \omega_b$).

Após algum tempo, a água passa a girar com a mesma velocidade angular que o balde e o que se observa é uma tendência de se afastar do centro de rotação, assim como o motorista ao fazer a curva acentuada; sua superfície deixa de ser plana e toma a forma de um parabolóide de revolução. Aqui a velocidade angular da água passa a ser igual à velocidade angular do balde novamente, porém diferente de zero como mostra a terceira situação na figura 2 ($\omega_h = \omega_b$).

Sabe-se que tal comportamento é devido à aceleração radial sofrida pela água que tende a sair pela tangente sendo impedida pelas paredes do balde, porém a primeira pergunta que Newton faz é se tal aceleração possui como causa uma força bem definida ou seria o efeito de uma força fictícia? É lógico que, da perspectiva de um referencial inercial, o efeito é causado por uma força fictícia no referencial girante do balde, mas em qual referencial inercial isso pode ser coerentemente afirmado? Invocando o exemplo do motorista: ao analisarmos o referencial de fora ou perspectiva da figura 1, descobrimos que o carro estava acelerado em relação à Terra através de uma força de atrito e por isso ocorreram as acelerações “fantasmas” no motorista; mas e nessa situação, quem faz o papel da Terra e da força de atrito para que a água acelere e se torne côncava?

Em relação a que referencial tal aceleração radial se dá? Newton analisa possíveis candidatos para esse referencial: o próprio balde, a Terra, e as estrelas fixas. De imediato, Newton descarta o balde, pois estando em repouso como na primeira situação da figura 2, ou em movimento na terceira situação, a velocidade relativa entre ele e a água é nula, não podendo induzir a aceleração que afasta as moléculas do centro. Acelerações implicam em diferenças de velocidades entre os corpos ou possíveis referenciais que interagem aqui.

A segunda situação da figura 2 mostra que o atrito entre o balde e a água não é suficiente também para criar a concavidade, uma vez que se fosse, logo no início do movimento, a água já perderia sua superfície plana e não é o que ocorre. Além

disso, se a Terra e todo o Universo ao redor do balde desaparece, colocando o sistema de referência no balde, a água precisaria estar parada nas duas situações, pois está parada também em relação ao balde. Se todo e qualquer movimento que se possa conceber se limita ao sistema balde água, e ambos estão parados um em relação ao outro, é impossível conceber qualquer aceleração que não seja causada por um agente conhecido de força, não podendo surgir então a concavidade.

Seguindo a análise, Newton precisa descartar a Terra, pois, nesse caso, a única interação real que ocorre entre ela, o balde e a água é a força gravitacional; de fato, sua teoria da gravitação não depende da velocidade ou aceleração relativas, mas apenas da distância relativa r . Portanto, não importa se o balde esteja parado ou girando, a interação exercida pela Terra será sempre a mesma e a superfície da água teria de ser plana em todas as situações, uma vez que o resultado físico e matemático esperado para cada uma de tais situações é o mesmo.

Para conceber que a Terra é a causadora do efeito, a única interação que existe entre ela e a água teria de ser suficiente para explicar o efeito, porém em sua forma matemática a teoria de gravitação de Newton não prevê a existência de comportamentos físicos distintos para tal fenômeno apesar dos distintos comportamentos observados da água em cada situação; ver equação 1.

Equação 1 - Força gravitacional de acordo com a Mecânica Newtoniana. G é a constante gravitacional universal, m_{g1} e m_{g2} , massas dos corpos interagentes e r é a distância relativa entre tais massas. Tal equação não prevê os diferentes comportamentos nas diferentes situações da figura 2, o que faz Newton invocar um espaço absoluto.

$$\vec{F} = G m_{g1} m_{g2} \frac{\hat{r}}{r^2}$$

Newton descarta também as estrelas fixas devido a uma dinâmica básica que talvez não seja muito intuitiva e que é um dos paradigmas centrais para os teóricos críticos de um referencial absoluto; ao se julgar de início que não existe um referencial privilegiado no Universo, ou que não é o espaço absoluto que determina qualquer movimento verdadeiro, é necessário aceitar de antemão que, numa situação onde é a Terra ou as estrelas fixas que determinam o movimento relativo de qualquer corpo, não poderá mais existir distinção real entre translação e rotação, ou seja, não faz nenhuma diferença física o balde com a água rotacionar no sentido horário ou todos os corpos do Universo, inclusive a Terra, girarem no sentido anti-

horário ao redor do balde parado, por passarem a ser movimentos puramente equivalentes numa simetria real simultânea em que, se um parar e o outro continuar, não veríamos nenhuma diferença na dinâmica de forças e acelerações.

Isso eleva o patamar das forças fictícias para forças reais criadas por interação entre massas, interação esta que pode ser considerada majoritária e efetivamente como de natureza gravitacional. Nas palavras do próprio Mach: “*tente fixar o balde de Newton – e girar o céu das estrelas fixas... e, então... – prove a ausência de forças centrífugas*”. Dessa forma, nessas duas situações fisicamente complementares, a água teria que subir as paredes do balde, pois o que existe é um tipo de movimento relativo por intermédio gravitacional entre ela, o balde e todas as outras massas do Universo, gerando força gravitacional adicional responsável pela força centrífuga que acelera a água radialmente – ver seção 2.2.1.

Aceitar essa hipótese significa aceitar também que a formulação matemática da força gravitacional entre corpos proposta por Newton na equação 1 deve estar incompleta. Como veremos adiante, a Mecânica Relacional do movimento puramente relativo de André Assis implementa que a influência gravitacional da equação 1 não deve depender apenas da distância relativa entre os corpos, mas também da velocidade e acelerações relativas entre eles. Newton não tinha motivos a partir de suas teorias para aceitar essa hipótese, pois não via como um possível movimento de translação das estrelas fixas ao redor do balde poderia causar a concavidade na superfície da água; era intuitivo para ele pensar que um movimento circular, em relação ao espaço absoluto, da casca esférica de massa aproximadamente homogênea das estrelas fixas apenas as fariam se afastar da Terra como indica um trecho de sua escrita:

“Os efeitos que distinguem movimento absoluto de relativo são as forças que agem no sentido de provocar um afastamento a partir do eixo do movimento circular. Pois não há tais forças em um movimento circular puramente relativo; mas em um movimento circular verdadeiro ou absoluto elas são maiores ou menores, dependendo da quantidade de movimento.”
ISAAC NEWTON, *PRINCIPIA*.

“Se para cada ponto de uma superfície tenderem forças centrípetas iguais, que diminuem com o quadrado das distâncias a partir desses pontos, afirmo que um corpúsculo localizado dentro daquela superfície não será atraído de maneira alguma por aquelas forças. (...)” – Teorema 30, *principia* livro III.

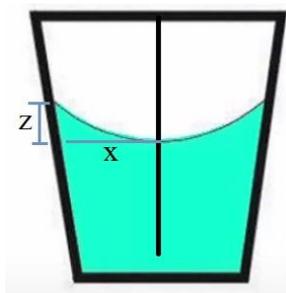
A influência gravitacional de todas as estrelas sobre o balde teria de ser anulada pela simetria espacial dessa casca esférica homogênea tendo o balde como centro – julgando um Universo infinito com um número infinito de estrelas em todas as direções como se pensava na época. Novamente, as estrelas fixas só poderiam influenciar no balde se uma mudança na lei da gravitação de Newton, o qual é a única interação física expressiva entre os corpos desse sistema, fosse feita de modo que a influência gravitacional de um corpo sobre o outro passasse a depender também de seus estados de movimento, coisa que Newton não tinha motivos para concretizar, mas feito com relativo sucesso por outras vertentes de estudo sobre o tema atualmente.

Sendo assim, como nenhum referencial inercial poderia ser usado para explicar o efeito na água, Newton concluiu que deveria haver um referencial espacial imaterial e absoluto em relação ao qual se dava tal aceleração da água; só poderia ser um espaço absoluto em relação ao qual movimentos verdadeiros ocorrem e movimentos fictícios são medidos por referenciais acelerados em relação a ele. A equação 2 é o resultado matemático para o deslocamento vertical sofrido pela água na Mecânica Newtoniana. z é o quanto a água sobe pelas paredes em relação ao ponto de mínimo do parabolóide como na figura 3, ω é a velocidade angular do balde, nesse caso em relação ao espaço absoluto, x é a distância em relação ao centro de rotação do balde que se quer medir a altura da água z . g é a aceleração da gravidade local.

Equação 2 - deslocamento vertical z sofrido pela água no balde. ω é a velocidade angular do balde, x é a distância em relação ao eixo de rotação e g é a aceleração da gravidade local.

$$z = \frac{\omega^2}{2g} x^2$$

Figura 3 - principais grandezas envolvidas na elevação vertical z sofrida pela água no balde girante.



Fonte – adaptada pelo autor.

Sendo assim, da perspectiva da Mecânica Newtoniana, a água acelera devido a uma força fictícia gerada pelo referencial do balde cuja velocidade angular ω só pode ser efetivamente concebida em relação ao espaço absoluto, assim como na equação 2. Espaço absoluto este que, por sua imutabilidade e homogeneidade, exclui a necessidade de uma interação física conhecida para explicar a inércia da água. A inércia pode ser vista aqui como a capacidade que os corpos tem de mudar perante algo absolutamente imutável, sendo o movimento verdadeiro a mudança que ocorre nessas condições; dessa forma a inércia pode ser pensada como uma propriedade intrínseca a qualquer corpo que se manifesta quando medida em relação ao referencial absoluto.

2.2.1 O balde de Newton e a Mecânica Relacional

Como já dito anteriormente, a ideia de um espaço absoluto foi alvo de diversas discussões e oposição, tendo Ernst Mach como um ponto de inflexão para o desenvolvimento de novas ideias conhecidas como princípios de Mach ou Teses Relacionais. Em sua obra *A ciência da Mecânica* (1883), ele afirma não ser necessário invocar a existência de um referencial absoluto para explicar o balde de Newton, bastava considerar que as estrelas fixas e as massas do Universo é que estabelecem o referencial e a interação efetiva a partir do qual se pode medir acelerações, velocidades e a inércia dos corpos.

Mach não chega a fazer alterações matemáticas nas equações da Mecânica Newtoniana vigente a fim de implementar seu princípio, mas sim outras figuras importantes depois dele que deram contribuições especiais ao desenvolvimento desse paradigma. Albert Einstein, ao formular sua teoria da Relatividade Geral, foi fortemente influenciado pelas ideias relacionais, apresentando quatro consequências

que qualquer teoria que implementasse o princípio de Mach teria que obter e que sintetizam parte da discussão que tivemos até aqui:

1.º: um corpo em um Universo vazio não deve ter inércia; ou toda inércia de qualquer corpo tem que vir de sua interação com outras massas do Universo.

2.º: a inércia de um corpo aumenta se nas suas vizinhanças se acumularem massas ponderáveis.

3.º: um corpo deve sofrer uma aceleração de mesmo sentido, quando massas vizinhas são aceleradas.

4.º: um corpo em movimento de rotação deve criar no seu interior um campo de Coriolis e um campo radial de forças centrífugas.

As duas primeiras hipóteses evidenciam a importância que a interação gravitacional entre os corpos possui nessa mecânica relativística, sendo a causa direta para a inércia dos corpos. A terceira, um pouco menos intuitiva, visa descrever como as acelerações relativísticas entre corpos devem se dar em situações específicas; numa situação hipotética em que dois corpos existem sozinhos no Universo e um deles acelera repentinamente num dado sentido, então o outro corpo também deverá sofrer a mesma aceleração devido à mudança no tempo da força gravitacional entre os dois gerada por tal aceleração relativa.

A quarta hipótese é o que determina a água acelerar radialmente na situação em que este está parado e todo o Universo gira ao redor no sentido oposto. Tais campos de Coriolis e de forças centrífugas também devem ter origem, numa visão moderna da teoria, por mudanças ou diferenças na interação gravitacional resultante, criadas pelas massas e grandezas relativas associadas como velocidade e aceleração. Mesmo ao pensar que a teoria da Relatividade Geral continha todos os resultados matemáticos esperados para assimilar o princípio de Mach, com o tempo Einstein teve de abandonar tais ideias devido a resultados que impediam a coexistência das duas teorias.

Um deles é que a relatividade não pôde prever a existência de um campo de força capaz de fazer a água manifestar concavidade no balde de Newton parado à medida que o Universo gira ao seu redor. De fato, com a Relatividade Geral, Einstein generalizou a Relatividade Restrita de tal forma que as leis da física tivessem uma estrutura cuja validade não permanecesse apenas em sistemas de referências

inerciais, mas também nos acelerados. Isso significava uma busca por equações que possuísem validade em qualquer sistema de coordenada e sobre qualquer lei da natureza – covariância geral.

Essa igualdade na forma das equações de movimento independente do sistema de referência não foi pensada por Mach e está enraizada na Relatividade Geral numa forte iniciativa conceitual teórica para se superar os problemas e a complexidade de se lidar com sistemas de referência. De fato, as primeiras soluções para a equação de campo gravitacional implicavam, como condição de contorno, que a métrica no infinito, ou para o Universo em totalidade, era a métrica de Minkowski igual àquela usada na Relatividade Restrita.

No entanto, isso vai diretamente contra o princípio de Mach, pois a métrica local do Universo não seria determinada apenas na distribuição e interação de matéria, mas também por condições de contorno adicionais. E isso, em última análise, implica que se o Universo fosse vazio, todos os corpos deveriam ainda sofrer inércia mesmo na ausência de outras massas; ou seja, numa métrica minkowskiana, uma espécie de espaço absoluto ainda precisa estar presente para que as condições de contorno usadas na Relatividade Geral sejam minimamente coerentes – nem mesmo a primeira consequência do princípio pôde ser completamente acatada.

Em suma, apesar das relatividades inicialmente parecerem implicar nas teses relacionais, isso não é verdade; elas são uma reformulação das noções que temos do próprio espaço e como ele dita a dinâmica de movimento e manifestação dos corpos do Universo independentemente de como um referencial aleatoriamente privilegiado mediria, uma linha conceitual e metodológica que esta escrita pretende ainda analisar. Tais fatos não significam que o princípio de Mach seja necessariamente falso, a valer pelo caso de John Archibald Wheeler (1964) que propôs a utilização do princípio a fim de encontrar condições iniciais de contorno na Relatividade Geral que fossem apropriadas para o Universo.

Tal discussão foi fortemente reacesa por André Koch Torres Assis em seu livro *Mecânica Relacional* (1998), em que propõe uma modificação na lei da gravitação de Newton para implementar matematicamente o princípio de Mach como mostra a equação 3. Seguindo um modelo de gravitação proposta inicialmente por Weber (1804 – 1891) na lei de Coulomb, conseguiu incluir termos que dependem da velocidade e da aceleração relativas entre os corpos interagindo gravitacionalmente

na lei da gravitação de Newton e com isso mostrou, pelo menos quantitativamente, que a velocidade das estrelas fixas em rotação ao redor do balde de Newton pode explicar o comportamento da água no balde girante sem necessariamente invocar um espaço absoluto ou referencial privilegiado.

Perceba que na equação 3, quando \dot{r} e \ddot{r} são nulos, ou seja, quando não existem velocidades ou acelerações relativas entre o balde de Newton e o Universo, a equação volta a ser a gravitação de Newton original dependendo apenas da distância relativa entre os corpos. Sendo assim, a água precisa estar plana devido à força gravitacional dada por esse resultado específico e prevê corretamente o comportamento da água na primeira situação da figura 2.

Porém, quando o balde ou o próprio Universo giram na terceira situação, uma resultante gravitacional diferente da primeira situação precisa ser medida, uma vez que a velocidade e aceleração relativas não são mais nulas, gerando uma sutil mudança na resultante de forças entre as duas situações à medida que o tempo passa. De fato, na terceira situação, onde existe um movimento relativo entre o balde e o resto do Universo, uma força gravitacional resultante maior devido ao movimento relativo, no plano normal ao eixo de rotação do balde, deve ser medida nas moléculas de água em relação à situação em que o balde e o Universo estão parados. Tal força adicional é a força responsável por fazer a água acelerar para as paredes do balde na direção das massas distantes, que explica o comportamento diferente da água na terceira situação, apesar das velocidades angulares serem iguais nas duas situações como mostra a figura 2. Essa força adicional é vista então na Mecânica Relacional como a força centrífuga que acelera a água e é, portanto, uma força real de origem gravitacional. Sendo assim, o teorema 30 de Newton não é mais válido aqui, pois ele considera apenas a distância relativa entre os pontos na casca esférica e não a velocidade e acelerações relativas entre eles que devem gerar influências gravitacionais adicionais e distintas. Nesse caso, o comportamento da água não é explicado apenas pelo movimento relativo entre os corpos ou referenciais privilegiados, mas sim pela diferença na intensidade da interação gravitacional causada por tais movimentos relativos em diferentes estados de movimento.

Equação 3 – Força de interação gravitacional entre duas massas. Para implementar o princípio de Mach, tal interação deve depender não apenas da distância relativa r , mas também da velocidade \dot{r} e aceleração relativa \ddot{r} entre as massas. G é a constante gravitacional, m_{g1} e m_{g2} as massas interagentes, c é a velocidade da luz. ξ é uma constante adimensional que usualmente é 6.

$$\vec{F} = -G m_{g1} m_{g2} \frac{\hat{r}}{r^2} \left[1 - \frac{\xi}{c^2} \left(\frac{\dot{r}^2}{2} - r \ddot{r} \right) \right]$$

A equação 4 é o resultado matemático quando se implementa o princípio de Mach para o deslocamento vertical sofrido pela água no contexto da Mecânica Relacional. z é o quanto a água sobe pelas paredes em relação ao ponto de mínimo do parabolóide como na figura 3, as outras grandezas independentes são as mesmas da equação 2 com exceção de ω_u que representa a velocidade angular do Universo. O fator $\omega - \omega_u$ na equação 4 descreve a dinâmica simétrica complementar que existe quando tratamos de um movimento puramente relativo, como no balde e nas estrelas fixas.

No referencial do balde que gira, o resto do Universo gira no sentido contrário, da mesma forma que vemos o Cosmos passar em cima de nossas cabeças na velocidade de rotação média da terra.

Equação 4 - deslocamento vertical z sofrido pela água no balde. ω é a velocidade angular do balde, ω_u é a velocidade angular do Universo ao redor do balde.

$$z = \frac{(\omega - \omega_u)^2}{2g} x^2$$

Assim como no referencial do Universo que gira é o balde que está girando num movimento complementar oposto que deve gerar a mesma realidade física mensurável; a água subir as paredes do balde. Na equação 4, tanto ω quanto ω_u podem gerar a elevação vertical da água independentemente de qual movimento rotacional estamos considerando, pois nesse paradigma, mesmo para rotações relativas surgem as forças centrífugas que possuem uma natureza gravitacional dada em geral pela equação 3. Isso sintetiza as palavras de Mach sobre a dinâmica de referenciais:

Não considerando aquele meio desconhecido do espaço [espaço absoluto], relativamente os movimentos do universo são os mesmos, quer adotemos o ponto de vista de Ptolomeu, quer adotemos o de Copérnico. Ambas as concepções são igualmente corretas; só que a última é mais simples e mais prática. O sistema do universo não nos é dado duas vezes, uma com a Terra em repouso e outra com a Terra em movimento; mas apenas uma única vez, com seus movimentos relativos, os únicos determináveis. [...] O experimento de Newton com o balde de água girante nos ensina apenas que a rotação relativa da água com respeito às paredes do balde não produz nenhuma força centrífuga perceptível, mas que tais forças são produzidas pela rotação relativa com respeito à massa da Terra e de outros corpos celestes. (p.232 – A ciência da Mecânica, Mach)

Em resumo, em qualquer ponto do Universo que se coloque o balde de Newton tal efeito pode ser observado, portanto, cada ponto do Universo pode ser considerado um centro de rotação/translação onde os corpos estão sobre um campo radial de forças centrífugas gravitacionais reais dadas entre as velocidades e acelerações relativas entre os corpos. Portanto, a inércia deve ser gerada aqui no cerne dessa dinâmica onde interações gravitacionais vigoram e permitem fazer medidas confiáveis do movimento puramente relativo entre os corpos. A tabela 1 sintetiza as diferenças fundamentais no que diz respeito a teoria do movimento entre a Mecânica Newtoniana de Isaac Newton e as teses relacionais de Ernst Mach e seus precursores.

Tabela 1: diferenças fundamentais entre a Mecânica Newtoniana e a Mecânica Relacional.

Mecânica Newtoniana	Teses Relacionais
O movimento absoluto é aquele que ocorre em relação a um referencial inercial absoluto.	Não existem referenciais absolutos, só existe o movimento relativo.
A inércia é uma propriedade intrínseca da matéria.	A inércia de um corpo é produto de sua interação global com o resto do Universo.

Forças fictícias surgem nos referenciais não inerciais, ou acelerados.	Forças centrífugas e de Coriolis são interações reais geradas pelo movimento relativo gravitacional entre um corpo e o resto do Universo.
O Universo não pode exercer influência sobre o balde girante.	Não existe distinção física entre rotação e translação no sistema formado entre o balde e o resto do Universo.

Fonte: elaborada pelo autor (2023).

2.2.2 Uma simulação sobre o experimento do balde de Newton

Ao estudar o experimento do balde de Newton percebe-se que não se trata de um problema de fácil compreensão, inclusive para aqueles que são da área, muitos menos para aqueles que nunca tiveram contato com qualquer dos temas mencionados; talvez seja por isso que seja um experimento muito pouco falado inclusive nas universidades, apesar de ser tão essencial e constituir a base de qualquer pensamento racional para compreender e realizar a medida daquilo que conhecemos como movimento.

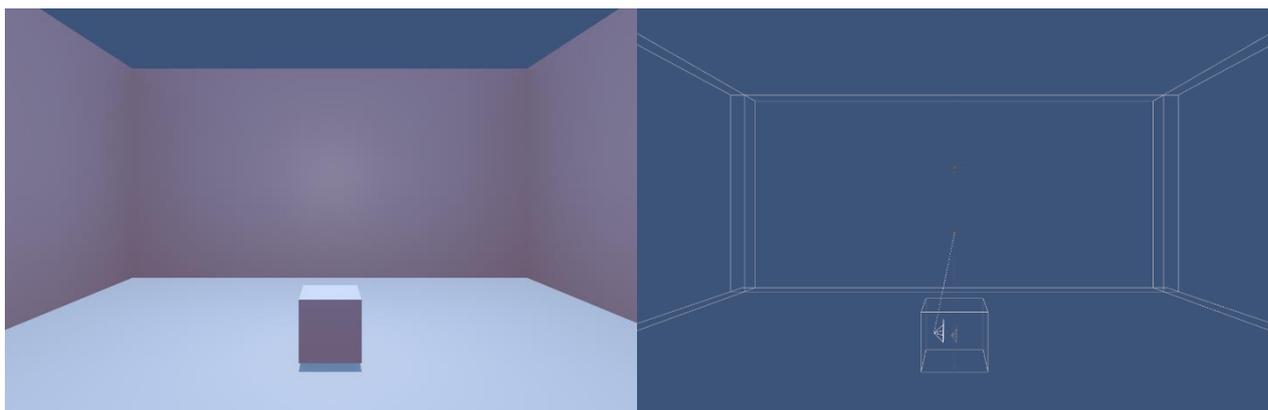
De fato, acompanhar de perto o raciocínio desenvolvido por Newton e de seus opositores, sem a ajuda de um recurso que permite visualizar diretamente parte da dinâmica que eles conceberam, é um desafio difícil de enfrentar. Uma simulação baseada na experiência do balde de Newton foi criada de modo a ajudar a observar melhor o fenômeno e com isso poder futuramente servir de recurso didático para alunos e professores. Chamo a atenção de que se trata de um programa que só pode ser aberto em computador e que talvez possa não funcionar em alguns sistemas operacionais.

No instantâneo da figura 4 é possível ver duas configurações distintas da interface principal do programa que representa uma sala sem teto com um cubo oco em seu centro, ambos podendo girar – todos os objetos usados são tridimensionais. O cubo faz o papel do balde de Newton onde são colocadas esferas sólidas homogêneas de tamanhos exagerados a fim de replicar a dinâmica das moléculas de água – ver figura 5. Uma das imagens na figura 4 mostra o sistema na forma de

estrutura de arame(*wireframe*) em que apenas as arestas e vértices são mostrados, permitindo uma visão do lado de dentro do balde e também do lado de fora da sala para o horizonte, à medida que a dinâmica ocorre.

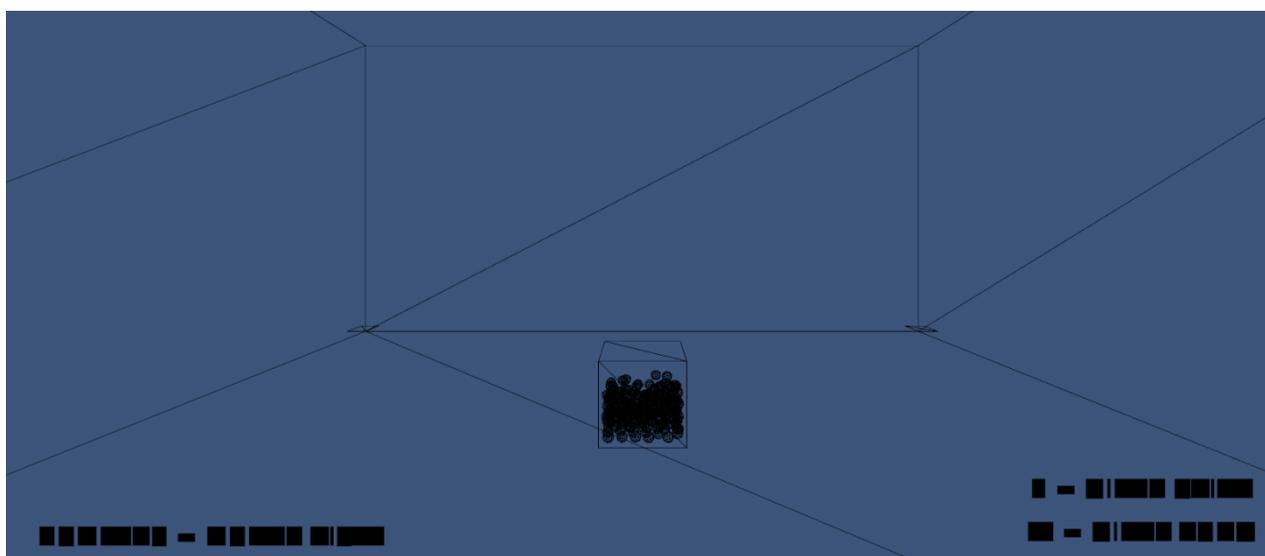
É importante poder ver do lado de fora da sala, pois qualquer objeto que se encontre no horizonte, pode servir como um referencial para analisar os fenômenos que ocorrem na sala – horizonte aqui e na simulação representa o espaço sideral, espaço vazio, o próprio Universo em extensão visível ou o próprio espaço absoluto de Newton. Dois referenciais são usados no programa, ou seja, temos duas visões; uma que observa tudo de dentro da sala e que tem a visão mostrada nas figuras 4 e 5, e outra que tem uma visão privilegiada do lado de fora do sistema como mostrado na figura 6.

Figura 4 – imagem esquerda: versão material da interface principal do programa com um cubo oco dentro de uma sala. Imagem direita: mesma interface em estrutura de arame para que se possa ver através dos objetos.

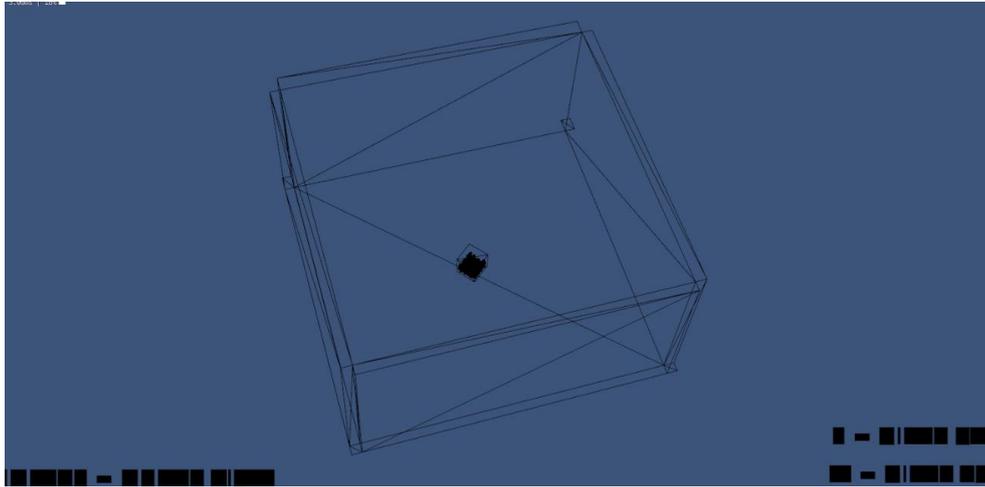


Fonte: feita pelo autor.

Figura 5 – cubo preenchido parcialmente com esferas sólidas homogêneas que são usadas para representar as moléculas de água dentro do balde de Newton.



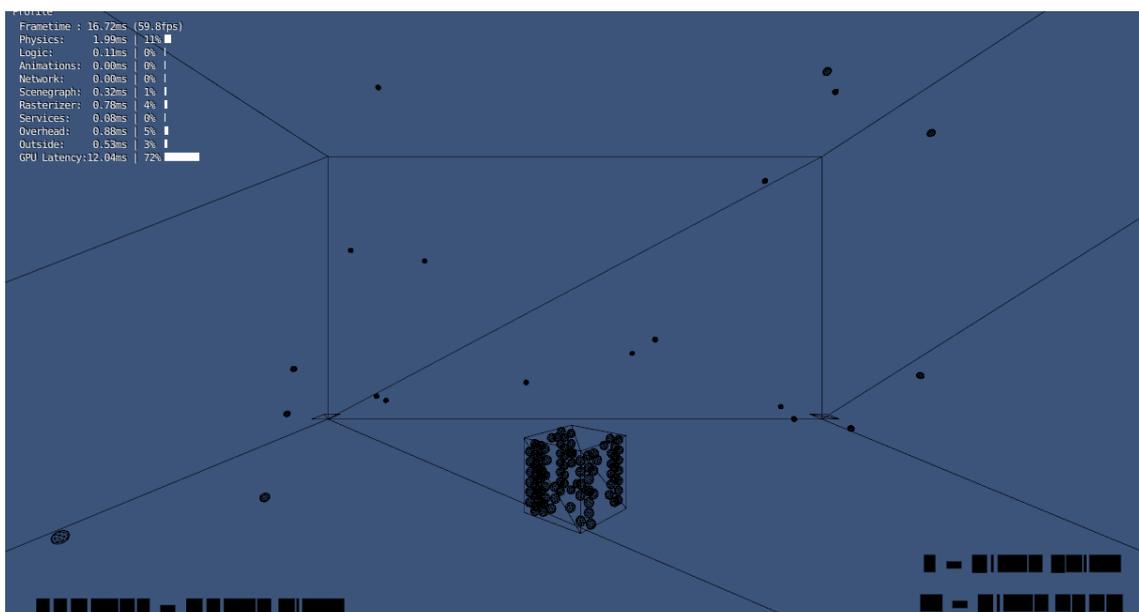
Fonte: feita pelo autor.



Fonte: feita pelo autor.

Como Newton não considera que as estrelas fixas, nem a Terra, podem influenciar a água, ou o cubo, em termos da relatividade do movimento e também gravitacionalmente, a fim de explicar os movimentos relativos da água, foram omitidas da interface e da física do programa; mas a gravidade da Terra ainda foi mantida para que as moléculas/esferas não flutuem aleatoriamente dentro do cubo e o programa fique mais fiel ao experimento original de Newton. De fato, se a gravidade da Terra é anulada no programa, o mesmo efeito ainda é alcançado quando o cubo é colocado a girar, pois ainda algumas esferas interagem com as paredes do cubo, transferem movimento entre si e se aglomeram nas arestas como pode ser visto na figura 7:

Figura 7 – cubo girando e sala em repouso com gravidade nula. Os mesmos comportamentos que se observam nas situações em que se usa a gravidade da Terra no programa são observados também sem gravidade.



Fonte: feita pelo autor.

De fato, mesmo anulando a gravidade de todos os corpos do programa, as forças centrífugas ainda podem ser observadas à medida que as esferas se aglomeram nas arestas do cubo e ocupam posições mais elevadas na vertical, assim como ocorre quando existe gravidade, da Terra ou qualquer outra, em outro instantâneo do movimento na figura 8. Porém, no programa, o que observamos não é um parabolóide de revolução perfeito ser formado à medida da rotação do cubo, nem esse pode ser seu objetivo essencial, pois para isso as esferas teriam de ser menores, com maior quantidade e ainda com geometrias e propriedades diferentes, mas sim a dinâmica essencial simples de as esferas maciças se aglomerarem nas arestas do cubo e começarem a compartilhar do movimento e velocidade angular dele depois de um tempo; é o que basicamente as moléculas de água no experimento original de Newton realizam à medida que o balde gira e que deve ocorrer mesmo na ausência de gravidade da Terra.

Portanto, podemos dizer que se trata de um mecanismo capaz de conceber a tendência de movimento do sistema como um todo, logo de sua capacidade de rotação, quase que de maneira independente de forças e interações externas; uma síntese visual dos argumentos de Newton sobre o fenômeno quando analisa os causadores do efeito observado na água e de como se pode medi-los coerentemente.

Em nossa análise, essa maneira de ver o experimento abre caminhos para problematizações acerca do embate entre as teorias discutidas nas seções anteriores no que tange a origem da inércia do sistema e que logo serão tratadas na forma de lógica e tentativa de reduções ao absurdo das situações criadas no programa. Se outros objetos fossem colocados fixos a uma certa distância no horizonte da simulação, poderíamos facilmente dizer que qualquer movimento que ocorra no sistema é em relação a esses objetos que podem fazer o papel das estrelas fixas.

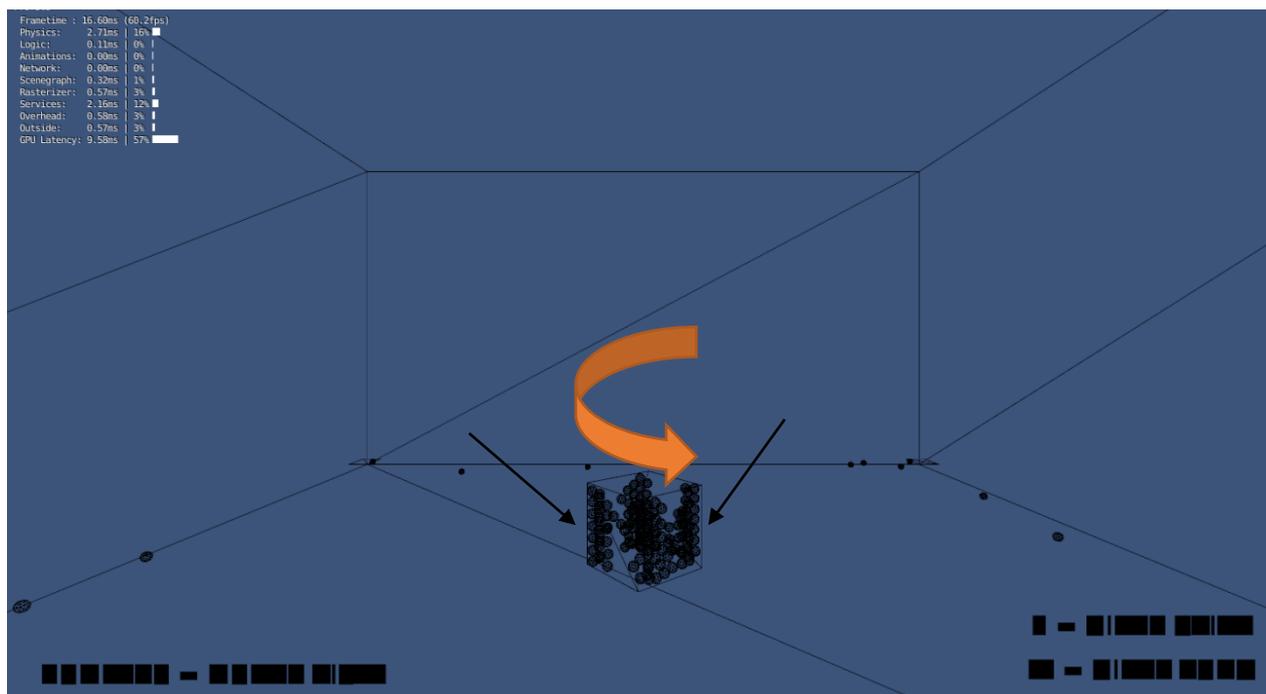
Porém, como já foi discutido aqui, constatar as estrelas longínquas passando pelo céu devido à rotação da Terra não significa necessariamente que tal rotação se dá em relação a elas. É importante enfatizar que a abordagem teórica usada no programa foi a de Newton e como tal deve ser direcionada; nem com isso cogita ser usada como argumento de prova a favor dessa teoria, mas sim como um recurso didático para se visualizar melhor o experimento do balde em si. Apesar disso, pode e deve ser usado também para analisar possíveis cenários no contexto da Mecânica

Relacional, pois o programa é capaz de abraçar os dois domínios de interpretação dos fenômenos assim como o próprio balde de Newton pode ser.

Dito isso, a melhor maneira de vislumbrar o programa é imaginando que não existe mais nada além da sala e do cubo, ou considerar que estão num espaço absoluto de Newton. Foi suficiente adicionar dois movimentos ao sistema: o primeiro é um movimento de rotação apenas do cubo, a fim de fazer com que as esferas reproduzam o efeito da água subindo pelas paredes do balde; apesar de um parabolóide perfeito não ter sido alcançado, pois as esferas são muito maiores do que moléculas de água e interações elétricas não foram consideradas, a aceleração radial foi facilmente observada como mostra o instantâneo da figura 8.

Analisando atentamente a imagem, é possível perceber que, além de subir as paredes do cubo, as esferas tendem a se aglomerar em suas arestas verticais – setas pretas. Isso significa que as esferas passam a girar com o cubo e também na mesma velocidade angular que ele; como já discutido, tal fato é o que leva Newton a dizer que o balde não pode ser usado para explicar o comportamento da água, pois tanto na situação em que o cubo está parado quanto na que ele está girando, a velocidade relativa entre ele e as moléculas de água é zero, ou seja, estão parados um em relação ao outro como pode ser visto na figura 2.

Figura 8 – cubo girando no sentido anti-horário e sala em repouso. As acelerações radiais fazem as esferas subirem as paredes do cubo.

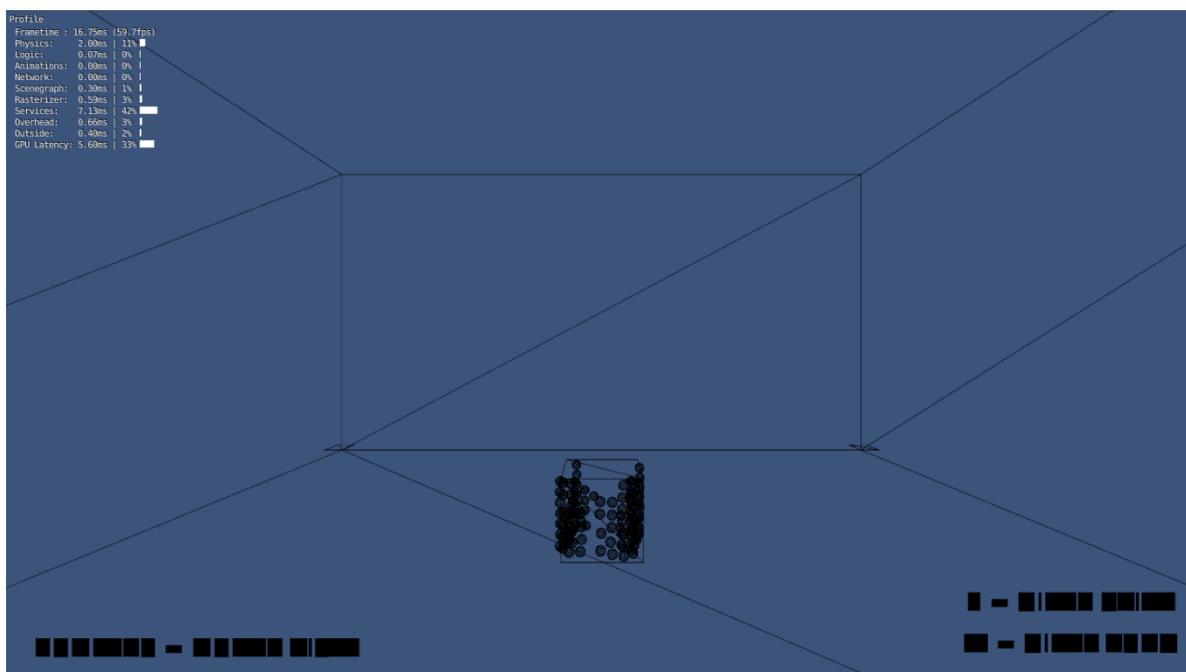


Fonte: feita pelo autor.

E é pensando nessa dinâmica de eventos que foi adicionado estrategicamente o segundo movimento do programa; agora, além de fazer o balde girar no sentido anti-horário, a sala toda também o fará, de modo que o referencial dentro dela também gire com o balde e na mesma velocidade angular – no caso também nós observadores. Apesar de não existir no original, esse movimento é especial porque sintetiza o argumento de Newton de que corpos que compartilham do mesmo movimento ou que não interagem efetivamente para a mudança do estado de movimento um do outro, não podem ser usados para explicar acelerações e dinâmicas que podem ocorrer num sistema.

Tanto no primeiro movimento, quanto no segundo, a água irá subir as paredes do cubo e suas velocidade angulares serão iguais, porém, como no segundo movimento a sala toda gira na mesma velocidade angular que o cubo, então todos os corpos e referenciais nessa situação devem estar parados uns em relação ao outros, uma vez que a velocidade relativa entre todos eles é zero. Tal situação também é análoga a estarmos sentados na boca do balde, como num carrossel em movimento, observando a dinâmica de concavidade da água ocorrer sem ter nada que influencie efetivamente ao redor e que explique tal dinâmica – tal foi a situação embaraçosa de Newton. Quem está no referencial de dentro da sala veria as esferas subindo pelas paredes do cubo, mas sem observar nenhuma rotação do próprio cubo como mostra a figura 9.

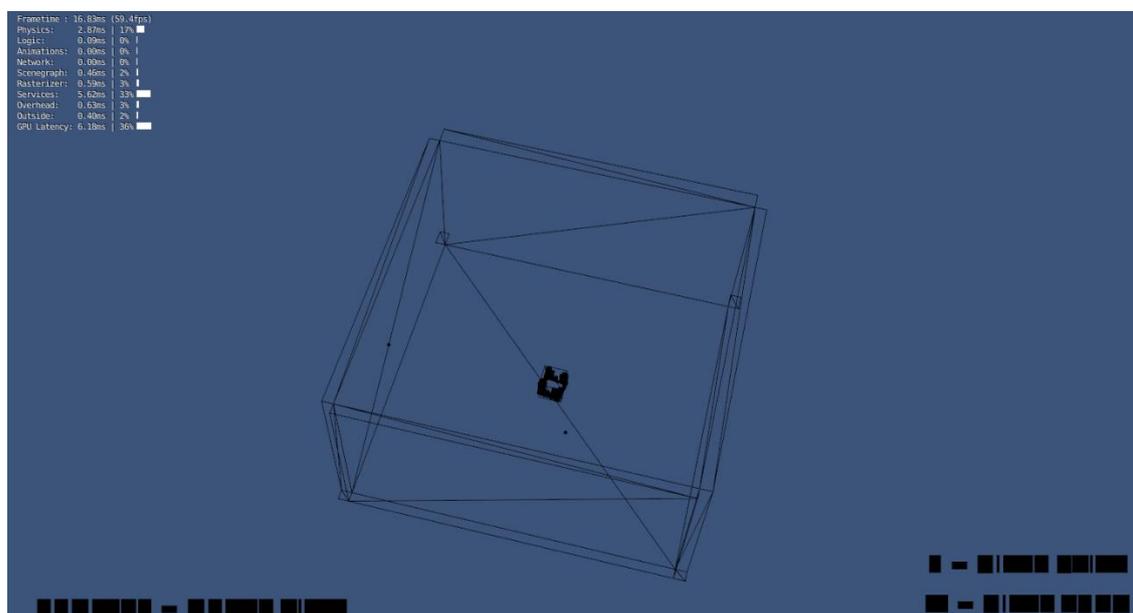
Figura 9 – Todos os referenciais giram juntos. É impossível determinar pelo referencial de dentro da sala em relação a que a aceleração radial da água está ocorrendo.



Dessa maneira, cabe perguntar o seguinte: se a água está parada, ou com a mesma velocidade em relação ao cubo, que está parado em relação à sala e também a nós observadores, então em relação a que referencial a água está acelerando? Se Newton já nos disse que não pode ser em relação à Terra, nem em relação as estrelas fixas, pois isso, de acordo com sua teoria, geraria muitas discrepâncias, o que sobra só pode ser o que o referencial privilegiado fora da sala observa na figura 10: um movimento de todo o sistema em relação ao espaço vazio profundo ou em relação a um espaço absoluto que “preenche” um suposto nada.

É importante enfatizar que, na ausência de um espaço absoluto, não faria sentido olhar pelo referencial de fora da sala, pois ele não existiria. Dessa forma, para os críticos do espaço absoluto, mesmo que o sistema realizasse os movimentos de rotação apresentados, as esferas não deveriam se elevar pelas paredes do balde, pois não seria possível conceber fisicamente tais movimentos sem massas gravitacionais significativas fixas no horizonte, como sugere a equação 3. Massas essas que, em sua própria existência inercial, realizando o movimento relativo oposto ao do cubo ou da sala, manifestam campos de Coriolis, forças centrífugas e a inércia gravitacional necessária para as esferas acelerarem radialmente em direção às paredes do cubo ou para a própria sala girar efetivamente; sem massas, o que sobra é uma espécie de suspensão que não permite mais comparações, nem processamento de qualquer movimento coerentemente manifestado ou mensurável.

Figura 10 – sistema acelerando em relação ao espaço absoluto de Newton.



Fonte: feita pelo autor.

O programa foi feito através de um *software* de criação de jogos chamado UPBGE (*Uchronia Project Blender Game Engine*) blender que tem como linguagem de programação nativa o Python. Tal programa já possui diversas formas geométricas e funcionalidades que não precisam ser programadas do zero, o que poupa bastante tempo e torna o processo de criação bem mais simples. É possível criar qualquer programa a partir de dois métodos distintos com repartições próprias no programa; o primeiro é o de se escolher um objeto qualquer e atribuir um código a ele com programação em Python.

O segundo, mais simples, é o de trabalhar com proporções do tipo 24:1, ou seja, 24 frames igual a 1 segundo na criação de animações; esse programa usou os dois métodos, portanto é uma mistura de animações e simulação interativas. Apesar de se exigir um pouco de tempo para aprender todas as suas funcionalidades, pode ser um recurso valioso para professores interessados em criar seus próprios recursos e ajudar os alunos nas aulas de física; os pontos negativos são que seus programas só rodam no computador e o executável precisa sempre estar numa pasta que contém alguns arquivos de renderização.

Link para download do UBGE: <https://upbge.org/#/download>. O programa do balde de Newton mostrado aqui está no anexo desse trabalho; basta baixar a pasta zipada da simulação no computador, extrair e acessar o arquivo com formato do tipo aplicativo. O aplicativo não funciona se não estiver dentro da pasta original, pois nela estão as *APIs* necessárias para fazê-lo rodar. Mais informações se encontram num texto na pasta original e também em um vídeo que produzi para a plataforma YouTube sobre o experimento do balde de Newton que pode ser acessado pelo link: <https://youtu.be/TBT1L4woCW8>.

3 CONSIDERAÇÕES FINAIS

A essa altura de desenvolvimento, já estamos aptos a invocar e adaptar um termo bastante conhecido, inclusive em física, mas que aqui pode levar uma interpretação diferente e que facilita generalizações e compreensão intuitiva acerca do que estamos analisando nesse trabalho, além de nos ajudar a pensar em outras hipóteses para a solução do problema do balde, a qual é *informação*. Tal palavra possui muitos significados dependendo do contexto em que está sendo usada, mas que, apesar disso, carrega uma ideia geral: *informação é o resultado de um*

processamento, manipulação e organização de uma série de dados, de modo que represente uma modificação no conhecimento do sistema que o recebe.

Ou na teoria matemática da informação que estuda a quantificação, comunicação, processamento e armazenamento da informação tendo como base teórica e de medida a *entropia*. A entropia está ligada a quantidade de informação capaz de ser extraída de um sistema, portanto também deve estar relacionada à casualidade, probabilidade e indeterminação que ele carrega; é mais fácil poder prever qual resultado irá sair na jogada de uma moeda honesta, pois temos duas possibilidades igualmente prováveis, cara ou coroa.

Porém, é mais complicado estimar qual face ficará voltada para cima ao se jogar um dado, pois seis possibilidades de iguais probabilidades irão enfrentar o colapso do tempo. Quanto maior a informação contida no sistema maior a desordem, maior a entropia. Menor a informação, menos estados, menos configurações, menos escolhas e menor a entropia (Claude E. Shannon, 1948). Trazendo para nosso contexto de análise, podemos pensar informação como sendo: *toda e qualquer manifestação de existência capaz ou não de ser medida; tudo que não é informação é o próprio nada, ou não existência em si que teoricamente não causa mudanças em nosso sistema do Universo e não nos serve de conhecimento físico.*

Diante disso, a informação física, como definida aqui, deve ser de alguma forma *processada* e possuir uma *fonte de processamento* a fim de ser manifesta em uma realidade física capaz de ser medida por nós. Se pode ser medida, então precisa estar relacionada a algum referencial generalizado de comparação, e se está relacionada a referenciais de medida deve estar relacionada ao cerne da discussão que estamos desenvolvendo aqui.

Podemos perceber tal conexão com uma análise mais profunda do sistema mostrado na simulação discutida na seção anterior: imagine uma situação hipotética em que o cubo e a sala podem girar juntos, tal como o segundo movimento possível do programa, devido a um motor qualquer que gera energia a partir de uma combustão química interna ao sistema. O motor poderia funcionar de maneira parecida com o de um automóvel que no aquecimento, compressão e expansão de um gás concede movimento de rotação para a sala e o cubo.

Ou através de um propulsor de plasma que acelera íons a grandes velocidades; um emissor de alta eficiência emite elétrons que colidem com um gás

nobre gerando íons positivos e fazendo um componente de rotação acelerar no sentido oposto devido à energia liberada no processo. Talvez, de forma mais simples, um jato aquecido que expelido numa direção e sentido faz o aparato girar no outro sentido por ação e reação. A partir do que já foi discutido, seria coerente então perguntar: parte da energia liberada está se transformando em calor no sistema e outra está sendo usada para girar o motor e conseqüentemente o sistema todo; tudo conforme a primeira e a segunda lei da Termodinâmica.

Porém, a energia sendo efetivamente usada para o trabalho de girar o sistema poderia estar simplesmente *desaparecendo* num universo sem tais massas ou, sem um espaço absoluto? Uma vez que tal movimento não pode ser concebido, ou digno de uma manifestação física capaz de ser manifesta, ou medida, na ausência de massas significativas ou de um referencial privilegiado externo que usamos para medir.

Se dissermos que o aparato gira em relação a um espaço absoluto de Newton, a resposta é aparentemente simples, uma vez que a inércia do sistema seria manifesta em relação a tal entidade física; apesar de esta hipótese ainda não nos oferecer uma ideia clara do que seja e qual a origem dessa inércia nos corpos. Em seu livro *Philosophiae Naturalis Principia Mathematica*, Newton se limita coerentemente a definir a inércia na forma de uma lei prática do movimento: *“Todo corpo continua em seu estado de repouso ou de movimento uniforme em uma linha reta, a menos que seja forçado a mudar aquele estado por forças imprimidas sobre ele”*(1687).

E numa realidade em que são as massas que determinam a dinâmica de movimento, como conforme o primeiro e segundo princípio de Mach? *Se um corpo em um Universo vazio não deve ter inércia; ou toda inércia de qualquer corpo tem que vir de sua interação com outras massas do Universo*, então isso deve significar que o quarto girante, na situação analisada, não pode ter inércia, tampouco girar, ou seja, não poderíamos medir a água subir pelas paredes do cubo como na situação da figura 9, apesar do “funcionamento” de um motor, pois não deve existir mudanças em estados de movimento capazes de serem medidos.

Se a inércia de um corpo aumenta se nas suas vizinhanças se acumularem massas ponderáveis; na possibilidade de se ir adicionando aos poucos quantidades consideráveis de massas ao redor do quarto, como uma estrela, buraco negro ou galáxia, então passaríamos a medir sucessivamente a água subir as paredes cada

vez mais na proporção de aparecimento delas, mesmo estando o motor “funcionando a pleno vapor” desde o início? Se a inércia do sistema nasce de uma interação com as massas que não mais estão presentes lá fora, então poderíamos considerar que a inércia poderia nascer da interação entre as massas dos corpos que compõem o próprio sistema, como seus átomos e moléculas? Uma vez que esse é o sistema de universo que temos agora.

Se tanto o cubo, as esferas de água e o quarto passam a girar na mesma velocidade, então, é coerente afirmar que todos os seus componentes atômicos também o fazem e estão parados em relação uns aos outros; sendo assim, conforme a equação 3, a força gravitacional entre eles deve ser a da equação 1 de Newton, o que impede a existência de diferenciais de força responsáveis pela criação de acelerações radiais no cubo, na água ou até da própria sala, pois a velocidade e acelerações relativas são zero.

O que resta é analisar o que esta ocorrendo de fato no motor, que aqui simboliza a energia capaz de causar mudanças em um sistema físico para além de seu estado atual de existência física. É intuitivo conceber que o movimento aleatório de cada um dos componentes atômicos energeticamente excitados dentro do motor, independentemente do processo de *propulsão* usado, não podem servir como um movimento coerentemente relativo complementar ao movimento de rotação que a sala toda pode realizar, muito menos podemos usar da equação 3 para pensar gravitacionalmente tantos movimentos relativos aleatórios e distintos.

Isso pode ser bem-visto através do terceiro princípio de Mach: *um corpo deve sofrer uma aceleração de mesmo sentido, quando massas vizinhas são aceleradas*, poderíamos imaginar que à medida das acelerações aleatórias das partículas no motor, os componentes mais próximos da sala também deveriam sofrer acelerações proporcionais efetivas, porém tais acelerações deveriam ser tão ínfimas e aleatórias que a probabilidade de resultarem numa inércia gravitacional global no sistema é praticamente zero – a sala ainda não iria poder efetivamente girar.

O mesmo deve valer para a velocidade relativa das partículas entre si, pois a velocidade relativa média gerada por todas elas deve ser praticamente zero dentro do motor, não podendo gerar influências gravitacionais efetivas na rotação do sistema global. O que podemos pelo menos esperar é que a entropia do sistema deve estar aumentando dentro do motor à medida que um trabalho realizado por esses componentes atômicos fazem o eixo girar em relação à própria estrutura do

motor até o combustível chegar a seu fim eterno nesse limbo - no caso hipotético em que o motor não gira com o sistema todo.

É possível que o motor, ou qualquer outro componente estrutural, ao não compartilhar do mesmo movimento que o sistema, apesar de ser uma situação complicada de ser, pode atribuir uma inércia rotacional que condiz ou não com a intensidade rotacional gerada energeticamente no motor? A questão ainda é se uma rotação está de fato ocorrendo para qualquer estrutura poder compartilhar ou não dela. Além disso, na equação 4, ω_u é a velocidade complementar global de todas as massas e do próprio Universo ao redor do balde, ou seja, ao considerar que uma estrutura acoplada ao sistema pode servir de tal movimento relativo, a existência de um universo para além desses domínios poderia até se tornar obsoleto, apesar de na equação 3 obtermos resultados diferentes para os dois referenciais, pois as massas interagentes são distintas, gerando forças radiais distintas nas esferas.

No entanto, se o trabalho realizado pelo motor nos dois casos deve ser o mesmo, o simples fato de o motor e a estrutura global do sistema ser capaz de gerar uma mínima inércia gravitacional de movimento no sistema de partículas microscópicas dentro dele não seria suficiente para o sistema girar conforme faria se todas as estrelas fixas ainda estivessem lá fora? Apesar de estas mesmas estrelas fixas não estarem mais lá atribuindo inércia à nossa sala girante da figura 7.

Que estado de influências deve sair ganhando aqui, os movimentos microscópicos no motor que giram a sala ou a relatividade macroscópica inerte na estrutura global devido à falta de massas externas? Se a rotação ainda não pode ser facilmente compreendida ou medida aqui, poder-se-ia argumentar então que num sistema como esse a combustão, ou qualquer reação química exotérmica, não poderia se dar, pois tais processos envolvem essencialmente energia cinética de componentes atômicos extremamente excitados, e se não há movimentos reais capazes de serem medidos, não faz sentido falar de trocas de energia como estas – assim, energia não está sendo produzida e nem sendo aniquilada, salvando a conservação de energia através da relativização da própria energia no sistema; apesar que com essa hipótese somos obrigados a voltar à estaca zero de nossas indagações ao não saber o que mediríamos em situações como estas.

De fato, a hipótese de que a massa inercial surge de uma interação com a matéria do resto do Universo nasceu no final do século XIX com Gustav Holzmüller e François Tisserand e tal ideia está diretamente atrelada à origem da energia cinética

dos corpos em movimento. Gustav e François introduzem, pela primeira vez na década de 1870, o chamado princípio de Mach à gravitação de Newton, que teoriza um potencial gravitacional que não depende apenas da posição relativa, mas também das velocidades relativas entre os corpos.

Mas dizer que um fluxo de energia não pode ser efetivamente concebida num sistema como esse, não parece ferir princípios que regem o mundo das partículas atômicas ao sugerir que estão numa espécie de estado de inatividade, ou até de não manifestação física, por não poderem trocar quantidades de movimento ou interagirem dinamicamente até para a própria composição estrutural e dinâmica do sistema que estamos analisando? É claro que alguém até poderia dizer que nenhuma energia poderia estar mais disponível num sistema como esse, pois foi gasta no processo de se tirar o resto do universo ao redor.

Ainda bem que a imaginação não exige tamanhas quantidades e um pouco ainda sobrou no motor. Será mesmo que precisamos supor que os movimentos dos átomos podem, nesse caso, ocorrer em relação uns aos outros e até do cubo ou da própria sala? Se assim for, não importa a escala de grandezas dos corpos envolvidos nem sua relação espacial e dinâmica com o Universo, mas sim, somente o movimento relativo e influência gravitacional mínima que um permite ao outro?

Dessa forma, se as infinitas estrelas fixas desaparecem, o referencial é então “trocado” para a sala, ou componentes relacionados, com ou sem nenhuma mudança física mensurável na dinâmica de movimento? Se isso for verdade, então a sala ainda poderá girar, mesmo que minimamente, em relação a seus próprios componentes? Se a sala ainda pode girar nessa situação, então qual a diferença de estar fazendo em relação a um espaço absoluto ou daquelas massas que desapareceram? Se a inércia realmente pode mudar nessa situação, como poderíamos de fato perceber ou medir isso se nossa inércia também mudou com o processo?

Talvez a profundidade de tais indagações não podem ser concebidas totalmente pelo leitor sem um exemplo que aproxime um pouco nosso cotidiano com tal forma de pensar. Inicialmente, imagine uma picape qualquer como a da figura 11; você sai de casa para o trabalho num dia chuvoso e estaciona num local descoberto onde ela fica sobre a ação das intempéries. Ao retornar no final da tarde, observa que a capota marítima (capa protetora da carroceria) está cheia de água e teme que isso possa tensionar algum componente do sistema e causar algum dano.

Figura 11 – picape com capota marítima.



Fonte: adaptada da internet.

Tal situação deve ser fácil de solucionar, basta acelerar abruptamente positiva ou negativamente a picape para que a água, por efeito da inércia, deixe a capota e caia na estrada. Mas imaginamos novamente uma situação em que somente tal picape e a poça d'água em sua capota existam em todo o Universo. Ainda é possível derrubar a água da capota? É compreensível que numa situação como essa não existirá mais interações gravitacionais entre as moléculas de água e a Terra, não existindo mais a possibilidade de que se aglomerem na capa e muito menos que caiam numa estrada onde a picape possa acelerar por efeito de atrito.

Nessa primeira situação, podemos afirmar que a inércia do sistema picape-água, da maneira como somos capazes de medir o sistema, pode ser facilmente explicada por interações de natureza gravitacional e atrito. Mas indo além nessa imaginação, podemos incrementar bastante a picape transformando-a em uma nave sofisticada capaz de sofrer acelerações sem a ajuda de interações externas como atritos e pneus, mas sim através de propulsores de plasma que aceleram íons a grandes velocidades – um emissor de alta eficiência emite elétrons que colidem com um gás nobre gerando íons positivos e fazendo a nave acelerar no sentido oposto.

Podemos “atribuir” peso à poça de água e tensionar a capota marítima fazendo a picape inicialmente acelerar $9,8\text{m/s}^2$ na direção na qual o teto da picape aponta e depois podemos alterar um pouco a direção do movimento, com a ajuda de algum mecanismo dentro da picape ou da *própria observação da água abandonando a capota*, de modo a fazer com que ela acelere também numa direção que faz um ângulo próximo de 45° com a direção inicial.

Podemos afirmar com certeza que haverá uma componente de aceleração responsável por fazer uma boa quantidade de água deixar a capota e sofrer uma espécie de queda livre? Assim como aconteceria na superfície da Terra ou qualquer

outro corpo dotado de gravidade; como sabemos hoje, pela Relatividade Geral, devem ser situações fisicamente análogas. Por isso, a questão que deve surgir é a mesma que surgiu no balde de Newton; tais acelerações da nave picape, para que a água deixe a sua capota, podem de fato ocorrer sem nenhum referencial externo ou interação conhecida que nos permita medi-las ou até mesmo percebê-las? Tais acelerações podem ter algum significado físico para medida? Como podemos saber que um corpo está resistindo ou respondendo de formas distintas em relação a qualquer estado de movimento se a única interação existente no sistema é a causada pela própria medida que fazemos dele? Experimente ficar empurrando um caixote num sistema sem atrito ou gravidade; a única informação e referência dessa interação será a energia química usada para mover seu braço contra o caixote.

E nessa situação, a indução dos movimentos e colisões entre íons no plasma é suficiente para constatar que a nave está de fato acelerando ou alterando algum estado de movimento, assim como no motor que gira o sistema da simulação anterior? Na primeira situação, em que você deixa o trabalho acelerando abruptamente sua camionete, podemos de fato medir e correlacionar que a inércia da água tem natureza gravitacional, atrito e até elétrica, como afirmam os teóricos relacionais, mas e nessa situação? Podemos dizer que a inércia da água surge da própria aceleração da nave picape, uma vez que podem ser vistas como situações fisicamente complementares que manifestam um mesmo comportamento medido na água?

Sintetizando tais raciocínios: na primeira situação, sabemos que a água possui o que chamamos de inércia quando medimos também que um campo de natureza gravitacional existe como componente do sistema, da mesma forma que medimos também a intensidade da constante de uma mola ao suspendermos verticalmente um peso conectado a ela – a aceleração que distende a mola é a mesma que puxa o corpo para o centro da Terra e por isso somos capazes de fazer medidas e correlações.

Mas na segunda situação, a única medida que podemos tirar para concluir a inércia da água seria da própria poça de água abandonando a capota e de nossos corpos afundando nos assentos na direção do “movimento”? Se isso for verdade, então as *acelerações derivam da inércia do sistema ou a inércia existe devido às acelerações do sistema?* - se estivermos concebendo tais situações absurdas assim como Zenão de Eleia(490 a.C.) o faria, então aquilo que conhecemos como inércia

na primeira lei de Newton não é um fenômeno intuitivo e nada fácil de conceber. Para aceitar que tal pergunta é realmente válida, podemos imaginar outra situação que envolva a análise da energia desse sistema: imagine uma estrada livre de trânsito onde a picape pode andar livremente, porém, tal estrada não possui horizontes em relação ao qual nós motoristas podemos ter qualquer referência, como mostra a figura 12. Nessa situação, como poderíamos saber que estamos seguindo uma estrada horizontal ou íngreme, descendo ou subindo?

Figura 12 – Uma estrada sem referenciais de movimento.



Fonte: retirada do banco de imagens Pixabay.

Precisamos analisar o fluxo de *energia* e *informação* desse sistema. Consideremos primeiro que tal estrada está sob a ação de um campo de gravidade parecido com o da Terra. Como a força gravitacional é conservativa, o trabalho realizado por ela deve depender exclusivamente da altura em que a estrada se eleva ou declina em relação à sua posição horizontal. Se a estrada se eleva, perceberemos isso como uma colina a ser superada, significando também que deveremos acelerar a picape; acelerar significa imprimir torque adicional nas rodas a partir da energia gerada no motor da combustão de componentes atômicos extremamente excitados.

A aceleração mínima que a camionete terá de gerar para subir é igual à componente da aceleração gravitacional devido à inclinação da estrada em relação a sua horizontal; o que observaríamos de dentro da picape seria a estrada acelerando cada vez mais para atrás la fora. Se a estrada declina, então a gravidade vai realizar um trabalho positivo na picape fazendo-a acelerar à medida que desce - observaríamos o mesmo, ou seja, a estrada acelerando ou ficando cada vez mais para trás com a água abandonando a capota marítima. Na horizontal, a gravidade não deve exercer influência direta no estado de movimento da picape, mas apenas no atrito das rodas com a estrada e conseqüentemente no movimento relativo entre elas que pode gerar as mesmas acelerações.

No final de contas, tudo parece se tratar de um *fluxo de informação* gerado

por mudanças em um *domínio de manifestação* que nós somos capazes de medir, em nossa escala, como acelerações ou variações de distância e tempo - pode-se facilmente perceber que a única dinâmica que poderíamos usar para diferenciar essas situações seria a energia sendo gerada ou não pelo próprio sistema. Tal energia, assim como em qualquer outro sistema, é gerada pela dinâmica atômica e de entropia de componentes microscópicos excitados que podem estar sendo *processados e manifestados* por um *domínio de existência*, o que nos mostra que as respostas para as indagações que estão surgindo aqui devem existir no mundo quântico, assim como em suas estranhas características recém-descobertas.

Dessa forma, é coerente perguntar então: será mesmo que a manifestação física de qualquer corpo só tem significado se houver outro corpo que ateste sua existência em uma rede dinâmica de relatividade e interações mútuas que vão do mais infinito ao menos infinito? Nessa perspectiva, é possível um elétron ou qualquer corpo existir absolutamente sozinho no Universo? Manifestando qualidades físicas como momento linear, temperatura ou outras formas de existência física?

Se partimos da hipótese de que existe um espaço absoluto, ou talvez algo um pouco diferente do que temos pensado até agora, como um *domínio real de manifestação*, é bem mais intuitivo imaginar que o mesmo processa a existência e dinâmica desse elétron, em relação a si, um domínio físico material ou imaterial de manifestação e continuidade, em qualquer ponto de sua extensão ou escala.

Processar aqui é o mesmo que dizer que *tal elétron é capaz de individualmente experienciar regiões ou possíveis estados e configurações distintas de existência num certo tempo; tempo aqui deve significar a taxa ou a velocidade com que o domínio processa e manifesta a informação do elétron através de uma sequência de configurações possíveis ou estados que ele pode estar dentro de certas condições físicas coerentes de um sistema.*

Porém, se for verdade que as principais dinâmicas no Universo dependem diretamente da relação que existe entre seus componentes, tal pergunta se torna bastante complexa e, ao mesmo tempo, nos leva a novos patamares de pensamento como esse sobre a natureza do todo: *falar de dinâmica de referenciais parece não ser apenas falar de velocidade relativa entre corpos, mas sim de como a existência física se manifesta.*

Nesse sentido, a fim de se começar a buscar um denominador comum e de generalização, é vantajoso falar que o elétron é uma manifestação de existência

processada por um domínio que, em nossa linguagem, é tocado indiretamente por análises de referenciais e de medidas comparativas, ou seja, a medida indireta da informação? A questão então é saber como tal domínio funciona ou suas principais características e não apenas se ele está absolutamente parado, homogêneo em todos os pontos, similar e sem velocidade assim como já propôs Newton.

Reformulando as hipóteses iniciais: tal domínio processa qualquer movimento independentemente de outras manifestações? Ou qualquer manifestação é produto de uma ligação existente entre todas as outras manifestações dentro desse domínio interconectado? Do ponto de vista do que acabamos de discutir, deve ter ficado claro que a resposta parece indefinitivamente pender mais para o que conhecemos como espaço absoluto do que para o que conhecemos hoje como Mecânica Relacional do movimento puramente relativo entre corpos, apesar do fato de que uma hipótese não parece excluir totalmente a outra.

Poderíamos começar a vislumbrar o nascer de uma nova hipótese mais geral e eminente que nos permita usar dos dois paradigmas para buscar explicar fenômenos físicos importantes? Uma frase de Werner Heisenberg parece nos dar luz do real problema que estamos enfrentando aqui, *“O que observamos não é a própria natureza, mas a natureza exposta ao nosso método de questionamento.”*

Não seriam noções como referenciais privilegiados, movimentos absolutos e relativos, produtos somente de nossos métodos arcaicos de medida que realizam quantizações separatistas de modo a facilitar comparações precisas acerca daquilo que nossa perspectiva é capaz de observar? É claro que tais métodos são, em nossa linguagem sapiens e posição em relação à dinâmica complexa que o todo manifesta, bastante úteis para realizarmos nossos cálculos e previsões que nos afetam positivamente, mas será que podemos extrapolar tal metodologia para dizer que as coisas essencialmente funcionam dessa maneira?

Os gregos pensavam ser toda a esfera celestial que girava ao redor da Terra em repouso no sagrado centro do Universo, isso não era baseado apenas em suposições filosóficas ou no aristotelismo, mas sim nas observações e medidas que eram capazes de fazer do céu dia e noite (Origens e evolução das ideias da física - 2002). Ninguém conseguia provar o oposto. Sempre observaram as estrelas e os corpos errantes se movendo no céu sem medir nenhum movimento por parte da Terra, então era racional acreditar que a Terra estava parada e o resto se movia.

Com Euclides (séc III a.C.) e Cláudio Ptolomeu(100 d.C.), o geocentrismo foi

formalizado matematicamente como nunca tinha sido antes, e realizava previsões dos movimentos dos corpos que se comparam em muito com as medidas precisas que fazemos hoje. Um bom tempo depois, as bases do geocentrismo foram desmoronando gradualmente quando pensadores como Nicolau Copérnico(1473 – 1543), Galileu Galilei(1564 – 1642) e Johannes Kepler(1571 – 1630) começaram a vislumbrar dinâmicas e leis que pareciam estar escondidas para além daquilo que nossa perspectiva limitada do todo conseguia observar. Não bastava ver que tudo estava girando ao redor de nós para saber, mas era necessário chegar a um argumento físico mais consistente para a época que explicasse tal manifestação, uma busca por melhorar as teorias para melhorar as observações, uma ordem maior, ou visão geral que mostrava que isso devia ser verdade independentemente do que apenas nossos sentidos e medidas eram capazes de conceber; a visão mais geral não parecia ver a Terra no centro do Universo, mas sim o Sol.

Isso abriu os caminhos para que Newton pudesse propor sua teoria da Gravitação Universal, em que corpos com massa devem interagir entre si até mesmo a longas distâncias no espaço. Corpos de maior massa, como o Sol, devem atrair mais intensamente outros corpos de massa relativamente menores como a Terra e os outros planetas. O resultado seria um sistema dinâmico com a massa maior ao centro e as outras massas menores girando ao redor.

Tais desenvolvimentos na história da Ciência não parecem estar diretamente relacionados a uma busca de cada vez mais superarmos nossa condição humana localmente limitada que só pode observar tudo a partir de si mesma e que por isso concebe referenciais aleatoriamente convenientes também em relação a si? Se o resto do Universo desaparecer e apenas a Terra e o Sol continuarem existindo, de nossa perspectiva podemos afirmar que o Sol gira ao redor de nós como os gregos pensavam e, além disso, podemos até fazer alterações em nossas flexíveis teorias e equações de movimento para que boas previsões possam ser feitas desse ponto de visão, como eles e povos posteriores o faziam.

Da perspectiva do Sol, seremos nós que estamos girando ao seu redor. É realmente coerente perguntar: quem está certo? Talvez para nossas equações tal pergunta não carrega um sentido explícito, uma vez que, para elas, o que importa é o que podemos medir e prever com segurança e não o que realmente é - dessa forma, a resposta mais coerente deve ser que depende de onde e em que condições estamos medindo, além de um centro de massa definido para tal sistema.

Mas e do ponto de vista de uma realidade mais objetiva dos fenômenos que estamos tentando buscar aqui, de uma natureza intrínseca maior que gera a existência física? Com esta indagação não estaremos regredindo nossa análise e voltando até os gregos antigos? A verdadeira suposição não seria aquela que implica numa ordem intrínseca maior? Que está lado a lado com as condições de interação eminentes entre corpos que chamamos de leis ou dinâmicas contínuas que regem o fluxo de informação e manifestação do Universo e sua existência individual independente? Independentemente de outros corpos, a Terra não deveria girar ao redor do Sol, por mais que possamos conceber e equacionar referenciais diferentes de medida?

De modo geral, o que vem primeiro: a manifestação e as leis que regem suas dinâmicas em um domínio físico de manifestação ou nossa capacidade de medir e conceber referenciais a fim de contemplá-las? Acredito fortemente ser a primeira opção, mas isso não nos impede, pelo menos matematicamente e como parte de um desenvolvimento científico válido, de fazer com que a lei de Gravitação Universal dependa também da velocidade e aceleração relativa entre o Sol e a Terra, o que nos resta ainda é saber se isso é realmente necessário ou se o Universo precisa de fato funcionar dessa maneira.

É claro, julgando de antemão, sem entrar aqui mais a fundo na epistemologia do saber humano, que um dia conseguiremos tocar a natureza intrínseca maior do Universo e de que como ele realmente funciona. É importante evidenciar nesse trabalho que as argumentações que estamos desenvolvendo aqui possuem algumas conexões com uma indagação coerente, essencialmente filosófica e também metafísica, que o leitor certamente já tenha escutado: “Se uma árvore cai na floresta e ninguém está por perto para ouvir, ela fez barulho?” George Berkeley(1685 – 1753), ao desenvolver a teoria metafísica do idealismo subjetivo, tentou responder a esta questão cunhando o famoso termo “ser é ser percebido”, ou seja, a existência de algo não pode ser dissociada do processo de percebê-la.

Com isso, surgiu uma indagação essencial que dividem os metafísicos até hoje; *uma substância pode ser considerada distinta de suas propriedades ou ela é o próprio conjunto agregado de seus dados dos sentidos?* Numa abordagem absolutamente científica de nossa linguagem, poderíamos facilmente raciocinar que o som, uma vibração transmitida aos nossos sentidos através do mecanismo da orelha, é reconhecido como som apenas em nossos centros nervosos. A queda da

árvore ou qualquer outra perturbação irá produzir a vibração do ar. Se não há ouvidos para ouvir, não haverá nenhum som ou barulho.

Mas, analisando melhor o enigma, assim como fizemos com o balde de Newton, percebemos que se trata de um nó filosófico que tensiona fortemente nossas gargantas quando estamos falando da divisão existente entre a percepção, ou medida de uma realidade, e como tal realidade realmente é ou se manifesta independentemente. Se uma árvore existe fora da percepção, então não há nenhuma maneira de saber que ela de fato existe; só podemos conceber como o som mecanicamente ocorre porque é compreendido a partir de uma sensação que deriva o que concebemos essencialmente como som que algo gerou – um vórtex epistemológico consistente como uma cobra se alimentando do próprio rabo.

Um som, como mecanicamente entendido, pode ocorrer na queda da árvore fora de nossa percepção, porém o som de uma árvore caindo, como captado pelos sentidos, não deve soar como qualquer coisa aleatória. Dessa forma, como podemos realmente ter certeza que som, como mecanicamente concebido, vai ocorrer se tal som não pode ser percebido? Se a onda mecânica não pode ser concebida com certeza, então a queda da árvore também não? Qual é a diferença entre como algo é e como algo se parece? Extrapolando um pouco mais: a não observação de um fenômeno deve afetar o resultado?

Um evento não observado deve ocorrer de forma previsível como quando é observado? Estaria de fato correto John Locke (1632 – 1704) ao afirmar que isso se trata apenas de um problema que envolve qualidades primárias e secundárias? Ram Roy Bhaskar (1944 – 2014), em seu realismo crítico, ao afirmar que *estruturas reais existem de forma independente e são, muitas vezes, fora de fase com o real padrão de eventos?* Ou será que tivemos sorte ao ponto de qualquer teoria válida sobre o Universo ser consistente com nossa existência conforme o princípio antrópico?

Como sua mais extrema definição: *A existência de observadores dá existência ao universo.* Stephen William Hawking em seu livro *uma breve história do tempo* diz: *“vemos o universo da maneira como ele é porque, se fosse diferente, não estaríamos aqui para vê-lo”.* Da mesma forma, de uma perspectiva mais metafísica do que física, o movimento pode ser considerado uma propriedade intrínseca à natureza e existência independente dos corpos ou deve ser sempre entendido como uma propriedade que ganha forma e significado na fronteira dinâmica entre a realidade e a medida referencial de nossa linguagem?

Seria conveniente para nós, ou talvez até possível, tentarmos pensar além dessas rígidas fronteiras, a fim de nós aproximarmos mais de entender o que é a realidade física independente? Voltando ao elétron suspenso no vazio: quando dizemos que um domínio físico ou imaterial processa sua existência através da contínua manifestação de estados e configurações sequenciais de certa cadência, o que pode ser traduzido aqui como movimento, noções de referenciais privilegiados ou não se tornam obsoletos, assim como movimentos verdadeiros ou relativos que só devem existir em nossa linguagem e posição pouco privilegiada na visão de um todo.

Para facilitar nossa compreensão, uma analogia com um computador pode ser bem usada aqui: imagine que um programador criou um simples código que faz um ponto se mover na tela do monitor. O processador não precisará conceber em relação a que referencial tal movimento vai se dar, mas simplesmente irá processar o código com a trajetória do ponto e então o manifestará na forma de um movimento que é, na verdade, uma série de configurações sequenciais de luzes que ocorrem numa certa taxa de frames e atualizações no monitor.

Parece que o interessante debate entre Heráclito(V a.C.) e Parmênides(530 a.C.) ainda perdura com tanta força quanto em suas próprias épocas. Movimentação parece ser o próprio espaço experimentando novas formas de manifestação, sendo espaço e movimento fenômenos fisicamente indissociáveis, assim como temperatura e energia o são – um elétron é uma perturbação no próprio domínio de manifestação espacial e não deve estar separado dele.

Será que o que chamamos de movimento é apenas uma mudança nas configurações e estados atuais de informação do espaço manifestante? Assim como os píxeis que acendem e apagam de modo a fazer com que a manifestação do ponto seja visto em posições diferentes num certo intervalo de tempo? Gerando ilusão de movimento.

Será o espaço um agente vivo e coordenado que ao se autotransformar coerentemente, como os píxeis o fazem, gera o que chamamos de elétron e seu movimento? Será que ao ir de um ponto A até um B tal elétron está, na verdade, apenas sofrendo atualizações existenciais momentâneas, ou manifestando estados possíveis que, quando cadenciados pelo tempo, nos parece como uma trajetória? Tal qual a flecha de Zenão(5 a.C.) que nunca realmente se move.

Cada partícula sendo pensada como uma topologia dinâmica que o espaço

escolhe manifestar-se e que se estende globalmente em sua extensão. Se assim for, tais possibilidades e configurações já não devem estar sendo processadas de antemão ou já subjetivamente talhadas na estrutura procedural do domínio de manifestação? Assim como cada píxel posicionado no monitor esperando por instruções de um código, para que, num determinado contexto físico de interação entre interfaces de informação, apenas estados coerentes se manifestem para medida?

Então, tal espaço ou, o que também podemos chamar aqui de *campo de manifestação*, deverá ter uma natureza dual? Uma objetiva, de pura manifestação física que podemos facilmente medir, e outra subjetiva, na forma de pura potência ou probabilidade de informação que podemos indiretamente vislumbrar? Deve existir um agente físico que manifesta, pelo menos indiretamente, na nossa linguagem de medida, a natureza subjetiva de tal campo de manifestação? Poderiam ser as famosas *funções de onda* descobertas por Erwin Schrödinger(1887 - 1961)?

Como o todo se autorregula para gerar configurações coerentes a cada nova atualização do domínio? Deve existir um mediador físico conhecido para isso? Se um computador atualiza a cada 1/60 de segundo as configurações de luzes na tela, em que taxa o campo de manifestação o faria? A cada tempo e espaço de planck? Ao analisar o mundo quântico um pouco mais de perto, não deve ficar claro que noções que temos de espaço, tempo e movimento em nossa escala não parecem fazer muito sentido naquela? Como a medição da posição deve influenciar na medida do movimento conforme o princípio da incerteza de Heisenberg? Será mesmo a interação de fótons e outras formas de medida que causam tal efeito, ou será que movimento não pode ser dissociado essencialmente do espaço por algum maquinismo ainda desconhecido?

Se pensarmos que energia é a capacidade que um sistema tem de alterar as configurações de seu estado atual, podemos dizer também que ela é a medida de autotransformação do espaço e assim nos surge que a quantização da energia pode se tratar de mecanismos inerentes ao próprio espaço de manifestação. Se tempo pode ser visto aqui como a taxa com que o processamento de informação ocorre, ou a taxa com que o espaço se autotransforma, então tempo e energia devem estar tão fisicamente entrelaçados quanto espaço e velocidade estão.

Perceba que fenômenos físicos já bastante conhecidos passam a aparecer intuitivamente quando começamos a pensar dessa maneira. Nesse contexto, faz

realmente sentido pensar em movimento como o conhecemos? Será que as tecnologias tendem a harmoniosamente imitar as entranhas da natureza? Se forem dois pontos ou mais na tela, é fácil perceber que o movimento de um não deve influenciar em nada na dinâmica de manifestação do outro, isso só ocorrerá quando nós nos colocamos em um dos pontos e buscamos estudar o movimento de um em relação ao movimento do outro, que é onde os problemas começam a aparecer.

O processador e o monitor são, nessa analogia, o que já definimos como domínio de manifestação da existência ou espaço em si, o código são o que conhecemos como leis, formas ou dinâmicas eminentes, conhecidas ou não, que processam e correlacionam todas as configurações e estados possíveis para a manifestação direta de qualquer informação física coerente; o mundo das ideias de Platão(427 – 348 a.C.) pode ter uma conexão filosófica aqui. A taxa de processamento é o que chamamos de tempo e que rege a mudança de estado do sistema formado por qualquer informação no espaço.

A partir disso, surgem mais indagações que o leitor atento já deve ter percebido e que possuem forte paralelo com fenômenos descobertos recentemente pela ciência; a taxa de processamento é constante para qualquer manifestação/corpo, em qualquer parte desse domínio? Existe uma quantidade limite de informação que um sistema pode processar? Se sim, deve existir uma velocidade limite para qualquer manifestação? Tal domínio deve estar sempre agregando informação, tanto como gerente de manifestação, quanto através da interação que ocorre entre as várias interfaces de manifestações conforme as fronteiras ou leis determinam, fazendo sempre aumentar a informação ou entropia dentro do sistema? Toda e qualquer informação precisa se conservar nas entranhas do espaço, ou algumas devem simplesmente desaparecer?

Diante dessa maneira de pensar, podemos dizer, de uma forma ainda bem grosseira, que a água no balde girante sobe pelas paredes porque está, de alguma forma, “programada” pela própria estrutura do espaço para fazê-lo nessa condição. É uma realidade já subjetivamente impressa no tecido espaço-temporal em qualquer ponto do domínio existencial e não porque o faz em relação a alguma coisa.

A inércia deve ser pensada então como uma característica intrínseca ao próprio espaço que ao manifestar objetivamente os corpos lhes atribui tal propriedade assim como Newton bem afirmava. Indo além, a inércia poderia ser pensada aqui como *o empreendimento necessário ao domínio de manifestação para*

processar e manifestar qualquer realidade física dinâmica.

O balde de Newton pode existir absolutamente sozinho no Universo, girando e com a água subindo pelas suas paredes, pois cada um de seus constituintes atômicos, produtos de transformações do próprio tecido existencial do espaço, devem fazê-lo para conservar um fluxo de informação gerado por tais transformações que, por sua vez, derivam do *processamento inercial* de configurações e estados capazes de gerar a própria rotação num feedback intrínseco e dinâmico com tal domínio.

Invocando a lei de Ampère para uma perspectiva mais geral; corrente elétrica nada mais é que elétrons se movendo, não muito rápido, por uma rede de átomos. Um leigo poderia facilmente incorrer ao erro prático de pensar que se pegar um fio, que contém muitos elétrons, e começar a chacoalhar em relação a seu corpo, um campo magnético passaria a existir devido a tal movimento do fio e, é claro, dos elétrons. Poderia pensar que um movimento relativo a alguma coisa dos elétrons já seria suficiente para causar a manifestação do campo magnético induzido. Porém, não é assim que funciona, nesse caso não basta apenas existir um movimento relativo dos elétrons em relação a alguma coisa, mas tal movimento precisa se dar onde os campos elétricos do sistema sofrerão alterações ao longo do tempo.

Deve existir uma ligação de fatores que se traduzem como mudanças ou transformações em campos, ou formas dinâmicas intrínsecas. Mover o fio será mover apenas o sistema ou domínio todo de lugar, não causando mudanças nas configurações espaciais de cargas nos átomos. Por isso, se numa situação hipotética, todo o domínio de existência se mover agora, ou até girar, nós nunca poderíamos medir isso diretamente, pois o espaço deve processar qualquer dinâmica em relação a si, inclusive forças centrífugas, Coriolis e as demais físicas conhecidas.

Existe uma grande diferença entre estar dentro de uma sala que gira e estar em um domínio onde todo e qualquer movimento não está separado dele, mas é a própria métrica individual desse domínio; no primeiro seríamos arremessados violentamente pelas paredes, no segundo, nada mediríamos. O espaço-tempo poderia estar então girando nesse exato momento? Se o estivesse, como poderíamos conceber isso? Quais métricas devem ser pensadas para um caso como esse? Tal giro poderia influenciar diretamente na expansão desse domínio? Se gira, gira em relação a que e sobre o quê? Como podemos de fato conceber um

sistema como esse? São perguntas que merecem atenção e pesquisa, mas que não será feito nesse trabalho.

Pelo que já discutimos, a energia pode ser melhor pensada aqui como a capacidade que o espaço de manifestação tem de sofrer autotransformações para experimentar diferentes estados de existência processadas em si, gerando informação. Dessa forma, a inércia poderia ser um mecanismo intrinsecamente relacionado a como tais transformações se dão nesse domínio; a inércia pode ser pensada então como *a medida do processamento de uma informação, no sentido de que qualquer informação gerada no espaço deve exigir um empreendimento por parte do mesmo e tal empreendimento muda à medida do processamento de mais informação - isso deve significar que a inércia é uma entidade flexível capaz de mudar, assim como a própria estrutura do espaço do qual faz parte.*

Se a inércia muda, então medidas de massa também, assim como todas as outras grandezas relacionadas à medida do movimento – resultados encontrados também na Relatividade restrita. Por fim, é importante ressaltar que tal forma de pensar é apenas uma tentativa de se abrir novos horizontes para o caso e que ainda precisa de muita pesquisa e pensamento coletivamente científico para ser efetivamente útil na explicação coerente de como nossa realidade física manifesta-se. A tabela 2 é uma atualização da tabela 1 - página 26 - e sintetiza o que visamos desenvolver nessa seção ao comparar os paradigmas vigentes com a possibilidade juvenil e imatura de um domínio de manifestação de existência como qualitativamente pensado aqui.

Tabela 2: Tabela atualizada com a possibilidade de um domínio de manifestação.

Mecânica Newtoniana	Teses Relacionais	Domínio de manifestação
O movimento absoluto é aquele que ocorre em relação a um referencial inercial absoluto.	Não existem referências absolutas, só existe o movimento relativo.	Espaço e movimento são fenômenos essencialmente indissociáveis, tanto quanto energia e temperatura o são.
A inércia é uma propriedade intrínseca da matéria.	A inércia de um corpo é produto de sua interação global com o resto do Universo.	A inércia é um empreendimento necessário ao domínio de manifestação para processar e manifestar qualquer realidade física.
Forças fictícias surgem nos referenciais não inerciais, ou acelerados.	Forças centrífugas e de Coriolis são interações reais geradas pelo movimento relativo gravitacional entre um corpo e o resto do Universo.	O espaço deve processar qualquer dinâmica em relação a si, inclusive forças centrífugas, Coriolis e as demais físicas conhecidas. Logo, devem ser interações reais.
O Universo não pode exercer influência sobre o balde girante.	Não existe distinção física entre rotação e translação no sistema formado entre o balde e o resto do Universo.	O balde de Newton pode existir absolutamente sozinho no Universo, girando e com a água subindo pelas suas paredes, pois um <i>processamento inercial</i> manifesta estados possíveis em relação a si.

REFERÊNCIAS

- Hawking, Stephen. *O universo numa casca de noz*. Editora Intrínseca, 2016.
- HAWKING, Stephen. **Uma breve história do tempo**. Editora Intrínseca, 2015.
- DE MACH, Implementação do Princípio. *Mecânica Relacional*.
- ASSIS, A. K. T.; PESSOA JR, Osvaldo. Erwin Schrödinger e o princípio de Mach. **Cadernos de História e Filosofia da Ciência**, v. 11, n. 2, p. 131-152, 2001.
- SAA, Alberto. Arrasto de referenciais e o princípio de Mach. **Revista USP**, n. 62, p. 94-103, 2004.
- PERLOV, Delia; VILENKIN, Alex. **Cosmology for the Curious**. New York: Springer, 2017.
- KEETON, Charles. **Principles of Astrophysics**. 2014.
- A. K. T. Assis. *Mecânica Relacional (Centro de lógica, epistemologia e história da ciência – Unicamp, Campinas, 1998)*, Volume 22, Coleção CLE.
- A. K. T. Assis. A experiência do balde de Newton. Site: ifi.unicamp. disponível em: [https://www.ifi.unicamp.br/~assis/balde49-61\(1997\).pdf](https://www.ifi.unicamp.br/~assis/balde49-61(1997).pdf). Acesso em: 25/10/2021.
- Newton, Principia - Princípios Matemáticos de Filosofia Natural (Nova StellarEdusp, São Paulo, 1990), Tradução de T. S. F. Ricci, L. G. Brunet, S. T. Ghering e M. H. c. Celia.
- HALLIDAY, David; RESNICK, Robert; WALKER, Jearl. *Fundamentos de Física*, vol. 4: óptica e física moderna. **Livros Técnicos e Científicos Editora**, p. 25, 2009.
- NUSSENZVEIG, Herch Moysés. **Curso de física básica: Ótica, relatividade, física quântica (vol. 4)**. Editora Blucher, 2014.
- DE OLIVEIRA, Yuri Alves; ANDREATA, Mauro Antonio. O EFEITO CASIMIR. **Blucher Physics Proceedings**, v. 1, n. 1, p. 39-44, 2014.
- de Gracia, G. B. "A física na visão de Ernst Mach: De uma crítica a Newton às teorias gravitacionais." *Revista Brasileira de Ensino de Física* 41 (2019).
- ESCOBAR, O.; PLEITEZ, V. *Mecânica Relacional: A propósito de uma resenha*. **Revista Brasileira de Ensino de Física**, v. 23, p. 260-270, 2001.
- J. Barbour e H. Pfister, in: *Mach's Principle; From Newton's Bucket to Quantum Gravity*, edited by D. Howard e J. Stachel (Boston University, Boston, 1995), v. 6.
- D.A. Mendonça, *Os principia de Newton: Uma Leitura de seus Conceitos e Princípios Fundamentais* (Uece, Iguatu, 2015).
- P. Davies, *Inertia Theory – Paul Davies on the Meaning of Mach's Principle.*, disponível em <http://www.pa.drak.com/ine/INERTIA.html>.

- V. Sabbata e M. Gasperini, *Introduction to Gravitation* (World Scientific Publishing Co, Singapore, 1985). [20] A. Einstein, *The principle of relativity* (Dover, New York, 1952), p. 175.
- M. Dine, *The Utility of Quantum Field Theory*, Palestra plenária no ICHEP 2000, Osaka, Japon; hep-ph/0010035.
- R. Geroch, *General Relativity from A to B*, University of Chicago Press, Chicago, 1978.
- C. M. Will, The confrontation between gravitation theory and experiment, em *General Relativity, An Einstein Centenary Survey*, S. W. Hawking e W. Israel (Eds.), Cambridge University Press, Cambridge, 1979.
- C. W. Misner, K. S. Thorne e J. A. Wheeler, *Gravitation*, Freeman, New York, 1963; p.1095.

APÊNDICE A – Link de acesso para Download da simulação

https://mega.nz/file/pxwFiJiD#749hrivFEsD_Vp5P1VLfDPbHGLJn07zVQakf4bNbXE

0.

APÊNDICE B – Link de acesso para Download das versões do UPBGE

<https://mega.nz/folder/k9MW1KiZ#UOKzjh3IQ0GEgjQ6GUc7ug/folder/B19HAa7Z>