



UNIVERSIDADE FEDERAL DO CEARÁ
CENTRO DE CIÊNCIAS
DEPARTAMENTO DE FÍSICA
GRADUAÇÃO EM FÍSICA

VINÍCIUS DOS SANTOS BESSA RIBEIRO

ENSINO DE FÍSICA DE PARTÍCULAS NO ENSINO MÉDIO UTILIZANDO
ROLE-PLAYING GAME

FORTALEZA

2022

VINÍCIUS DOS SANTOS BESSA RIBEIRO

ENSINO DE FÍSICA DE PARTÍCULAS NO ENSINO MÉDIO UTILIZANDO
ROLE-PLAYING GAME

Trabalho de conclusão de curso apresentado ao Curso de Graduação em Física do Centro de Ciências da Universidade Federal do Ceará, como requisito parcial à obtenção do título de Licenciado em Física.

Orientador: Prof. Dr. Roberto Vinhaes Maluf Cavalcante.

FORTALEZA

2022

Dados Internacionais de Catalogação na Publicação
Universidade Federal do Ceará
Sistema de Bibliotecas
Gerada automaticamente pelo módulo Catalog, mediante os dados fornecidos pelo(a) autor(a)

R372e Ribeiro, Vinícius dos Santos Bessa.
Ensino de Física de Partículas no ensino médio utilizando Role-Playing Game / Vinícius dos Santos Bessa Ribeiro. – 2022.
79 f. : il. color.

Trabalho de Conclusão de Curso (graduação) – Universidade Federal do Ceará, Centro de Ciências, Curso de Física, Fortaleza, 2022.
Orientação: Prof. Dr. Roberto Vinhaes Maluf Cavalcante.

1. Ensino de Física. 2. Física Moderna. 3. Role-Playing Game. 4. Gamificação. I. Título.

CDD 530

VINÍCIUS DOS SANTOS BESSA RIBEIRO

ENSINO DE FÍSICA DE PARTÍCULAS NO ENSINO MÉDIO UTILIZANDO
ROLE-PLAYING GAME

Trabalho de conclusão de curso apresentado ao Curso de Graduação em Física do Centro de Ciências da Universidade Federal do Ceará, como requisito parcial à obtenção do título de Licenciado em Física.

Aprovada em: 13/12/2022.

BANCA EXAMINADORA

Prof. Dr. Roberto Vinhaes Maluf
Cavalcante (Orientador)
Universidade Federal do Ceará (UFC)

Dr. Ednardo Moreira Rodrigues
Seara da Ciência

Prof. Dr. Nildo Loiola Dias
Universidade Federal do Ceará (UFC)

À minha mãe, Adriana Bessa, que é uma
guerreira implacável.

AGRADECIMENTOS

Gostaria de agradecer primeiramente aos meus pais, que sempre me apoiaram.

Ao meu irmão, Victor, espero que alcance todos os seus sonhos.

Aos meus tios, Andressa e Jean, que representam para mim uma grande fonte de motivação.

Aos meus primos, Jeanzinho e Eduardo, sinto grandes saudades e espero vê-los em breve.

À minha namorada, Sara, obrigado por tantos anos de parceria e amor.

Um grande obrigado aos amigos que fiz na vida; Adailton, Henrique, Elisson, Liz e Pedro.

Aos colegas que fiz ao longo da graduação, em especial, Alessandro, Davi, Iury e Sybele.

Ao professor Dr. Ednardo Rodrigues por propor o tema deste trabalho, por apoiar o meu crescimento acadêmico e por permitir a abertura de muitas oportunidades.

À Nathalia e à Maggie por contribuir na elaboração do sistema de P&D.

Ao Dr. Rafael Eufrásio, que para mim é uma grande inspiração como profissional e ser humano.

Quero agradecer ainda ao professor Dr. Roberto Maluf, por ser um dos melhores professores que tive na graduação e pela contribuição como orientador neste trabalho.

À Seara da Ciência, onde o trabalho nasceu e em nome do qual ele pôde ser apresentado no XIX Encontro de Pesquisa em Ensino de Física .

Ao CNPq pelo apoio financeiro com a manutenção da bolsa de iniciação científica.

"A história do atomismo é de reducionismo – o esforço para reduzir todas as operações da natureza a um pequeno número de leis que governam um pequeno número de objetos primordiais." (LEDERMAN, 1993, p.87)

RESUMO

O desenvolvimento do Modelo Padrão (MP) de Partículas Elementares no século XX representou um marco na história da ciência, razão pela qual a Física de Partículas permanece sendo uma área de grande relevância para diversos campos de estudo e aplicação. Apesar da importância, a Física de Partículas é pouco explorada em tópicos de Física Moderna no Ensino Médio. É provável que o motivo disso seja a complexidade dos termos e conceitos empregados na área, o que dificulta a compreensão do conteúdo pelo aluno. Com o objetivo de superar esse problema, propõe-se a utilização de noções de *Role-Playing Game (RPG)* na aplicação de uma dinâmica gamificada como complemento de uma aula tradicional sobre Física de Partículas, visando uma abordagem criativa que permita um melhor entendimento do conteúdo apresentado. O *RPG* é um jogo narrativo que, apesar de exigir a compreensão de um conjunto de regras e elementos, consegue cativar facilmente o jogador, conquistando o seu interesse e comprometimento. A abordagem pedagógica proposta é dividida em duas etapas, realizadas em dias distintos. A primeira consiste de uma aula tradicional introduzindo os conceitos básicos da Física de Partículas. A segunda etapa consiste da aplicação da dinâmica gamificada, em que o professor faz o papel de mestre numa sessão de *RPG*. Elaborou-se um sistema de *RPG* simplificado no qual cada partícula foi associada a uma entidade/espécie de alta fantasia (AF). Por exemplo, os léptons são correspondentes aos elfos. Diversos fenômenos associados às partículas podem ser representados a partir das noções do *RPG-AF*. Por exemplo, elfos (elétrons) e poor-goblins (pósitrons) tendem a se aniquilar, transformando-se em raios gama (representados por phantoms). Os atributos inerentes a cada classe no *RPG*, tais como destreza e constituição, podem ser associados às propriedades fundamentais das partículas, como carga elétrica e spin. A aplicação da proposta deu-se em uma turma da Escola Estadual de Educação Profissional Joaquim Nogueira, a partir da qual buscou-se avaliar a experiência dos alunos através de um questionário.

Palavras-chave: ensino de física; física moderna; role-playing game; gamificação.

ABSTRACT

The development of the standard model of particles in the 20th century represented a milestone in the history of science, which is why particle physics remains an area of great relevance for several fields of study and application. Despite its importance, elementary particle physics is little explored in topics of Modern Physics in High School. It is likely that the reason for this is the complexity of terms and concepts used in the area, which makes it difficult to understanding of the content by the student. In order to overcome this problem, we propose the use of RPG (Role-Playing Game) notions in the application of a gamified dynamics as a complement to a traditional class on particle physics, aiming at a creative approach that allows a clear understanding of the displayed content. The RPG is a narrative game that, despite requiring the understanding of a set of rules and elements, manages to easily captivate the player, gaining their interest and commitment. The proposed pedagogical approach is divided into two stages, carried out on different days. The first consists of a traditional class introducing the basic concepts of particle physics. The second stage consists of the application of gamified dynamics, in which the teacher plays the role of master in an RPG session. A simplified RPG system was developed in which each particle was associated with a high fantasy entity/species (RPG-HF). For example, the leptons correspond to elves. Several phenomena associated with particles can be represented from the notions of RPG-HF. For example, elves (electrons) and poor-goblins (positrons) tend to annihilate each other, transforming in gamma rays (represented by phantoms). The attributes inherent to each class in RPG, such as dexterity and constitution, can be associated with the properties fundamentals of particles, such as electric charge and spin. The application of the proposal took place in a class of the State School of Professional Education Joaquim Nogueira, from which we sought to evaluate the students' experience through a questionnaire.

Keywords: physics teaching; modern physics; role-playing game; gamification.

LISTA DE FIGURAS

| | |
|--|----|
| Figura 1 – Ilustração de uma ampola de Crooks | 20 |
| Figura 2 – Ilustração do experimento de Thomson com raios catódicos | 21 |
| Figura 3 – Ilustração do experimento de Geiger e Mardsen | 23 |
| Figura 4 – Ilustração de um elétron sofrendo uma transição de um estado estacionário inicial para um estado estacionário final com menor energia. | 25 |
| Figura 5 – Níveis de energia do átomo de hidrogênio de acordo com o modelo de Bohr. | 25 |
| Figura 6 – Interpretação para as antipartículas de acordo com o modelo do mar de Dirac. | 30 |
| Figura 7 – Tabela do modelo padrão de partículas. | 40 |
| Figura 8 – Ilustração de uma típica mesa de sessão de <i>Role-Playing Game (RPG)</i> | 44 |
| Figura 9 – Módulos básicos da 5 ^o edição de <i>Dungeons & Dragons</i> | 45 |
| Figura 10 – Fluxograma indicando os passos de um sessão de RPG. | 45 |
| Figura 11 – Modelo Padrão de Física de Partículas associado a RPG de alta fantasia. | 50 |
| Figura 12 – Diagramas de Feynman ilustrados com personagens de <i>RPG</i> . (a) aniquilação de par de partículas elétron-pósitron. (b) decaimento do múon. | 53 |
| Figura 13 – Decaimentos do tau em diagramas de Feynman com seres de <i>RPG</i> | 53 |
| Figura 14 – Registros da aula ministrada no Dia 1. | 55 |
| Figura 15 – Registros da aula ministrada no Dia 3. | 56 |
| Figura 16 – Pontuações da primeira parte do questionário. | 57 |
| Figura 17 – Questão 1 do questionário. | 57 |
| Figura 18 – Questão 2 do questionário. | 59 |
| Figura 19 – Questões 3 e 4 do questionário. | 61 |
| Figura 20 – Respostas à Questão 4. | 62 |
| Figura 21 – Questão 5 do questionário. | 63 |
| Figura 22 – Respostas à Questão 5. | 64 |
| Figura 23 – Questões 6 e 7 do questionário. | 64 |
| Figura 24 – Respostas à Questão 6. | 65 |
| Figura 25 – Respostas à Questão 7. | 65 |
| Figura 26 – Questões 8 e 9 do questionário. | 66 |
| Figura 27 – Respostas à Questão 8. | 66 |
| Figura 28 – Respostas à Questão 9. | 67 |
| Figura 29 – Questão 10 do questionário. | 67 |

| | |
|--|----|
| Figura 30 – Respostas à Questão 10. | 68 |
| Figura 31 – Questão 11 do questionário. | 68 |
| Figura 32 – Respostas à Questão 11. | 69 |
| Figura 33 – Questão 12 do questionário. | 69 |
| Figura 34 – Exemplos de fichas de personagem simplificadas para P&D. | 77 |

LISTA DE TABELAS

| | |
|---|----|
| Tabela 1 – Família dos léptons. | 35 |
| Tabela 2 – Números leptônicos. | 36 |
| Tabela 3 – Alguns bárions e suas propriedades. | 37 |
| Tabela 4 – Alguns mésons e suas propriedades. | 37 |
| Tabela 5 – Combinações de quarks e antiquarks para formação dos mésons. | 38 |
| Tabela 6 – Combinações de quarks para a formação dos bárions. | 39 |
| Tabela 7 – Família dos quarks. | 39 |
| Tabela 8 – Interações fundamentais. | 41 |
| Tabela 9 – Habilidades para quantificação de atributos no RPG. | 47 |
| Tabela 10 – Respostas à Questão 1. | 58 |
| Tabela 11 – Respostas à Questão 2. | 60 |
| Tabela 12 – Respostas à Questão 3. | 61 |
| Tabela 13 – Respostas à Questão 12. | 70 |

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

| | |
|----------------|-------------------------------------|
| <i>D&D</i> | <i>Dungeons & Dragons</i> |
| <i>NPC</i> | <i>non-player character</i> |
| <i>P&D</i> | <i>Particles & Dragons</i> |
| <i>RPG</i> | <i>Role-Playing Game</i> |
| <i>XP</i> | <i>experience point</i> |
| AF | Alta Fantasia |
| CA | Classe de Armadura |
| CD | Classe de Dificuldade |
| LHC | <i>Large Hadron Collider</i> |
| MP | Modelo Padrão |
| SNO | <i>Sudbury Neutrino Observatory</i> |

LISTA DE SÍMBOLOS

| | |
|-----------|------------------------------|
| B | Campo magnético |
| <i>c</i> | Velocidade da luz |
| <i>e</i> | Carga elementar |
| <i>E</i> | Energia |
| E | Campo elétrico |
| F | Força de Lorentz |
| \hat{H} | Hamiltoniano |
| <i>h</i> | Constante de Planck |
| \hbar | Constante de Planck reduzida |
| <i>K</i> | Constante de Boltzmann |
| <i>m</i> | Massa da partícula |
| m_e | Massa do elétron |
| P | Momento linear |
| \hat{P} | Operador momento linear |
| <i>q</i> | Carga da partícula |
| <i>r</i> | Raio orbital |
| <i>R</i> | Constante de Rydberg |
| <i>S</i> | Estranheza |
| <i>t</i> | Tempo |
| <i>T</i> | Temperatura efetiva |
| <i>u</i> | Densidade de energia |
| <i>U</i> | Tensão elétrica |
| <i>v</i> | Velocidade da partícula |
| <i>Z</i> | Número atômico |
| ψ | Função de onda |
| ν | Frequência |
| λ | Comprimento de onda |

SUMÁRIO

| | | |
|--------|--|----|
| 1 | INTRODUÇÃO | 15 |
| 2 | REVISÃO DA FÍSICA DE PARTÍCULAS | 18 |
| 2.1 | Os primórdios da hipótese atômica | 18 |
| 2.2 | A descoberta do elétron | 19 |
| 2.3 | O modelo nuclear de Rutherford | 22 |
| 2.4 | O início da mecânica quântica e o modelo de Bohr | 23 |
| 2.5 | A descoberta do nêutron e do neutrino | 26 |
| 2.6 | Radioatividade | 27 |
| 2.6.1 | <i>Radiação α</i> | 28 |
| 2.6.2 | <i>Radiação β</i> | 28 |
| 2.6.3 | <i>Radiação γ</i> | 28 |
| 2.7 | Antipartículas | 29 |
| 2.7.1 | <i>Propriedades das antipartículas</i> | 31 |
| 2.8 | Interações fundamentais da natureza | 31 |
| 2.8.1 | <i>Interação gravitacional</i> | 31 |
| 2.8.2 | <i>Interação nuclear fraca</i> | 32 |
| 2.8.3 | <i>Interação eletromagnética</i> | 32 |
| 2.8.4 | <i>Interação nuclear forte</i> | 32 |
| 2.9 | Píons, múons e o problema dos neutrinos solares | 32 |
| 2.10 | Classificação de partículas e leis de conservação | 34 |
| 2.10.1 | <i>Léptons</i> | 35 |
| 2.10.2 | <i>Hádrons</i> | 36 |
| 2.10.3 | <i>Quarks</i> | 38 |
| 2.11 | O modelo padrão de partículas elementares | 39 |
| 2.11.1 | <i>Férmions</i> | 40 |
| 2.11.2 | <i>Bósons de calibre e interações fundamentais</i> | 41 |
| 3 | NOÇÕES DO <i>ROLE-PLAYING GAME</i> | 43 |
| 3.1 | A origem do <i>RPG</i> | 43 |
| 3.2 | O manual do <i>RPG</i> | 44 |
| 3.2.1 | <i>O passo a passo de uma sessão</i> | 44 |

| | | |
|-------|--|----|
| 3.2.2 | <i>Criação de personagem e habilidades</i> | 46 |
| 3.2.3 | <i>Classe de Dificuldade (CD) e Classe de Armadura (CA)</i> | 47 |
| 4 | METODOLOGIA PROPOSTA PARA O ENSINO DE FÍSICA DE PARTÍCULAS | 49 |
| 4.1 | Representação dos atributos e das interações entre partículas | 52 |
| 4.2 | Enredo e mecânica de Particles & Dragons | 54 |
| 4.3 | Aplicação da proposta | 55 |
| 5 | RESULTADOS | 57 |
| 5.1 | Primeira parte do questionário | 57 |
| 5.2 | Segunda parte do questionário | 64 |
| 6 | CONCLUSÃO | 71 |
| | REFERÊNCIAS | 73 |
| | APÊNDICE A –EXEMPLO DE FICHA DE RPG PREENCHIDA | 76 |
| | APÊNDICE B –FICHAS DE PERSONAGEM DE PARTICLES & DRAGONS | 77 |
| | APÊNDICE C –PLANO DE AULA DO DIA 1 | 78 |
| | APÊNDICE D –PLANO DE AULA DO DIA 2 | 79 |

1 INTRODUÇÃO

O Ensino de Física na Educação Básica exige a elaboração de estratégias pedagógicas que aproximem o estudante de conceitos físicos que, por vezes, são considerados complexos ou extensos. A Física Moderna é composta de assuntos que despertam o fascínio dos estudantes. Isso pode ser verificado pela popularidade dos conteúdos de divulgação científica produzidos na internet, os quais costumam abordar temas como partículas fundamentais e cosmologia. Apesar do grande potencial de difusão entre os jovens, a Física Moderna é pouco explorada no Ensino Médio. O ensino de Física de Partículas, em específico, encontra um conjunto de dificuldades adicionais, dentre as quais pode-se citar a complexidade da nomenclatura empregada. A chamada Teoria do *Flow* tenta explicar o estado mental no qual as pessoas se dedicam a determinadas atividades que não lhes fornecem ganho material aparente. Pode-se dizer que os elementos básicos do jogo de *RPG*, tais como o desafio e a recompensa, induzem nos estudantes o estado de *flow*. Tendo em mente aproximar a cultura escolar da cultura da juventude, propõe-se um sistema gamificado de ensino de Física de Partículas por meio da aplicação de noções de *RPG*, com o objetivo principal de facilitar a compreensão das partículas do Modelo Padrão (MP), suas características e como elas se relacionam. Tal abordagem pode ser utilizada como método de fixação dos conteúdos previamente estudados em sala de aula, uma vez que os alunos demonstradamente aprendem com maior eficiência através de metodologias de aprendizagem ativa (SILVA *et al.*, 2019).

A gamificação na educação pode ser entendida como um conjunto de estratégias pedagógicas que visam inserir características de um game no processo de aprendizagem. Alguns dos elementos principais de um *game* são regras bem definidas, sistema de recompensas, desafios e narrativa. O termo “gamificação” no contexto da educação surgiu em 2010, mas alguns autores reconhecem que elementos básicos da gamificação já eram empregados em sala de aula há muito tempo (SILVA *et al.*, 2014). A gamificação no ensino de Física frequentemente aparece relacionada a *games* digitais e simulações virtuais, nos quais as leis da Física são representadas de maneira lúdica e interativa. Os *games* digitais foram intensamente influenciados pelo *Role-Playing Game*, tendo ambos muitas características em comum e sendo o segundo mais acessível em sala de aula (BOAS *et al.*, 2017). Sendo assim, o *RPG* contém um grande potencial de aplicação como método de engajamento.

O *RPG* é um jogo de interpretação que mistura a improvisação com um conjunto

de regras pré-estabelecidas. Os jogadores devem inicialmente criar um personagem dentro de uma gama de opções de raças e classes. As características do personagem irão determinar seus atributos, tais como constituição, força, destreza e inteligência. Esses atributos, bem como também a história de fundo e os itens portados pelo personagem são organizados na ficha de personagem, cujo modelo pode ser encontrado na internet. A narrativa do jogo é guiada pelo mestre, que no contexto da sala de aula é o professor. O mestre tem como atribuição descrever o ambiente e os demais personagens não-jogáveis, tais como inimigos, aliados e personagens neutros.

O grupo de jogadores, também chamado de *Party*, pode variar de 3 a 6 membros, os quais devem cooperar para resolver os desafios impostos pelo mestre ou narrador. Ao longo da aventura, o resultado das ações dos jogadores é definido ao jogar-se dados (os mais utilizados são o d6, o d8 e o d20, sendo que o número no final indica a quantidade de faces do dado), de modo a conferir o caráter de aleatoriedade aos acontecimentos. No entanto, os atributos dos personagens acrescentam modificadores nos resultados dos dados. Por exemplo, um personagem com um alto valor de inteligência será beneficiado em um teste de inteligência. Um personagem com um alto valor de força poderá infligir mais dano em combate.

Acompanhando a emergente tendência de gamificação na educação, muitos trabalhos tentaram explorar o *RPG* como uma metodologia ativa para o ensino de variadas matérias. Sistemas de *RPG* orientados para o ensino começaram a surgir no final da década de 1990, com a proposta ficando conhecida como *RPG* pedagógico (AMARAL,). Sistemas de *RPG* orientados para o ensino de matemática, química e outras matérias podem ser facilmente encontrados na literatura. Uma proposta de *RPG* pedagógico para o Ensino de Física que se destaca foi elaborado por Boas *et al.* (2017), com regras simplificadas e com cada sessão dedicada à resolução de uma problemática associada ao tema de Física que se pretende ensinar.

O capitão avisa que existe outro submarino a 100 km de distância e que a velocidade do som na água é de 1130 m/s, complementando que a resposta do outro submarino chegaria em, aproximadamente, 3 minutos. Era preciso então que os alunos verificassem, por meio dessas informações, se o sonar estava funcionando corretamente ou não, fato que exigiria deles conhecimentos de cinemática. (BOAS *et al.*, 2017, p. 383).

O *RPG* pedagógico evidentemente exige uma adaptação cuidadosa dos elementos clássicos do *Role-Playing Game*. É necessário simplificar as mecânicas do jogo, de modo que elas permitam que o conteúdo didático seja apreendido pelo aluno no contexto da sala de aula,

mas também é necessário que o sistema mantenha os elementos do game. Um exemplo de *RPG* pedagógico cujo sistema de regras é descrito em detalhes é o elaborado por Sá e Paulucci (2021). Nessa proposta, foram criados 7 personagens com fichas simplificadas. A turma foi dividida em grupos, de forma que cada grupo fosse responsável por interpretar um personagem. A sessão foi dividida em cenas, que funcionam como capítulos do enredo. A trama do jogo é ambientada em uma espécie de novela espacial e tem como objetivo ensinar um conteúdo que abrange Astronomia básica, Leis de Kepler e Leis de Newton.

O guia rápido de como jogar foi distribuído a todos os grupos de jogadores e foi feita uma leitura conjunta com o professor para discussão das regras. O jogo teve início com a descrição da cena inicial aos alunos, na qual seus personagens estão a caminho de Mercúrio quando sua nave sofre uma pane devido a uma erupção solar inesperada. A partir de então, eles devem descobrir se a nave sofreu danos, qual a extensão desses danos e qual a melhor estratégia para que todos possam voltar sãos e salvos para casa. A linha da história deve induzi-los a consertar a nave e realizar uma acoplagem de emergência em uma estação espacial abandonada, já que não conseguirão voltar sozinhos à Terra ou seguir para Mercúrio devido à grande perda de combustível que a nave sofreu. O conteúdo de física, além de ser explorado na mecânica de questões bônus, que podiam ser utilizadas para facilitar uma jogada de dados, surgia também no contexto da aventura. Quando, por exemplo, os personagens identificaram um vazamento de combustível na lateral da nave, foi necessário a compreensão da terceira lei de Newton para verificar que isto mudaria a trajetória da nave. Ao sair da nave para manutenção, eles discutiram, orientados pelo professor, como a primeira lei de Newton garantiria que eles não seriam “deixados para trás” pela espaçonave. (SÁ; PAULUCCI, 2021).

Ao final da dinâmica, Sá e Paulucci (2021) propõem aos alunos que respondam um questionário para avaliar a proposta de *RPG* pedagógico. O questionário funciona como uma maneira indispensável de medir o quanto o aluno relacionou a sua experiência no jogo com o conteúdo didático que se pretende ensinar. O presente trabalho tem como objetivo principal aplicar uma proposta de ensino de Física de Partículas que mistura a abordagem de ensino tradicional com uma dinâmica que simula um jogo de *RPG*, nomeado de *Particles & Dragons*.

O Capítulo 2 foca-se em apresentar a fundamentação teórica da Física de Partículas. O Capítulo 3 traz um histórico e as noções da dinâmica do *RPG*. O Capítulo 4 expõe a metodologia proposta do uso do *RPG* para o Ensino de Física de Partículas bem como o planejamento da aplicação na Escola Estadual de Educação Profissional Joaquim Nogueira. O Capítulo 5 dedica-se aos resultados obtidos na aplicação através de questionário. Por fim, o Capítulo 6 apresenta as conclusões obtidas a partir de análises de caso.

2 REVISÃO DA FÍSICA DE PARTÍCULAS

A Física de Partículas Elementares é a área da Física que estuda os constituintes mais fundamentais da matéria, suas interações e efeitos no mundo macroscópico. As próximas sessões serão focadas em apresentar uma linha do tempo desse ramo da física, explorando figuras históricas e conceitos relevantes.

2.1 Os primórdios da hipótese atômica

Uma das doutrinas filosóficas mais influentes no desenvolvimento do pensamento do mundo físico certamente foi o atomismo, originada no século V a.C. na Grécia por Leucipo e Demócrito. À princípio, uma investigação superficial da natureza levaria à conclusão de que a matéria é contínua, estando essa concepção de acordo com a nossa percepção sensorial da matéria que nos cerca e da qual somos constituídos. No entanto, a ideia de um caráter contínuo da matéria falhava em explicar satisfatoriamente o constante movimento da natureza, isto é, o fato de que a matéria está em constante mudança. Leucipo de Abdera tentou resolver esse problema conjecturando que toda a matéria é composta de pequeníssimos entes, que seriam estáveis, indivisíveis e permanentes ao longo das transformações. Essa é a primeira concepção do átomo enquanto componente fundamental da matéria. Dessa forma, as propriedades dos corpos são consequência da distribuição espacial dos átomos que os constituem, enquanto as transformações são explicadas pelos seus rearranjos (PORTO, 2013).

É convenção o doce, convenção o amargo; é convenção o quente, convenção o frio; é convenção a cor; a realidade são os átomos e o vazio. (DIELS, 1906 apud GOMPERZ, 2011, p. 281).

O atomismo enquanto corrente filosófica voltou a ganhar destaque durante o Renascimento, movimento de resgate da cultura clássica ocorrido na Europa no século XV. Surgiu nesse período um processo de recuperação das obras de Leucipo e Demócrito, bem como as contribuições teóricas trazidas por atomistas subsequentes como Epicuro de Samos. As bases do atomismo clássico foram então difundidas na Europa, baseando-se nas noções reducionista e mecanicista dos componentes fundamentais da matéria. No século XVII, a teoria da gravitação de Newton passa a explorar o conceito de ação à distância, que inicialmente contraria o princípio de ação local no qual se baseia o atomismo clássico.

Não têm as partículas dos corpos certos poderes, virtudes ou forças pelos quais agem à distância, não apenas sobre os raios luminosos, refletindo-os, refratando-os e inflitando-os, mas também umas sobre as outras, produzindo uma grande parte dos fenômenos da natureza? Pois é bem sabido que os corpos agem uns sobre os outros pelas atrações da gravidade, do magnetismo e da eletricidade; e

esses exemplos mostram o teor e curso da natureza, e fazem não ser improvável que haja outros poderes atrativos além desses. (NEWTON, 2002, p. 274-293).

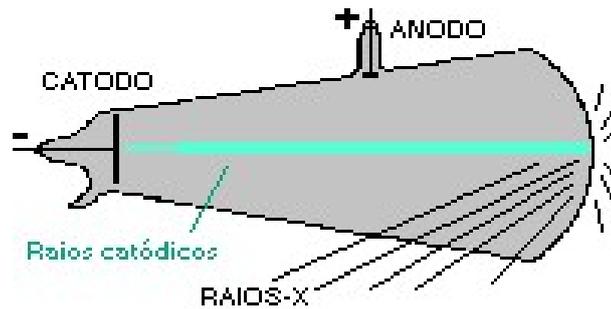
As primeiras evidências experimentais da hipótese atômica surgiram a partir do desenvolvimento da teoria cinética dos gases. Em 1738, Daniel Bernoulli explicou corretamente a relação entre a pressão de um gás e a energia cinética média dos átomos que o compõem. Em 1803, John Dalton publicou o trabalho intitulado “Absorption of gases by water and other liquids”, no qual estabeleceu as bases para o que viria a ser a primeira teoria atômica moderna. Dalton admitia o átomo como uma partícula fundamental e indivisível, cujas características definem diferentes elementos. Assim, as combinações entre os átomos formariam as moléculas, que estariam sujeitas às transformações químicas. A teoria de Dalton explicava bem os experimentos com reações químicas, sendo o fundamento para as chamadas leis ponderais (conservação de massa e reação em proporções fixas). Porém o modelo falhava em explicar adequadamente os fenômenos de natureza elétrica. Em 1857, Rudolf Clausius expande a ideia de que os átomos que compõem os gases ideais seriam esferas perfeitamente elásticas e considera, além da translação, também a rotação e a vibração como movimentos moleculares possíveis. Construindo o seu modelo como um sistema mecânico, Clausius conseguiu caracterizar os estados físicos em termos moleculares, além de fornecer a explicação correta para o calor, descartando definitivamente a hipótese do calor enquanto substância (o calórico) e fortalecendo ainda mais a teoria atômica (CLAUSIUS, 1857).

2.2 A descoberta do elétron

Em 1858, o físico alemão Julius Plücker realizou experimentos em que observou o surgimento de radiação na passagem de uma corrente elétrica em um gás rarefeito. O químico inglês William Crookes contribuiu significativamente com o avanço desses experimentos ao construir um tubo de vidro parcialmente evacuado, contendo eletrodos conectados a uma fonte de tensão elétrica (DEKOSKY, 1983). O aparato, denominado ampola de Crookes, é mostrado na Figura 1. O físico alemão Gotthilf-Eugen Goldstein conduzindo experimentos na ampola de Crookes, observou que os feixes de radiação eram gerados perpendicularmente da superfície do catodo (eletrodo negativo), indicando que se tratavam de partículas eletricamente negativas, que foram nomeadas de raios catódicos.

A determinação da razão carga massa q/m das partículas que compunham os raios

Figura 1 – Ilustração de uma ampola de Crooks



Fonte: Universidade Federal do Ceará (2001).

catódicos foi possível através dos experimentos do físico britânico Joseph John Thomson. O experimento de Thomson consistia em emitir raios catódicos a partir do catodo, que ao serem colimados por um conjunto de fendas, passam por uma região entre placas carregadas. Nesta região, é mantido um campo elétrico e um magnético perpendiculares entre si e com intensidades ajustadas, de modo que os raios sigam sem sofrer deflexão. Em seguida, desliga-se o campo elétrico, de forma que a trajetória dos raios sofram uma certa deflexão devido à influência do campo magnético. Para simplificar o problema, Thomson assumiu campos uniformes e pequenos ângulos de deflexão (GLASCOCK; SPARLIN, 1972).

Desconsiderando a influência dos campos, uma partícula carregada de carga q sujeita a uma diferença de potencial U irá percorrer uma linha reta com velocidade constante v cujo módulo é dado por:

$$v = \left(\frac{2qU}{m} \right)^{1/2} \quad (2.1)$$

Quando a partícula move-se na presença exclusiva do campo magnético \mathbf{B} , ela sofre a ação da força de Lorentz \mathbf{F} dada por

$$\mathbf{F} = e\mathbf{v} \times \mathbf{B} \quad (2.2)$$

Assumindo as condições iniciais consideradas por Thomson em seu experimento, o campo magnético \mathbf{B} é uniforme e perpendicular a \mathbf{v} . Assim, a partícula passa a descrever uma órbita circular de raio r , cuja força centrípeta associada deve se igualar à força de Lorentz, que é a causa original do movimento:

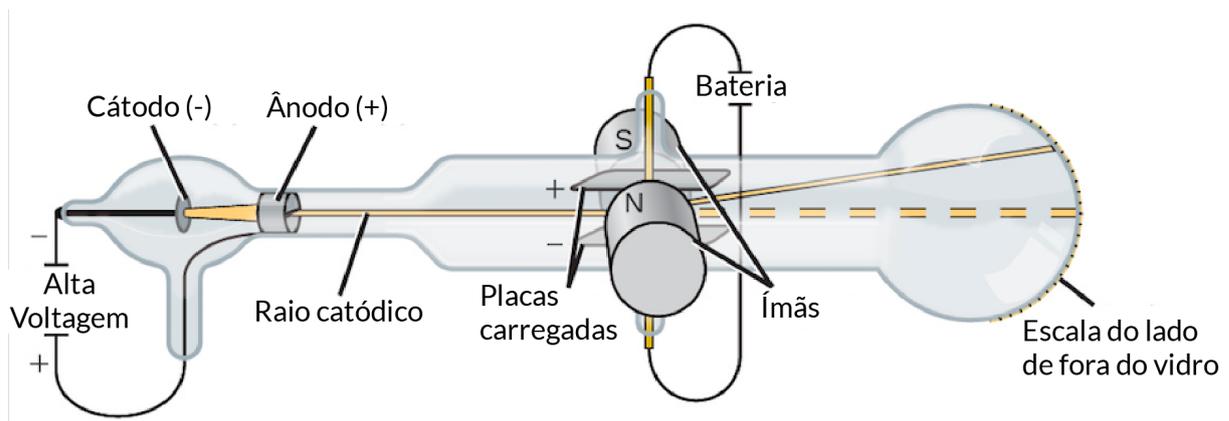
$$qvB = m \frac{v^2}{r} \quad (2.3)$$

Combinando a Equação (2.1) com a Equação (2.3), obtém-se:

$$\frac{q}{m} = \frac{2U}{(Br)^2} \quad (2.4)$$

Uma vez que o campo magnético no experimento é conhecido, a Equação (2.4) permite determinar a razão carga massa das partículas que compõem os raios catódicos. Thomson observou que o valor de q/m experimentalmente encontrado superava em torno de 2000 vezes o valor de q/m para o íon mais leve. Esse fato permitiu concluir que os raios catódicos eram formados por partículas consideravelmente menores que o átomo. Posteriormente, essas pequenas partículas eletricamente negativas foram nomeadas de *elétrons* pelo físico Hendrik Lorentz (TIPLER; LLEWELLYN, 2012). O esquema do aparato experimental utilizado por Thomson para a determinação da razão carga-massa do elétron é mostrada na Figura 2.

Figura 2 – Ilustração do experimento de Thomson com raios catódicos



Fonte: adaptado de KHAN... (2015).

A determinação precisa da carga do elétron só ocorreu em 1909, através dos experimentos conduzidos pelo físico experimental americano Robert Andrews Millikan. O aparato elaborado por Millikan consiste de um borrifador de pequenas gotas de óleo, que as lança sobre um capacitor de placas paralelas inicialmente alimentado por uma bateria. Devido ao atrito, as gotas de óleo tornavam-se carregadas, interagindo, conseqüentemente, com o campo elétrico gerado pelo capacitor. No arranjo montado, as gotas estavam sujeitas a quatro forças: a força gravitacional, a força elétrica, a força de viscosidade e a força de empuxo, sendo a última consideravelmente menor que as demais. Como a interação da gota com o campo elétrico externo depende diretamente da carga líquida da gota, foi possível fazer um balanço de forças de modo a estimar o valor dessa carga a partir das velocidade terminais de cada gota. Millikan observou que as cargas líquidas das diferentes gotas sempre tendiam a múltiplos de um valor elementar. Esse

resultado indicava que a carga teria uma natureza quantizada (TIPLER; LLEWELLYN, 2012), sendo que seu valor elementar correspondia justamente à carga do elétron (aproximadamente $1,6 \cdot 10^{-19}$ C).

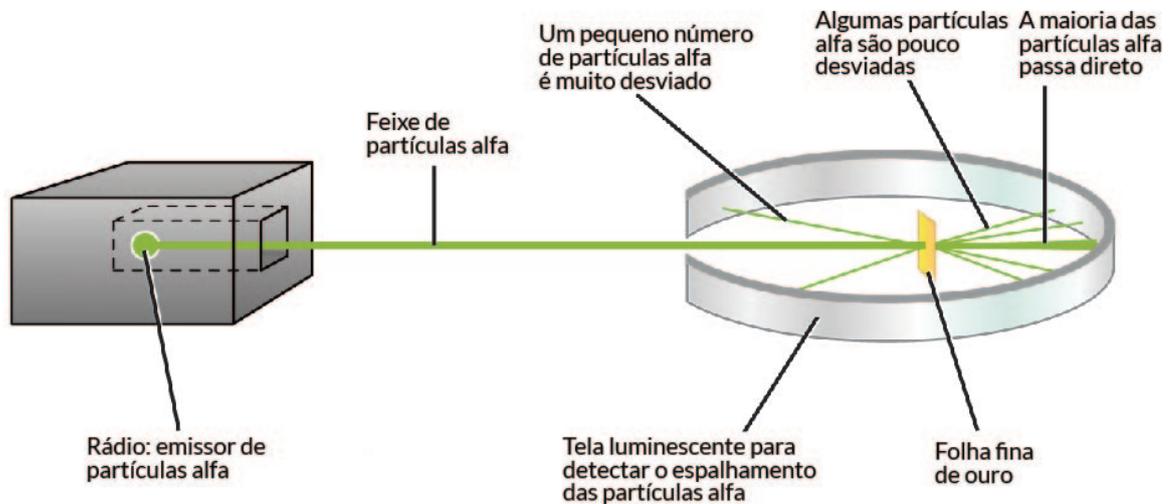
2.3 O modelo nuclear de Rutherford

Em conformidade com as observações da época, o átomo segundo o modelo de Thomson consistia de uma esfera eletricamente positiva no qual distribuíam-se uniformemente os elétrons, partículas negativas consideravelmente mais leves. No entanto, o surgimento de novos fenômenos conhecidos associados às emissões radioativas começaram a pôr em cheque a aceitação do modelo de Thomson. O físico neozelandês Ernest Rutherford já havia descoberto em meados de 1900 que o urânio emitia núcleos de hélio, as chamadas partículas α . Por serem emissões relativamente energéticas de núcleos massivos, Rutherford, juntamente com seus alunos H.W Geiger e E. Marsden, realizaram um conjunto de experimentos com o objetivo de descobrir a estrutura interna do átomo através do espalhamento de partículas α (TIPLER; LLEWELLYN, 2012).

O experimento de Geiger e Marsden consistia basicamente de uma fonte radioativa para emitir o feixe de partículas α , uma fina folha de ouro e uma tela revestida por um cintilador. As partículas α , ao atravessarem a folha de ouro, sofriam um processo de espalhamento e eram, por fim, detectadas na tela através dos sinais no cintilador. A maior parte das partículas atravessava a folha de ouro sem sofrer desvio, mas uma pequena parcela sofria grandes deflexões. O esquema do experimento é mostrado na Figura 3.

As grandes deflexões observadas no experimento com espalhamento de partículas α não poderiam ser satisfatoriamente explicadas pelo modelo de Thomson, uma vez que a estrutura macia da esfera eletricamente positiva não seria capaz de produzir uma força suficientemente intensa nas partículas incidentes. A explicação proposta por Rutherford no ano de 1911 baseava-se na ideia de que o átomo é composto por um núcleo massivo central, ao redor do qual distribuem-se os elétrons em órbita. Desta forma, as partículas α que sofriam grandes deflexões experimentavam um ricochete por consequência de um impacto quase frontal com o núcleo, enquanto as partículas não desviadas deviam passar pelas regiões de vazio do átomo (RUTHERFORD, 1911). O modelo atômico de Rutherford ficou conhecido como modelo

Figura 3 – Ilustração do experimento de Geiger e Mardsen



Fonte: adaptado de KHAN... (2015).

planetário, devido à semelhança entre dinâmica dos elétrons em volta do núcleo atômico e as órbitas planetárias.

2.4 O início da mecânica quântica e o modelo de Bohr

A teoria eletromagnética prevê que os corpos opacos emitem radiação, uma vez que a absorção de radiação eletromagnética é responsável por causar um aumento na energia cinética dos elétrons, tirando-os do seu estado de “equilíbrio”. Quando um corpo absorve energia, sua temperatura aumenta, o corpo então passa a emitir radiação, de modo que a temperatura retorne ao estado inicial. No caso descrito, trata-se do que é chamado de radiação térmica, cujos comprimentos de onda variam ao longo do infravermelho para temperaturas moderadas (TIPLER; LLEWELLYN, 2012). No geral, todos os corpos com temperatura não-nula emitem energia de acordo com uma distribuição de intensidade num intervalo de comprimento de onda. O corpo negro ideal seria aquele que absorve completamente toda a radiação que incide sobre ele, sendo, portanto, também um emissor perfeito. Os estudos sobre a emissão de radiação em corpos negros trouxeram os primeiros indícios experimentais para o conceito de quantização de energia. Em meados de 1900, Max Planck propôs efetivamente que a energia associada à radiação do corpo negro é uma variável discreta, restrita a assumir múltiplos de um certo valor:

$$E = nh\nu \quad n = 1, 2, 3, \dots \quad (2.5)$$

Em que E é a energia transportada pela radiação, ν é a respectiva frequência e h é uma constante que ficou conhecida como constante de Planck. Com a consideração da quantização de energia,

Planck foi capaz de resolver a catástrofe do ultravioleta advinda da equação de Rayleigh-Jeans, propondo uma nova função para descrever a distribuição de densidade de energia para a radiação de um corpo negro:

$$u(\lambda) = \frac{8\pi hc \lambda^{-5}}{e^{\frac{hc}{\lambda kT}} - 1} \quad (2.6)$$

À princípio, a Equação 2.6 poderia facilmente ser encarada como um ajuste conveniente, visto que a hipótese da quantização de energia violava princípios básicos da mecânica clássica. De fato, a proposta de Planck foi inicialmente encarada com certa resistência. Em 1905, Einstein deu uma interpretação física para a constante de Planck em seu famoso trabalho sobre o efeito fotoelétrico, postulando que a quantização seria uma característica universal da luz.

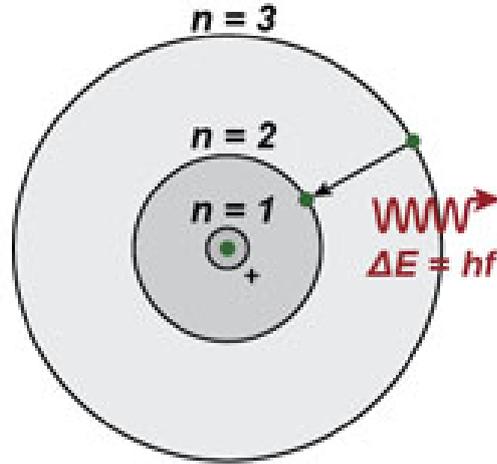
Após 1911, Rutherford observou que o "modelo planetário" continha graves inconsistências do ponto de vista da eletrodinâmica. O movimento de rotação dos elétrons ao redor do núcleo atômico exige que estes estejam acelerados, e que portanto devam emitir radiação. A emissão constante de radiação faria com que os elétrons perdessem energia cinética, eventualmente colidindo com o núcleo. A solução para esse problema foi apresentada por um dos alunos de Rutherford, o físico dinamarquês Niels Bohr, que em 1913 construiu o seu modelo a partir das contribuições de Rutherford, Planck e Einstein. O modelo de Bohr postulou que o elétron no átomo somente pode assumir estados fixos de energia, os chamados estados estacionários. Nesses estados, o elétron não irradia energia. Quando o elétron sofre uma transição de um estado estacionário para outro, ocorre a emissão de um quanta de energia cuja frequência é dada pela Equação 2.5. Esse processo é esquematizado na Figura 4.

Todo elétron ocupando um estado estacionário realiza um movimento circular ao redor do núcleo, sendo que os níveis eletrônicos possíveis são aqueles obtidos a partir da quantização do momento angular do elétron:

$$m_e v r = \frac{nh}{2\pi} = n\hbar \quad n = 1, 2, 3, \dots \quad (2.7)$$

Em que m_e é a massa do elétron, \hbar é a constante de Planck reduzida e v e r são respectivamente a velocidade e o raio da órbita do elétron. Com o objetivo de conciliar esses postulados com a mecânica clássica, Bohr considerou a necessidade de que os resultados clássicos fossem recuperados para o caso de grandes órbitas, o chamado princípio da correspondência. De fato, a Figura 5 ilustra o fato de que para grandes valores de n , os níveis de energia estão

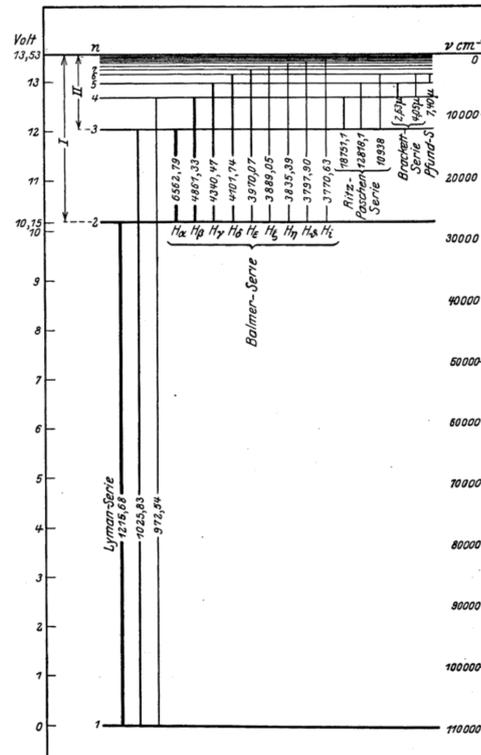
Figura 4 – Ilustração de um elétron sofrendo uma transição de um estado estacionário inicial para um estado estacionário final com menor energia.



Fonte: Instituto de Física da Unicamp (2021).

mais próximos uns dos outros, de modo que a frequência dada pela expressão $E_n - E_{n-1} = h\nu$ coincida com o valor esperado pela teoria clássica da radiação (SEGRÈ, 2012).

Figura 5 – Níveis de energia do átomo de hidrogênio de acordo com o modelo de Bohr.



Fonte: Grotrian (1928).

A solução do movimento do elétron com o momento angular quantizado leva à Equação 2.8 para o raio orbital em função de n :

$$r_n = \frac{n^2 \hbar^2}{m_e k Z e^2}; \quad n = 1, 2, 3, \dots \quad (2.8)$$

onde, k é a constante de Coulomb, Z é o número atômico do elemento, e é a carga elementar e m_e é a massa do elétron. A expressão para as respectivas energias quantizadas é dada por:

$$E_n = -\frac{m_e k^2 Z^2 e^4}{2 \hbar^2 n^2} = -E_0 \frac{Z^2}{n^2}; \quad n = 1, 2, 3, \dots \quad (2.9)$$

Em que E_0 é o estado de energia fundamental. Um dos grandes feitos de Bohr foi conciliar um modelo atômico com a equação de Rydberg-Ritz para as linhas espectrais dos elementos, algo que estava sendo intensamente buscado pelos físicos da época e só foi alcançado pela imposição da condição de quantização do momento angular. De fato, a Equação 2.9 retorna comprimentos de onda equivalentes à equação de Rydberg-Ritz, dada por:

$$\frac{1}{\lambda_{mn}} = R \left(\frac{1}{m^2} - \frac{1}{n^2} \right); \quad n > m, \quad (2.10)$$

onde R é a constante de Rydberg e m e n são números inteiros. A teoria de Bohr também obteve grande sucesso em prever o espectro do hélio ionizado e espectros além da série de Balmer. No entanto, Bohr reconhecia os limites de seu modelo, acreditando que logo uma teoria mais geral seria desenvolvida (SEGRÈ, 2012).

2.5 A descoberta do nêutron e do neutrino

Rutherford já havia observado que era possível liberar núcleos de hidrogênio ao colidir partículas α em núcleos de nitrogênio. Esses resultados o levaram a concluir que o núcleo de hidrogênio, o mais leve de todos, seria uma partícula fundamental presente nos núcleos atômicos. Em 1920, Rutherford nomeou essa partícula fundamental de próton, tendo carga elétrica +1 e aproximadamente 1800 vezes a massa do elétron. A concepção do núcleo atômico até aquele momento era de que este seria formado por prótons (H^+) e elétrons (devido aos experimentos com decaimento β). Por volta desse mesmo período, já havia uma suspeita de que o núcleo atômico também deveria conter partículas neutras, para garantir a estabilidade elétrica. Um dos grandes problemas conceituais com a hipótese de que o núcleo seria constituído de prótons e elétrons vinha do spin inteiro do nitrogênio. Já se sabia que tanto o próton quanto o

elétron possuíam spin $1/2$. O modelo da época previa que o núcleo do nitrogênio seria composto de 14 prótons e 7 elétrons. No entanto, não é possível que a combinação de um número ímpar de partículas com spin $1/2$ resulte no spin 1 do nitrogênio. Em meados de 1932, o físico britânico James Chadwick, que já havia colaborado com Rutherford nos experimentos com núcleos de nitrogênio, repetiu os experimentos de Irene Joliot-Curie e Frederic Joliot-Curie em que ambos utilizavam uma fonte de partículas α emitidas do polônio para bombardear berílio. O experimento original resultou no surgimento de uma radiação penetrante e eletricamente neutra, a qual foi primeiramente interpretada como sendo radiação gama de alta energia. Chadwick foi o responsável por dar a interpretação correta para essa emissão, provando que nela havia uma componente neutra com massa aproximadamente igual à do próton e nomeando-a de nêutron (SETTLE, 2020). Dessa forma, a visão de que o núcleo conteria elétrons foi abandonada, dando lugar a um núcleo composto de prótons e nêutrons. A representação de um elemento neutro E com p prótons e massa A é mostrada abaixo:

$${}_pE^A \quad (2.11)$$

Em meados da década de 1920, observou-se que o decaimento β , um processo radioativo que será abordado com mais detalhes na próxima sessão, não obedecia à conservação de energia. Para explicar a variação da energia dos elétrons emitidos no decaimento β , o físico Wolfgang Pauli propôs a existência de uma partícula neutra, de spin $1/2$ e com pouca ou nenhuma massa. Essa partícula foi chamada de neutrino. A existência do neutrino só viria a ser completamente aceita algumas décadas mais tarde, quando se observou que a sua participação no decaimento β era necessária para garantir a conservação do momento (OSTERMANN, 2001 (Texto de apoio ao professor de Física, V.12)).

2.6 Radioatividade

A radioatividade é o processo pelo qual núcleos instáveis decaem e emitem radiação na forma de partículas ou ondas eletromagnéticas. Muitos avanços na Física de Partículas ocorreram a partir dos experimentos de radioatividade realizados na primeira metade do século XX.

2.6.1 Radiação α

As partículas α foram amplamente utilizadas nos experimentos de Rutherford e foram essenciais para a sondagem da estrutura espacial do átomo. Essas partículas são na realidade núcleos de hélio (2 prótons e 2 nêutrons). Um exemplo de reação que libera partículas α é o decaimento do núcleo de rádio Ra^{226} (88 prótons e 138 nêutrons) em um núcleo de radônio Rn^{222} (86 prótons e 136 nêutrons). É perceptível que nesse processo a emissão do núcleo de hélio é necessária para a conservação do número total de prótons e nêutrons (OSTERMANN, 2001 (Texto de apoio ao professor de Física, V.12)):



2.6.2 Radiação β

A radiação β consiste na emissão de elétrons de alta energia a partir do núcleo. O processo pelo qual isso ocorre chama-se decaimento β^- , consistindo na transformação de um nêutron em um próton com a consequente liberação do elétron e do antineutrino do elétron. O decaimento β^+ consiste na transmutação de um próton em um nêutron, com a consequente emissão do pósitron (antipartícula do elétron) e do neutrino do elétron. O conceito de antipartícula será melhor explorado na seção seguinte. Um exemplo desse processo é o decaimento do carbono-14 (6 prótons e 8 nêutrons) em nitrogênio-14 (7 prótons e 7 nêutrons) (GRAHAM, 2002):



2.6.3 Radiação γ

A radiação γ consiste na emissão de ondas eletromagnéticas de alta frequência. Em geral, ocorre quando um núcleo está temporariamente em um estado excitado. A energia extra é então liberada na forma de raios γ . Um exemplo disso é o que ocorre com o núcleo de neônio excitado:



2.7 Antipartículas

Em 1926, os físicos Oskar Klein e Walter Gordon elaboraram uma equação de onda relativística cuja representação no espaço de posições é dada abaixo:

$$\left(\frac{1}{c^2} \frac{\partial^2}{\partial t^2} - \nabla^2 + \frac{m^2 c^2}{\hbar^2} \right) \psi(\mathbf{x}, t) = 0, \quad (2.15)$$

em que $\psi(\mathbf{x}, t)$ é a função de onda que descreve a partícula de massa m . Ao contrário da equação de Schrödinger, a Equação 2.15 é de segunda ordem no tempo e conduz a probabilidades negativas. Em vista disso, o físico britânico Paul Dirac passou a buscar uma equação relativística para descrever o elétron e que mantivesse a interpretação probabilística da equação de Schrödinger, o que equivale a uma expressão da forma:

$$\hat{H} \psi = i \frac{\partial \psi}{\partial t} \quad (2.16)$$

O Hamiltoniano associado a energia relativística é expresso por:

$$\hat{H} = \pm \sqrt{\hat{\mathbf{p}}^2 c^2 + m^2 c^4} \quad (2.17)$$

Considerando a solução positiva e aplicando a atuação dos operadores na Equação 2.17, obtém-se:

$$\sqrt{(-i\hbar\nabla)^2 c^2 + m^2 c^4} \psi = i \frac{\partial \psi}{\partial t} \quad (2.18)$$

Dirac contornou o problema de lidar com a soma de operadores dentro da raiz fazendo a seguinte consideração:

$$\sqrt{\hat{p}^2 c^2 + m^2 c^4} = c\boldsymbol{\alpha} \cdot \mathbf{p} + \beta mc^2 \quad (2.19)$$

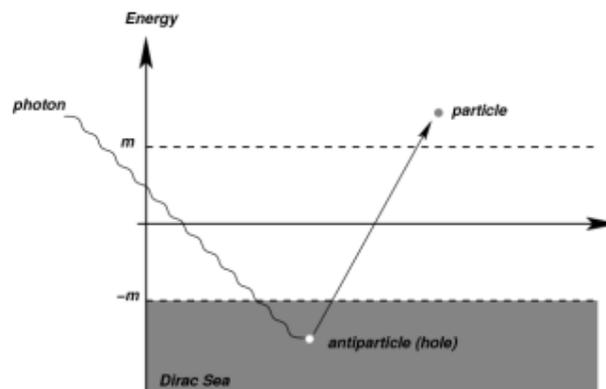
O que leva à equação abaixo:

$$(c\boldsymbol{\alpha} \cdot \mathbf{p} + \beta mc^2) \psi(\mathbf{x}, t) = i \frac{\partial \psi(\mathbf{x}, t)}{\partial t}, \quad (2.20)$$

onde α e β são operadores atuando em $\psi(\mathbf{x}, t)$ que devem satisfazer as condições inicialmente impostas, tais como possuir derivadas espaciais de primeira ordem e obedecer à expressão para a energia relativística (LOBO,). Se α e β satisfazem as condições impostas, a Equação 2.20 corresponde à equação de Dirac para o elétron livre. A expressão elaborada por Dirac permite soluções com energia negativa, o que poderia ser entendido como um problema do ponto de

vista da interpretação física. No entanto, Dirac incorporou esse resultado em sua *teoria dos buracos* ou *mar de Dirac*. A aceitação da solução negativa resulta na possibilidade de que os elétrons emitam fótons e decaiam infinitamente para níveis de energia negativos. Dirac invocou o princípio de exclusão de Pauli para conjecturar que todos os estados de energia negativa já estão ocupados, evitando assim que os elétrons com energia positiva decaíssem indefinidamente (FERREIRA NETO,). Porém, esse modelo permitiria que um elétron no mar negativo recebesse energia suficiente para ocupar um estado no mar positivo. Essa transição deixaria um “buraco” no mar de energia negativa que se comportaria como uma partícula idêntica ao elétron, porém com carga elétrica positiva. Ou seja, a teoria de Dirac previa a existência de uma antipartícula do elétron, que mais tarde ficou conhecida como pósitron.

Figura 6 – Interpretação para as antipartículas de acordo com o modelo do mar de Dirac.



Fonte: Cesarius (2013).

O pósitron foi detectado em laboratório em 1932, enquanto o antipróton e o antinêutron foram detectados em meados de 1955. De fato, hoje sabe-se que a maioria das partículas possui uma antipartícula associada. Dirac encerra sua Nobel Letter de 1933 conjecturando sobre a existência de estruturas em larga escala compostas de antimatéria.

Se aceitarmos a visão de completa simetria entre carga elétrica positiva e negativa no que diz respeito às leis fundamentais da natureza, devemos considerar como um acidente que a Terra (e presumivelmente todo o sistema solar) contenha uma preponderância de elétrons negativos e prótons positivos. É bem possível que para algumas das estrelas seja o contrário, pois essas estrelas são formadas principalmente por pósitrons e prótons negativos. Na verdade, pode haver metade das estrelas de cada tipo. Os dois tipos de estrelas mostrariam exatamente o mesmo espectro, e não haveria como distingui-los pelos métodos astronômicos atuais. (DIRAC, 1933, p. 325).

2.7.1 *Propriedades das antipartículas*

A colisão entre uma partícula e sua antipartícula associada provoca a aniquilação de ambas, com consequente liberação de energia na forma de fótons. A reação de aniquilação elétron-pósitron é denotada abaixo:

$$e^{-} + e^{+} \longrightarrow 2\gamma \quad (2.21)$$

Considerando a equivalência matéria-energia, o processo inverso do mostrado acima pode ocorrer, isto é, um par partícula-antipartícula pode ser criado a partir de uma quantidade correspondente de energia:

$$\gamma \longrightarrow e^{-} + e^{+} \quad (2.22)$$

Ainda é possível que um par partícula-antipartícula transforme-se em outro par partícula-antipartícula. Por exemplo, considerando que uma colisão elétron-pósitron produza inicialmente uma certa quantidade de energia, é possível que a energia cinética desse par forneça a energia da massa de repouso do par próton-antipróton (OSTERMANN, 2001 (Texto de apoio ao professor de Física, V.12)):

$$e^{-} + e^{+} \longrightarrow p + \bar{p} \quad (2.23)$$

2.8 **Interações fundamentais da natureza**

Existem quatro forças fundamentais no universo; gravitacional, nuclear fraca, eletromagnética e nuclear forte. Cada uma delas está associada a uma propriedade fundamental da matéria. Do ponto de vista da Física Moderna, as forças envolvidas na interação entre as partículas são transmitidas através da troca de partículas mediadoras. As forças fundamentais também estão associadas a campos fundamentais. Dessa forma, analogamente aos campos gravitacional e eletromagnético, existem também os campos forte e fraco. Pode-se dizer que as partículas mediadoras são os quanta dos campos fundamentais (MOREIRA, 2009).

2.8.1 *Interação gravitacional*

A interação gravitacional está associada à presença de massa, que é uma das propriedades intrínsecas da matéria. É uma força atrativa e de longo alcance. A partícula mediadora responsável pela interação gravitacional seria o gráviton (G), que até o momento não foi detec-

tado experimentalmente. É a força mais fraca entre as quatro, o que explica o fato de apenas objetos de grande massa serem capazes de produzir campos gravitacionais apreciáveis.

2.8.2 Interação nuclear fraca

A interação nuclear fraca atua nos fenômenos de decaimento radioativo, tal como o decaimento β . As partículas mediadoras dessa força são W^+ , W^- e Z^0 , que ao contrário das demais, são partículas com massa de repouso não-nula. A propriedade da matéria ligada à força fraca é a carga fraca. Os neutrinos, cuja existência foi proposta com o objetivo de explicar corretamente o decaimento β , só sentem a força fraca e a força gravitacional. Considerando que a força fraca tem o menor alcance e que a massa dos neutrinos é extremamente pequena, não é de se surpreender que essas partículas interajam tão pouco com a matéria.

2.8.3 Interação eletromagnética

A interação eletromagnética está associada à carga elétrica e é consideravelmente mais intensa que as duas anteriores. Pode ser tanto atrativa quanto repulsiva, dependendo das cargas envolvidas na interação. A partícula mediadora da interação eletromagnética é o fóton (γ). A Teoria de Glashow-Weinberg-Salam unifica as interações fraca e eletromagnética, descrevendo a chamada força eletrofraca, que tem grande relevância na descrição das condições do universo primordial.

2.8.4 Interação nuclear forte

A Interação nuclear forte é responsável por manter os constituintes do núcleo atômico, os chamados núcleons, coesos, garantindo sua estabilidade. Possui a maior intensidade entre as quatro forças fundamentais e seu alcance está restrito às dimensões do núcleo, sendo portanto uma força de curto alcance. A propriedade fundamental com a qual se relaciona é chamada de carga cor. A partícula mediadora da interação forte é o glúon (g). A força forte pode ser dividida em fundamental e residual, essa distinção será melhor explorada posteriormente.

2.9 Píons, múons e o problema dos neutrinos solares

Por volta da década de 1930, o físico japonês Hideki Yukawa buscou calcular a massa da partícula mediadora da força nuclear forte, encontrando aproximadamente 1/7 da

massa do próton e prevendo que a partícula deveria existir em três variedades de carga; positiva, neutra e negativa. As três variedades dessa partícula, com a massa prevista por Yukawa, foram detectadas no final da década de 1940, sendo chamada de pión (π). Como visto na seção anterior, a verdadeira partícula mediadora da interação forte é o glúon (g), mas a troca de píons entre prótons e nêutrons é responsável por gerar a força forte residual, que será discutido em breve. Ao contrário das partículas apresentadas até aqui, o pión é altamente instável. Os píons carregados têm um tempo de vida médio da ordem de 10^{-8} segundos, enquanto o pión neutro tem um tempo de vida ainda menor, da ordem de 10^{-16} segundos (OSTERMANN, 2001 (Texto de apoio ao professor de Física, V.12)).

O estudo do decaimento dos píons revelou a existência de uma nova partícula, o múon (μ), que possui aproximadamente 1/9 da massa do próton e se apresenta com duas variedades; μ^+ (carga elétrica +1) e μ^- (carga elétrica -1). Abaixo são apresentados dois decaimentos possíveis do π^+ .

$$\pi^+ \longrightarrow \mu^+ + \nu \quad (2.24)$$

$$\pi^+ \longrightarrow e^+ + \nu \quad (2.25)$$

Porém, os neutrinos produzidos nessas reações não são realmente iguais. O primeiro é chamado de neutrino do múon (ν_μ), enquanto o segundo é chamado de neutrino do elétron (ν_e). Essa distinção é construída a partir das interações que cada tipo de neutrino pode realizar. Por exemplo, as seguintes interações entre neutrinos e o nêutron são possíveis:

$$n + \nu_\mu \longrightarrow \mu^- + p \quad (2.26)$$

$$n + \nu_e \longrightarrow e^- + p \quad (2.27)$$

No entanto, o seguinte decaimento nunca foi observado:

$$n + \nu_e \longrightarrow \mu^- + p \quad (2.28)$$

Em 1975 detectou-se uma partícula com 2 vezes a massa do próton, carga elétrica -1 e spin 1/2, semelhante a um elétron pesado. Essa partícula foi chamada de tau (τ), possuindo também um neutrino associado (ν_τ). Existem então três tipos de neutrinos; ν_e , ν_μ e ν_τ . Em concordância com o que foi exposto na Sessão 2.1.7, cada neutrino possui um antineutrino

correspondente; $\bar{\nu}_e$, $\bar{\nu}_\mu$ e $\bar{\nu}_\tau$.

Um dos mais duradouros problemas em aberto na física do século XX certamente foi o que ficou conhecido como problema dos neutrinos solares, que só foi propriamente resolvido no ano de 2002. O problema inicia-se em 1966, quando o chamado experimento Homestake indicou um fluxo de ν_e proveniente do Sol menor do que o esperado pelo *Modelo Solar Padrão* (MSP). Sabe-se que a maior parte da energia do Sol tem origem termonuclear, do contrário sua energia seria completamente irradiada em uma fração da sua idade atual. Atualmente, o Sol encontra-se na sequência principal do diagrama Hertzsprung-Russell, que é a fase mais duradoura da vida de uma estrela e é marcada pela fusão do hidrogênio em hélio. A reação do ciclo próton-próton (pp), que é responsável pela produção da maior parte da energia do Sol, é apresentada abaixo:



Ou seja, o Sol representa uma grande fonte de emissão de neutrinos do elétron. Entre 1970 e 2002, sucessivos experimentos foram realizados e as medições sempre indicavam um deficit no fluxo de neutrinos provenientes do Sol. Em 2002, o experimento *Sudbury Neutrino Observatory* (SNO) realizado no Canadá foi capaz de detectar os neutrinos do múon e do tau. A explicação do problema está no fato de que o neutrino do elétron pode alterar sua identidade no intervalo de tempo entre a emissão e a detecção. Assim, parte do fluxo de ν_e seria convertido em ν_μ e ν_τ , comprometendo a detecção dessa parcela. Esse processo ficou conhecido como oscilação de neutrinos (PRAIS,).

2.10 Classificação de partículas e leis de conservação

Além das leis de conservação convencionais, tais como conservação da energia total, do momento linear e do momento angular, os físicos observaram a necessidade de se incluir novas quantidades conservadas para explicar por que algumas reações ocorrem e outras não (SCHÄFFER *et al.*, 2020). As seções a seguir trazem algumas dessas leis de conservações intrínsecas a classificação de cada partícula.

2.10.1 Léptons

O conceito dos léptons enquanto um grupo surgiu em 1947 como uma maneira de classificar as partículas segundo suas propriedades em comum. A palavra lépton tem origem grega e significa "leve", o que é inspirado no fato de que os primeiros léptons descobertos tinham pouca massa. Os léptons são partículas com spin 1/2, não interagem via força forte e, até onde se sabe, não possuem estrutura interna, sendo partículas verdadeiramente elementares. Como mostrado na 1, são léptons o elétron, o múon, o tau, seus respectivos neutrinos e suas antipartículas correspondentes.

Tabela 1 – Família dos léptons.

| Lépton | Símbolo | Massa (MeV/c ²) | Carga elétrica (e) |
|-------------------------|------------------|-----------------------------|--------------------|
| Elétron | e^- | 0,511 | -1 |
| Múon | μ^- | 105,7 | -1 |
| Tau | τ^- | 1777 | -1 |
| Neutrino do elétron | ν_e | $< 1,5 \cdot 10^{-5}$ | 0 |
| Neutrino do múon | ν_μ | $< 0,17$ | 0 |
| Neutrino do tau | ν_τ | < 19 | 0 |
| Pósitron | e^+ | 0,511 | +1 |
| Antimúon | μ^+ | 105,7 | +1 |
| Antitau | τ^+ | 1777 | +1 |
| Antineutrino do elétron | $\bar{\nu}_e$ | $< 1,5 \cdot 10^{-5}$ | 0 |
| Antineutrino do múon | $\bar{\nu}_\mu$ | $< 0,17$ | 0 |
| Antineutrino do tau | $\bar{\nu}_\tau$ | < 19 | 0 |

Fonte: Adaptado de Ho-Kim e Pham (2013).

Para o caso de reações com léptons, foram estabelecidas três quantidades que devem se conservar para que uma reação seja possível; o número leptônico do elétron, o número leptônico do múon e o número leptônico do tau. Partículas que não fazem parte da família dos léptons têm número leptônico nulo. A Tabela 2 indica os números leptônicos para os seis léptons e suas respectivas antipartículas.

Tabela 2 – Números leptônicos.

| Lépton | Símbolo | N° leptônico do e | N° leptônico do μ | N° leptônico do τ |
|-------------------------|------------------|-------------------|-----------------------|------------------------|
| Elétron | e^- | 1 | 0 | 0 |
| Múon | μ^- | 0 | 1 | 0 |
| Tau | τ^- | 0 | 0 | 1 |
| Neutrino do elétron | ν_e | 1 | 0 | 0 |
| Neutrino do múon | ν_μ | 0 | 1 | 0 |
| Neutrino do tau | ν_τ | 0 | 0 | 1 |
| Pósitron | e^+ | -1 | 0 | 0 |
| Antimúon | μ^+ | 0 | -1 | 0 |
| Antitau | τ^+ | 0 | 0 | -1 |
| Antineutrino do elétron | $\bar{\nu}_e$ | -1 | 0 | 0 |
| Antineutrino do múon | $\bar{\nu}_\mu$ | 0 | -1 | 0 |
| Antineutrino do tau | $\bar{\nu}_\tau$ | 0 | 0 | -1 |

Fonte: adaptado de Ostermann (2001 (Texto de apoio ao professor de Física, V.12)).

Considere a reação geral para o decaimento β^- abaixo:



Verifica-se facilmente que os números leptônicos são conservados. Para o número leptônico do elétron, tem-se ($0 = 0 + 1 - 1$). Essa é a razão pela qual essa reação produz o antineutrino do elétron. Do contrário, o número leptônico não seria conservado. Sem o conceito dessa nova quantidade conservada, não haveria razão para que a participação do antineutrino fosse privilegiada. Como o neutrino não interage via força eletromagnética, sua carga elétrica é nula e portanto não se pode distinguir um neutrino de seu antineutrino através de uma propriedade intrínseca. O número leptônico é um conceito construído em cima da interação entre as partículas. Assim, uma possibilidade de se distinguir um neutrino de seu antineutrino é através do processo de oscilação.

2.10.2 Hádrons

Hádrons são partículas que interagem via força forte, sendo portanto uma família de núcleons. Seu nome também é originado do grego e significa "pesado". Os hádrons são divididos em bárions e mésons. Os bárions possuem spin fracionário, enquanto os mésons têm spin inteiro. Alguns exemplos de bárions são o próton (p), o nêutron (n), o lambda (Λ) e suas antipartículas. Alguns exemplos de mésons são os píons carregados (π^\pm) e o pión neutro (π^0). É importante ressaltar que um grande número de bárions e mésons foi sendo descoberto ao longo dos anos. A

razão para essa variedade está no fato de que bárions e mésons não são partículas elementares, isto é, possuem uma estrutura interna.

Uma nova regra de conservação no contexto dos hádrons foi elaborada, trata-se da conservação do número bariônico. Os físicos observaram que o número total de bárions em uma reação deve ser conservado. Então, o valor +1 foi associado aos bárions e o valor 0 foi associado aos léptons e mésons. As antipartículas que compõem os bárions têm número bariônico -1. Mesmo com a introdução do número bariônico, ainda haviam algumas reações possíveis que nunca eram observadas em laboratório. Uma avaliação cuidadosa das propriedades das partículas participantes dessas reações fez com que os cientistas elaborassem a chamada regra da estranheza, introduzindo a estranheza (S) como uma nova propriedade fundamental. A estranheza é conservada em interações via força forte e eletromagnética. A Tabela 3 mostra alguns bárions e suas propriedades, enquanto a Tabela 4 mostra alguns mésons e suas propriedades.

Tabela 3 – Alguns bárions e suas propriedades.

| Bárion | Símbolo | Carga | Massa (MeV/c²) | Spin | N° bariônico | Estranheza |
|---------------|-----------------|--------------|--------------------------------------|-------------|---------------------|-------------------|
| Próton | p | +1 | 938 | 1/2 | +1 | 0 |
| Antipróton | \bar{p} | -1 | 938 | 1/2 | -1 | 0 |
| Nêutron | n | 0 | 940 | 1/2 | +1 | 0 |
| Antinêutron | \bar{n} | 0 | 940 | 1/2 | -1 | 0 |
| Lambda | Λ | 0 | 1116 | 1/2 | +1 | -1 |
| Antilambda | $\bar{\Lambda}$ | 0 | 1116 | 1/2 | -1 | +1 |
| Ksi zero | Ξ^0 | 0 | 1315 | 1/2 | +1 | -2 |
| Antiksi zero | $\bar{\Xi}^0$ | 0 | 1315 | 1/2 | -1 | +2 |
| Delta menos | Δ^- | -1 | 1239 | 3/2 | +1 | 0 |
| Delta mais | Δ^+ | +1 | 1235 | 3/2 | +1 | 0 |

Fonte: adaptado de Ostermann (2001 (Texto de apoio ao professor de Física, V.12)).

Tabela 4 – Alguns mésons e suas propriedades.

| Méson | Símbolo | Carga | Massa (MeV/c²) | Estranheza |
|--------------|----------------|--------------|--------------------------------------|-------------------|
| Píon zero | π^0 | 0 | 135 | 0 |
| Píon menos | π^- | -1 | 140 | 0 |
| Píon mais | π^+ | +1 | 140 | 0 |
| K menos | K^- | -1 | 494 | -1 |
| K mais | K^+ | +1 | 494 | +1 |

Fonte: adaptado de Ostermann (2001 (Texto de apoio ao professor de Física, V.12)).

2.10.3 Quarks

O modelo dos quarks surgiu em 1964 como uma teoria que visava explicar as características dos hádrons conhecidos até então. A teoria estabelece que os bárions são constituídos de três partículas verdadeiramente fundamentais, que foram chamados de quarks, todos com spin 1/2, carga elétrica fracionária e número bariônico 1/3. O que os diferencia é um número quântico denominado sabor. Os sabores dos três quarks do modelo foram chamados de strange (s), up (u) e down (d). Evidentemente, cada tipo de quark possui um antiquark associado. As estranhezas do quark strange e do antiquark strange são respectivamente -1 e +1, enquanto que a estranheza para os outros dois quarks e dois antiquarks é 0 (OSTERMANN, 2001 (Texto de apoio ao professor de Física, V.12)).

A nova teoria previa que os mésons deveriam ser constituídos da combinação de um quark e um antiquark. Ainda na década de 1960, muitos mésons foram descobertos observando-se essa previsão teórica. A Tabela 5 mostra a combinação de quarks necessária para formar os mésons apresentados anteriormente na Tabela 4.

Tabela 5 – Combinações de quarks e antiquarks para formação dos mésons.

| Méson | Símbolo | Quark | Antiquark | Estranheza |
|------------|---------|-------|-------------------|------------|
| Píon zero | π^0 | u/d | \bar{u}/\bar{d} | 0 |
| Píon menos | π^- | d | \bar{u} | 0 |
| Píon mais | π^+ | u | \bar{d} | 0 |
| K menos | K^- | s | \bar{u} | -1 |
| K mais | K^+ | u | \bar{s} | +1 |

Fonte: adaptado de Ostermann (2001 (Texto de apoio ao professor de Física, V.12)).

De fato, a combinação das contribuições de estranheza de cada quark e antiquark corresponde exatamente à estranheza do méson formado. A restrição dos mésons serem formados pela combinação de um quark e um antiquark impõe que as únicas estranhezas possíveis sejam +1, 0 e -1. Uma estranheza +2, por exemplo, só poderia existir pela combinação de dois antiquarks strange, que por definição não pode corresponder a um méson.

Já em relação aos bárions, a teoria prevê que estes são formados por todas as combinações possíveis de três quarks. A Tabela 6 abaixo apresenta as combinações necessárias para formar os bárions apresentados anteriormente na Tabela 3.

Tabela 6 – Combinações de quarks para a formação dos bárions.

| Bárion | Símbolo | Combinação | Estranheza |
|--------------|-----------------|-------------------------|------------|
| Próton | p | duu | 0 |
| Antipróton | \bar{p} | $\bar{d}\bar{u}\bar{u}$ | 0 |
| Nêutron | n | ddu | 0 |
| Antinêutron | \bar{n} | $\bar{u}\bar{d}\bar{d}$ | 0 |
| Lambda | Λ | dus | -1 |
| Antilambda | $\bar{\Lambda}$ | $\bar{d}\bar{u}\bar{s}$ | +1 |
| Ksi zero | Ξ^0 | uss | -2 |
| Antiksi zero | $\bar{\Xi}^0$ | $\bar{u}\bar{s}\bar{s}$ | +2 |
| Delta menos | Δ^- | ddd | 0 |
| Delta mais | Δ^+ | $\bar{d}\bar{u}\bar{u}$ | 0 |

Fonte: adaptado de Ostermann (2001 (Texto de apoio ao professor de Física, V.12)).

Novamente, é perceptível que as contribuições das estranhezas dos quarks correspondem à estranheza da combinação que define cada bárion. É fácil visualizar que os valores possíveis de estranheza para os bárions variam de -3 até +3.

Novos sabores de quarks foram propostos por volta da segunda metade da década 1970. Além dos conhecidos up, down e strange, foram propostos os sabores charm (c), top (t) e bottom (b) (FRITZSCH; MINKOWSKI, 1981). A Tabela 7 apresenta todos os sabores de quarks e suas características.

Tabela 7 – Família dos quarks.

| Quark | Símbolo | Massa constituinte (MeV/c ²) | Carga elétrica (e) |
|---------|---------|--|--------------------|
| up | u | 0,33 | 2/3 |
| down | d | 0,33 | -1/3 |
| charm | c | 1,5 | 2/3 |
| strange | s | 0,5 | -1/3 |
| top | t | 180 | 2/3 |
| bottom | b | 4,5 | -1/3 |

Fonte: adaptado de Ho-Kim e Pham (2013).

2.11 O modelo padrão de partículas elementares

Desde o desenvolvimento do modelo dos quarks até os dias atuais, a Física de Partículas elementares expandiu-se enormemente. Novos constituintes da matéria foram experimentalmente descobertos nos modernos aceleradores de partículas, tal como o famoso *Large*

Hadron Collider (LHC). O chamado Modelo Padrão MP de partículas, cujo desenvolvimento iniciou-se na década de 1970, é uma teoria que busca descrever os campos fundamentais e as partículas elementares que constituem a matéria. É considerada uma das teorias mais bem sucedidas da física, sendo em grande parte consistente com a relatividade restrita e a mecânica quântica.

2.11.1 Férmions

De acordo com o MP, as partículas fundamentais que compõem a matéria são os quarks e léptons, que por sua vez encaixam-se na categoria de férmions, pois possuem spin 1/2 e obedecem à distribuição estatística de Fermi-Dirac (MOREIRA, 2009). Ao contrário dos léptons, não observam-se quarks livres, estes sempre se combinam em uma estrutura interna para formar os hádrons. Os férmions são divididos em três grupos, denominados primeira, segunda e terceira geração. O elétron e seu neutrino, juntamente com os quarks up e down compõem as partículas de primeira geração. O múon, seu neutrino e os quarks charm e strange compõem as partículas de segunda geração. Por fim, o tau, seu neutrino e os quarks top e bottom fazem parte da terceira geração. A matéria ordinária, isto é, a matéria com a qual convive-se no dia a dia, é formada pelas partículas de primeira geração. As partículas das demais gerações são consideravelmente mais instáveis, tendendo a decair para as partículas de primeira geração.

Figura 7 – Tabela do modelo padrão de partículas.

Modelo Padrão das Partículas Elementares

| três gerações da matéria (férmions) | | | interações / partículas mensageiras (bósons) | | |
|-------------------------------------|--|---|---|--|----------------------------------|
| | I | II | III | | |
| massa | $\approx 2.2 \text{ MeV}/c^2$ | $\approx 1.28 \text{ GeV}/c^2$ | $\approx 173.1 \text{ GeV}/c^2$ | 0 | $\approx 124.97 \text{ GeV}/c^2$ |
| carga | $\frac{2}{3}$ | $\frac{2}{3}$ | $\frac{2}{3}$ | 0 | 0 |
| spin | $\frac{1}{2}$ | $\frac{1}{2}$ | $\frac{1}{2}$ | 0 | 0 |
| | u up | c charm | t top | g glúon | H higgs |
| QUARKS | d down | s strange | b bottom | γ fóton | |
| | $\approx 4.7 \text{ MeV}/c^2$ | $\approx 96 \text{ MeV}/c^2$ | $\approx 4.18 \text{ GeV}/c^2$ | 0 | |
| | $-\frac{1}{3}$ | $-\frac{1}{3}$ | $-\frac{1}{3}$ | 0 | |
| | $\frac{1}{2}$ | $\frac{1}{2}$ | $\frac{1}{2}$ | 1 | |
| | e elétron | μ múon | τ tau | Z bóson Z | |
| LÉPTONS | $\approx 0.511 \text{ MeV}/c^2$ | $\approx 105.66 \text{ MeV}/c^2$ | $\approx 1.7768 \text{ GeV}/c^2$ | $\approx 91.19 \text{ GeV}/c^2$ | |
| | -1 | -1 | -1 | 0 | |
| | $\frac{1}{2}$ | $\frac{1}{2}$ | $\frac{1}{2}$ | 1 | |
| | ν_e neutrino do elétron | ν_μ neutrino do múon | ν_τ neutrino do tau | W bóson W | |
| | $< 1.0 \text{ eV}/c^2$ | $< 0.17 \text{ MeV}/c^2$ | $< 18.2 \text{ MeV}/c^2$ | $\approx 80.39 \text{ GeV}/c^2$ | |
| | 0 | $\frac{1}{2}$ | $\frac{1}{2}$ | ± 1 | |
| | $\frac{1}{2}$ | $\frac{1}{2}$ | $\frac{1}{2}$ | 1 | |
| | | | | BÓSONS DE GAUGE BÓSONS VETORIAIS | BÓSONS ESCALARES |

Fonte: Fermilab (2016).

2.11.2 *Bósons de calibre e interações fundamentais*

Existe ainda um grupo de partículas de spin inteiro que não obedecem ao princípio de exclusão de Pauli, conhecidas como bósons de calibre (HO-KIM; PHAM, 2013). Em alguns contextos, os bósons são classificados como partículas virtuais em oposição aos férmions, que são partículas de matéria.

Os bósons de calibre correspondem às já discutidas partículas mediadoras das interações fundamentais. O MP prevê também a existência de um bóson escalar responsável por fornecer a massa das demais partículas, o chamado Bóson de Higgs. Uma partícula com as propriedades esperadas do Bóson de Higgs foi descoberta no LHC em 2013, o que representa uma forte evidência de sua existência (FRENCH CONSEIL EUROPÉEN POUR LA RECHERCHE NUCLÉAIRE, 2013). Com todas essas definições apresentadas, é conveniente retornar ao tema das interações fundamentais sob a luz do MP. A Tabela 8 apresenta as forças fundamentais e seus respectivos bósons de calibre.

Tabela 8 – Interações fundamentais.

| Força/interação | Bóson de calibre | Intensidade relativa | Massa (GeV/c^2) | Alcance |
|------------------------|-------------------------|-----------------------------|-------------------------------------|----------------|
| Gravitacional | gráviton (G) | 10^{-39} | 0 | ∞ |
| Eletromagnética | fóton (γ) | 1/137 | 0 | ∞ |
| Fraca | W^\pm, Z^0 | 10^{-5} | 80 - 90 | 10^{-16} |
| Forte | glúon (g) | 1 | 0 | $< 10^{-13}$ |

Fonte: adaptado de Ho-Kim e Pham (2013).

Os quarks possuem uma propriedade denominada carga cor, que é análoga à carga elétrica, com a diferença de que cada sabor de quark pode assumir três variedades de carga cor; vermelho, verde e azul. Assim como a presença de carga elétrica indica interação via força eletromagnética, a carga cor está associada à interação via força nuclear forte (HO-KIM; PHAM, 2013). Essa propriedade já era esperada, uma vez que os quarks são os constituintes dos núcleons.

Existem ainda as anticores, correspondentes aos antiquarks. Cores iguais tendem a se repelir, enquanto uma cor tende a atrair-se a sua respectiva anticor. Existe ainda uma relação de atração menos intensa, correspondente à interação entre cores diferentes. Por exemplo, a atração entre um quark vermelho e um quark azul. Assim, a cor faz com que certos quarks tendam a atrair-se para formar os hádrons, que são sempre partículas sem cor. Os mésons, por exemplo,

são frutos da atração entre quarks de cores opostas. Já os bárions são formados pela atração decorrente da combinação de três cores, que será máxima no caso de as três serem diferentes. Feitas essas considerações, surge a seguinte pergunta: se os hádrons são partículas sem cor, como a força forte pode atuar na coesão do núcleo atômico? Acontece que a estabilidade dos hádrons é devida à força forte fundamental, que é transmitida por meio da troca de glúons e possui um alcance da ordem de 10^{-18} m. A já referida força forte residual é consequência de um balanço imperfeito dos quarks que compõem os núcleons, fazendo com que surja um campo forte residual responsável pela estabilidade do núcleo e cujo alcance é da ordem do tamanho do mesmo (MOREIRA, 2004). Neste caso, os núcleons interagem por meio da troca de píons (π), que fazem o papel de partículas mediadoras da força forte residual.

Os quarks também interagem via força nuclear fraca. A interação fraca via partículas W^{\pm} e Z^0 é a única capaz de alterar os sabores dos férmions (OSTERMANN, 2001 (Texto de apoio ao professor de Física, V.12)). Léptons não possuem carga cor, portanto não interagem via força nuclear forte, mas interagem via força fraca e eletromagnética. Todas as partículas de matéria interagem via força gravitacional.

3 NOÇÕES DO *ROLE-PLAYING GAME*

Este capítulo foca-se em apresentar brevemente a história do surgimento do *Role-Playing Game*, além de introduzir as noções básicas acerca dos elementos, características e dinâmica presentes em qualquer sistema de *RPG*.

3.1 A origem do *RPG*

A sigla *RPG* vem do inglês, “*Role-Playing Game*”, cuja tradução livre é “Jogo de Interpretação de Papéis”. O *RPG* surgiu em 1974 com o lançamento do jogo *Dungeons & Dragons (D&D)* nos Estados Unidos elaborado pelos americanos Gary Gygax e Dave Arneson. O novo jogo era, de certa forma, uma evolução dos conhecidos *wargames* da época (jogos de tabuleiro de estratégia militar). Os criadores de *D&D* eram grandes entusiastas de histórias de fantasia, tendo sido inspirados especialmente por J.R.R Tolkien (escritor de *O Senhor dos Anéis* e *O Hobbit*) e Robert E. Howard (escritor de *Conan, o Bárbaro*) (VASQUES,). Porém, Gygax e Arneson não se contentavam em permanecer no papel passivo de expectadores, desejando atuar diretamente nos mundos de fantasia de suas obras preferidas. Essa foi precisamente a proposta de *D&D*, isto é, um jogo de imaginação interativa no qual os jogadores atuam ativamente em um mundo de fantasia medieval vasto e em constante mutação.

Dungeons & Dragons, mesmo por ser o primeiro *RPG* da história, é considerado até hoje o jogo mais popular do gênero, mas muitos outros jogos e sistemas foram lançados com o passar dos anos. Enquanto *D&D* têm uma temática de Alta Fantasia (AF), existem jogos de *RPG* com temática *cyberpunk*, velho oeste etc. Cada jogo tem suas peculiaridades no que diz respeito à *lore* (história de fundo do mundo no qual o jogo é situado), *non-player character (NPC)* que é um personagem não jogável, mecânica de interação e combate. Esses detalhes serão explorados com mais detalhes na Seção 3.2. A Figura 8 mostra uma ilustração que representa uma típica sessão de *RPG*, com uma mestra no lado direito, jogando dados atrás de seu escudo, e os demais jogadores no lado esquerdo, possivelmente discutindo alguma estratégia de ação ou tendo um diálogo divertido.

Nas últimas três décadas, o acelerado desenvolvimento tecnológico produziu profundas mudanças na indústria do entretenimento, especialmente no que diz respeito à ascensão dos

Figura 8 – Ilustração de uma típica mesa de sessão de *RPG*.



Fonte: RPG Mais Barato (2018).

jogos eletrônicos. A chamada indústria dos games já movimenta mais recursos anualmente que a indústria cinematográfica (RIBEIRO *et al.*,), mantendo-se já há muitos anos como o setor mais lucrativo do mercado de entretenimento. Por esta razão, atualmente o *RPG* é mais associado a um gênero de jogos eletrônicos. O *RPG* digital de fato conserva muitas das mecânicas introduzidas na sua versão analógica, sendo esta renomeada de *RPG* de mesa.

3.2 O manual do RPG

Os livros que acompanham um kit completo de *RPG*, chamados de módulos básicos, contém muito mais do que regras e orientações para os jogadores. Esses livros costumam descrever em detalhes mapas, demografia, religiões, idiomas, itens etc. Em resumo, apresentam tudo o que for necessário para um entendimento mínimo do universo em que os jogadores devem adentrar.

Um kit de *D&D* é tipicamente composto de um livro de regras para o jogador, um livro de orientações para o mestre (a pessoa responsável por narrar a aventura e guiar os demais jogadores) e um livro que descreve detalhadamente os monstros daquele universo. A Figura 9 mostra os livros associados à versão mais recente de *D&D* lançada.

3.2.1 O passo a passo de uma sessão

Um grupo de *RPG* é formado pelo mestre e os demais jogadores, o que geralmente totaliza algo entre 3 e 7 pessoas. A jogatina é chamada de sessão. Um conjunto de sessões forma uma campanha, que compreende uma aventura bem definida, com início, meio e fim. A Figura 10 apresenta um fluxograma indicando os passos envolvidos em uma típica sessão de *RPG* (CRAWFORD *et al.*, 2014).

Figura 9 – Módulos básicos da 5ª edição de *Dungeons & Dragons*.

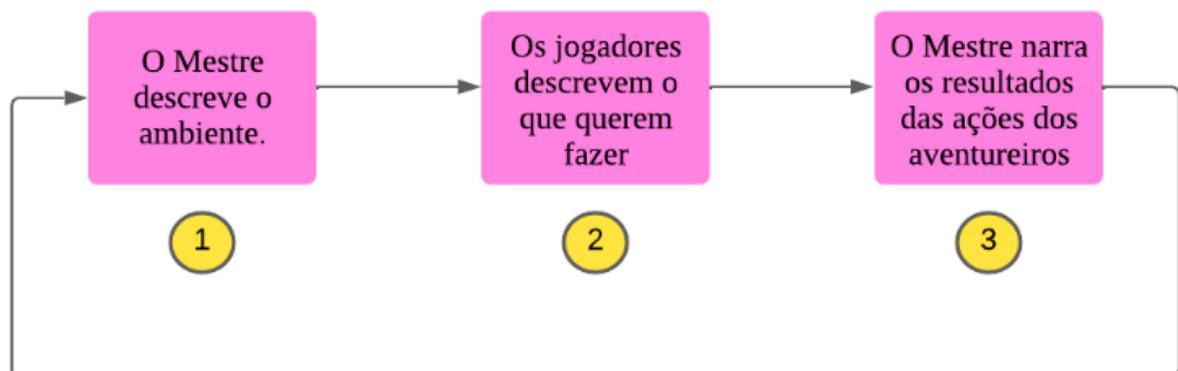


Fonte: Vinha (2019).

No Passo 1, o mestre é responsável por guiar a aventura dos demais jogadores, narrando ambientes, eventos e controlando os personagens não-jogáveis da trama. A descrição do ambiente pode ser complementada com mapas e objetos elaborados pelo mestre. Imediatamente após o Passo 1 e antes do 2, é comum que se siga alguma interação entre os jogadores, que pode envolver um diálogo casual ou a discussão de uma estratégia de ação. O Passo 2 é possivelmente o mais importante do jogo, pois é nele em que os jogadores decidem como irão agir. A ação de um jogador sempre é realizada em um turno, uma vez realizada, o jogador deverá esperar até o início do próximo turno para agir novamente. Alguns exemplos de ação são; correr uma certa distância, realizar um ataque, descansar, performar um teste de percepção etc.

Figura 10 – Fluxograma indicando os passos de um sessão de RPG.

Passos de um jogo de RPG



Fonte: Adaptado de Crawford *et al.* (2014).

Ações triviais como consumir um item ou caminhar podem ser feitas diretamente, mas qualquer ação que represente um desafio para o jogador é comumente acompanhado de um teste. Por exemplo, escalar uma montanha alta exigirá um teste de acrobacia, enquanto perceber uma armadilha adiante exigirá um teste de percepção ou inteligência. O sucesso ou o fracasso de um teste é decidido ao jogar-se dados, que são variados em número de faces. Os dados mais usados são o de vinte faces (d20), o de doze faces (d12), o de dez faces (d10) e o de seis faces (d6). O Passo 3 é consequência direta do resultado da ação dos jogadores. Uma vez que os dados tenham definido o resultado da ação, cabe ao mestre narrar os detalhes desse resultado. Por exemplo, se um jogador falha em tentar persuadir um guarda, cabe ao mestre interpretar a reação do guarda, que pode ser tanto pacífica quanto violenta. Esses três passos repetem-se sucessivamente ao longo de uma sessão de *RPG*, promovendo o progresso da campanha.

3.2.2 Criação de personagem e habilidades

Antes da primeira sessão, cada jogador deve criar o seu personagem através do preenchimento de uma ficha de informações básicas. Um exemplo de ficha de personagem do *D&D* preenchida é apresentada no Apêndice A. Além de informações básicas como o nome, classe, raça, alinhamento, histórico e ideais do personagem, a ficha especifica uma série de valores que influenciam diretamente na experiência do jogador. Um exemplo disso são os números no canto esquerdo da ficha do Apêndice A. Os números menores são chamados de habilidades ou atributos, enquanto os maiores logo acima são os modificadores. Os valores de habilidade são uma tentativa de quantificar os atributos que compõem o perfil do personagem. A Tabela 9 apresenta os pontos de algumas habilidades e suas respectivas interpretações. O modificador de cada habilidade é determinado de acordo com o intervalo no qual o valor da habilidade se encaixa (por exemplo, um carisma de 8 pontos fornece um modificador -1). Os modificadores acabam sendo mais importantes do que os pontos de habilidade em si, pois são eles que atuam diretamente nos testes de ação. Por exemplo, o mestre solicita um teste de furtividade a um jogador que deseja passar furtivamente por um corredor. Nesse caso, o modificador de destreza irá influenciar no resultado do teste. A ficha contém ainda informações mutáveis, tais como itens carregados, equipamentos como espadas, arcos e cajados. A ficha também é o local em que se anota a *experience point (XP)*, que é uma medida dos pontos experiência acumulada pelo personagem. O ganho de *XP* é essencial para o sistema de progresso do *RPG*, pois ele permite que o personagem suba de nível, aumentando os seus pontos de habilidade e aprendendo

novos ataques e “magias”.

Tabela 9 – Habilidades para quantificação de atributos no RPG.

| Pontos de habilidade | Modificador | Força | Destreza | Inteligência | Constituição |
|----------------------|-------------|---|---|---|--|
| 1 | -5 | Sua força é equivalente a de um criança | Você tropeça por onde passa | Você empataria numa partida de xadrez contra um orangotango | Sua saúde é debilitada |
| 10 | +0 | Sua força está na média de um adulto | Sua agilidade é a de uma pessoa comum | Você tem 100 pontos de QI | Sua saúde é estável |
| 20 | +5 | Você é muito forte e costuma ganhar na queda de braço | Você domina o malabares de olhos fechados | Você concluiu o doutorado em física | Você tem um grande vigor |
| 30 | +10 | Você tem a força de um fisiculturista e poderia levantar um carro | Você é ágil como um atleta de alto nível | Você é o próprio Dirac | Você nunca fica doente e é duro na queda |

Fonte: elaborado pelo autor

3.2.3 Classe de Dificuldade (CD) e Classe de Armadura (CA)

O que exatamente determina se uma ação será bem-sucedida ou não? Considere que um jogador deseje realizar um salto sobre um penhasco cujas extremidades distam de um comprimento X . A dificuldade dessa ação depende tanto de X quanto da destreza do personagem. O mestre então solicita que o jogador lance um d20. Num sistema tipo-*D&D*, o salto será bem sucedido se o valor do lance do d20 + o modificador de destreza for maior ou igual a um certo número alvo, que é chamado de Classe de Dificuldade (CD). A CD é responsável por quantificar a dificuldade da ação. Se X for igual a 3 metros, o salto não será uma tarefa tão difícil e o mestre poderia estipular um valor de CD igual a 8. Porém, se X for igual a 7 metros, o sucesso do salto beira o impossível e o mestre poderia fixar um valor de CD igual a 22. Nesse caso, considerando que o personagem tenha um modificador de destreza igual a +5, o jogador precisaria tirar pelo menos um 17 no dado. Para o caso específico de um ataque, o número alvo é chamado de Classe de Armadura (CA). Tanto jogadores quanto *NPC*'s têm CA's, sendo uma medida do quão bem

um personagem consegue evitar de sofrer um ataque. Para que o ataque de um jogador seja bem-sucedido, é necessário que o valor obtido do lance de um d20 (possivelmente + algum modificador relevante) seja igual ou superior ao valor de CA do adversário. O d20 só determina o sucesso do ataque, o valor do dano infligido é determinado ao jogar-se um dado característico da arma com a qual se ataca (por exemplo, um machado cujo dano perfurante é dado por 1d8).

No Capítulo 4 será apresentada uma proposta de gamificação do ensino de Física de Partículas por meio do *RPG-AF*.

4 METODOLOGIA PROPOSTA PARA O ENSINO DE FÍSICA DE PARTÍCULAS

Com o objetivo de se desenvolver um sistema de *RPG* simplificado orientado ao ensino da Física de Partículas, cada partícula fundamental foi associada a uma raça/criatura de um jogo semelhante a *D&D*. Esse jogo foi chamado de *Particles & Dragons (P&D)*. Buscou-se associar as características específicas de cada criatura com propriedades ou comportamentos da respectiva partícula, de modo a facilitar a associação entre o jogo e a fenomenologia da física envolvida. Propõe-se que os alunos formem um grupo (*party*) e que cada um crie uma ficha de personagem, que deve obedecer às regras das criaturas associadas às partículas. O professor executa o papel de mestre, guiando a *party* em uma aventura cujo enredo representa um paralelo ao histórico cósmico das partículas fundamentais. Os alunos (personagens) participam ativamente do jogo. Além da narração dos eventos, o professor (mestre) também é responsável pela organização dos mecanismos de batalha e recompensa, os quais são baseados na dinâmica dos dados (típica do *RPG*) e que também seguem regras pré-estabelecidas, relacionadas às interações entre as partículas.

No contexto do ensino de física na educação básica brasileira, a presente proposta pode ser preferencialmente aplicada em turmas regulares do segundo e terceiro ano do ensino médio. A dinâmica deve ser precedida de uma aula ou mais aulas teóricas sobre a física de partículas e o modelo padrão, de modo a introduzir a turma ao conteúdo propriamente dito. Em seguida, deve ser dada uma aula para explicar as regras básicas do *RPG* (regras simplificadas, que são tipicamente usadas em campanhas curtas). As aulas seguintes compõem as sessões de jogo, nas quais o professor deve comandar a aventura e garantir que o sucesso da *party* dependa de uma boa compreensão dos aspectos teóricos introduzidos nas aulas iniciais e continuamente reforçados ao longo da narração. A verificação da efetividade dessa metodologia será feita através de questionários, que avaliem tanto o que foi aprendido como também a experiência subjetiva dos alunos.

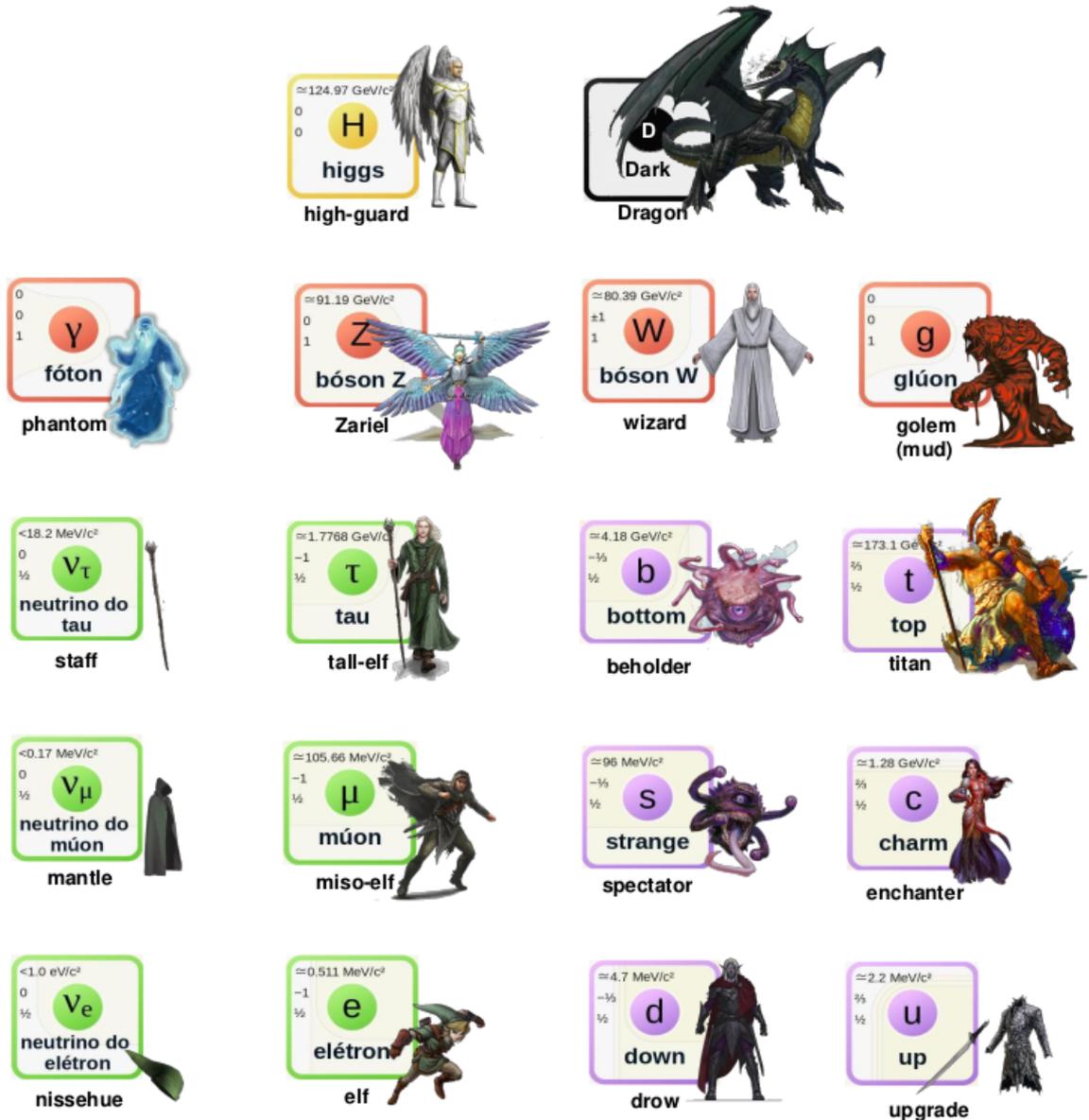
Procurou-se utilizar três regras para escolher um ser figurado de *RPG-AF* para representar uma partícula do MP:

1. possuir um nome de mesma inicial ou que lembre o símbolo utilizado para representar a partícula;
2. ter alguma característica que lembre a partícula;
3. ter uma relação familiar entre os seres semelhante a relação entre as partículas como

genealogia;

A Figura 11 apresenta as associações utilizadas nesta metodologia. Férmions foram associados a seres materiais.

Figura 11 – Modelo Padrão de Física de Partículas associado a RPG de alta fantasia.



Fonte: adaptado de Fermilab (2016), DUNGEONS & DRAGONS (2022).

Os Léptons estão representados por três sub-raças de elfos e seus acessórios:

- I. O elétron (e) é uma partícula de pequena massa e tempo de meia-vida tendendo a infinito. Assim foi associado ao elfo por sua longevidade. O neutrino do elétron (ν_e) foi representado pelo *nissehue* (chapeu de elfo em dinamarquês).
- II. O múon (μ) é uma partícula com massa superior a do elétron e tempo de meia-vida pequeno.

Assim, um meio-elfo (metade humano e metade elfo) foi utilizado para representar o múon. O neutrino do múon (ν_μ) foi representado por um *mantle* (manto).

- III. A partícula tau (τ) é representada por um tall-elf (alto-elfo), maior do que um meio elfo e com tempo de meia-vida ainda menor do que o meio-elfo. O neutrino do tau (ν_τ) foi representado por um *staff* (cajado).

Os quarks foram representados por seres de má conduta. Por exemplo:

- I. O down (d) por ser uma partícula de massa maior do que a do elétron e por não ser encontrado livre na natureza foi representado por um drow, um elfo renegado que vive em colônia no subterrâneo. O up (u) é uma partícula com aproximadamente a metade da massa de um down e foi representado por um upgrade como uma armadura ou espada;
- II. O charm (c) foi representado por uma *enchanter* (encantadora) e o strange (s) foi representado por um *spectator* (espectador) por ser uma criatura muito estranha;
- III. O top (t) foi representado por um titan (titã) por ser representado pela letra “t” a mesma inicial e também por ser a partícula mais massiva do modelo padrão. O bottom (b) foi representado pelo *beholder* por ser de mesma inicial (letra “b”) e também por ser mais forte do que um *spectator*

É perceptível pela Figura 11 que o caráter “mágico/divino” dos personagens vai se intensificando de baixo para cima. Assim, as partículas de uma mesma geração estão num mesmo “plano de poder”, de modo que a geração I contém personagens com maior caráter material enquanto a geração III tem um maior caráter “mágico”. Bósons, conhecidos como partículas mediadoras ou mensageiras, foram associados a seres celestiais.

1. O bóson de Higgs (H) na cultura pop ficou conhecido como partícula divina. Nesse caso, o Higgs foi representado por uma espécie de anjo denominado high-guard (guardião superior) ou guardinal.
2. O bóson Z foi representado por um anjo caído chamado Zariel.
3. bósons W por Wizards (magos). No universo de *RPG-AF*, é comum utilizar nas narrativas anjos que se disfarçam de magos para intervir no cotidiano. Desta forma os magos podem se transformar em outros seres assim como as partículas W podem decair em uma série de outras partículas.
4. Os glúons (g) foram representados por golens, seres sem vida manipulados geralmente

pelos magos.

5. Os fótons (γ) são representados por *phantoms* (fantasmas) por possuírem pronúncia parecida em inglês. Fantasmas também podem ser associados a espectros.
6. Para concluir a associação permitindo uma expansão do jogo ou do MP, a matéria escura foi associada um *dark dragon*. Na cartografia antiga, os dragões representavam regiões desconhecidas e perigosas.

4.1 Representação dos atributos e das interações entre partículas

Um modo de generalizar os paralelos entre as propriedades das partículas e as características dos personagens é associar tais propriedades aos atributos de personagem. Algumas possibilidades de associação são apresentadas abaixo.

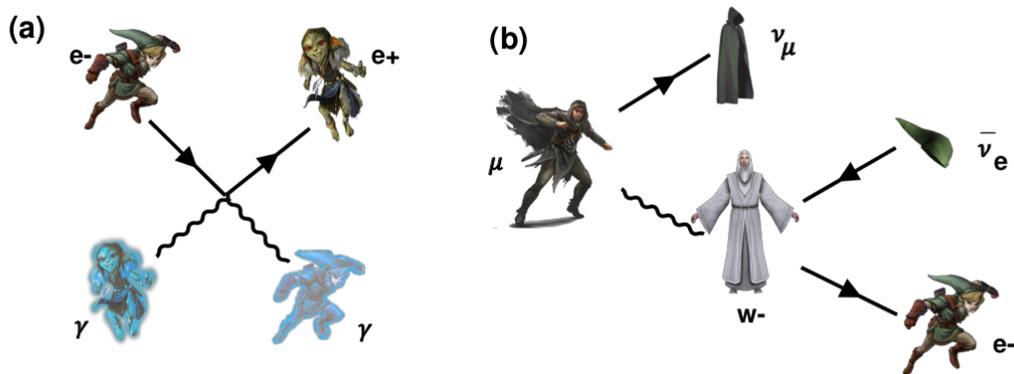
- O tempo de meia-vida se relaciona com a Constituição (CON) e com a Força de vontade (WILL).
- O spin se relaciona com a Destreza (DES) e Agilidade (AGI)
- A massa se relaciona com a Força (FOR)
- A carga se relaciona com a Percepção (PER) e a Inteligência (INT).

Sendo assim, é importante que as informações acerca das propriedades de cada partícula sejam determinantes para as mecânicas do jogo, de modo que os jogadores adquiram o incentivo para memorizar e compreender os significados dessas propriedades. As relações entre as partículas podem ser ilustradas por meio dos diagramas de Feynman conforme as Figuras 12 e 13. Essas relações são puramente mnemônicas, ou seja, auxiliam na memorização dos decaimentos das partículas.

Na Figura 12a, um elétron (elfo) se aniquila com um pósitron (poor-goblin) gerando dois fótons (phantoms). O narrador/professor pode usar o contexto no qual um elfo entra em conflito com um poor-goblin não sobrevivendo nenhum dos dois, portanto gerando dois fantasmas.

Na Figura 12b, um meio-elfo (múon) libera seu manto (neutrino do múon). Revela-se um mago (bóson W) adquire um chapéu (neutrino do elétron). Contudo, no processo, para o mago conseguir um chapéu ele teve que emitir um chapéu invertido (anti-neutrino do elétron).

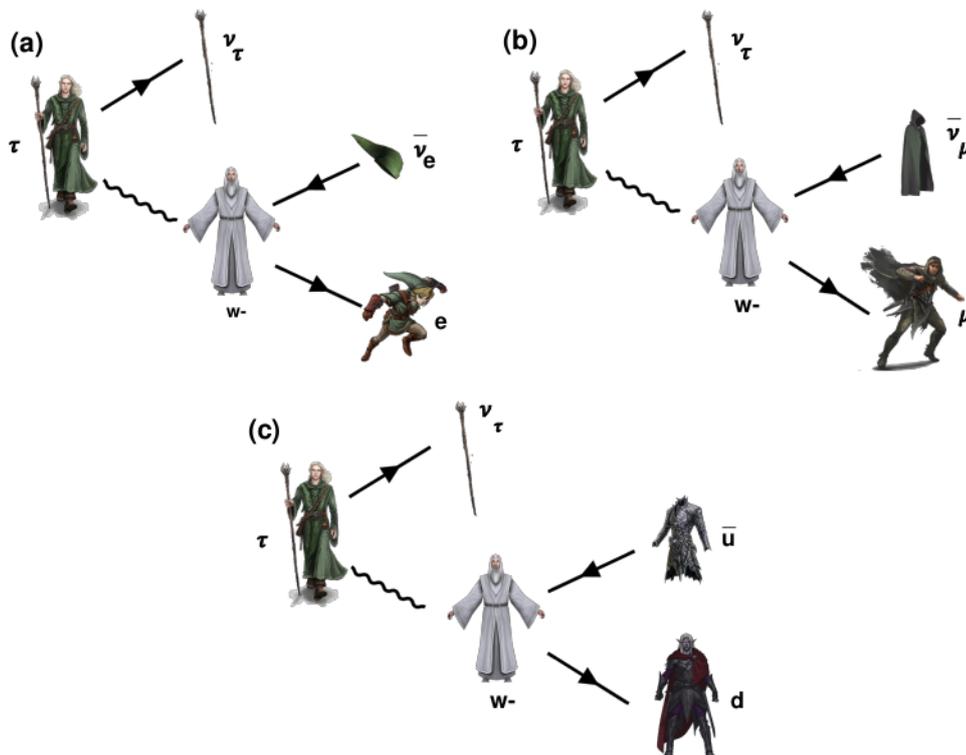
Figura 12 – Diagramas de Feynman ilustrados com personagens de *RPG*. (a) aniquilação de par de partículas elétron-pósitron. (b) decaimento do múon.



Fonte: adaptado de DUNGEONS & DRAGONS (2022).

A Figura 13 traz os decaimentos do tau. Na Figura 13a, um *tall-elf* (tau) libera o *staff* (neutrino do tau) revelando-se o mago (bóson W), adquire um chapéu de elfo, emite um chapéu invertido (antineutrino do elétron) e converte-se em um elfo (elétron). Se o mago adquire um manto, ele emite um manto invertido (anti neutrino do múon) e se torna um meio-elfo (múon) conforme a Figura 13b. Na Figura 13c, no lugar de um chapéu ou manto, o mago adquire uma armadura emitindo uma armadura invertida (anti up) e se converte em um drow (down).

Figura 13 – Decaimentos do tau em diagramas de Feynman com seres de *RPG*.



Fonte: Adaptado de DUNGEONS & DRAGONS (2022)

Desta forma um próton seria um *drow* (quark down) com duas espadas (dois quarks up). O grupo de jogadores, também conhecido como Party, pode representar as associações entre partículas, as quais formam estruturas de escala maior, como os átomos. Portanto, a escolha de personagens pelos jogadores influencia diretamente nas características da Party. Como exercício imaginativo, o professor pode solicitar aos alunos que pensem em novas partículas hipotéticas, trazendo uma reflexão acerca da expansão do MP e suas implicações para os fenômenos macroscópicos do universo.

É importante ressaltar que as associações apresentadas neste trabalho foram intencionais e mnemônicas sem qualquer relação com a Física encontrada nas partículas elementares. Contudo, tem-se um modo criativo para contextualizar o ensino de Física de Partículas.

4.2 Enredo e mecânica de Particles & Dragons

A mecânica de P&D é inspirada no sistema de Sá e Paulucci (2021), com a principal diferença sendo que apenas um aluno interpreta cada personagem. Os personagens jogáveis são os elfos, representados pelos léptons. Os adversários são tipicamente quarks e antipartículas leptônicas (tal como o pósitron, representado pelo goblin). De maneira geral, o ambiente em que o jogo se passa é equivalente a uma *dungeon* (ou masmorra), porém contextualizado com a Física de Partículas. Assim, *dungeons* possíveis são o átomo, o interior de uma estrela de neutrons, o espaço no universo primordial etc. Cada um desses cenários possui condições físicas específicas que propiciam o estudo de certas interações entre as partículas elementares. No início de cada *dungeon*, os jogadores devem fazer uma avaliação das condições do cenário, discutindo aspectos reais de quais partículas devem estar presentes naquele ambiente. Por exemplo, no caso do átomo, os alunos devem chegar à conclusão de que irão encontrar *drows* com duas espadas (prótons).

As duas principais ações que os jogadores podem tomar envolvem testes de percepção/inteligência (para avaliar as condições da *dungeon*) e ações de ataque (em batalhas). As batalhas são realizadas da forma clássica, como explicado na Seção 3.2.3, com a diferença de que a evolução da batalha é determinada pelas reações possíveis entre as partículas envolvidas (visto que a interação entre as partículas pode dar origem a novas partículas no campo de batalha). O surgimento de um novo férmion é interpretado no jogo como uma transformação, enquanto o

surgimento de um bóson é interpretado como uma invocação, o bóson funciona como um aliado que assume o combate do lépton, em analogia com a mediação da interação. Essas relações podem ser percebidas na Figura 13.

O Apêndice B contém os modelos de ficha simplificada elaborados para *P&D*. Optou-se pelo formato manual, ao invés de um modelo digital que necessitasse de impressão, para facilitar a aplicação da proposta e para que os próprios alunos pudessem criar as suas fichas. A ficha contém consideravelmente menos informação do que a ficha apresentada no Apêndice A, mas resume as principais informações contidas no sistema explicado na Seção 3.2.

4.3 Aplicação da proposta

A proposta de ensino de Física de Partículas foi aplicada em uma turma da Escola Estadual de Educação Profissional Joaquim Nogueira, localizada na cidade de Fortaleza. A turma em questão é do primeiro ano do curso de Libras, sendo composta por alunos ouvintes e não-ouvintes.

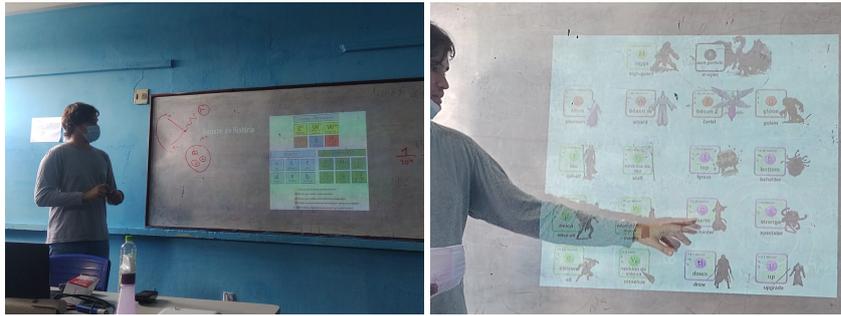
Como dito na Introdução, a proposta original compreende uma aula tradicional, seguida da aula no qual a dinâmica seria aplicada. Devido à necessidade de se revisar conteúdos correlatos de Química e Física Básica, optou-se por dividir a aplicação em três dias distintos. O primeiro dia foi dedicado a uma aula sobre conceitos básicos de Física Geral e revisão do conteúdo de modelos atômicos. O segundo dia reservado para introduzir a Física de Partículas elementares. Por fim, o terceiro dia envolve a aplicação da sessão de *P&D*. Os planos de aula correspondentes aos dias 1 e 2 são apresentados nos Apêndice C e no Apêndice D, respectivamente. As Figuras 14 e 15 mostram alguns registros das aulas ministradas ao longo dos três dias.

Figura 14 – Registros da aula ministrada no Dia 1.



Fonte: o autor.

Figura 15 – Registros da aula ministrada no Dia 3.



Fonte: o autor.

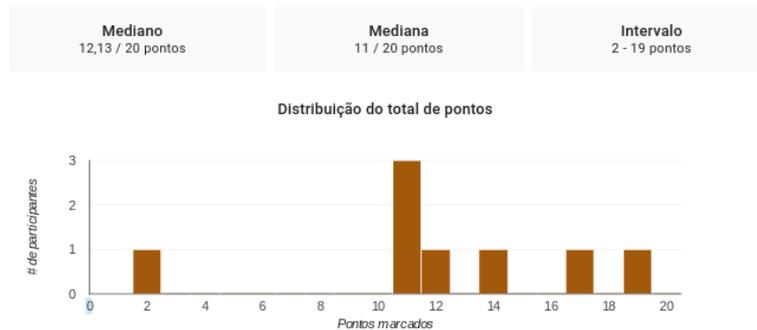
A aula do Dia 3 foi composta de uma rápida revisão do conteúdo visto nas duas aulas anteriores, seguida de uma explicação acerca das regras básicas de *Particles & Dragons*. Os 30 minutos finais foram dedicadas a uma rápida sessão de *Particles & Dragons* com alguns estudantes interessados no jogo. Os demais estudantes acompanharam a sessão. Foi utilizado um aplicativo como recurso alternativo aos dados de *RPG* físicos. Ao final da aplicação, foi encaminhado aos alunos um questionário virtual opcional.

5 RESULTADOS

O questionário foi dividido em duas partes. A primeira parte consiste de cinco perguntas teóricas relacionadas ao conteúdo ministrado. A segunda parte consiste de uma avaliação da experiência pessoal dos estudantes. É importante ressaltar que este trabalho não tem qualquer intenção de fazer uma análise estatística a partir dos resultados do questionário, até devido ao fato de que a proposta foi aplicada em uma única turma. O objetivo do questionário é exclusivamente o de permitir que os estudantes interessados em dar o seu *feedback*. Ao todo, oito estudantes optaram por responder ao questionário. Os resultados da primeira parte do questionário são apresentados abaixo.

5.1 Primeira parte do questionário

Figura 16 – Pontuações da primeira parte do questionário.

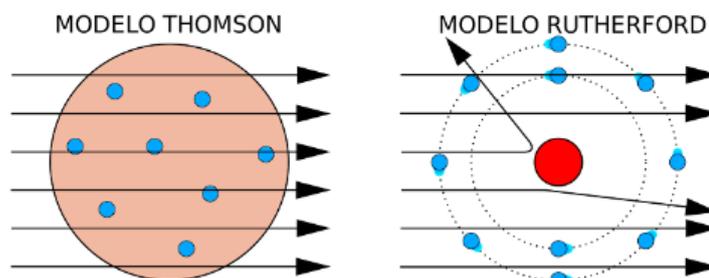


Fonte: Google Forms.

As figuras abaixo apresentam as cinco questões da primeira parte do questionário

Figura 17 – Questão 1 do questionário.

Explique com suas palavras por que o modelo atômico de Thomson (pudim de passas) estava incorreto. **Dica: lembre-se do experimento com deflexão de partículas alfa lançadas contra uma folha de ouro.** * 5 pontos



Fonte: elaborado pelo autor.

A Questão 1 trata do principal tema estudado no Dia 1, que foi a evolução dos modelos atômicos. Entre os experimentos discutidos em sala, o experimento com deflexão de partículas α foi o que mais gerou curiosidade nos alunos.

Tabela 10 – Respostas à Questão 1.

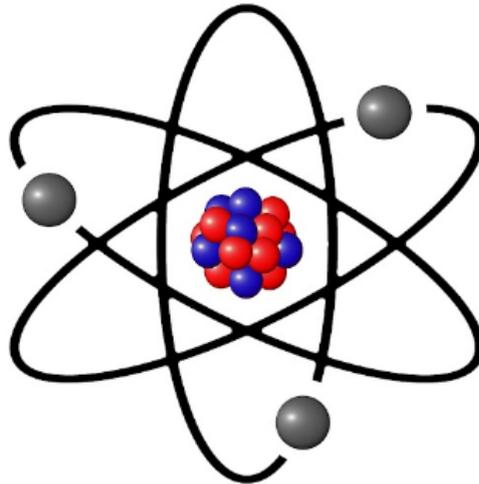
| Aluno | Resposta |
|--------------|---|
| Aluno 1 | Thomson propôs um novo modelo para o átomo, apelidado de “pudim de passas” ou “pudim de ameixas”. Porque seria uma esfera de carga positiva, não maciça, incrustada de elétrons (negativos), de modo que sua carga elétrica total é nula. |
| Aluno 2 | Porque ele não é divisível e não tem nêutrons |
| Aluno 3 | Porque ele dizia que o átomo não era divisível e os elétrons estavam junto com os prótons. |
| Aluno 4 | Esse resultado não era explicado pela teoria de Thomson. A teoria de Rutherford dizia que havia um núcleo no meio do átomo, que causava os desvios dos raios alfa, aqueles que não eram desviados passavam pelo vazio da eletrosfera. |
| Aluno 5 | Aquela bolinha era frente de longe folha de ouro linha vermelha até largo. |
| Aluno 6 | Ele não se divide e não tem nêutrons. |
| Aluno 7 | O modelo não explicava que o átomo tinha um núcleo e por isso não era divisível, já no modelo de Rutherford se tem divisões e desvios justamente pela descoberta do núcleo. |
| Aluno 8 | Pois notaram que os átomos atravessavam a placa de ouro. |

Fonte: elaborado pelo autor.

A resposta mais comum à Questão 1 diz respeito à divisibilidade do átomo e à presença de nêutrons no núcleo. Algumas respostas, tais como a do Aluno 1 e do Aluno 5, apresentaram uma certa desconexão com a pergunta, indicando que podem ter sido copiadas da *internet*, especialmente no caso de a resposta ser extensa, mas desconexa, ou simplesmente elaboradas a partir de uma interpretação equivocada da pergunta, no caso de uma resposta curta e desconexa.

Figura 18 – Questão 2 do questionário.

Considerando a física de partículas elementares, como você descreveria a estrutura interna do átomo? (Ex: o átomo é composto das partículas X e Y no núcleo, que por sua vez são compostas pelas partículas elementares K e Z) * 5 pontos



Fonte: elaborado pelo autor.

A Questão 2 é bastante representativa do conteúdo ministrado no final do Dia 1 e no início do Dia 2, pois ela situa-se justamente na transição do conhecimento da química básica para o conhecimento da Física Moderna. O propósito dessa questão é avaliar o quão bem os alunos absorveram a ideia de que prótons e nêutrons não são partículas fundamentais, invocando a existência dos quarks como constituintes elementares.

Tabela 11 – Respostas à Questão 2.

| Aluno | Resposta |
|---------|---|
| Aluno 1 | A estrutura do átomo é dividida basicamente em duas regiões: o núcleo, que é formado pelos prótons e nêutrons, e a eletrosfera, formada por elétrons e um grande vazio. |
| Aluno 2 | O núcleo é mais denso e os prótons e nêutrons ficam circulando pela camada de valência. |
| Aluno 3 | A parte de dentro é muito densa e ao redor dela tem prótons e nêutrons. |
| Aluno 4 | O átomo é dividido em núcleo e eletrosfera, onde ficam os elétrons. No núcleo ficam os prótons e nêutrons, que são compostos de partículas indivisíveis chamadas quarks. |
| Aluno 5 | Prótons: são partículas carregadas positivamente com carga relativa igual a +1. Sua massa relativa também é de 1 O número de prótons existente no núcleo é chamado de número atômico (Z) e é o responsável pela diferenciação de um elemento químico de outro, ou seja, cada elemento químico é formado por um conjunto de átomos que possui o mesmo número atômico ou a mesma quantidade de prótons. - Nêutrons: como o próprio nome indica, essas são partículas neutras, isto é, não possuem carga elétrica. Assim, os nêutrons diminuem a força de repulsão entre os prótons no núcleo (tendo em vista que cargas de mesmo sinal repelem-se). |
| Aluno 6 | O núcleo é bem mais denso e também os prótons e nêutrons. Elétrons circulam pela camada de valência. |
| Aluno 7 | O átomo é formado por um núcleo, em que estão presentes os nêutrons e os prótons, e pela a eletrosfera, onde está os elétrons. |
| Aluno 8 | Prótons e nêutrons compostos por quarks (up e down) no núcleo e elétrons. |

Fonte: elaborado pelo autor.

Das oito respostas à Questão 2, apenas duas fizeram referência à existência dos quarks como constituintes elementares dos núcleons. Quatro respostas apresentaram a visão de ensino médio do átomo, isto é, um núcleo composto por prótons e nêutrons rodeado pelos elétrons na eletrosfera. As duas respostas restantes apresentaram grande desconexão da pergunta. Em especial, o Aluno 2 parece ter copiado um trecho de algum artigo da *web* sobre o tema.

As Questões 3 e 4 mostradas na Figura 21 são focadas nas interações fundamentais e seus bósons correspondentes. Essas questões tiveram o objetivo de mensurar o aproveitamento das definições dadas no Dia 2.

Figura 19 – Questões 3 e 4 do questionário.

Liste as interações fundamentais (ou forças fundamentais) em ordem de * 2 pontos
intensidade (indo da mais fraca até a mais forte)

Sua resposta

Relacione cada interação fundamental com seu respectivo Bóson. * 4 pontos

| | Glúon | Fóton | Gráviton | Z-,Z+,W |
|-----------------|----------------------------------|----------------------------------|----------------------------------|----------------------------------|
| Gravitacional | <input type="radio"/> | <input type="radio"/> | <input checked="" type="radio"/> | <input type="radio"/> |
| Eletromagnética | <input type="radio"/> | <input checked="" type="radio"/> | <input type="radio"/> | <input type="radio"/> |
| Nuclear Fraca | <input type="radio"/> | <input type="radio"/> | <input type="radio"/> | <input checked="" type="radio"/> |
| Nuclear Forte | <input checked="" type="radio"/> | <input type="radio"/> | <input type="radio"/> | <input type="radio"/> |

Fonte: elaborado pelo autor.

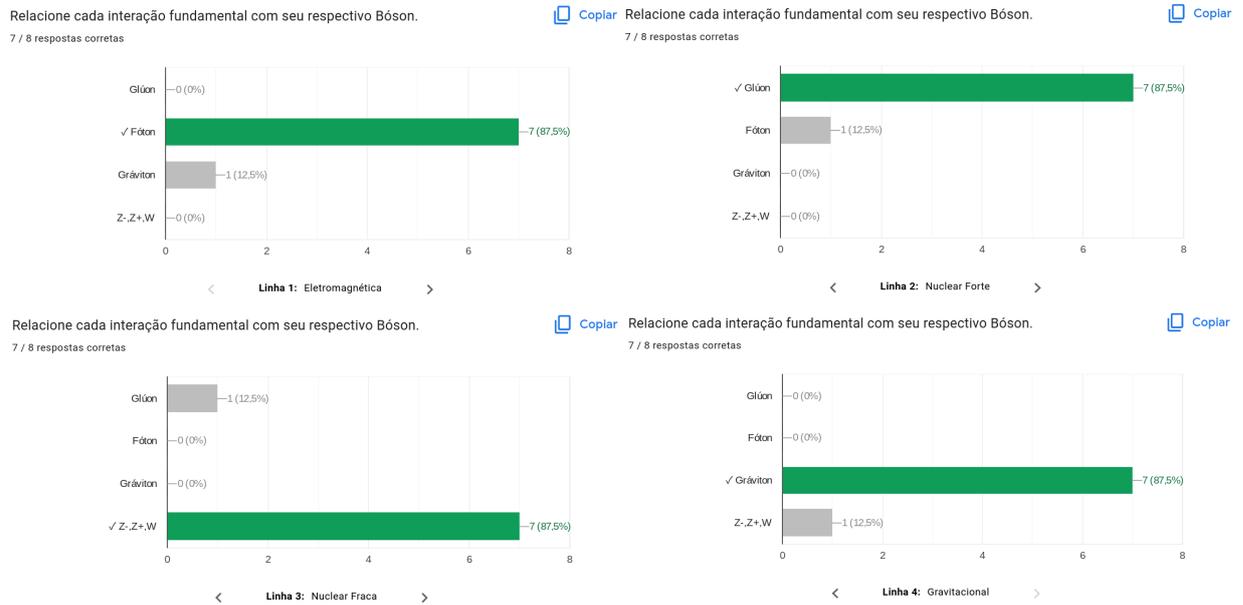
Tabela 12 – Respostas à Questão 3.

| Aluno | Resposta |
|---------|---|
| Aluno 1 | Essas interações são forças, sendo elas: força eletromagnética, força gravitacional, força nuclear forte e força nuclear fraca. |
| Aluno 2 | Gravitacional, força fraca, eletromagnética, força forte. |
| Aluno 3 | Gravitacional, nuclear fraca, eletromagnética, nuclear forte (eu lembro do senhor explicando isso, acho que nunca mais vou esquecer). |
| Aluno 4 | Fraca, gravitacional, eletromagnética, forte. |
| Aluno 5 | A movimentação da agulha de uma bússola eletromagnética ocorre em virtude da força eletromagnética Força Nuclear Fraca Força desenvolvida entre os léptons e os hádrons é denominada força nuclear fraca. |
| Aluno 6 | Gravitacional, força fraca, eletromagnética e força forte |
| Aluno 7 | 4- Gravitacional 3- Fraca 2- Eletromagnética 1- Forte. |
| Aluno 8 | Gravitacional, fraca, eletromagnética, forte. |

Fonte: elaborado pelo autor.

A Questão 3 é aberta, porém não é discursiva como as anteriores. Os resultados em geral foram bons. Sete alunos indicaram corretamente as forças fundamentais, desses sete, três forneceram a ordem correta. O principal erro com relação à ordem está na indicação da força fraca como a força de menor intensidade. A resposta do Aluno 5 está parcialmente desconectada da questão, uma vez que não se pediu para explicar a natureza das interações.

Figura 20 – Respostas à Questão 4.



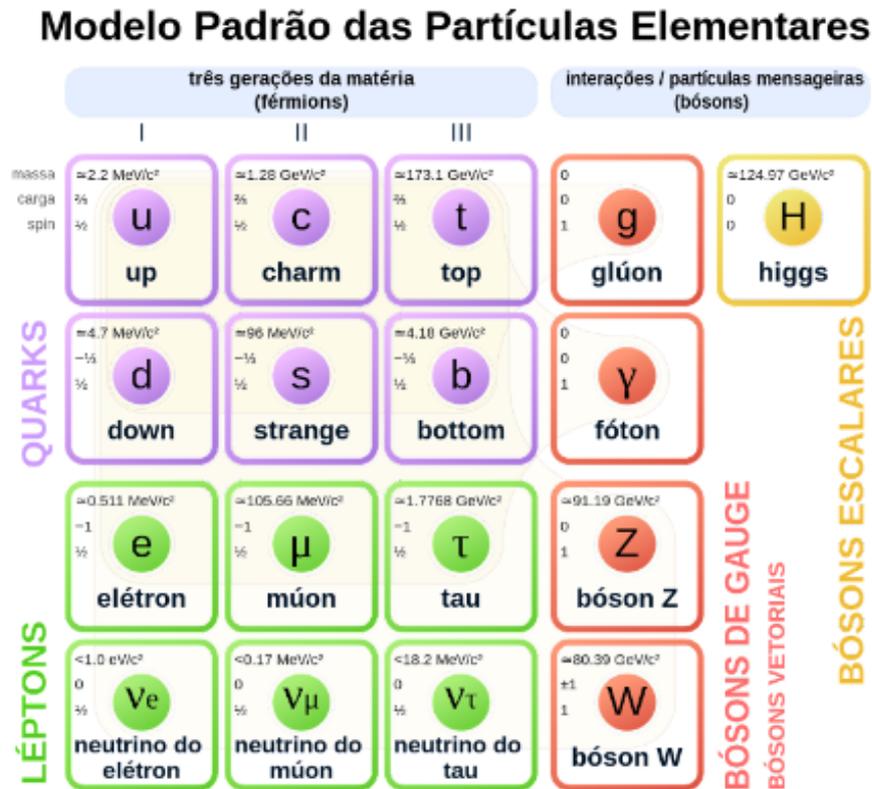
Fonte: Google Forms.

A Questão 4 também trata das interações fundamentais, mas é uma questão inteiramente objetiva. Nesta questão pede-se para relacionar os respectivos bósons de cada interação fundamental. A Figura 21 mostra os resultados da questão, indicando um elevado índice de acerto.

Figura 21 – Questão 5 do questionário.

Assinale a alternativa com a afirmação **INCORRETA** *

4 pontos

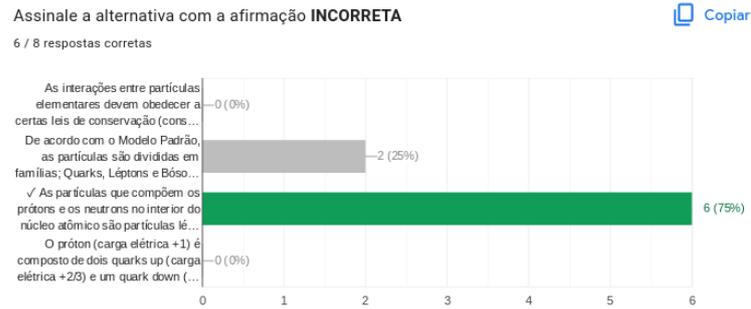


- As interações entre partículas elementares devem obedecer a certas leis de conservação (conservação de carga elétrica, carga cor etc)
- De acordo com o Modelo Padrão, as partículas são divididas em famílias; Quarks, Léptons e Bósons, sendo o último uma família de partículas mediadoras
- As partículas que compõem os prótons e os neutrons no interior do núcleo atômico são partículas léptônicas
- O próton (carga elétrica +1) é composto de dois quarks up (carga elétrica +2/3) e um quark down (carga elétrica -1/3)

Fonte: elaborado pelo autor.

A Questão 5 envolve uma pergunta sobre aspectos do modelo padrão. A primeira alternativa foi discutida em sala de aula no contexto dos fundamentos básicos de Física. A segunda alternativa pode ser identificadas como corretos pela visualização da tabela que acompanha a questão. As duas últimas alternativas são mutuamente excludentes e exige que o aluno relembre o papel dos quarks nos núcleos atômicos.

Figura 22 – Respostas à Questão 5.



Fonte: Google Forms.

Observa-se novamente um resultado positivo nas respostas de uma questão objetiva. A segunda resposta mais selecionada foi da alternativa 2, referente à classificação geral das partículas do MP.

5.2 Segunda parte do questionário

As figuras abaixo apresentam as sete questões da segunda parte do questionário, referentes à avaliação da experiência pessoal dos estudantes na aplicação da proposta didática. A questão 6 mostrada na Figura 23 é a mais geral de todas, buscando mensurar a qualidade final das três aulas. Já a questão 7 na mesma figura busca identificar o interesse prévio do aluno nas matérias de física e química.

Figura 23 – Questões 6 e 7 do questionário.

Avalie a sua experiência geral com as aulas de física de partículas em uma escala de 1 a 5 (sendo 1 péssimo e 5 excelente) *

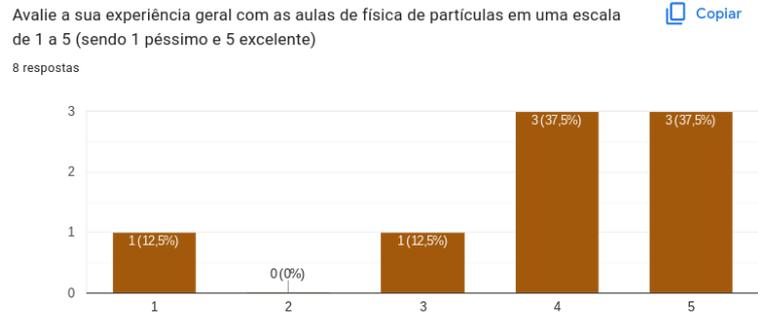
1 2 3 4 5

Você tinha um interesse prévio em física/química (ex: já achava essas matérias interessantes, consumia conteúdos no youtube sobre divulgação científica etc). *

- Sim
- Não

Fonte: elaborado pelo autor.

Figura 24 – Respostas à Questão 6.



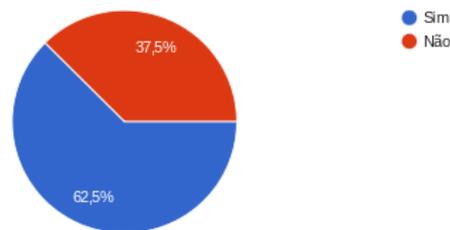
Fonte: Google Forms.

A Figura 24 indica uma prevalência da avaliação positiva (4 e 5) em relação às aulas tradicionais ministradas nos dois primeiros dias de aplicação. Ao todo, seis alunos avaliaram positivamente as aulas, enquanto um aluno forneceu uma avaliação neutra e outro aluno avaliou negativamente.

Figura 25 – Respostas à Questão 7.

Você tinha um interesse prévio em física/química (ex: já achava essas matérias interessantes, consumia conteúdos no youtube sobre divulgação científica etc).

8 respostas



Fonte: Google Forms.

A Figura 25 mostra a porcentagem de alunos que mantinham um interesse prévio em física e química. A maioria dos alunos respondeu possuir ter um interesse prévio, mas o pequeno espaço amostral não permite generalizar esse resultado. De fato, os alunos foram perguntados no início da aplicação se estes tinham interesse por física e a maioria respondeu negativamente.

Considerando a interdisciplinaridade do tema das aulas, é conveniente avaliar a percepção dos alunos no que diz respeito à relevância do conteúdo estudado para as matérias regulares. O propósito da Questão 8 na Figura 26 é sondar esse aspecto. A Questão 9 busca verificar o envolvimento prévio do aluno com o *RPG*.

Figura 26 – Questões 8 e 9 do questionário.

Você considera que as aulas de física de partículas contribuíram para um entendimento mais completo dos conteúdos de física e química que você estuda na matéria regular? (ex: o que você estuda com o seu professor de química no JN). *

Sim

Não

Você já conhecia o Role Playing Game (RPG de mesa), seja acompanhando vídeos no youtube ou jogando você mesmo? *

Sim

Não

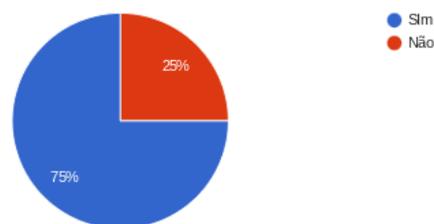
Fonte: elaborado pelo autor.

A Questão 8 teve como objetivo avaliar a capacidade de aulas extracurriculares de Física de Partículas de contribuir para o processo de aprendizagem do aluno nas cadeiras regulares de física e química. Já a Questão 9, analogamente à Questão 7, busca mensurar o interesse prévio dos alunos no jogo de RPG. A Figura 27 mostra o resultado geral das respostas à Questão 8.

Figura 27 – Respostas à Questão 8.

Você considera que as aulas de física de partículas contribuíram para um entendimento mais completo dos conteúdos de física e química que você estuda na matéria regular? (ex: o que você estuda com o seu professor de química no JN).

8 respostas



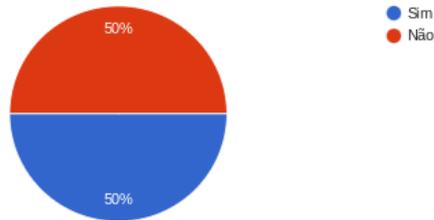
Fonte: Google Forms.

Em reforço ao resultado positivo evidenciado na figura acima pelas respostas dos oito alunos, muitos outros alunos trouxeram *feedbacks* em sala de aula, indicando satisfação em estudar um conteúdo diferente e ao mesmo tempo tão conectado com temas da física e da química do primeiro ano do ensino médio.

Figura 28 – Respostas à Questão 9.

Você já conhecia o Role Playing Game (RPG de mesa), seja acompanhando vídeos no youtube ou jogando você mesmo?

8 respostas



Fonte: Google Forms.

A Figura (28) acima indica um resultado equilibrado em relação ao conhecimento prévio do RPG. Novamente, não é possível generalizar esse resultado para toda a turma, mas é provável que a maioria dos alunos não tivessem um interesse/conhecimento prévio do RPG.

Figura 29 – Questão 10 do questionário.

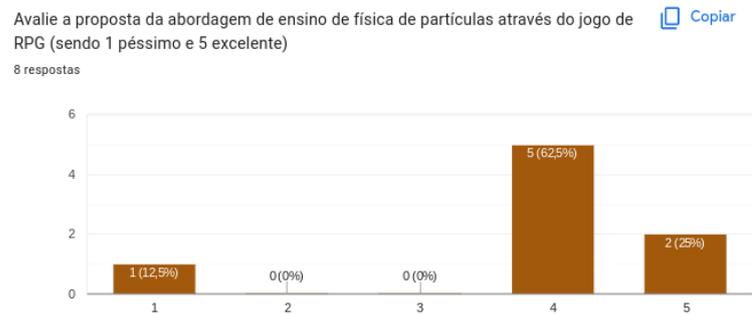
Avalie a proposta da abordagem de ensino de física de partículas através do jogo de RPG (sendo 1 péssimo e 5 excelente)

| | | | | | |
|--|-----------------------|-----------------------|-----------------------|-----------------------|-----------------------|
| | | | | | |
| | | | | | |
| | | | | | |
| | | | | | |
| | | | | | |
| | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 |
| | <input type="radio"/> |

Fonte: elaborado pelo autor.

A Questão 10 na Figura 29 acima visa avaliar especificamente a experiência do aluno na dinâmica de *P&D*. Como apenas alguns alunos jogaram o jogo, a avaliação pode também dizer à respeito da experiência de espectador na dinâmica. Assistir a uma sessão de *RPG* pode ser tão divertido quanto jogá-lo. De fato, há séries de campanhas de *RPG* no plataformas de vídeos com centenas de milhares de visualizações. A Figura 30 abaixo mostra os resultados da Questão 10.

Figura 30 – Respostas à Questão 10.



Fonte: Google Forms.

Das oito respostas, sete avaliaram positivamente a dinâmica de *P&D* aplicada no Dia 3.

Figura 31 – Questão 11 do questionário.

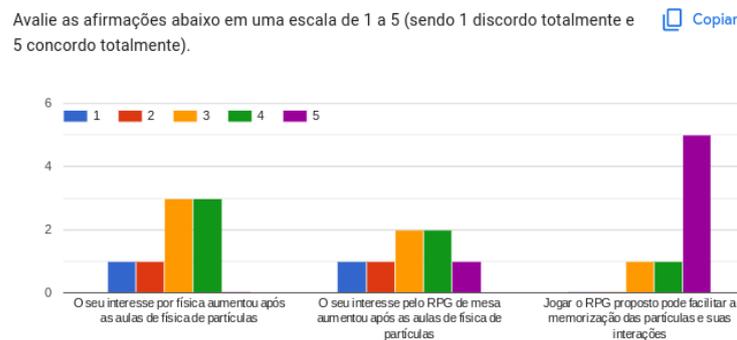
Avalie as afirmações abaixo em uma escala de 1 a 5 (sendo 1 discordo totalmente e 5 concordo totalmente).

| | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 |
|--|-----------------------|-----------------------|-----------------------|-----------------------|-----------------------|
| O seu interesse por física aumentou após as aulas de física de partículas | <input type="radio"/> |
| O seu interesse pelo RPG de mesa aumentou após as aulas de física de partículas | <input type="radio"/> |
| Jogar o RPG proposto pode facilitar a memorização das partículas e suas interações | <input type="radio"/> |

Fonte: elaborado pelo autor.

A Questão 11 na Figura 31 tem o propósito de verificar um conjunto de informações. Primeiramente, se o interesse do aluno por Física aumentou, o que pode ser comparado com a resposta da Questão 7 sobre o interesse prévio em Física. A segunda pergunta da questão verifica se o interesse pelo *RPG* aumentou, o que pode ser comparado com a resposta da Questão 9 sobre o conhecimento prévio do *RPG*. A última pergunta verifica a opinião do aluno sobre a capacidade da dinâmica proposta em auxiliar no processo de aprendizagem de Física de Partículas. A Figura 32 abaixo mostra os resultados da Questão 10.

Figura 32 – Respostas à Questão 11.



Fonte: Google Forms.

É possível perceber que o índice de respostas positivas referentes ao aumento de interesse em física e no RPG acompanham aproximadamente os resultados dos respectivos interesses prévios. Em todo caso, a grande maioria dos alunos indicou que a proposta de ensino com *P&D* pode auxiliar no estudo do conteúdo teórico.

Figura 33 – Questão 12 do questionário.

Com as suas palavras, diga o que achou sobre as aulas (críticas, sugestões, comentários).

OBS: OPCIONAL

Sua resposta

Fonte: elaborado pelo autor.

A última questão, mostrada na Figura 33, é uma pergunta opcional aberta solicitando críticas, sugestões ou comentários sobre as aulas ministradas e a dinâmica realizada. No total, cinco alunos responderam à questão. As respostas são apresentadas na Tabela 13.

Tabela 13 – Respostas à Questão 12.

| Aluno | Resposta |
|--------------|---|
| Aluno 1 | Difícil entender, mas é bom aprender. Eu gostaria de assistir de novo. |
| Aluno 2 | Foram boas, mas cansativas. |
| Aluno 3 | Foi muito legal porque tirou a turma daquela rotina chata e nos proporcionou uma experiência nova porque muitas pessoas da sala não conheciam esse conteúdo e/ou não tinham interesse nesses assuntos, mas as aulas fizeram com que algumas delas se interessassem por isso tanto pros ouvintes quanto pros surdos, foi bem legal parando pra pensar no caso deles também porque eles não tem tanto acesso a esse tipo de conteúdo quanto a gente devido a diferença linguística e falta de acessibilidade. Eu particularmente gostei muito porque já tinha ouvido falar sobre isso mas nunca me aprofundei nele e essas aulas fizeram com que meu interesse aumentasse. Em relação ao RPG, eu gostaria muito de ter jogado e eu tenho 99% de certeza que eu decoraria esse conteúdo bem mais rápido e fácil jogando mas ainda sim foi bem legal ele ter explicado como funcionava o RPG mesmo eu não tendo jogado, espero algum dia jogar isso. No geral eu adorei, obrigado por ter feito essa aula com libras 1, espero que o senhor seja um grande profissional e continue assim, é muito satisfatório te ver explicando a matéria porque você explica muito animado e tira as dúvidas bem direitinho, muitos professores não têm paciência de fazer isso. Não tenho críticas a fazer, só falar novamente o que eu já falei continue sendo assim e os seus futuros alunos vão gostar, nem todos porque muitos alunos não ligam pra escola, mas os que realmente se interessarem vão adorar. |
| Aluno 4 | Mais ou menos, porque não consigo compreender |
| Aluno 5 | Achei bastante interativa e interessante. |

Fonte: elaborado pelo autor.

As respostas da Tabela 13 foram positivas no geral. Alguns alunos relataram dificuldade de compreender o conteúdo. A resposta do Aluno 2 pode estar associada com a quebra de rotina proporcionada pelas aulas de Física de Partículas. Por ser uma escola profissionalizante, os alunos têm uma carga horária de matérias regulares reduzida, de modo que seja possível focar na formação técnica, Por isso, todas as turmas da escola têm aulas de física uma única vez na semana, totalizando uma carga horária semanal de uma hora e quarenta minutos. Além disso, muitas aulas são dedicadas a resolução de exercícios do livro ou dinâmicas abertas, tornando a aula tradicional de conteúdo algo ainda mais raro na rotina dos alunos. A aplicação durou três aulas, ou seja, três semanas de aulas carregadas de um novo conteúdo.

6 CONCLUSÃO

O *RPG* demonstra-se cada vez mais como uma excelente ferramenta de engajamento dentro dos modelos de ensino gamificados. Em específico, a relação entre as dinâmicas do *RPG* e o ensino de Física de Partículas mostra-se promissor, uma vez que ambos exigem a memorização de um conjunto de termos e regras, com o jogo de *RPG* adicionando o aspecto de diversão e comprometimento, característicos do estado de *flow*. Com isso, cada partícula fundamental foi associada a uma raça/criatura de um jogo de *RPG* de alta fantasia. As características específicas de cada raça possuem paralelos com propriedades ou comportamentos da respectiva partícula (elfo-elétron ou glúon-golem). Além disso, personagens podem agrupar-se para formar novas unidades, as quais são chamadas de grupos (*Parties*), que podem se relacionar de maneiras análogas ao que acontece com as partículas na natureza.

Como o *RPG* é um jogo que exige o uso da imaginação da parte dos jogadores (alunos) e do mestre (professor), os detalhes específicos de como serão as regras que ditam as dinâmicas de ação, combate e enredo podem ser convenientemente determinadas pelo professor, desde que sejam mantidas os paralelos entre os elementos do jogo e os conceitos da Física de Partículas. Além disso, o professor pode propor que os alunos pensem em novas partículas e suas propriedades, de modo a criar um exercício imaginativo sobre a expansão do modelo padrão.

A aplicação da proposta na turma de Libras 1 da escola Joaquim Nogueira foi, no geral, bem sucedida. Ao final de cada aula, muitos alunos demonstraram satisfação e interesse em aprender o conteúdo, que se diferencia da grade curricular tradicional. Um dos grandes pontos positivos de se ensinar Física de Partículas no ensino básico é que este é um tema altamente interdisciplinar. Além da aula dedicada à revisão dos tópicos de Química, era frequente o surgimento de dúvidas relacionadas a assuntos tangenciais, tais como os efeitos da radioatividade para a saúde humana, a geração de energia na sociedade industrial e o funcionamento de equipamentos médicos. Algumas vezes, surgiam dúvidas relacionadas a outras áreas da Física Contemporânea, como por exemplo quando uma aluna perguntou sobre como surgem os buracos negros e estrelas de nêutrons.

O desempenho geral das respostas da primeira parte do questionário foi mediano. É impossível generalizar as conclusões baseadas nesses resultados, uma vez que a proposta foi

aplicada em um única turma e apenas uma fração dos alunos optou por participar da avaliação. No entanto, é possível fazer algumas análises de caso. Os resultados do questionário mostraram que os alunos apresentam uma certa dificuldade em responder perguntas abertas de caráter discursivo. É possível identificar nas Tabela 10 e 11 que uma grande parte dos alunos não compreendeu corretamente o que estava sendo perguntado, visto que muitos deram respostas corretas, mas que não respondiam exatamente à pergunta da questão. Já na questão 3, verifica-se pela Tabela 12 que um percentual maior de alunos respondeu corretamente. A questão 3, mesmo sendo aberta, não é uma questão discursiva, o que explica o melhor desempenho obtido pelos alunos.

O resultado da segunda parte do questionário mostrou que a experiência geral dos alunos com as aulas e a dinâmica foi positiva. No que diz respeito à avaliação dos estudantes à proposta de *Particles & Dragons*, as respostas indicam que a maioria considerou que a dinâmica pode auxiliar na aprendizagem do conteúdo, mas a experiência com o jogo ficou dividida, uma vez que metade dos alunos respondeu que seu interesse no *RPG* aumentou após a aplicação da dinâmica. Esse resultado precisa ser encarado com cautela, uma vez que não houve tempo suficiente para uma aplicação que englobasse toda a turma. Já em relação ao aumento no interesse de Física, 3/4 dos alunos responderam positivamente, o que já é um percentual maior do que os que responderam possuir um interesse prévio em Física. Portanto, conclui-se que uma dinâmica gamificada baseada no *RPG* tem um grande potencial de trazer resultados positivos para aprendizagem dos alunos, em especial, com temas considerados difíceis ou extensos.

REFERÊNCIAS

- AMARAL, R. R. do. **Uso do RPG Pedagógico para o ensino de Física**. 2008. Dissertação (Mestrado em Ensino de Ciências) - Programa de Pós Graduação em Ensino de Ciências da Universidade Federal Rural de Pernambuco, Recife, 2006.
- BOAS, A. C. V.; JÚNIOR, A. G. M.; DIAS, M. M. P. RPG pedagógico como ferramenta alternativa para o ensino de física no ensino médio. **Caderno Brasileiro de Ensino de Física**, v. 34, n. 2, p. 372–403, 2017.
- CESARIOUS. **Dirac: do outro lado (proibido) da matéria**. 2013. Disponível em: [https://chem.libretexts.org/Ancillary_Materials/Exemplars_and_Case_Studies/Case_Studies/Nuclear_Energy_for_Today's_World/02._Discovery_of_the_Neutron_\(1932\)](https://chem.libretexts.org/Ancillary_Materials/Exemplars_and_Case_Studies/Case_Studies/Nuclear_Energy_for_Today's_World/02._Discovery_of_the_Neutron_(1932)). Acesso em: 24 nov. 2022.
- CLAUSIUS, R. On the nature of the motion which we call heat. **The London, Edinburgh, and Dublin Philosophical Magazine and Journal of Science**, Taylor & Francis, v. 14, n. 91, p. 108–127, 1857.
- CRAWFORD, J.; WYATT, J.; SCHWALB, R. J.; CORDELL, B. R. **Player's handbook**. [S. l.]: Wizards of the Coast LLC, 2014.
- DEKOSKY, R. K. William crookes and the quest for absolute vacuum in the 1870s. **Annals of Science**, Taylor & Francis, v. 40, n. 1, p. 1–18, 1983.
- DIRAC, P. A. Theory of electrons and positrons. **Nobel Lecture**, v. 12, p. 320–325, 1933.
- DUNGEONS & DRAGONS. **D&D Beyond: play with advantage**. 2022. Disponível em: <https://www.dndbeyond.com/>. Acesso em: 6 dez. 2022.
- FERMILAB. **Standard Model of Elementary Particles**. 2016. Disponível em: https://pt.wikipedia.org/wiki/Modelo_Padrão. Acesso em: 05 dez. 2022.
- FERREIRA NETO, O. **Explorando a Equação de Dirac: um passeio por isolantes topológicos e férmions de majorana**. 2019. Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação em Física de Materiais) - Instituto de Física, Universidade Federal de Uberlândia, Uberlândia, 2019.
- FRENCH CONSEIL EUROPÉEN POUR LA RECHERCHE NUCLÉAIRE. **New results indicate that new particle is a Higgs boson**. 2013. Disponível em: <https://home.web.cern.ch/news/news/physics/new-results-indicate-new-particle-higgs-boson>. Acesso em: 05 dez. 2022.
- FRITZSCH, H.; MINKOWSKI, P. Flavordynamics of quarks and leptons. **Physics Reports**, Elsevier, v. 73, n. 2, p. 67–173, 1981.
- GLASCOCK, M.; SPARLIN, D. Thomson's e/m experiment revisited. **American Journal of Physics**, American Association of Physics Teachers, v. 40, n. 11, p. 1663–1668, 1972.
- GOMPERZ, T. **Os pensadores da Grécia: história da filosofia antiga**. São Paulo: Ícone, 2011.
- GRAHAM, A. The abc's of nuclear science. **The Physics Teacher**, American Association of Physics Teachers, v. 40, n. 3, p. 190–190, 2002.

GROTRIAN, W. **Graphische Darstellung der Spektren von Atomen und Ionen mit ein, zwei und drei Valenzelektronen**: zweiter teil. Berlin: Springer-Verlag, 1928.

HO-KIM, Q.; PHAM, X.-Y. **Elementary particles and their interactions**: concepts and phenomena. New York: Springer Science & Business Media, 2013.

INSTITUTO DE FÍSICA DA UNICAMP. **O átomo de Bohr**. 2021. Disponível em: <https://www.ifi.unicamp.br/~fauth/1OrigensMecanicaQuantica/2OatomodeBohr/AtomoBohr.html>. Acesso em: 16 nov. 2022.

KHAN ACADEMY. **Descoberta do elétron e do núcleo**. 2015. Disponível em: <https://pt.khanacademy.org/science/chemistry/electronic-structure-of-atoms/history-of-atomic-structure/a/discovery-of-the-electron-and-nucleus>. Acesso em: 14 nov. 2022.

LOBO, M. P. **Dirac's square root and the discovery of antiparticles**. Disponível em: <https://osf.io/8q2zh>. Acesso em: 14 nov. 2022.

MOREIRA, M. A. Partículas e interações. **Física na escola**, São Paulo, v. 5, n. 2, p. 10–14, 2004.

MOREIRA, M. A. O modelo padrão da física de partículas. **Revista Brasileira de Ensino de Física**, SciELO Brasil, v. 31, p. 1306–1, 2009.

NEWTON, I. **Óptica**. São Paulo: EdUSP, 2002.

OSTERMANN, F. **Partículas elementares e interações fundamentais**. Porto Alegre: UFRGS, 2001. (Texto de apoio ao professor de Física, v. 12).

PORTO, C. O atomismo grego e a formação do pensamento físico moderno. **Revista Brasileira de Ensino de Física**, SciELO Brasil, v. 35, p. 1–11, 2013.

PRAIS, L. R. **Oscilação de neutrinos no vácuo e o problema do neutrino solar**. 2016. Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação em Física) - Instituto de Geociências e Ciências Exatas, Universidade Estadual Paulista, Rio Claro, 2016.

RIBEIRO, A. C. M. *et al.* **A indústria de vídeo games e seu impacto econômico**. 2015. Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação em Auditoria e Controladoria Empresarial) - Faculdade de Administração e Ciências Contábeis, Universidade Federal de Mato Grosso, Cuiabá, 2015.

RPG MAIS BARATO. A origem do RPG de Mesa. 2018. Disponível em: <https://rpgmaisbarato.com/blog/rpg-de-mesa-origem-como-jogar/>. Acesso em: 20 nov. 2022.

RUTHERFORD, E. Lxxix. The scattering of α and β particles by matter and the structure of the atom. **The London, Edinburgh, and Dublin Philosophical Magazine and Journal of Science**, v. 21, n. 125, p. 669–688, 1911.

SÁ, C. D. de; PAULUCCI, L. Desenvolvimento de um sistema de rpg para o ensino de física. **Revista Brasileira de Ensino de Física**, SciELO Brasil, v. 43, 2021.

SCHÄFFER, D.; SCHUMACKER, F. K.; ORENGO, G. Uma introdução à física de partículas para o ensino médio: uma tradução adaptada do texto de bettelli, bianchi-streit e giacomelli. **Revista Brasileira de Ensino de Física**, SciELO Brasil, v. 42, 2020.

- SEGRÈ, E. **From x-rays to quarks: modern physicists and their discoveries**. San Francisco: Courier Corporation, 2012.
- SETTLE, F. A. **Discovery of the Neutron (1932)**. 2020. Disponível em: [https://chem.libretexts.org/Ancillary_Materials/Exemplars_and_Case_Studies/Case_Studies/Nuclear_Energy_for_Today's_World/02._Discovery_of_the_Neutron_\(1932\)](https://chem.libretexts.org/Ancillary_Materials/Exemplars_and_Case_Studies/Case_Studies/Nuclear_Energy_for_Today's_World/02._Discovery_of_the_Neutron_(1932)). Acesso em: 22 nov. 2022.
- SILVA da *et al.* **Gamificação na educação**. São Paulo: Pimenta Cultural, 2014.
- SILVA, J. B. d.; SALES, G. L.; CASTRO, J. B. d. Gamificação como estratégia de aprendizagem ativa no ensino de física. **Revista Brasileira de Ensino de Física**, v. 41, 2019.
- TIPLER, P. A.; LLEWELLYN, R. A. **Modern physics**. New York: WH Freeman and Co., 2012.
- UNIVERSIDADE FEDERAL DO CEARÁ. **Os Raios X**. Fortaleza: UFC, 2001. Disponível em: <https://seara.ufc.br/pt/secoes-especiais-de-ciencia-e-tecnologia/secoes-especiais-fisica/os-raios-x/>. Acesso em: 10 nov. 2022.
- VASQUES, R. C. **As potencialidades do RPG (Role Playing Game) na educação escolar**. 2008. Dissertação (Mestrado em Educação Escolar) - Faculdade de Ciências e Letras, Universidade Estadual Paulista, Araraquara, 2008.
- VINHA, F. **D&D 5ª edição chega ao Brasil: veja como o RPG transformou os jogos**. 2019. Disponível em: <https://www.techtudo.com.br/noticias/2019/11/dandd-5a-edicao-chega-ao-brasil-veja-como-o-rpg-transformou-os-jogos.ghtml>. Acesso em: 20 nov. 2022.

APÊNDICE B – FICHAS DE PERSONAGEM DE PARTICLES & DRAGONS

Figura 34 – Exemplos de fichas de personagem simplificadas para P&D.

| NOME: | ELFO TAU | NOME: | ELFO ELÉTRON | NOME | ELFO MÚON |
|--|-----------------|--|------------------|---|------------------|
| τ | VITALIDADE: 1d8 | e | VITALIDADE: 1d12 | μ | VITALIDADE: 1d10 |
| TAU | | elétron | | MÚON | |
| ITENS: STAFF  (NEUTRINO DO TAU) | 1d6 | ITENS: TOUCA  (NEUTRINO DO ELÉTRON) | 1d4 | ITENS: MANTO  (NEUTRINO DO MÚON) | 1d6 |
| SPIN: 1/2 (DES, AGI) +1 | | SPIN: 1/2 (DES, AGI) +1 | | SPIN: 1/2 (DES, AGI) +1 | |
| MASSA: 1.777 GeV/c ² (FOR) +5 | | MASSA: 0.5 MeV/c ² (FOR) +2 | | MASSA: 105 MeV/c ² (FOR) +3 | |
| CARGA: -1 (PER, INT) +0 | | CARGA: -1 (PER, INT) +0 | | CARGA: -1 (PER, INT) +0 | |

Fonte: elaborado pelo autor.

APÊNDICE C – PLANO DE AULA DO DIA 1

Objetivos

- Apresentar as figuras históricas responsáveis pelo desenvolvimento dos primeiros modelos atômicos modernos.
- Apresentar as características de cada modelo atômico.
- Discutir os experimentos associados à elaboração dos modelos, bem como as razões pelas quais estes foram sendo substituídos.
- Explorar o conceito de constituintes fundamentais do átomo.

Conteúdo programático

- O atomismo na Grécia antiga.
- O modelo atômico de Dalton e leis básicas de conservação.
- O modelo atômico de Thomson e fenômenos elétricos.
- O modelo atômico de Rutherford e o experimento com deflexão de partículas α .
- O modelo atômico de Bohr e a quantização da energia.
- Prótons, nêutrons e o problema da estabilidade do núcleo.

Estratégia de ensino

- Aula expositiva dialogada.
- Comentários acerca de conteúdos estudados nas matérias regulares.

Recursos

- Notebook.
- Projetor de vídeo.
- Lousa.

APÊNDICE D – PLANO DE AULA DO DIA 2

Objetivos

- Introduzir o conceito de partículas elementares.
- Apresentar os léptons e quarks como constituintes fundamentais da matéria.
- Discutir cada interação fundamental e os fenômenos associados a cada um .
- Apresentar o modelo padrão de partículas.
- Explorar as técnicas modernas de detecção de partículas nos aceleradores de partículas.

Conteúdo programático

- Características e propriedades de partículas.
- Quarks e léptons.
- Interações fundamentais e partículas mediadoras.
- O modelo padrão de partículas.
- O LHC e o Bóson de Higgs.

Estratégia de ensino

- Aula expositiva dialogada.
- Comentários acerca de conteúdos estudados nas matérias regulares.
- Explicação de uma dinâmica gamificada.

Recursos

- Notebook.
- Projetor de vídeo.
- Lousa.
- Ficha de RPG