



PPGEnFis
Programa de Pós-Graduação em Ensino de Física



UNIVERSIDADE FEDERAL DO ESPÍRITO SANTO – UFES
CENTRO DE CIÊNCIAS EXATAS
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENSINO DE FÍSICA
MESTRADO NACIONAL PROFISSIONAL EM ENSINO DE FÍSICA
(MNPEF/SBF)

Francisco Elias Gomes

**Uma Unidade de Ensino Potencialmente Significativa para a Física de
neutrinos**

VITÓRIA-ES
2022

Francisco Elias Gomes

**Uma Unidade de Ensino Potencialmente Significativa para a Física de
neutrinos**

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Ensino de Física (PPGEnFis)/Mestrado Nacional Profissional em Ensino de Física, da Universidade Federal do Espírito Santo em parceria com a Sociedade Brasileira de Física (SBF), como requisito para obtenção do título de Mestre em Ensino de Física.

Orientador: Prof. Dr. Flávio Gimenes Alvarenga.

**VITÓRIA-ES
2022**

Ficha catalográfica disponibilizada pelo Sistema Integrado de
Bibliotecas - SIBI/UFES e elaborada pelo autor

G633u Gomes, Francisco Elias, 1959-
Uma unidade de ensino potencialmente significativa para a
física de neutrinos / Francisco Elias Gomes. - 2022.
253 f. : il.

Orientador: Flávio Gimenes Alvarenga.
Dissertação (Mestrado Profissional em Ensino de Física) -
Universidade Federal do Espírito Santo, Centro de Ciências
Exatas.

I. Alvarenga, Flávio Gimenes. II. Universidade Federal do
Espírito Santo. Centro de Ciências Exatas. III. Título.

CDU: 53



UNIVERSIDADE FEDERAL DO ESPÍRITO SANTO
CENTRO DE CIÊNCIAS EXATAS
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENSINO DE FÍSICA



-Uma Unidade de Ensino Potencialmente Significativa para a Física de Neutrinos"

Francisco Elias Gomes

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Ensino de Física - Mestrado Profissional em Ensino de Física, ofertado pela Universidade Federal do Espírito Santo, como requisito parcial para obtenção do título de Mestre em Ensino de Física.

Aprovada em 30 de março de 2022.

Comissão Examinadora

Prof. Dr. Flávio Gimenes Alvarenga
(Orientador PPGEnFis/UFES)

Prof. Dr. Fernando José Lira Leal
(Membro Externo/UFES)

Profa. Dra. Márcia Regina Santana Pereira
(Membro Interno PPGEnFis/UFES)

An. Fernando Ferrari, 814, Colômbia, Vitória - ES. Vitrão do prédio de IC1, membro interno.
Tel. (27) 4009-7961 e-mail: ppgenfis.ufes@gmail.com www.mnpef.ufes.br



UNIVERSIDADE FEDERAL DO ESPÍRITO SANTO

PROTOCOLO DE ASSINATURA



O documento acima foi assinado digitalmente com senha eletrônica através do Protocolo Web, conforme Portaria UFES nº 1.269 de 30/08/2018, por
MARCIA REGINA SANTANA PEREIRA - SIAPE 2292813
Departamento de Tecnologia Industrial - DTI/CT
Em 16/05/2022 às 11:45

Para verificar as assinaturas e visualizar o documento original acesse o link:
<https://api.lepisma.ufes.br/arquivos-assinados/474393?tipoArquivo=O>



Documento assinado digitalmente

FERNANDO JOSE LIMA LEAL

Data: 24/05/2022 11:02:29-0300

Verifique em <https://ver.fisador.br>

Dedico essa dissertação a Deus (causa não causada), no meu entendimento um processo dinâmico-organizado onipotente, onisciente e onipresente, que produz gratuitamente uma pluralidade infinita de mundos e de vida.

VITÓRIA-ES
2022

Sou grato ao Professor Dr. Flávio Gimenes Alvarenga, a todos os professores e funcionários do MNPEF/UFES e ao apoio financeiro da CAPES. Sempre sonhei em fazer mestrado profissional em ensino de Física, por isso meus agradecimentos especiais e sinceros vão para a SBF e para a CAPES, sem o apoio das quais jamais realizaria esse sonho. Parabéns a CAPES, SBF e UFES pela excelência desse programa. Vocês conseguiram mudar absolutamente minha prática docente. Não parem. Vamos juntos mudar o ensino de Física em nosso Brasil! Também de maneira alguma poderia deixar de agradecer à Lucimar Alixandrina de Souza Soares e à Flávia Cristina Duarte Brandão Oliveira Silva, diretora e vice-diretora, respectivamente, da escola Dionysio Costa de Mutum-Mg, e também à atuação comprometida e exemplar da estudante Edivânia Aparecida Dias Moreira, moradora da zona rural de Mutum e participante bastante ativa da pesquisa em questão.

“A realidade é uma superfície que conseguimos arranhar apenas superficialmente. A matemática nos permite conhecer aparentemente seu interior. Conhecer e saber empregar a matemática para explicar o que é observado e fazer previsões é fundamental. Einstein fazia isso muito bem”. HELAYËL-NETO, 2019.

Resumo

A investigação em questão está inserida no âmbito da pesquisa qualitativa e quantitativa em ensino de Física. O problema de pesquisa pode ser resumido no seguinte questionamento: É possível modelar um produto educacional e testá-lo como um método de pesquisa operacional em ensino de Física Contemporânea (FC) para o ensino médio de forma que os alunos aprendam em conformidade com a Teoria da Aprendizagem Significativa (TAS) de David Ausubel? Para a coleta de dados foi utilizada uma Sequência Didática (SD) inspirada nas Unidades de Ensino Potencialmente Significativas (UEPS) que são sequências didáticas em conformidade com os pressupostos da teoria retro mencionada. Esses dados foram coletados utilizando os seguintes instrumentos: representação do átomo e do neutrino pelos estudantes; fala dos estudantes; questionário diagnóstico; questionário conceitual 1; questionário conceitual 2; e avaliação tradicional. Ao longo da investigação em questão foi aplicada durante seis aulas a Sequência Didática (SD) em questão aos estudantes de uma turma do terceiro ano do Ensino Médio da Escola Estadual de Ensino Fundamental Médio Dionysio Costa-Mutum/MG. Após a análise de dados, verificamos que os estudantes adquiriram novos conhecimentos a partir dos conhecimentos prévios colhidos no início da intervenção pedagógica. Dessa forma, podemos inferir que houve uma diferenciação progressiva acompanhada de uma reconciliação integradora, isto é, a partir dos subsunções átomo e partícula elementar os estudantes aprenderam que o Universo é todo “particulado” e que o neutrino é uma dessas partículas. A eficácia da SD como instrumento pedagógico para o ensino de neutrinos foi aprovada pela maioria dos estudantes participantes dessa investigação conforme questionário de opinião (Anexo E).

Palavras-chave: Física de neutrinos; UEPS; Ensino sob Medida; Aprendizagem Significativa.

Abstract

The investigation in question is part of the qualitative and quantitative research in Physics teaching. The research problem can be summarized in the following question: Is it possible to model an educational product and test it as an operational research method in teaching Contemporary Physics (CP) for high school so that students learn in accordance with the Meaningful Learning Theory (MLT) by David Ausubel? For data collection, a Didactic Sequence (DS) inspired by the Potentially Meaningful Teaching Unit (PMTU) was used, which are didactic sequences in accordance with the assumptions of the aforementioned theory. These data were collected using the following instruments: representation of the atom and the neutrino; students' speech; diagnostic questionnaire; conceptual questionnaire 1; conceptual questionnaire 2; and traditional assessment. In the course of the investigation in question, the Didactic Sequence (DS) in question was applied to students of a third year high school class at Dionysio Costa-Mutum/MG State Elementary School. After data analysis, we found that students acquired new knowledge from previous knowledge collected at the beginning of the pedagogical intervention. In this way, we can infer that there was a progressive differentiation accompanied by an integrative reconciliation, that is, from the atom and elementary particle subsumors, the students learned that the Universe is all particulate and that the neutrino is one of these particles. Instructional Instructed SD's diligence in teaching this neutrinos instruction was approved by the majority of student students as per opinion (Annex E as per opinion).

Keywords: Neutrino Physics; PSTU; Just-in-Time Teaching; Meaningful Learning.

Sumário

Capítulo 1	11
Introdução.....	11
1.1 Objetivos.....	12
1.2 Organização da Pesquisa.....	13
1.3 Problema da Pesquisa.....	14
1.4 Local da investigação.....	14
1.5 Sujeitos da Pesquisa.....	15
1.6 Justificativa de caráter emocional.....	15
Capítulo 2	18
Referencial Teórico “Transcrição” da Aprendizagem Significativa de Ausubel proposta por Moreira com o emprego da UEPS.....	18
2.1 A teoria da Aprendizagem Significativa de David Ausubel, um conceito cognitivista.....	19
2.1.1 O que são subsunçores?.....	21
2.1.2 O que são diferenciação progressiva e reconciliação integradora?.....	22
2.1.3 Aprendizagem mecânica e a aprendizagem significativa.....	25
2.2 Unidades de Ensino Potencialmente Significativas (UEPS).....	27
2.2.1 Passo a passo construtivo da UEPS.....	28
2.3 Metodologias Ativas.....	30
2.3.1 Just-in Time Teaching - Ensino sob Medida (EsM).....	30
2.4 Inserções de Física Contemporânea.....	31
Capítulo 3	33
Física de neutrinos.....	33
3.1 O Modelo Padrão de Partículas.....	33
3.2 A herança científica do cientista brasileiro César Lattes.....	37
3.3 Neutrino.....	43
3.3.1 Breve resumo histórico sobre os neutrinos.....	49
3.3.2 Fontes de neutrinos.....	57
3.3.3 Como os neutrinos adquirem massa?.....	58
3.3.4 Neutrinos e Supernovas.....	62

3.3.5 Neutrinos e Cosmologia.....	63
3.3.6 A terra vista através dos neutrinos.....	65
3.3.7 Partículas das quais somos feitos.....	65
3.3.8 Pauli.....	68
3.3.9 Decaimento beta menos e o duplo decaimento beta com e sem emissão de neutrinos.....	71
3.3.10 A partícula neutrino e o enigma de Majorana.....	73
Capítulo 4.....	79
Metodologia.....	79
4.1 O que é uma sequência didática (SD)?.....	79
4.2 Dados da Sequência Didática.....	80
4.2.1 Aula 1.....	83
4.2.2 Aula 2.....	83
4.2.3 Aula 3.....	84
4.2.4 Aula 4.....	85
4.2.5 Aula 5.....	85
4.2.6 Aula 6.....	86
4.3- Coleta de dados.....	86
4.3.1 Representação do átomo e do neutrino pelos estudantes.....	87
4.3.2 Questionário diagnóstico.....	87
4.3.3 Questionário conceitual 1.....	88
4.3.4 Nova representação do átomo e do neutrino e Questionário conceitual 2.....	88
4.3.5 Avaliação Tradicional.....	88
4.3.6 Observando a diferenciação progressiva e indícios de aprendizagem significativa na fala dos estudantes através de aula dialogada interativa.....	89
Capítulo 5.....	90
Análise de dados.....	90
5.1 Aula 1: Fala dos estudantes e representação do átomo e do neutrino pelos estudantes.....	90
5.2 Aula 2: Fala dos estudantes e questionário diagnóstico.....	92
5.3 Aula 3: Fala dos estudantes e questionário conceitual 1.....	95
5.4 Aula 4: Fala dos estudantes e questionário conceitual 2.....	99

5.5 Aula 5: Avaliação discursiva tradicional.....	104
5.6 Aula 6: Observando a diferenciação progressiva e indícios de aprendizagem significativa na fala dos estudantes através de aula dialogada interativa.....	108
Considerações finais.....	115
Referências bibliográficas.....	117
Apêndices.....	124
Anexo 1: Terceira aula.....	124
Anexo 2: Quarta aula.....	134
Anexo 3: Quinta aula.....	147
Anexo A: Questionário diagnóstico.....	153
Anexo B: Sugestão de questionário conceitual 1.....	154
Anexo C: Sugestão de questionário conceitual 2.....	158
Anexo D: Sugestão de avaliação.....	159
Anexo E: Sugestão de questionário de opinião.....	160
Anexo F: Termo de Consentimento Livre e Esclarecido- TCLE - assinado pelos alunos sujeitos da pesquisa.....	162
Produto Educacional.....	164

Capítulo 1

Introdução

Antes da escrita dessa dissertação três questionamentos profundos e indagadores fluíram em meus pensamentos, a saber: Como estamos ensinando? O que estamos ensinando? Como os estudantes aplicam esses conhecimentos em sua vivência social ou não? Sabemos que são perguntas difíceis de serem respondidas, pois envolvem vários parâmetros não lineares bastante conhecidos dos teóricos da educação e professores. Esse triplete de questionamentos certamente desperta nos docentes sérios a procura de novas metodologias educacionais. Foi exatamente isso que aconteceu comigo. Já estava cansado de não conseguir ensinar Física para meus estudantes do ensino médio. Já ministrei aulas em vários lugares e observei e observo um desinteresse crescente pela maioria das disciplinas da grade curricular do ensino médio. E a Física não é e jamais foi uma exceção a essa mudança comportamental educacional.

Isso nos mostra de maneira contundente que devemos mudar de paradigma, trazendo, por exemplo, como no meu caso, a Física Contemporânea aliada a novas técnicas de ensino e aprendizagem para a Escola Dionysio Costa.

Esse trabalho de pesquisa relata de forma minuciosa a aplicação de uma sequência didática para ensinar Física de neutrinos na escola retro mencionada. No entanto, por que escolhemos esse tema? Em primeiro lugar, de um lado, pensamos que os estudantes não podem ficar alheios àquilo que está acontecendo agora na Física de fronteira; de outro, sabemos que tudo que existe tem uma constituição “granulada” (suspeita-se que o espaço também o seja: átomos de espaço) e os neutrinos fazem parte desses “grãos” que varrem todo o Universo e que poderia nos informar com era o Universo três minutos após um grande sobressalto de energia chamado big-bang [1].

O leitor (a) poderá constatar que a pesquisa foi aplicada à distância via *meet* e no período noturno em uma turma do terceiro ano do ensino médio da escola e sempre às quartas-feiras das 19 às 20 horas, a direção da escola não achando

viável que a implementação dessa investigação fosse aplicada no horário convencional, no caso matutino. A seleção dos estudantes foi feita apenas uma vez através de um convite via *Whatsap* no grupo de estudantes da escola. Quem quisesse podia participar podia fazê-lo. Tivemos mais de 21 alunos interessados em plena pandemia. Nessa época todas as escolas de Minas estavam absolutamente fechadas. Não foi fácil.

No entanto devido a fatores externos e alheios à minha vontade e a da escola, a metade da turma desistiu logo no início da investigação, ficando apenas com 11 estudantes. Muitos deles não tinham celular adequado e internet de boa qualidade. Tive dois participantes da zona rural que caminhavam 600m para chegar a um morro para acessar a nossa aula no *meet*.

Todavia mesmo com 11 estudantes jamais em toda minha carreira presenciei tanta motivação para conhecer o desconhecido; para se inteirar dos mistérios da criação de Deus.

1.1 Objetivos

Por um lado, o objetivo principal é verificar se é possível ensinar Física de neutrinos na terceira série do ensino médio por meio de uma Sequência Didática (SD) na forma de uma Unidade de Ensino Potencialmente Significativa (UEPS), ou melhor, analisar e tentar compreender de que forma essa SD pode contribuir para o processo de ensino e aprendizagem de Física de neutrinos em turmas do ensino médio

Por outro, como objetivos específicos podemos destacar:

- *Fornecimento*: Fornecer ao Professor um material didático de qualidade sobre Física de Neutrinos, de maneira tal que tenha uma excelente base teórica quanto ao que são férmions e bósons; quanto à definição das quatro interações fundamentais da natureza, dos neutrinos e dos neutrinos de Majorana; quanto ao postulado de Pauli; e quanto às aplicações tecnológicas dos neutrinos.

- *Aplicação*: Aplicar de forma contextualizada no ensino médio a teoria da aprendizagem significativa na forma de UEPS, utilizando a metodologia ativa

denominada Ensino sob Medida (EsM) para ensinar Física de neutrinos, analisando assim, entre outras coisas, a troca de significados entre os estudantes e a evolução ou não do processo de ensino-aprendizagem deles.

- *Confecção*: Confeccionar para o Professor um produto educacional, ou Material Instrucional (MI), para que ele possa ensinar Física de neutrinos no ensino médio.

1.2 Organização da Pesquisa

A dissertação aqui exposta foi redigida e estruturada em 5 capítulos, além de Considerações Finais; Referências Bibliográficas; e Apêndice. Procuramos desenvolver uma organização textual e lógica para proporcionar ao leitor (a) uma leitura prazerosa, motivadora e instrutiva.

Capítulo 1- Nesse capítulo inicial descrevemos o objetivo geral e o específico; a organização dessa dissertação; o problema da pesquisa; o local da investigação; os sujeitos da pesquisa; e a justificativa de caráter emocional, desse trabalho científico;

Capítulo 2- Aqui mostramos o referencial teórico como uma manifestação/transcrição da Aprendizagem Significativa de Ausubel, conforme Moreira, por meio de uma UEPS, passando pelos passos da SD na forma de UEPS e pelo Ensino sob Medida, até chegarmos a tópicos de Física Contemporânea;

Capítulo 3- Nessa parte da dissertação, exploramos com desenvoltura e profundidade a Física de neutrinos para o ensino médio. Começamos com a herança científica do cientista brasileiro César Lattes, passando por neutrinos e sua história, fontes de neutrinos e outros, até a partícula neutrino e o enigma de Ettore Majorana;

Capítulo 4- Aqui apresentamos de forma pormenorizada uma descrição completa da Metodologia, incluindo a definição de sequência didática; o processo de coleta de dados, os instrumentos escritos de avaliação e outros.

Capítulo 5- Nesse último capítulo *mostramos a análise os dados coletados, além dos métodos de análise;*

Considerações Finais- Nesse item reside a conclusão de nosso trabalho investigativo;

Referências Bibliográficas- Trata-se de uma fonte de busca dos conteúdos de alta qualidade utilizados nessa pesquisa científica; e

Apêndice- Nesse espaço encontram-se as aulas expositivas dialogadas na forma de slides que o Professor poderá utilizar ao longo da aplicação da SD, além de questionários de Física de neutrino e de opinião, e avaliação escrita final.

1.3 Problema da Pesquisa

O problema de pesquisa se resume no seguinte questionamento: É possível viabilizar a aprendizagem significativa de Física de neutrinos na terceira série do ensino médio utilizando ao mesmo tempo uma Unidade de Ensino Potencialmente Significativa (UEPS) e a metodologia ativa Ensino sob Medida (EsM)?

1.4 Local da investigação

A intervenção pedagógica em questão foi aplicada em uma turma do terceiro ano do ensino médio da Escola Estadual de Ensino Fundamental e Médio Dionysio Costa, situada na cidade de Mutum, leste de Minas Gerais. Mutum está a 238 km de Vitória e a 384 km de Belo Horizonte e tem uma economia sustentada pela agropecuária. A escola é subordinada à Secretaria Regional de Ensino (SRE), localizada na cidade de Manhuaçu-MG, a 110 km de Mutum; conta com 15 salas de aula; 600 estudantes, sendo 250 do ensino fundamental e 350 do ensino médio regular e EJA; possui laboratório de informática (atualmente está inoperante) e de ciências cujo espaço físico é muito pequeno (as aulas experimentais demonstrativas são realizadas na própria sala de aula); pequena biblioteca; pátio e refeitório adequados; e excelente quadra de esportes coberta.

Atualmente, sou Professor de Física do quadro efetivo e leciono aulas teóricas e experimentais para o primeiro, segundo e terceiro anos do ensino médio regular e EJA.

1.5 Sujeitos da Pesquisa

Participaram dessa investigação 11 alunos de uma turma da 3ª série do ensino médio da “EEEFM Dyonisio Costa”. Todos os estudantes em questão decidiram participar voluntariamente via Termo de Consentimento Livre e Esclarecido- TCLE- (Anexo F), devidamente assinado.

1.6 Justificativa de caráter emocional

Sou Professor de Física do ensino médio há tempos e já lecionei aulas de Física em escolas de Minas Gerais, Espírito Santo e Distrito Federal. Também há bastante tempo venho observando um aumento progressivo e não-linear da falta de interesse dos estudantes por aulas teóricas de Física. Achei que era hora de mudar o rumo de minha prática pedagógica.

A Física que ensinamos no ensino médio é ainda a Física do final do século XIX, mas os estudantes não podem ficar alheios às pesquisas e descobertas de fronteira que estão ocorrendo atualmente em todos os campos da Física teórica, observacional e experimental. Por isso, a LDB já preconiza há tempos que o Professor deve oportunizar aos estudantes tópicos de Física Moderna e Contemporânea. Isso é uma tendência de abrangência internacional. Motivar os estudantes e despertar o interesse deles é imprescindível para a ocorrência da aprendizagem significativa. Estudante desmotivado não consegue apreender.

Então, conhecer novas metodologias para motivar esses estudantes e trazer a Física Contemporânea para a Escola Dyonísio Costa de maneira que consiga transformá-los no sentido de um melhor entendimento do Universo e das tecnologias atuais de sua vivência, é minha justificativa maior.

Gostaria de ressaltar alguns fatos de minha trajetória profissional. Por um lado, minha formação acadêmica quanto ao ensino fundamental foi construída em escolas municipal e estadual do estado de Minas Gerais, especificamente na cidade

de Lajinha. Relativamente ao ensino médio, estudei 01 ano no Colégio Batista de Vitória/ES e 02 anos no Colégio Batista Mineiro, em Belo Horizonte/MG. Também falo, escrevo e compreendo razoavelmente bem o idioma francês, conhecimento adquirido durante três anos na Aliança Francesa de Belo Horizonte. Por outro, no concernente à minha trajetória acadêmica, ressalto: graduação em Engenharia Mecânica pelo Centro Federal de Educação Tecnológica de Minas Gerais-Belo Horizonte (CEFET-BH); especialização em Engenharia de Máquinas Navais e Offshore pela Universidade Federal do Rio de Janeiro (UFRJ), patrocinada pela Petrobrás; formação Pedagógica em Física pela Universidade Metropolitana de Santos (Unimes); especialização em Metodologia do Ensino de Física pela Faculdade de Educação da Serra; licenciatura EAD em Física pela UFES; ex-aluno da FALE (Faculdade de Letras da UFMG); mestrando em ensino de Física pela UFES.

Quanto às minhas experiências na docência, comecei-as há bastante tempo, ministrando aulas de matemática e física em escolas estaduais e municipais de Lajinha, tanto nas rurais como nas urbanas. Nessa época tudo era muito precário e o ensino era predominantemente bancário, mecanicista, memorialístico (GEIDE, 2017). Os estudantes eram considerados como “copos vazios”, “tábuas rasas” (GIUSEPPI, 2017). Isso sempre me constrangia, pois queria que aprendessem verdadeiramente e para sempre. Em suma, queria transformar, aprimorar as ferramentas cognitivas com as quais esses estudantes percebiam o mundo.

Também trabalhei de 2001 a 2005, como professor do ensino médio na cidade do Paranoá-DF. Na época todas as aulas eram germinadas e as escolas eram pré-moldadas em aço. O público das escolas públicas de Brasília era muito heterogêneo, sendo a maioria dos estudantes oriunda dos estados do nordeste. Também ministrei aproximadamente durante 07 anos aulas de Física para o ensino médio do meu querido estado do Espírito Santo. Comecei trabalhando em Brejetuba, especificamente no distrito de São Jorge e na Fazenda Leogildo. Também trabalhei 03 anos em Venda Nova do Imigrante e atualmente sou professor de Física na escola Dionysio Costa de Mutum. No entanto, por que pretendo ardentemente cursar MNPEF?

As aulas expositivas estão perdendo cada vez mais espaço na arena educacional global, então precisamos de novas metodologias, novas formas de

ensinar, novas teorias que preconizam uma aprendizagem significativa. Durante o curso EAD em Física (UFES) passei a usar em minhas aulas simulações e laboratório virtual de ensino (concebido e vivido, respectivamente) e pude perceber como despertei a curiosidade e a vontade de aprender de meus alunos. Esses estudantes querem falar, mostrar como seu Universo funciona. Estão cansados de apenas escutar, copiar, decorar, fazer provas e depois esquecer tudo. Quando deixarão de serem espectadores?

Se me lembro bem tenho apenas duas produções acadêmicas, a saber, um TCC sobre “Fluxo de Hubble” ou “Expansão do Universo”, gentilmente orientado pelo Professor Oliver (UFES) e um projeto sobre poluição sonora na cidade do Paranoá-DF, realizado em parceria com a Fundação de Amparo à Pesquisa do Distrito Federal (FAP-DF). Também já realizei centenas de experimentos tanto nas escolas do Paranoá como nas escolas do Espírito Santo e de Minas Gerais

Para encerrar essa manifestação emocional, gostaria de parafrasear o professor e cosmólogo do Instituto Tecnológico de Massachussets, Max Tegmark: “Meu principal papel como educador é despertar a chama apagada das perguntas espontâneas de nossos estudantes”. No meu entendimento os estudantes estão perdendo o poder de observação. Isso é um fato e por isso é muito grave!

Capítulo 2

Referencial Teórico: “Transcrição” da Aprendizagem Significativa de Ausubel proposta por Moreira com o emprego da UEPS

Na maioria das instituições de ensino em nosso país, pelo menos até onde sei, a Física “ensinada” é ainda a Física do final do século XIX. Além da Física Clássica, imprescindível na maior parte dos cursos de engenharias e outras áreas, precisamos contemplar tópicos de Física Contemporânea de forma que nossos estudantes se mantenham atualizados quanto a novas descobertas e pesquisas na Física de fronteira, aprendendo assim novas definições e conceitos e aplicando-os, obviamente se for o caso, em sua vivência. No meu entendimento, é inaceitável que o sistema educacional prive, involuntariamente ou não, nossos estudantes desses avanços da ciência, mantendo-os tão distantes e alheios quanto a uma revolução científica de ponta em curso acelerado. Nunca antes tivemos tantas informações científicas e equipamentos complexos para acessá-las e decodificá-las. Porém, nesse obscurantismo intelectual, há iniciativas de algumas instituições de ensino e pesquisa com caráter de formação profissional e de divulgação científica no sentido de inserir professores, estudantes e comunidade leiga no território da Física de fronteira: Cito, entre outras instituições, a UFES com o seu Ciência ao Vivo e a Unesp com o ICPT-SAIFR (Centro Internacional de Física Teórica - Instituto Sul-Americano de Pesquisa Internacional), entre outros.

Ressalto a importância multifacetada da Física Contemporânea e suas consequências científicas e tecnológicas na vida cotidiana dos estudantes do ensino médio, visivelmente subliminar nos dizeres da Professora Iramaia [2]: “Estamos na era da informação, da alta densidade de fluxo de comunicação e sempre que nos comunicamos sobre um tema, valorizamos esse tema”.

É notório que nossos estudantes, para compreenderem essa alta “densidade” de novas definições e informações contemporâneas, necessitam de novos métodos de ensino de Física que os capacitem em direção a um entendimento crítico dessa

avalanche de informações jamais produzida pela espécie humana. Todavia, como desenvolver o senso crítico e o senso criativo de nossos estudantes se não compreendem os princípios científicos e tecnológicos que regem a vida moderna?

Acredito que a intenção da maioria dos Professores que amam a profissão de Professor e são estudiosos, é que os estudantes desenvolvam uma aprendizagem significativa que os acompanhe para sempre em suas interações sociais ou não. Para que isso ocorra, evitando assim que aprendam mecanicamente (conhecimento decorado) e que nossas aulas lhes sejam um aborrecimento, um punhado de equações e uma mera divulgação de informações e teorias muitas vezes desconexas de sua vivência, é imprescindível, entre outras coisas, que o material fornecido ao aluno seja potencialmente significativo. É pertinente mencionar que o significado não está no material, mas no sujeito que o estuda.

Como sempre fui propenso a verdadeiras mudanças revolucionárias nos campos do ensino e da pesquisa, já que ambos são dinâmicos e provisórios, logo inováveis, proponho ensinar sobre Física das partículas com foco nos neutrinos via uma sequência didática (SD) inspirada nas Unidades Potencialmente Significativas (UEPS), bastante testadas e verificadas, propostas e desenvolvidas pelo pesquisador brasileiro em educação Marco Antônio Moreira [8].

2.1 A Teoria da Aprendizagem Significativa de David Ausubel, um conceito cognitivista.

Para Ausubel, aprendizagem significativa é um processo por meio do qual uma nova informação relaciona-se com um aspecto especificamente relevante da estrutura de conhecimento do indivíduo, ou seja, este processo envolve a interação da nova informação com uma estrutura de conhecimento específica, a qual Ausubel define como subsunçor, existente na estrutura cognitiva do indivíduo. A aprendizagem cognitiva do indivíduo ocorre quando a nova informação ancora-se em conceitos ou proposições relevantes, preexistentes na estrutura cognitiva do indivíduo [3] (p.153)

Na perspectiva ausubeliana, a estrutura cognitiva prévia (isto é, os conhecimentos prévios e sua organização hierárquica) é o principal fator, a variável isolada mais importante afetando a aprendizagem e a retenção de novos conhecimentos. [4] [p.9].

David Ausubel nasceu em 1918 na cidade de Nova York e graduou-se em psicologia. Destacou-se, sobretudo nos campos da psicologia do desenvolvimento, psicologia da educação, psicopatologia e desenvolvimento do ego. Trabalhou na

Universidade de Colúmbia como professor emérito. Apesar de ter sido médico-psiquiatra de formação, abdicou da carreira e tornou-se um acadêmico na área da psicologia da educacional. Aposentando-se, retornou à psiquiatria. Um dos grandes divulgadores da teoria de Ausubel é Joseph D. Novak¹, professor da Universidade de Cornell. Atualmente muitos acham adequado falar em teoria de Ausubel e Novak. Ausubel se retirou da vida profissional em 1994, então com 75 anos, para se dedicar em tempo integral à escrita, produzindo ainda quatro livros. Faleceu em nove de julho de 2008 [5].

Ausubel contribuiu bastante ao tentar explicar o processo de aquisição de novos conhecimentos usando conceitos e definições sobre os princípios lógicos da cognição². Pensava que se devesse valorizar o conhecimento e o entendimento dos conteúdos e não simplesmente decorá-los (aprendizagem mecânica). A teoria de Ausubel desenvolveu-se em torno de um conceito central denominado aprendizagem significativa. Trata-se de um processo dinâmico onde um novo dado ou conteúdo interage com uma estrutura preexistente que Ausubel chama de subsunçor (facilitador) ou conhecimentos prévios presentes na estrutura cognitiva dos indivíduos. Na teoria ausubeliana o cérebro humano armazena as informações que recebe de forma bastante organizada, criando uma estrutura conceitual hierarquizada (estrutura cognitiva) no interior da qual os conteúdos mais específicos se conectam de maneira integrada a conteúdos menos específicos. Segundo Ausubel a aprendizagem significativa acontecerá quando esse novo conteúdo se tornar intercambiável [3].

Por exemplo, especificamente na área de Física das Partículas, caso o aluno já tenha os subsunçores³ força e campo bastante consolidados, esses podem servir para que os estudantes compreendam o campo eletromagnético (ou fotônico) e a força eletromagnética veiculada pelos fótons; o campo gravitacional (ou de gravidade) e a força gravitacional que seria veiculada pelos grávitons; o campo fraco e a força fraca veiculada pelos bósons vetoriais e o campo de glúons (campo gluônico) e a força forte veiculada pelos glúons.

¹Nasceu em 1922. Empresário e educador americano conhecido internacionalmente pelo desenvolvimento da teoria do mapa conceitual nos anos 70.

²Conjunto de processos mentais que se relacionam com a função do conhecimento e envolve a memória, a inteligência, a resolução de problemas, a tomada de decisão, a percepção ou a atenção.

³Esse vocábulo não existe em português. É uma tentativa de tradução de “subsumer”. Podemos imaginá-lo como um facilitador da aprendizagem.

Essa ancoragem pode provocar um aprimoramento do subsunçor, propiciando assim o entendimento de novos conhecimentos ainda mais complexos. Deve ser ressaltado que os subsunçores, dependendo da frequência com que é acionado, podem ter alcance amplo e ser bastante desenvolvido ou pequeno alcance e pouco desenvolvido.

Em conformidade com Moreira, a aprendizagem significativa se manifestará quando há dois pré-requisitos, a saber, de um lado o material fornecido aos estudantes tem que ser potencialmente significativo, isto é, ter potencial para ser significativo. Ou seja, que o material entregue aos estudantes (textos de experimentos ou não; aplicativos e outros) tenha uma interação não estática e não literal com setores específicos e importantes da rede cognitiva do estudante; de outro, que o estudante tenha em sua cognição ideias prévias que tenham uma interação não homogênea com esse material, isto é, que tenha pré-disposição para aprender. De forma mais simples: o material fornecido aos estudantes e a mediação de um docente competente são imprescindíveis, pois os subsunçores da cadeia cognitiva do estudante podem inexistir ou existir e ser inadequados e/ou pouco desenvolvidos para receber os novos conhecimentos propostos [4].

2.1.1 O que são subsunçores?

É o nome que se dá a um conhecimento específico, existente na estrutura de conhecimentos do indivíduo, que permite dar significado a um novo conhecimento que lhe é apresentado ou por ele descoberto. Tanto por recepção como por descobrimento, a atribuição de significados a novos conhecimentos depende da existência de conhecimentos prévios especificamente relevantes e da interação com eles [4] (p. 2).

Definido como uma estrutura organizada, hierarquizada e intrínseca à estrutura cognitiva de cada indivíduo é nele que estão armazenados os conhecimentos prévios das pessoas. É nesse aparato cognitivo que se alojará os novos conhecimentos propostos aos estudantes. Os subsunçores não são estáticos ou estacionários, são dinâmicos: mudam com a frequência e com o tempo de uso. Quando a aprendizagem começa progressivamente a ser significativa, esses subsunçores tornam-se mais elaborados, mais aperfeiçoados e mais eficientes para agregar novos conhecimentos. Podemos fazer a seguinte comparação em relação a um subsunçor elaborado e outro não elaborado: neutrino e antineutrino só se

aniquilam se forem de mesmo sabor⁴. Então o subsunçor neutrino compreende bem o novo conhecimento chamado antineutrino; neutrino e antineutrino de sabores diferentes não se aniquilam, então o subsunçor neutrino não está preparado para compreender o novo conhecimento chamado antineutrino.

É pertinente destacar que a aprendizagem significativa tem como principal característica a interação dinâmica entre conhecimentos que o estudante já tem (prévios) e os novos conhecimentos propostos. A qualidade da aquisição desses conhecimentos pelos estudantes tem sua origem no tipo de interação que ocorre: não é ao pé da letra (não-literal) e nem arbitrária (não-causal), que por sua vez não segue princípios lógicos, casual. Também é importante ressaltar que subsunçores suficientemente organizados proporcionam dois fenômenos cognitivos, a saber, a diferenciação progressiva e a reconciliação integradora.

2.1.2 O que são diferenciação progressiva e reconciliação integradora?

É importante reforçar que a estrutura cognitiva é constituída de subsunçores intrinsecamente organizados em uma escala hierárquica e que é uma fonte estruturada que produz tanto a diferenciação progressiva quanto a reconciliação integradora.

Por um lado, a diferenciação progressiva fornece novos significados a um determinado subsunçor (uma definição ou um conceito), por exemplo, advindo de seu uso no sentido de dar significado a novos conteúdos.

Inicialmente o Professor generaliza o conteúdo e depois vai progressivamente detalhando-o e especificando-o. É mais fácil o estudante notar diferenças em um todo do que a partir das partes desse todo compreendê-lo. Exemplo: O Professor apresenta o modelo padrão de Física das partículas e depois apresenta os neutrinos.

Por outro, a reconciliação integradora se processa simultaneamente à diferenciação progressiva. Quanto aos conteúdos, essa última tenta eliminar diferenças sutis ou não; solucionar instabilidades; agregar significados; promover grandes ordenações.

⁴O neutrino é um férmion ou mais especificamente um lépton. Até onde sabemos há três sabores de neutrinos: neutrino do elétron, do múon e do tau e seus respectivos antineutrinos.

A diferenciação progressiva é o processo de atribuição de novos significados a um dado subsunçor (um conceito ou uma proposição, por exemplo) resultante da sucessiva utilização deste subsunçor para dar significado a novos conhecimentos [4] (p.6)

A reconciliação integradora, ou integrativa, é um processo da dinâmica da estrutura cognitiva, simultâneo ao da diferenciação progressiva, que consiste em eliminar diferenças aparentes, resolver inconsistências, integrar significados, fazer superordenações [4] (p.6).

Com frequência o sistema de educação é criticado por dar importância excessiva a questões tidas como pouco pertinentes e ao mesmo tempo por omitir conteúdos essenciais ao desenvolvimento integral dos estudantes. Por exemplo, podemos pensar que alguns livros antigos de Física e de uso obrigatório em alguns cursos não chegam a estabelecer boas relações com os jovens estudantes já que são velhos e não contemporâneos aos estudantes. Esse tipo de crítica está ligado a uma das teorias mais importantes da psicologia construtivista: nada mais nada menos que a teoria da aprendizagem significativa de David Ausubel.

Ausubel era psicólogo e pedagogo e tornou-se uma das grandes referências mundiais no campo da psicologia construtivista. Sendo assim insistiu muito para que o ensino fosse estruturado a partir dos conhecimentos que já tinham sido adquiridos pelos estudantes, ou seja, a partir de seus conhecimentos prévios. Em outros termos, o primeiro papel do ensino deveria ser aquele de descobrir o que o estudante sabe para conhecermos a lógica de sua maneira de pensar e a agir em consequência disso. Assim, para Ausubel, o ensino era um processo pelo qual o aluno é ajudado a continuar a argumentar e a aperfeiçoar seus conhecimentos prévios em vez de lhe impor uma agenda a ser decorada. Para ele, a educação não seria uma mera transmissão unilateral de dados ou informações.

A ideia de aprendizagem significativa com a qual Ausubel trabalhou pode ser resumida da seguinte forma: o verdadeiro conhecimento somente pode acontecer quando novos conteúdos têm um significado para o estudante quanto ao seu conhecimento prévio, isto é, aprender significa que novos conteúdos devem se conectar aos já existentes; não por que são idênticos, mas porque se relacionam de tal forma que criam um novo sentido. Para que isso aconteça os novos conhecimentos se integram aos antigos conhecimentos, com esses últimos sendo reconfigurados pelo primeiro. Ou seja: nem a nova aprendizagem é assimilada literalmente como aparece nos textos dos programas dos cursos, nem o antigo

permanece inalterado. Por sua vez, as novas informações assimiladas fazem com que os conhecimentos prévios fiquem mais estáveis e completos.

A teoria da assimilação oferece bastante subsídio para a compreensão do fundamental da aprendizagem significativa: como os novos conhecimentos são integrados aos conhecimentos prévios. A assimilação acontece quando uma nova informação é integrada na estrutura cognitiva mais geral, de sorte que há uma continuidade entre elas e que uma ajuda no aprimoramento da outra. Por exemplo, se você já conhece as definições de energia cinética, potencial gravitacional e elástica, terá bastante mais facilidade para compreender o teorema da conservação da energia mecânica e da conservação do momento linear; o neutrino fica bem mais simples de ser compreendido, se conhecermos um pouco do modelo padrão.

Porém o processo de aprendizagem significativa não para por aqui. No início, cada vez que desejar se lembrar da nova informação, o estudante poderá fazê-lo como se tratasse de uma informação separada da estrutura cognitiva mais geral na qual está ancorada. Mas ao longo do tempo os dois conteúdos se fundem em um só de tal maneira que não podemos invocá-los como se estivessem separados um do outro. De um certa maneira, os novos conhecimentos adquiridos no início são esquecidos como tais e aparecem no lugar um conjunto de informações qualitativamente diferentes. Esse processo de esquecimento é chamado por Ausubel de "assimilação obliterante".

Ausubel distingue três tipos de aprendizagem significativa, a saber:

- Representação da aprendizagem

É a forma mais elementar de aprendizagem. Nela a pessoa dá um sentido aos símbolos associando-os a essa parte concreta e objetiva da realidade às quais se referem, via conceitos facilmente disponíveis.

- Conceitos de aprendizagem

Esse tipo de aprendizagem significativa é parecido com o anterior e depende dele para se manifestar, de forma que os dois se completam e se adaptam. Porém há uma diferença entre eles. Nos conceitos de aprendizagem, em vez de associar

um símbolo a um objeto concreto e objetivo, referimo-nos a uma ideia abstrata, algo que na maioria das vezes tem um significado muito pessoal, acessível somente a partir de nossas experiências pessoais, algo que vivemos e ninguém mais. Por exemplo, para chegar a interiorizar a ideia do que é um neutrino, é necessário desenvolver uma ideia de neutrino permitindo diferenciar esses neutrinos das outras partículas. Se já vimos um neutrino em um documentário sem poder diferenciá-lo de outras partículas, esse conceito não existirá, mesmo se a pessoa estiver familiarizada com as partículas com essas diferenças estruturais e comportamentais e esse conceito como categoria distinta daquela das outras partículas.

- Proposições de aprendizagem

Essa modalidade de conhecimento deriva da combinação dos conceitos. Assim, trata-se da forma mais elaborada de aprendizagem útil que permite aos estudantes realizar avaliações científicas, matemáticas e filosóficas mais complexas. Como se trata de um tipo de aprendizagem que exige mais dedicação precisa ser feita voluntariamente e conscientemente. Obviamente que utiliza os dois tipos de aprendizagens precedentes [6].

Concluindo e estendendo, podemos resumir assim: toda vez que um novo conteúdo interage adequadamente com o que o estudante já sabe (desde que ache esse conteúdo seja interessante) a aprendizagem significativa tem chances de ocorrer. Aqui o estudante expande e coloca em dia o conteúdo anterior, dando novos significados a esses conteúdos; materiais que motivam e interessam os estudantes e boas estratégias (metodologias ativas, por exemplo), aliados à predisposição do estudante para aprender, também favorece a aprendizagem significativa; as interações sociais (troca de significados/negociação de significados) como são inerentemente indissociáveis dos estudantes, incentiva também o surgimento da aprendizagem significativa; atividades lúdicas (jogo e outros) sem troca de significados não desencadeia a aprendizagem significativa; estudos recentes mostram que além do aspecto cognitivo, outras características humanas também são importantes no processo de aprendizagem significativa [7].

2.1.3 Aprendizagem mecânica e a aprendizagem significativa

Em contraposição à aprendizagem significativa, Ausubel elaborou a definição de aprendizagem mecânica como um simples armazenamento de conteúdos que não intercambiam com conhecimentos prévios importantes pré-existentes na rede cognitiva do estudante. O novo conteúdo é simplesmente arquivado ao pé da letra ou arbitrariamente. A nova informação não se relaciona com subsunçores específicos para gerar novos conhecimentos. Como exemplo de aprendizagem mecânica, podemos citar os arquivos de computadores que não interagem entre si de maneira a produzirem novos conhecimentos, logo o computador “aprende” mecanicamente; a solicitação de alguns Professores para que os estudantes decorem a tabela periódica; o nome de cada quark, de cada lépton, de cada bóson e de cada força fundamental. São conhecimentos decorados que desaparecem ao longo do tempo dependendo da frequência com que são solicitados. Também podemos destacar a memorização de conceitos, de definições, de fórmula e de leis físicas. Ausubel não faz uma dicotomia entre essas modalidades de conceitos. A aprendizagem mecânica e a aprendizagem significativa coexistem, reforçando uma à outra [3]. Fato interessante: a maioria dos cientistas mais destacados em todos os tempos e em várias áreas do conhecimento basicamente estudou em regimes escolares onde prevalecia a aprendizagem mecânica! Ainda hoje, pelo menos no Brasil, a aprendizagem é basicamente mecânica.

Gostaria de destacar a inseparabilidade entre as aprendizagens significativa e mecânica, na fala de Moreira: *“A passagem da aprendizagem mecânica para a aprendizagem significativa não é natural, ou automática; é uma ilusão pensar que o aluno pode inicialmente aprender de forma mecânica, pois, ao final do processo, a aprendizagem acabará sendo significativa; isso pode ocorrer, mas depende da existência de subsunçores adequados, da predisposição do aluno para aprender, de materiais potencialmente significativos e da mediação do professor; na prática, tais condições muitas vezes não são satisfeitas e o que predomina é a aprendizagem mecânica”* [4] (p.12).

Podemos resumir a fala acima dizendo que os subsunçores “mecânicos” acabam por se transformarem em subsunçores “significativos” caso as pré-condições acima estiverem presentes.

É oportuno destacar a fala do Professor Giuseppe Camiletti (2019), do Programa de Pós-graduação em Ensino de Física da Ufes (PPGEnsFis): “Podemos

decorar sim, mas apenas aquilo que já aprendemos”.

2.2 Unidades de Ensino Potencialmente Significativas (UEPS)

Conforme Moreira [8], a UEPS é uma sequência didática cujos princípios de funcionamento estão apoiados nas teorias da aprendizagem, sobretudo a da aprendizagem significativa (não mecânica e não linear). Ainda destaca que só há ensino se houver vestígios ou indícios de aprendizagem.

Não podemos esquecer que a UEPS não é uma receita educacional de ensino, mas uma tentativa de contribuir, mesmo que de maneira progressiva e lenta, para atenuar a incidência de um ensino ainda bastante tradicional. A construção de uma UEPS conforme o mesmo autor segue uma trajetória composta de objetivo, filosofia e marco teórico, a saber:

Objetivo: desenvolver unidades de ensino potencialmente facilitadoras da aprendizagem significativa de tópicos específicos de conhecimento declarativo e/ou procedimental. Filosofia: só há ensino quando há aprendizagem e esta deve ser significativa; ensino é o meio, aprendizagem significativa é o fim; materiais de ensino que busquem essa aprendizagem devem ser potencialmente significativos. Marco teórico: a teoria da aprendizagem significativa de David Ausubel (1968, 2000), em visões clássicas e contemporâneas (Moreira, 2000, 2005, 2006; Moreira e Masini, 1982, 2006; Masini e Moreira, 2008; Valadares e Moreira, 2009), as teorias de educação de Joseph D. Novak (1977) e de D.B. Gowin (1981), a teoria interacionista social de Lev Vygotsky (1987), a teoria dos campos conceituais de Gérard Vergnaud (1990; Moreira, 2004), a teoria dos modelos mentais de Philip Johnson-Laird (1983) e a teoria da aprendizagem significativa crítica de M.A. Moreira (2005) [8] (p.2).

O docente deve procurar construir nos estudantes uma estrutura cognitiva sólida e consolidada que contenha em suas ramificações uma “densidade” de conhecimentos formativos que permita que os estudantes interpretem, compreendam e ajudem a desenvolver novas formas de pensar e agir, ou seja, uma mudança comportamental que o leve a mudar o meio social em que vive e sua forma de enxergar o Cosmos. A Física Contemporânea, sobretudo a astronomia, ajuda a formar o caráter dos estudantes, tornando-os mais humildes. Isso é um fato.

Também temos que mencionar o marco ou guia teórico da UEPS, ou seja, a Teoria da Aprendizagem Significativa. A citação imediatamente acima destaca uma relação sucinta de pesquisadores e/ou autores que abordam ou abordaram de

maneira generalista ou específica o tema em questão. Contudo o precursor e idealizador da teoria mencionada (TAS) foi David P. Ausubel nos anos sessenta.

2.2.1 Passo a passo construtivo da UEPS

Passo 1- Definição do tópico específico a ser abordado.

Tema: Física de neutrinos

Passo 2- Criar/propor situações que levem os estudantes a manifestar seus conhecimentos prévios escritos aceitos ou não aceitos no contexto do assunto abordado

Numa primeira aula conversei com a turma, promovendo uma discussão sobre qual a natureza da matéria ou do que as coisas são feitas. O objetivo dessa aula foi incentivar os estudantes a participar do tema Física dos neutrinos e conhecer (anotar) o que sabem sobre a composição do Universo observável. Essas informações foram utilizadas para elaborar um questionário para a segunda aula.

Enviei aos estudantes o questionário diagnóstico (Anexo A) sugerido abaixo, recolhendo-o tão logo os estudantes o terminaram. Promovi uma discussão a partir de algumas respostas dos estudantes que têm o potencial de promover a negociação de significados entre eles. O objetivo dessa aula é, mais uma vez, levar os estudantes a manifestarem seus conhecimentos prévios. Utilizei esses dados para elaborar minha terceira aula. O questionário diagnóstico proposto foi:

1-O que são átomos? 2-O que tem dentro deles? 3- O que é uma partícula? 4-Qual a carga do elétron, do próton e do nêutron? 5-Já ouviram falar de neutrinos? 6-Onde os átomos são produzidos? 7- O que significa a palavra elementar? 8-Existe alguma coisa imediatamente próxima ao redor do átomo? Se sim, o quê? 9-Se prótons repelem prótons, por que o átomo não desmancha? 10-Por que o elétron não cai sobre o núcleo? 11-Quais são as quatro interações (forças) da natureza? 12-Por que é mais fácil ocorrer uma reação química do que uma reação nuclear? 13-Se bilhões de neutrinos nos atravessam a cada segundo, por que não sentimos nada?

Passo 3- Propor situações-problema, em nível bem introdutório, levando em conta o conhecimento prévio do aluno

Ministrei uma aula expositiva dialogada via slides (Anexo 1) e enviei aos estudantes os textos [9, 10] para serem estudados, propondo-lhes que também respondam o questionário conceitual 1 (Anexo B). Esse questionário foi respondido e me foi enviado antes da próxima aula. De posse dessas respostas elaborei a aula na medida para os estudantes, tirando suas dúvidas. Durante a aula, promovi uma discussão a partir de algumas respostas dos estudantes, que têm o potencial de promover a negociação de significados entre eles. Ao corrigir o questionário, avaliei as respostas dos estudantes como um esforço de argumentação e não como algo certo ou errado adotado em exames de classificação, por exemplo.

Passo 4- Aprofundando o conhecimento.

Ministrei uma aula expositiva dialogada via slides (Anexo 2) e enviei aos alunos os textos [11, 12, 13] para serem estudados propondo-lhes que respondam o questionário conceitual 2 (Anexo C) e que foi respondido e enviado para mim antes da aula. De posse dessas respostas elaborei uma aula na medida para os alunos, tirando suas dúvidas. Durante a aula, promovi uma discussão a partir de algumas respostas dos estudantes que têm o potencial de promover a negociação de significados entre eles. Ao corrigir o questionário, avaliei as respostas dos estudantes como um esforço de argumentação e não como algo certo ou errado adotado em exames de classificação, por exemplo.

Passo 5- Avaliação somativa em sala de aula.

Enviei aos alunos a avaliação individual sem consulta constante no anexo D. Instruções: Cada questão foi respondida em uma folha separada fornecida aos alunos pelo Professor.

Passo 6- Observando a diferenciação progressiva via aula dialogada interativa

Promovi debates individuais entre os alunos e entre esses e eu mesmo com o intuito de verificar se os estudantes sabem explicar o que é, por exemplo, uma partícula; uma molécula; um átomo; o modelo padrão e para que serve; o neutrino; a

oscilação de neutrinos e etc. Em suma: se os estudantes foram capazes de perceber que há um processo natural que constrói tudo que existe via interações entre partículas e campos. Enfim, verificar se de fato houve indícios de aprendizagem significativa, isto é, se novos conhecimentos inseridos na rede cognitiva dos estudantes se associaram convenientemente a subsunções pré-existentes para explicar o que os estudantes não sabiam. No final da aula enviei aos alunos um questionário de opinião (Anexo E) que foi respondido e enviado para o Professor. Analisando o questionário de opinião podemos observar que 95% dos estudantes gostaram da metodologia e com a análise de dados podemos constatar que houve algum indício de aprendizagem significativa.

Até aqui pudemos observar como é complexo formatar uma ferramenta operacional-educacional que edifique nos estudantes um sistema cognitivo com características de excelência e impregnado por conhecimentos sólidos, duradouros e intercambiáveis a outros conhecimentos de maior complexidade.

2.3 Metodologia Ativa

2.3.1 Just-inTime Teaching - Ensino sob Medida (EsM)

A qualificação profissional é imprescindível para entrar no mercado de trabalho. A demanda por profissionais com habilidades e competências em conhecimentos específicos consolidados e em trabalho em equipe está em alta. Dito isso, é fundamental que o Professor lance mão de novos métodos pedagógicos para trabalhar mesmo que de forma mínima na “construção” de estudantes engenheiros de ideias e não arquivos sem conexão interativa com o mundo.

Para isso, o método Ensino sob Medida (EsM) elaborado pelo professor Gregor Novak (Universidade de Indiana/EUA) pode contribuir muito para a formação de nossos estudantes do ensino médio. Também esse método é utilizado em vários cursos universitários. Trata-se de uma ótima opção para ser trabalhada em conjunto com a teoria da aprendizagem significativa (e é justamente isso que fizemos em nosso produto educacional), pois considera aquilo que o estudante já sabe. Outra face importante, uma das mais importantes, é o poder desse método para despertar e motivar nos estudantes o hábito de estudar os novos conteúdos antes das próximas aulas. Para o Professor a vantagem desse método é fornecer subsídios

para que possa preparar suas aulas a partir daquilo que o estudante já sabe: o Professor envia antes da aula o conteúdo para os estudantes estudarem juntamente com um questionário para responderem e a seguir os estudantes enviam as respostas para o Professor, que então a partir daí prepara sua aula levando em consideração as dificuldades dos estudantes.

Praticamente podemos resumir o método EsM em três fases, a saber: (a) o Professor solicita aos alunos para lerem/estudarem previamente materiais de apoio que serão discutidos em sala de aula, propondo-lhes questões conceituais que devem ser respondidas antes da próxima aula. A partir dessas respostas o Professor prepara suas aulas na “medida” para os alunos. É importante ressaltar que a avaliação das respostas dos alunos seja pautada no esforço de argumentação do aluno e não no método certo ou errado. (b) O Professor promove a discussão em sala de aula, rerepresentando as questões conceituais e escolhendo algumas respostas dos alunos que têm potencial para desencadear a troca de significados entre eles; e (c) O professor propõe atividades em grupos referentes aos conceitos desenvolvidos nas questões conceituais e na discussão em sala de aula. Como não existe receita para ensinar, pois cada estudante aprende diferentemente, acredito que o Professor não precisa seguir de forma inflexível os três passos acima. Isso vai depender se a escola é urbana ou rural e se o método vai ser aplicado no ensino médio ou fundamental. O EsM é um método de ensino no qual podem existir cortes ou acréscimos de etapas, isto é, o importante é que o método já foi bastante experimentado e funciona, então é bem-vindo [14].

É importante destacar aqui que o Professor deve avaliar a turma antes de selecionar/elaborar as Tarefas de Leitura (TL) potencialmente significativas e os questionários, ambos sob medida, para a turma.

2.4 Inserções de Física Contemporânea

A maioria dos professores de Física do ensino médio não trabalha durante o ano letivo com a Física moderna ou, menos ainda, com a Física contemporânea. Há tempos repetimos sempre a mesma coisa e sempre do mesmo jeito. Precisamos construir e testar novos procedimentos pedagógicos para traçarmos um ambiente escolar onde a Física de fronteira seja atuante no sentido de ser uma espécie de

meio de sustentação intelectual para a edificação de estudantes críticos, contestadores da “verdade” atual e multiplicadores do conhecimento.

De um lado, preconizamos que o Professor deve oportunizar aos alunos tópicos de Física moderna e contemporânea.

De outro, a escolha do assunto tratado nesta pesquisa se deve ao fato de que a maioria das pessoas, isto é, estudantes formais, informais ou indivíduos inteiramente leigos, em algum momento de suas vidas se perguntaram: Qual a natureza de nosso Universo? De onde viemos? Por que estamos aqui? [15]. Os estudantes do ensino médio precisam saber que o Universo ou Cosmos (tudo que existiu, existe e existirá) é formado por “grãos” e que nós seres humanos somos formados, em última análise, por quarks up, quarks down e elétrons e que tudo isso é governado e mantido em funcionamento, até onde sabemos, por quatro interações fundamentais. Também é igualmente importante que saibam que os neutrinos são como sondas pré-históricas que nos informariam sobre as condições físicas reinantes no Universo imediatamente após o *big bang* ou como o Universo seria três minutos após o *big-bang*. Dentre as partículas que têm massa os neutrinos são os mais abundantes.

A importância da inserção de Física Contemporânea nas salas de aula do ensino médio está bem exposta qualitativamente em TERRAZZAN [16]; CAVALCANTE e TAVOLARO [17]; SOARES et. al. [18]; OSTERMANN [19]; MOREIRA [20,21]. Neste contexto, optamos por implementar o estudo de Física dos neutrinos voltado para alunos do ensino médio, através de um produto educacional na forma de uma sequência didática baseada em uma transcrição da Aprendizagem Significativa de Ausubel proposta por Moreira [22,4] com o emprego da Unidade de Ensino Potencialmente Significativa (UEPS) [8].

Capítulo 3

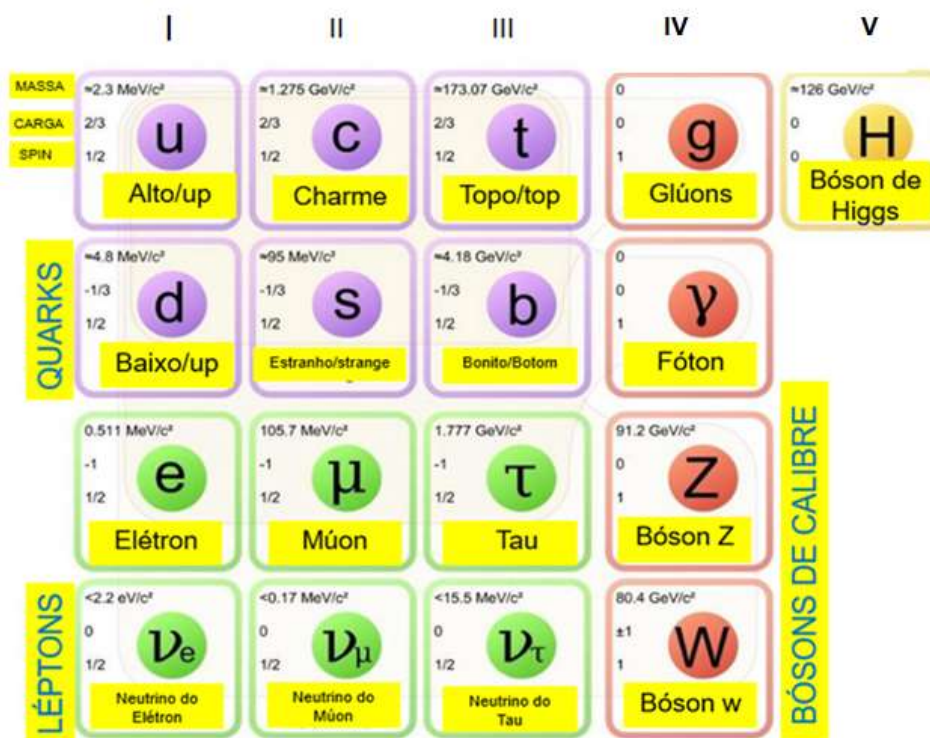
Física de Neutrinos

“Recuando as fronteiras do conhecimento até 14 bilhões de anos, ou seja, 400.000 anos depois do Big-bang (história térmica do Universo), constata-se que tudo aquilo que nos cerca provém de um plasma ardente que preenchia todo o espaço. Assim, não havia nenhum ser humano, planeta, estrela ou galáxia, mas simplesmente átomos saltando uns sobre os outros e difundindo a luz”. [23] (p.83).

3.1 O Modelo Padrão de Partículas

A figura 1 abaixo representa o Modelo Padrão das partículas elementares com três gerações de férmions (colunas I, II, III), com os bósons de calibre (quarta coluna) e com o bóson de Higgs (quinta coluna).

Figura 1- Modelo Padrão



Fonte: Wikipédia (https://fr.wikipedia.org/wiki/Mod%C3%A8le_standard_de_la_physique_des_particules).

Física das partículas ou física subatômica é a área da física que estuda os constituintes elementares (sem dimensão espacial) da matéria e as radiações, assim como suas interações. Também é chamada de física das altas energias, pois um grande número de partículas elementares instáveis não existe no estado natural e só podem ser detectadas durante colisões de altas energias, nos aceleradores de partículas, entre partículas estáveis. Os constituintes últimos da matéria e suas interações estão bem explicados no Modelo Padrão das partículas elementares. Trata-se de uma teoria formada por um conjunto de leis de Física fundamental, experimentalmente testadas. Repousa sobre a mecânica quântica e a teoria da relatividade de Einstein. Foi elaborado nos anos 1970 e agrega todos os conhecimentos teóricos experimentalmente testados sobre os constituintes elementares da matéria bariônica (prótons e nêutrons) e suas interações, exceto a gravitacional [21].

Vamos começar pelos átomos e viajar até as partículas elementares. Átomos são compostos de elétrons e núcleos, que abrigam prótons e nêutrons, que por sua vez são constituídos de quarks “**u**” e “**d**”. Até onde sabemos os quarks seriam os últimos constituintes da matéria convencional ou bariônica. Temos seis sabores (tipos) de *quarks*: **u** (*up*), **d** (*down*), **c** (*charmed*), **s** (*strange*), **b** (*bottom*) e **t** (*top*), sendo que cada um tem três cores (edições): 1 (vermelho), 2 (verde) e 3 (azul).

Totalizamos então 18 quarks distintos. Mas como cada partícula tem sua antipartícula (mesma massa, mesmo spin e carga oposta da partícula em questão) o número total de quarks é 36. Quarks carregam carga elétrica fracionária (+2/3 para os sabores **u**, **c** e **t** e -1/3 para os sabores **d**, **s** e **b**), todavia nunca foram detectados individualmente, isto é, vivem em estado de confinamento no interior de partículas chamadas hádrons (massivo), como por exemplo, prótons e nêutrons. Há duas classes de hádrons, a saber, aqueles formados por três quarks chamados bárions (pesado) e os mésons (médio), que são formados por um quark e um antiquark. Os bárions obedecem ao Princípio da Exclusão de Pauli e os mésons não. Os bárions possuem spin fracionário (1/2, 3/2,...) e os mais familiares são o próton e o nêutron. Mésons K e π são exemplos de mésons. Outra família não tão numerosa como a dos quarks são os léptons (delgado, leve) que têm spin $\frac{1}{2}$, não tem cor, podem ou não ter carga elétrica (neutrinos). Temos seis sabores de léptons. Até onde sabemos não têm estrutura interna como os hádrons. O lépton mais familiar é o elétron, mas

temos também o múon e o tau e seus respectivos neutrinos. Considerando que cada lépton tem seu antilépton, acreditamos haver um total de 12 léptons no Universo.

Para conhecer a composição da matéria precisamos saber como essas partículas interagem, como se associam a sistemas estáveis e como se desintegram, isto é, precisamos introduzir a noção de interações e campos de força. Para isso temos que conhecer outras categorias de partículas, as chamadas partículas mediadoras das interações fundamentais da natureza ou bósons. Conhecemos 04 interações fundamentais na natureza, a saber, a eletromagnética (interação entre um elétron e um núcleo atômico); a gravitacional; a forte (atração entre quarks) e a fraca. A interação forte mantém coesos prótons e nêutrons no núcleo atômico (estabilidade nuclear) e afeta somente hádrons. A interação fraca é responsável pelo decaimento relativamente lento de partículas como nêutrons e múons e por todas as reações envolvendo neutrinos. As interações são governadas por campos de força. Os quanta desses campos são denominados partículas mediadoras ou bósons.

O mediador ou quantum do campo eletromagnético é o fóton; o mediador ou quanta do campo forte é o glúon; o mediador ou quantum do campo eletromagnético é o fóton; o mediador ou quantum do campo gravitacional seria o gráviton; as partículas denominadas W^\pm e Z^0 (bósons vetoriais) são os quanta do campo fraco. A única partícula que ainda não foi detectada é o gráviton e caso o fosse, estaria demonstrado que a gravitação é quantizada. O termo mediar uma interação significa que a força entre as partículas tem origem na emissão (criação) e absorção (destruição) de partículas virtuais. Ressaltamos que os fótons são partículas de radiação (não de matéria), não têm massa e são idênticos às suas antipartículas. A energia de um fóton determina seu “tipo”: temos fótons de “ondas de rádio”, de luz visível, de radiação ultravioleta, de raios-X, de raios gama. Os glúons são para o campo de glúons o equivalente dos fótons para o campo eletromagnético e os quarks emitem e absorvem glúons.

Quando trabalhamos com altas energias partículas são criadas, destruídas e recriadas e a incerteza descrita por Heisenberg domina em um ambiente caótico, logo o termo força é inadequado sendo mais adequado falar em ações ou interações entre partículas. O primeiro a propor teoricamente a existência dos neutrinos foi o físico Austríaco Wolfgang Pauli que também formulou o princípio da exclusão e a

teoria não relativística para o spin dos elétrons. Foi laureado com o Prêmio Nobel de Física em 1945 pelas suas contribuições para o desenvolvimento da Mecânica Quântica. Na década de 20, o decaimento beta foi estudado com detalhes e suspeitaram que não ocorresse a conservação da energia. Então Pauli postulou que uma nova partícula levava consigo a energia que faltava. Para Pauli, essa partícula não tinha carga elétrica, tinha pequena ou nenhuma massa e o mesmo spin dos prótons e elétrons. Fermi a chamou de neutrino (pequeno nêutron). Em 1956 a partícula foi evidenciada experimentalmente em 1956 pelos físicos Clyde L. Cowan e Frederick Reines. O Bóson de Higgs é uma partícula associada ao mecanismo de Brout-Englert-Higgs (BEH) e está relacionado às origens das massas dos bósons W e Z do modelo eletrofraco e provavelmente também dos quarks e léptons. Com esse mecanismo, os físicos explicam a origem das massas das partículas elementares a partir de um novo campo onde os bósons de Higgs são os quanta de energia associado às oscilações (transmutações). Em 1967 Steven Weinberg e Abdus Salam utilizaram esse mecanismo para explicar a massa de novos bósons que acabaram de introduzir para unificar a força eletromagnética e a força nuclear fraca. Os bósons W são responsáveis pelos processos de radioatividade beta que faz o Sol brilhar quando ele produz hélio e deutério. Se esses bósons não fossem massivos, os núcleos se desintegrariam muito rápido e não existiriam. Sem o campo de Higgs, os elétrons não teriam massa e não formariam os átomos. No âmbito do Modelo Padrão podemos afirmar que o campo de Higgs é essencial para o aparecimento da vida na Terra, mas não explica a massa dos prótons e nêutrons que compõem nosso corpo e as estrelas. Em 4 de julho de 2012, o CERN anunciou a descoberta de um bóson cuja massa é aproximadamente 126 GeV, muito parecido com o Bóson de Higgs [24, 27].

Em Física, uma partícula virtual é definida como uma flutuação quântica transitória de características próximas daquelas de uma partícula ordinária; existem durante um tempo limitado devido ao princípio da incerteza de Heisenberg. O conceito de partícula virtual tem sua origem na teoria das perturbações da Teoria Quântica de Campos (TQC) na qual as interações entre partículas ordinárias são descritas em função de trocas de partículas virtuais. Na prática, essas partículas aparecem, existem e depois desaparecem. Podemos citar como exemplo a interação de um elétron e de um pósitron via um fóton virtual [62] [63].

“Mediar a interação significa que a força existente entre as partículas interagentes resulta de uma “troca” (emissão e absorção) de outras partículas (virtuais) entre elas” [24] (p.11).

Historicamente, a noção de força foi introduzida na Física por Newton para explicar que o Sol atrai a Terra, permitindo-lhe assim gravitar em torno dele. Essa noção de força, muito antropomórfica, caiu em desuso. Fez parte das tentativas de compreender o mundo, porém parecia bastante misteriosa devido à sua ação à distância e instantânea. Não faz muito tempo, foi substituída pela ideia relativística de interação veiculada por um campo que se propaga à velocidade da luz por meio de ondas. Um campo materializa a presença em cada ponto do espaço da influência da fonte da interação [25, 26].

3.2 A herança científica do cientista brasileiro César Lattes

Pesquisador respeitado internacionalmente, o Professor César Lattes pavimentou caminhos para o desenvolvimento de projetos inovadores em astrofísica de partículas na América Latina e além. Ainda adolescente, concluiu sua graduação em Física em 1943 na Universidade de São Paulo (USP). Não imaginava que anos depois suas pesquisas estariam relacionadas a dois prêmios Nobel de Física. Lattes era visto como um herói científico no Brasil, tendo seu nome registrado em ruas e praças.

Cássio Leite Vieira, do CBPF (Centro Brasileiro de Pesquisas Física), que redigiu sua tese de doutorado sobre uma técnica de detecção de partículas na qual Lattes foi pioneiro, declara: “Se as pessoas aqui no Brasil conhecem o nome de um físico, esse nome é César Lattes, que desempenhou um papel científico determinante para o Brasil; Argentina; Bolívia; Chile; Uruguai e outros países”.

Lattes contribuiu de maneira decisiva para o desenvolvimento da Física experimental no Brasil. Teve um papel imprescindível no desenvolvimento da tecnologia que levou ao descobrimento do pión (partícula de curta duração produzida na colisão de partículas cósmicas com a atmosfera terrestre). Sua

tecnologia ajudou na construção do acelerador de partículas Bevatron⁵ onde os pesquisadores evidenciaram o antipróton. A dedicação à Física e o reconhecimento de Lattes proporcionaram o desenvolvimento da Física experimental no Brasil e na América Latina. Seu legado pode ser observado nas experiências de astrofísica das partículas em toda a região. A figura 2 logo a seguir mostra uma representação artística feita pelo Sandox Studio do Físico César Lattes, ícone da Física brasileira.

Figura 2- Física experimental e repercussão internacional



Fonte: Symmetry: dimensions of the particles/ Sandox Studio, Chicago com Pedro Rivas (<https://www.symmetrymagazine.org/article/the-legacy-of-cesar-lattes>).

Quando Lattes iniciou seus estudos havia poucas experiências em Física experimental no Brasil, isto é, a Física experimental engatinhava. Antes de 1930, os Professores estavam voltados especificamente para o ensino e as pesquisas eram teóricas. Em 1934 o ambiente científico começa a mudar quando a então recente Universidade de São Paulo convida o renomado físico italiano Enrico Fermi para trazer seu programa de Física teórica e Experimental. Fermi declinou o convite, porém indicou o pesquisador russo-italiano Gleb Wataghin para substituí-lo. Lattes foi um dos primeiros alunos de Wataghin. Outro célebre Físico experimental convidado por Wataghin, Giuseppe Occhialini, veio ao Brasil para realizar pesquisas

⁵Acelerador de partículas instalado no Lawrence Berkeley National Laboratory. Começou a operar em 1954. Deixou de operar (descomissionado em 1993). O antipróton, previsto por Dirac, foi evidenciado ali em 1955 por Emile Segrè e Owen Charberlain.

sobre raios cósmicos. Occhialine deu um curso sobre raios X cujo único aluno era Lattes. Esse curso foi uma experiência prática para Lattes, pois Occhialine encarregou Lattes de desenvolver filmes fotográficos expostos a radiações. Tratava-se da entrada de Lattes na Física experimental e na pesquisa pioneira.

Em 1944, Occhialine retornou para Europa para trabalhar com o Físico inglês Cecil Frank Powell na Universidade de Bristol. Ali utilizaram ferramentas fotográficas especiais denominadas placas de emulsão nuclear para detecção de partículas carregadas. Essas placas são muito parecidas com filmes fotográficos ordinários em preto e branco e elas têm uma camada de gelatina como suporte para o sal de prata sensível à incidência de radiações. Essas partículas quando atravessam a placa deixam assinaturas que ficam visíveis após o desenvolvimento da placa. Occhialine enviou uma destas placas para Lattes que já tinha estudado as incidências de partículas atmosféricas via detector de partículas preenchido com vapor supersaturado chamado câmera de nuvens. Lattes percebeu imediatamente que a técnica das placas de emulsão eram superiores aos métodos utilizados por ele. Assim, foi para Bristol para conhecer in loco a técnica.

Analisando a técnica de Occhialine e Powell, Lattes decidiu acrescentar boro ao revestimento das placas fotográficas. Essa modificação nas placas permitiu a Lattes estudar os raios cósmicos. Quando em 1946 Occhialini estava de férias em uma estação de ski nos montes Pireneus franceses, levou para um observatório situado a 2877 metros de altitude em relação ao nível do mar no Pic du Midi (Pico meio dia, em tradução) duas placas de detecção, a saber, uma com boro de Lattes e outra sem.

Quando retornou e analisou as placas percebeu que aquelas modificadas por Lattes apresentavam assinaturas de uma partícula nunca observada. Essa partícula era um pión, um verdadeiro tesouro bastante procurado pelos pesquisadores desde que o Físico teórico japonês Hideki Yukawa previu sua existência na década de 1930. Yukawa postulou que o pión seria como uma cola (um mediador da força forte). Os prótons e nêutrons se manteriam coesos no núcleo atômico devido à troca de píons entre eles. O pión é feito de um quark e um antiquark. E tudo é regido pela mecânica quântica [28, 29, 30, 31].

As teorias quânticas de campos são essenciais à Física da Matéria Condensada e à Física de Altas Energias. De um lado, a Teoria Quântica de

Campos (TQC) quantiza objetos matemáticos chamados distribuições ou funções generalizadas. Aqui os campos quânticos representam distribuições que assumem valores em operadores. De outro, a Mecânica Quântica quantiza as grandezas físicas relacionadas ao movimento de um número limitado (finito) de partículas.

Na Teoria Quântica de Campos os observáveis são escritos na forma de operadores que podem aumentar ou diminuir o número de certas quantidades discretas do sistema (quantas de excitação). Então, essas quantidades são tomadas como partículas elementares e suas propriedades, tais como massa, carga elétrica e spin, afetam as propriedades do campo. Como exemplo, podemos citar os fótons ($m=0$; $q=0$; $\text{spin}=1$) resultantes da quantização do campo magnético. Como toda informação sobre a quantidade e estado das partículas estão registradas no estado do campo, o formalismo da TQC é adequado para tratar e analisar sistemas com várias partículas. Numa teoria relativística de campos (onde há criação e aniquilação de partículas) a função de onda perde o significado e então o formalismo de campos é primordial [65, 66].

A Teoria Quântica de Campos (TQC) é um formalismo que acomoda situações em que o número de partículas não permanece constante, sendo, portanto, compatível com a descrição de processos como a emissão ou absorção de fótons por átomos, ou a criação ou aniquilação de pares elétron-pósitron. As teorias de campos, em geral, fazem uso de objetos matemáticos chamados distribuições ou funções generalizadas. Os campos quânticos são considerados como distribuições que tomam valores em operadores [65] (p.162).

Os pesquisadores evidenciaram o pión, todavia as placas não continham assinaturas suficientes para que fossem conhecidas todas suas propriedades. Lattes então pensou em levar as placas para uma altitude mais elevada, expondo-as a uma incidência maior de píons oriundos dos choques dos raios cósmicos com a atmosfera, obtendo assim as informações suplementares que precisava. Então viajou para o monte Chacaltaya situado na Bolívia cuja altitude é de 5421m, ou seja, mais de duas vezes a altura do monte Pic du Midi, instalando ali suas placas fotográficas. Decorrido um mês recolheu as placas e viajou para Bristol. Analisando-as, o grupo de pesquisas encontrou muito mais assinaturas de desintegrações de píons. De posse desses dados e conhecendo a massa do múon identificada 10 anos antes, calcularam a relação entre a massa do pión e do múon. O resultado mostrou que os píons eram mais massivos que os múons.

Powel, principal pesquisador em Bristol, recebeu o Nobel (Nobel experimental) em 1950 pelo desenvolvimento da técnica de emulsão fotográfica e sua aplicação na identificação do pión. Yuakawa foi nobelizado (Nobel teórico) em 1949 pela previsão teórica dos píons.

César Lattes logo percebeu que sua técnica também poderia ser utilizada para detectar píons artificiais produzidos em aceleradores de partículas. Então em 1948 levou suas placas fotográficas para o laboratório de radiação da Universidade da Califórnia, Berkeley, hoje denominado Lawrence Berkeley National Laboratory. Nesse laboratório estava instalado o maior acelerador de partículas do mundo. Lattes e seu colega americano Eugene Gardner detectaram com suas placas os píons artificiais ali produzidos. Essa detecção foi muito divulgada nos Estados Unidos, ajudando o laureado Ernest Lawrence a pressionar o governo americano no sentido de financiar a construção de um acelerador com maior potência instalada, chamado Bevatron.

Ao voltar para o Brasil foi recepcionado como um herói dos tempos nucleares. “Na história científica de nosso país, era a primeira vez que alguém realizava realmente pesquisas no campo experimental com repercussões no âmbito nacional e internacional”, afirma Vieira.

Lattes, conforme pessoa próxima, não se via como uma estrela da Física experimental, afirma Vieira. No entanto, aceitou ser um ícone nacional no sentido de participar de campanhas populares para obtenção de financiamentos governamentais para o setor de ciência e tecnologia. Essa iniciativa surtiu efeito e em 1949 foi criado o CBPF, que teve como seu primeiro diretor o próprio Lattes. Ao longo dos anos Lattes lutou pelo desenvolvimento, manutenção e avanço do programa brasileiro de Física experimental.

A notoriedade de Lattes levou o CBPF, em 1954, à assinatura de um acordo comercial com a Universidade de San Andrés, Bolívia, para a construção de um laboratório de pesquisas em uma área sobre o monte Chacaltaya para o estudo dos raios cósmicos. Esse laboratório incentivou a criação de novos grupos de pesquisas tanto na Bolívia como em outros países da América Latina. O custo bastante em conta de materiais tais como placas fotográficas, reagentes químicos e um microscópio, propiciou a entrada de países sem recursos tecnológicos e financeiros suficientes em pesquisas de ponta no domínio da Física de altas energias.

Outra façanha de Lattes no final da década de 1950 foi sua parceria com Yuakawa para aumentar os limites de atuação do laboratório de Chacaltaya via colaboração de excelência durante 30 anos entre o Brasil e o Japão no campo dos raios cósmicos.

Lattes faleceu em 2005 e nesse mesmo ano sob o comando de Xavier Bertou foi instalado um código no Observatório Pierre Auger localizado na Argentina tendo como meta a pesquisa sobre raios cósmicos de alta energia. Para detecção dessas partículas a partir do solo são utilizados reservatórios com água chamados detectores Cherenkov⁶.

A equipe de Bertou verificou experimentalmente que com um só detector tinham a mesma sensibilidade dos 1600 detectores do observatório. Então decidiram instalar esse detector na montanha. Essa iniciativa teve como consequência o surgimento de uma cadeia internacional de detectores denominada LAGO⁷. Este detector utiliza uma tecnologia bem mais simples que os detectores Cherenkov no sentido de utilizar menores reservatórios de água, uma eletrônica mais simples e um número bem menor de detectores fotossensíveis. Atualmente a equipe da colaboração LAGO é composta de 100 pessoas de 10 países da América latina e da Espanha. É importante destacar que este detector está sendo instalado na Antártica.

A semente teórica e experimental plantada por Lattes que culminou com a descoberta do pión foi maravilhosa para o Brasil e a Bolívia e toda a América latina e o resto do mundo. Foi construída uma ligação entre a Física das partículas desenvolvida na América latina e aquela produzida pelos grandes atores internacionais de ciência de fronteira, declara o físico boliviano Martin Subieta, membro do LAGO.

Podemos citar como exemplo de parceria bem sucedida a investigação sobre raios cósmicos acontecida em Chacaltaya que uniu a Bolívia ao Japão e ao Instituto de Tecnologia de Massachussets. A Bolívia também em parceria com o Japão está empenhada na concepção e implantação de um projeto de astrofísica das partículas chamado ALPACA⁸. Há outros projetos em andamento

⁶Efeito que ocorre quando uma partícula carregada se desloca em um meio dielétrico com uma velocidade maior que aquela da velocidade da luz nesse mesmo meio. Em sua trajetória a partícula deixa um rasto de luz azulada, denominada radiação de Cherenkov.

⁷Latin American Giant Observatory (Observatório Gigante da América Latina) está situado em Tucumán (Argentina) e é um observatório internacional de Física de astropartículas que investiga eventos extremos no Universo.

⁸Andes Large area **P**article detector for Cosmic- ray physics and Astronomy (Detector de grandes

A meta desta ação é coletar dados para conhecer melhor a interação complexa entre vento solar, campo magnético terrestre e o fluxo de partículas em nossa atmosfera. Para muitos estudantes da Argentina, do Brasil e do México, LAGO é uma oportunidade para trabalhar e/ou estudar em grandes colaborações internacionais. Muitos estudantes latino americanos atuam no LHC, localizado CERN em Genebra.

Existem grandes projetos ainda na prancheta tais como o Cherenkov Telescopes Array⁹, SWGO¹⁰ e o The ANDES Underground Laboratory Project – CORE¹¹ (Projeto do Laboratório Subterrâneo ANDES-CORE), que reforçarão a pesquisa na América no campo dos neutrinos e da matéria escura. Com o projeto LAGO e outras cooperações científicas, a América latina se mostra pronta para receber grandes projetos de cunho internacional. A figura 7 representa de forma artística algumas parcerias científicas internacionais da América Latina com o mundo.

Podemos perceber acima a importância de César Lattes como um dos principais precursores do desenvolvimento da ciência teórica e experimental tanto em nível nacional como internacional e isso representa um grande mérito em um país como o Brasil que investe pouco e mal em educação e pesquisa [32].

3.3 Neutrinos

O neutrino é um férmion (partículas elementares de spin igual a 1/2) sensível apenas à interação fraca e à gravitacional. O neutrino foi nomeado assim por que é eletricamente neutro e sua massa durante muito tempo foi considerada como nula. Essa massa de repouso é menor que aquelas das outras partículas elementares conhecidas, exceto aquelas sem massa. A força fraca tem um alcance muito

áreas dos Andes para física de raios cósmicos e astronomia) trabalha com a observação de raios cósmicos e gama. Começou com uma parceria entre Japão e Bolívia em 2016. Sua meta principal é a observação contínua de raios gama de energia hiperelevadas (novidade no hemisfério sul) com amplo campo de visão e com a melhor sensibilidade do mundo.

⁹ Rede de Telescópios Cherenkov. É um observatório de nova geração, em construção, situado no solo. Será destinado ao estudo da astronomia de raios gama de alta energia. Trata-se de uma rede de 100 telescópios espalhados pelos hemisférios sul e norte.

¹⁰ Southern Wide-Field Gamma-Ray (Observatório de raios gama de campo amplo do sul). Também trabalha com raios gama de altas energias.

¹¹ Projeto do Laboratório Subterrâneo ANDES. A meta desse experimento é cooperar em nível internacional quanto a um entendimento fundamental sobre os neutrinos e a matéria escura. Discutem-se também aplicações nos campos da biologia, da geologia e das ciências dos materiais.

pequeno e a interação gravitacional tem uma intensidade bastante pequena. Essas propriedades conferem aos neutrinos a capacidade de atravessar a matéria normal quase sem serem observados (detectados).

A interação fraca permite a criação de neutrinos em três sabores leptônicos (neutrino eletrônico ou do elétron; neutrino do múon ou muônico; e neutrino do tau ou tauônico), juntamente com o lépton correspondente carregado. Durante bastante tempo os neutrinos foram considerados sem massa, mas atualmente sabemos que existem três massas discretas de neutrinos cuja diferença entre elas é muito pequena, todavia essas massas não correspondem unicamente aos três sabores. Um neutrino criado com um sabor específico tem uma superposição quântica específica associada aos três estados de massa. Como consequência disso ao se propagarem os neutrinos oscilam entre diferentes sabores. Mesmo conhecendo a diferença entre os quadrados dos três valores de massa dos neutrinos desde 2019, observações cosmológicas sugerem que a soma das três massas (menor que $2,14 \times 10^{-37}$ kg) deveria ser inferior a um milionésimo da massa do elétron ($9,11 \times 10^{-31}$ Kg).

Cada neutrino tem sua antipartícula (antineutrino) correspondente, que por sua vez possui também spin $\frac{1}{2}$ e carga elétrica nula. A diferença entre neutrinos e antineutrinos está no número leptônico negativo e na quiralidade do antineutrino, que é direita. Os neutrinos do elétron aparecem somente com os pósitrons ou com os antineutrinos do elétron, enquanto que os antineutrinos do elétron aparecem somente com elétrons ou neutrinos do elétron.

Os neutrinos podem ser produzidos por várias desintegrações radioativas, tais como desintegração beta de núcleos atômicos ou de hádrons; reações nucleares naturais como as que ocorrem no interior das estrelas; reações nucleares artificiais em reatores nucleares, bombas nucleares ou aceleradores de partículas; durante o fenômeno da supernova; durante o spin-down¹² de uma estrela de nêutrons; e durante a colisão de raios cósmicos ou feixes de partículas com os átomos. A maior parte dos neutrinos observados ao redor da Terra tem origem em reações termonucleares no interior do Sol. Um fluxo de $6,5 \times 10^9$ neutrinos solares por

¹²É uma propriedade quântica do spin. Temos o spin-down (spin de projeção negativa) e o spin-up (spin de módulo positivo). A descoberta desse fenômeno ocorreu em 1922 no Instituto de Física Teórica de Frankfurt (Alemanha) e realizada pelos físicos Otto Stern e Walther Gerlach.

segundo e por centímetro quadrado colide com a superfície da Terra de forma ininterrupta.

As principais questões em aberto quanto à natureza essencial dos neutrinos são: descobrir o valor absoluto da massa dos três sabores de neutrinos; o nível de violação CP ou de carga e paridade na área leptônica; as evidências em Física que poderiam quebrar a simetria do modelo padrão como a dupla desintegração beta sem neutrinos.

Até recentemente os neutrinos eram considerados partículas sem massa até a descoberta do fenômeno da oscilação, que evidenciou que têm massa não nula. Os estados de massa dos neutrinos (ν_1, ν_2, ν_3) é uma combinação de seus sabores próprios, ou seja, de $(\nu_e, \nu_\mu, \nu_\tau)$. As oscilações entre esses estados distintos são caracterizadas por três ângulos $(\theta_{12}, \theta_{23}, \theta_{13})$; duas diferenças quadradas de massa $(\Delta m_{12}^2, \Delta m_{31}^2)$; e um tipo de conjugação (simetria) de carga que viola a fase δ_{CP} (CP: carga/paridade). A colaboração experimental Double Chooz (DC) mede o valor da oscilação θ_{13} (ângulo de “mistura”) via os neutrinos provenientes de um reator nuclear. Nesse experimento θ_{13} é obtido por meio de uma nova técnica denominada “captura total de Nêutrons”. O valor encontrado foi de $\text{sen}^2 2\theta_{13} = (0,105 \pm 0,014)$.

Além do ângulo de “mistura” dos neutrinos, essa colaboração fornece também com bastante precisão o fluxo de neutrinos oriundos do reator, calculado por meio da seção de eficácia média por fissão, ou seja, $\langle \sigma_f \rangle = (5071 \pm 0,06) \times 10^{-43} \frac{\text{cm}^2}{\text{fissão}}$.

Devido às transições entre seus sabores $(\nu_e, \nu_\mu, \nu_\tau)$, as massas dos neutrinos são geradas e o estado próprio de massa do sistema de neutrinos (ν_1, ν_2, ν_3) torna-se uma superposição do sabor próprio. Considerando por exemplo apenas dois sabores genéricos (ν_α, ν_β) , podemos escrever o estado próprio de massa (ν_1, ν_2) como uma combinação linear:

$$\begin{pmatrix} \nu_1 \\ \nu_2 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \cos \theta & -\text{sen} \theta \\ \text{sen} \theta & \cos \theta \end{pmatrix} \begin{pmatrix} \nu_\alpha \\ \nu_\beta \end{pmatrix} \Rightarrow \nu_1 = \nu_\alpha \cos \theta - \nu_\beta \text{sen} \theta \text{ e } \nu_2 = \nu_\alpha \text{sen} \theta + \nu_\beta \cos \theta$$

Começando por ν_α observamos ν_β a uma distância L (distância em metros para ocorrer uma oscilação). Isto é causado pelo fenômeno da oscilação de neutrinos.

Uma relação matemática simples fornece a probabilidade de oscilação entre dois tipos de neutrinos: a probabilidade de ν_α se transmutar para ν_β em função dessa distância L é dada como:

$$P(\nu_\alpha \rightarrow \nu_\beta) \text{ ou, por exemplo, } P(\nu_e \rightarrow \nu_\mu) = \text{sen}^2 2\theta \text{sen}^2 \frac{\Delta m^2 L}{4E}, \text{ onde:}$$

“E” é a energia em MeV¹³ dos neutrinos produzidos; $\text{sen}^2 2\theta$ é o ângulo de “mistura quântica” entre as famílias dos neutrinos em questão; $\Delta m^2 = m_2^2 - m_1^2$ é a diferença dos quadrados entre as massas de ν_2 e ν_1 . Podemos observar na equação acima ($P(\nu_\alpha \rightarrow \nu_\beta)$) que quanto menor a massa do neutrino, maior é a distância necessária

à sua oscilação. Então um ν_e com massa de $0,001 \frac{\text{MeV}}{c^2}$, proveniente do Sol,

assim com alguns MeV, e oscilando com um ν_μ de massa $0,1 \frac{\text{MeV}}{c^2}$, transmutará

em ν_μ ao final de 400 m e voltará a ser ν_e ao final de 800m. Em virtude da interferência entre as amplitudes de propagação, a probabilidade oscila:

$$P(\nu_\alpha \rightarrow \nu_\alpha) = 1 - P(\nu_\alpha \rightarrow \nu_\beta) .$$

Trata-se da primeira evidência experimental da oscilação de neutrinos. Essa descoberta do fenômeno da oscilação de neutrinos surge como uma resposta ao problema dos neutrinos solares¹⁴ surgido no ano 2000. Apesar dos avanços teóricos e experimentais quanto à Física de partículas, não conhecemos ainda as massas individuais dos neutrinos. Todavia, postula-se que as massas dos neutrinos sejam

inferiores a $1,5 \times 10^{-37} \text{ kg} \approx 0,086 \frac{\text{MeV}}{c^2}$ [38,39].

¹³1MeV=10⁶ eV. O elétron-volt (eV) é uma unidade de energia adaptada ao mundo microscópico. É a energia cinética adquirida por um elétron quando acelerado no vácuo por uma diferença de potencial (ddp) de 1 Volt (1V). No Sistema Internacional de Medidas (SI) $1\text{eV} \cong 1,602 \times 10^{-19}$ Joules (J). O elétron-volt é uma unidade de energia extremamente pequena. São necessários 6×10^{18} eV (6 bilhões de bilhões) para elevar 100 gramas à uma altura de 1 metro, isto é, 400.00 vezes a energia do LHC.

¹⁴Problema relacionado à diferença entre teoria e observação quanto à quantidade de neutrinos produzidos pelo Sol (neutrinos eletrônicos) e aqueles que chegavam à superfície terrestre, isto é, havia um déficit de neutrinos. Experimentalmente está demonstrado que esse déficit é devido à oscilação dos neutrinos. Isto é, durante sua viagem até a Terra os neutrinos oscilam (mudam de sabor) espontaneamente, passando de Neutrino eletrônico a neutrinos muônico ou tauônico e vice-versa.

- Antineutrinos

Para cada neutrino há um antineutrino que também é eletricamente neutro e de spin semi-inteiro e se distinguem dos neutrinos pelo número leptônico diferente e pela quiralidade oposta. Até onde sabemos até 2016 só existiam essas duas diferenças. Atualmente, em todos os processos leptônicos observados há conservação do número leptônico. Os antineutrinos são gerados durante a desintegração beta onde um nêutron se desintegra em um próton, um elétron e um antineutrino. Um só dos dois estados de spin possíveis nunca foi observado.

Os antineutrinos foram descobertos primeiramente durante interação com prótons em um grande reservatório de água. Esse último foi instalado ao lado de um reator nuclear que funcionava como uma fonte controlada de neutrinos. A partir de então pesquisadores começaram a estudar a viabilidade de utilizar os antineutrinos para monitorar reatores nucleares com o objetivo de prevenir a proliferação de armas nucleares.

- Massa de Majorana

Por serem partículas neutras o neutrino e o antineutrino seriam ao mesmo tempo partícula e antipartícula. Assim, o neutrino seria uma partícula (férmion) de Majorana e não uma partícula (férmion) de Dirac. Essa teoria poderia explicar por que as massas dos neutrinos são tão pequenas em relação às massas das outras partículas elementares como os elétrons ou os prótons. Acredita-se que a única diferença entre o neutrino e o antineutrino de Majorana seria quanto à quiralidade, isto é, duas quiralidades possíveis. Se os neutrinos são efetivamente partículas de Majorana, os processos violando o número leptônico tal como a dupla desintegração beta sem neutrinos seriam então autorizados. Contrariamente não o seria caso o neutrino fosse uma partícula de Dirac.

O fundo de neutrinos cósmicos¹⁵ (Cosmic Neutrino Background: CNB ou CvB) também é um meio para se descobrir se os neutrinos são partículas de Majorana, pois deveria existir um número diferente de neutrinos cósmicos detectados no caso de Dirac ou de Majorana [33].

¹⁵Radiação de fundo de partículas do Universo composta por neutrinos. Também são chamados de neutrinos relíquias.

Resumindo, os neutrinos são partículas com massa muito pequena que começaram como uma construção matemática sem carga elétrica, sem massa e que contribuíram para explicar a desintegração beta. O interesse pelos neutrinos continuou até o início do século 20, onde seus diferentes sabores foram descobertos e experiências foram elaboradas para estudar os níveis mais baixos que previsto de um sabor e isso só ocorre se ao menos um neutrino possua massa. O objetivo é compreender e medir essas oscilações e a massa absoluta de cada um dos sabores de neutrino. Se essas oscilações são diferentes em relação aos neutrinos e aos antineutrinos (Violação Carga Paridade, CP) poderíamos interpretar o neutrino como tendo todos os sabores ao mesmo tempo (emaranhamento quântico). Mas ao medi-lo apenas um sabor é encontrado, processo semelhante à superposição de estados quânticos.

Se neutrino e antineutrinos oscilam diferentemente, isso poderia ajudar a explicar um pouco um dos maiores enigmas da teoria do big bang, ou seja, por que há mais matéria que antimatéria no Universo [34].

A maior parte do conhecimento que temos de nosso Universo vem dos fótons. Essa partícula tem muitas vantagens em relação aos raios cósmicos que bombardeiam de maneira permanente nossa atmosfera e são produzidos em grande quantidade via numerosos fenômenos. Quanto às vantagens, podemos citar: são neutros; viajam durante muito tempo, o que nos permite recuar bastante no tempo; podem ser detectados em uma gama de comprimentos de onda (isto é, de energia); contêm informações detalhadas de como foram gerados; e permitem que conheçamos em detalhes o mecanismo de funcionamento dos objetos celestes. Todavia, os fótons escapam dificilmente das regiões densas e quentes das estrelas, dos núcleos ativos das galáxias e de outras fontes energéticas espalhadas pelo Universo. Dessa forma, essas regiões não podem ser estudadas diretamente, mas de maneira indireta. Por exemplo, os fótons que recebemos do Sol têm origem na camada mais externa (fotosfera), bastante distante do centro do Sol onde se produzem as reações de fusão do hidrogênio em hélio. Além disso, os fótons interagem com outros fótons presentes no Universo (fundo difuso cosmológico a 3K ou radiação relíquia). A observação do universo via fótons de alta energia (acima de 10TeV, ou seja, 10^{13} eV) se limita a distâncias menores que 100 Mpc¹⁶ (300 milhões

¹⁶Parsec (pc) é uma unidade de medida de comprimento utilizada em astronomia para medir

de anos luz). Nossa galáxia tem aproximadamente 10^5 anos-luz e o Universo observável tem 12 a 15 bilhões de anos-luz.

Para observar e conhecer o funcionamento de objetos astrofísicos longínquos é necessário um mensageiro eletricamente neutro para garantir que sua trajetória não será desviada pelo campo magnético; estável para que não se desintegre durante sua propagação; e que interaja fracamente, isto é, que possa sair das regiões densas e atingir os detectores terrestres apesar do fundo difuso cosmológico. Enfim, um mensageiro que não perca informações durante sua viagem.

O único candidato que preenche todas essas condições ao mesmo tempo é o neutrino. A observação de neutrinos de alta energia abre uma nova janela de observação do Universo. No entanto, a detecção desses neutrinos representa um grande desafio já que sua fraca interação com a matéria, sua principal vantagem, torna-os difíceis de serem observados [35].

3.3.1 Breve resumo histórico sobre os neutrinos

Ressalto abaixo as principais etapas de uma saga histórica impressionante que culminou dentre outras coisas com o nascimento da Física de neutrinos.

-O problema da desintegração beta

A pré-história do neutrino inicia em 1896 a partir do momento que Henri Becquerel observa um estranho tipo de radiação emitida por sais de urânio. Tendo isolado o elemento rádio, Pierre e Marie Curie chamaram esse novo fenômeno de “radioatividade”. Ernest Rutherford via experimentação mostrou que há dois tipos de radioatividade, alfa e beta; os Curie identificaram a radiação beta como sendo composta por elétrons. A partir de 1910 a desintegração beta, isto é, a desintegração de um núcleo ${}^A_Z X$ em um núcleo ${}^A_{Z+1} X$ com emissão de um elétron, foi estudada experimentalmente. James Chadwick em 1914 descobre que o espectro de energia do elétron era contínuo e não a diferença de massa entre os

distâncias de objetos além do sistema solar. 1pc=3,26 anos-luz; 1Mpc= 10^6 parsecs.

dois núcleos. Anos mais tarde, Charles Drummond e William Alfred Wooster, utilizando o rádio E (bismuto-210), demonstram definitivamente que o espectro de energia era contínuo. Para contrapor a essa contradição, Niels Bohr, dentre outros físicos de destaque, sugeriram que a energia não era conservada como afirma o princípio da conservação da energia.

- O nascimento dos neutrinos

Em dezembro de 1930, Wolfgang Pauli sugere, para salvar o princípio da conservação da energia, que no decaimento beta o elétron é emitido juntamente com uma partícula de pouquíssima massa, neutra, de interação fraca, que levaria consigo a energia faltante no balanço energético. Pauli chamou essa partícula de nêutron. Todavia, após o nêutron ter sido descoberto em 1932, por Chadwick, Enrico Fermi passou a chamá-lo de neutrino, sendo aceito de maneira unânime pela comunidade internacional. Em 1933 durante a conferência de Solvay¹⁷, o neutrino foi oficialmente apresentado por Pauli com algumas características tais como uma massa muito fraca e um spin provável de $\frac{1}{2}$. Por meio da hipótese do neutrino, Fermi formula rapidamente a teoria da desintegração beta, descrevendo assim a desintegração de um nêutron em um próton com a emissão de um elétron e de um neutrino. Verificou-se mais tarde que na verdade era um antineutrino e não um neutrino como se acreditava.

- Uma partícula fantasma

Maria Goeppert-Mayer calcula em 1935 a probabilidade de emissão concomitante de dois elétrons e de dois neutrinos (à época não se conhecia ainda a distinção entre neutrino e antineutrino), a dupla desintegração beta, verificada experimentalmente nos anos 60. Em 1937, Ettore Majorana publica a teoria simétrica do elétron e do próton. Imediatamente incorporada ao neutrino por Giulio Racah. Atualmente sabemos que o neutrino é a única partícula com massa que poderia ser sua própria antipartícula (férmion de Majorana). Essa hipótese só seria

¹⁷Conferências científicas em Física e em Química que acontecem desde 1911.

demonstrada se a dupla desintegração beta sem neutrinos fosse constatada experimentalmente. Cálculos matemáticos realizados por Hans Bethe e Rudolf Peierls em 1934 previam que a probabilidade de interação entre um próton e um neutrino (seção eficaz) era muito baixa. Sendo assim afirmaram que não havia nenhum meio experimental para observar os neutrinos! Todavia em 1946, Bruno Pontecorvo teve uma ideia brilhante de utilizar o processo beta inverso para detectar os neutrinos. Bruno também afirmou que o Sol e os reatores nucleares seriam fontes importantes de neutrinos.

- A primeira detecção

Nos anos 50, a articulação entre fontes de neutrinos de alta intensidade e grandes detectores dá os primeiros passos para a observação do neutrino. Finalmente em 1956, o neutrino sai do campo da abstração matemática e torna-se real: Frederick Reines e Clyde Cowan o observaram experimentalmente na central de Savannah River (Georgia/EUA). A fonte do fluxo de alta intensidade de neutrinos foi fornecida pelas reações de fissão dentro do reator.

- Propriedade dos neutrinos em estudo

A partir de então os neutrinos passaram a serem intensamente estudados tanto no plano teórico como no experimental. Em 1957, Tsung-Dao Lee e Chen Ning Yang propuseram que a paridade não era conservada na desintegração beta. Então sugeriram uma teoria com dois componentes do neutrino. Surpreendentemente e rapidamente (em algumas semanas), Chien-Shiung Wu e sua equipe confirmaram experimentalmente que a paridade não era conservada. Pontecorvo e Jack Steinberger, no final dos anos 50, sugeriram em dois artigos que o neutrino emitido na desintegração do múon seria diferente daquele associado ao elétron. Em 1962, Leo Lederman, Melvin Schwartz e Jack Steinberger descobriram o neutrino do múon em uma experiência no acelerador de Brookhaven. Em 1965 na África do sul foram detectados os neutrinos oriundos da colisão de raios cósmicos com a alta atmosfera.

- Os neutrinos solares

A partir dos anos 60, o estudo dos neutrinos levou à interação de dois domínios, a saber, a Física das partículas quanto à geração de feixes de neutrinos para investigar a estrutura íntima da matéria e a astrofísica no concernente às fontes de neutrinos, tais como os raios cósmicos, o Sol e as supernovas. Hans Bethe e outros, em 1938, elaboram a teoria da fusão solar e da produção de energia nas estrelas, iniciando pela fusão primária próton-próton no núcleo do Sol. Produzindo neutrinos eletrônicos, essa reação é seguida de um ciclo complexo de reações nucleares que também produzem neutrinos eletrônicos. Depois dos modelos solares desenvolvidos por Johcall em 1964, Ray Davis utilizou a reação cloro-argônio para observar os neutrinos solares na mina de Homestake (Dakota do Sul/EUA). Surpreendentemente, **as** medidas mostravam claramente um déficit de neutrinos solares em relação às previsões teóricas. Esse fato deu início ao polêmico problema dos neutrinos solares ou neutrinos faltantes.

-Tipos de neutrinos e oscilação de neutrinos

Bruno Pontecorvo¹⁸, em 1957, sugere que os neutrinos durante sua propagação poderiam oscilar (se transformar) em antineutrinos. Logo após a descoberta da segunda família de neutrinos, Maki Nakagawa e Sakata mencionaram a ideia de mistura de sabores (tipos) para os neutrinos. Então entra em cena Pontecorvo, postulando novamente sua ideia inicial de 1967 e discutindo o fenômeno da oscilação entre o neutrino do elétron e o neutrino do múon. Sabia-se que a oscilação dos neutrinos mostraria que os neutrinos têm massa. A construção nos anos 60 no Cern e em Brookwaven (Mississippi/EUA) de novos aceleradores proporcionou a produção de feixes intensos de neutrinos para o estudo das propriedades dos neutrinos. O sucesso não tardou e em 1973 foram descobertas as correntes neutras (interação de neutrinos com a matéria, quarks ou elétrons, por meio da troca de bósons Z) em câmeras de bolha no Cern, fato que foi importante para o estabelecimento da teoria eletrofraca (interação fraca + eletromagnética). Além disso, esses feixes intensos de neutrinos foram usados para estudar a difusão

¹⁸Nasceu em 22 de agosto de 1913 em Marina di Pisa. Estudou em Roma onde obteve seu doutorado e trabalhou com Enrico Fermi nos anos 30. Propôs a oscilação dos Neutrinos pela primeira vez para explicar o déficit de neutrinos solares, sugerindo estudá-la para descobrir a massa dos neutrinos.

inelástica profunda na teoria Quantum Chromodynamics¹⁹ (QCD) (cromodinâmica quântica) por Martin Perl e sua equipe em 1975 no acelerador da Universidade de Stanford (SLAC), culminando com a descoberta do terceiro lépton carregado, o tau, divulgando o neutrino do tau e a terceira família ou geração de partículas. Em 2001 é observado. Também no Cern em 1989 foi demonstrado que havia somente três famílias ativas de neutrinos, ficando assim estabelecido o modelo padrão de Física das partículas. No entanto a massa dos neutrinos continuava a levantar questões tanto o meio teórico com o experimental. Como o modelo padrão mínimo necessita de massa nula, uma massa para o neutrino indicaria claramente que o modelo padrão teria extensões. Isso não significava que o modelo estava errado, mas que precisa ser corrigido. Há experimentos tentando medir diretamente a massa absoluta dos neutrinos via desintegração beta do trítium; procurando a oscilação dos neutrinos; procurando a dupla desintegração beta sem emissão de neutrinos - fenômeno raríssimo. Teoricamente, o modelo mais popular é o mecanismo de balanço, que explica o motivo de a massa dos neutrinos serem muito menores que as massas dos outros léptons e dos quarks.

-Supernovas²⁰ e Neutrinos

Em fevereiro de 1987 foram observadas, nos detectores Kamiokande (Japão) e IMB (detector Irvine-Michigan-Brookhaven/EUA), vinte interações devidas a neutrinos oriundos da supernova SN 1987A situada na Grande Nuvem de Magalhães. Essa explosão (supernova) ocorreu há 150.000 anos! Um grande evento antecipado por George Gamow em 1941 após os artigos de Baade e Zwicky, dando assim início ao desenvolvimento da astronomia dos neutrinos.

Os mesmos detectores kamiokande (Japão) e IMB (detector Irvine-Michigan-Brookhaven/EUA) observaram no final dos anos 80 uma anomalia no comportamento dos neutrinos solares (oriundos dos choques dos raios cósmicos com a alta atmosfera): havia menos neutrinos muônicos que o previsto pelos modelos de então. O detector Superkamiokande (10 vezes maior que o

¹⁹É um tipo de teoria quântica de campos que se ocupa das interações fortes (descreve a interação entre quarks e glúons).

²⁰Explosão cataclísmica de uma estrela que durante certo período de tempo pode ter um brilho maior que uma galáxia inteira composta de centenas de bilhões de estrelas.

Kamiokande), em 1998, constatou com alto grau de confiabilidade que os neutrinos do múon transformaram-se em neutrinos do tau via mecanismo de oscilação. Esse fato provou em definitivo a oscilação dos neutrinos, isto é, que têm massa não-nula.

-Grande profusão de estudos sobre os neutrinos

Em 1989, um fato inesperado ocorreu quando o detector Kamiokande apresentou uma medida relevante, a saber: ao detectar neutrinos solares de alta energia (denominados neutrinos do boro-8), observou-se um déficit no fluxo de neutrinos em relação às previsões dos modelos solares. A experiência radioquímica Gallex (30 toneladas de galium localizado no laboratório Gran Sasso/França) observa pela primeira vez neutrinos solares gerados na primeira reação de fusão próton-próton no centro do Sol. Surpresa: o fluxo era ainda menor do que aquele previsto pelos modelos solares. Enfim, o problema dos neutrinos solares foi resolvido em 2001 durante experiência no laboratório Sudbury Neutrino Observatory (SNO) (Observatório Sudbury de Neutrinos). Esse experimento utilizando 1000 toneladas de água pesada observou todos os sabores dos neutrinos, mostrando que uma parcela dos neutrinos do elétron solares se transformou em neutrinos do múon ou Neutrino do tau. Antes os detectores acessavam apenas os neutrinos do elétron.

As conclusões das observações do Sudbury Neutrino Observatory (Observatório Sudbury Neutrino) são que os modelos solares estão corretos e que os neutrinos oscilam entre o núcleo do Sol e o da Terra. Isso representa a segunda prova da existência do mecanismo de oscilação, além daquela já observada nos neutrinos atmosféricos. Mais precisamente, os neutrinos do elétron (eletrônicos) do Sol são modificados também por outro mecanismo além da oscilação já mencionada, ou seja, por uma transformação adiabática na matéria solar, prevista em 1985 por Lincoln Wolfenstein, Sytanislas Mikheyev e Alexei Smirnov. Quanto aos parâmetros de oscilação correspondentes, foram confirmados pela experiência KandLand/EUA ao estudar os pares elétrons-neutrinos produzidos nos reatores nucleares.

Em 2010, o experimento OPERA (Oscillation Project with Emulsion Racking Apparatus: Projeto com Dispositivo de Oscilação de Rastreamento de Emulsão) observou o neutrino do tau gerado em um feixe de neutrinos do múon produzido no

Cern à 732 km de distância, isto é: um neutrino do múon produzido no Cern foi detectado no OPERA/Itália como neutrino do tau, confirmando a oscilação. Após a descoberta do mecanismo de oscilação, voltemos à matriz de “mistura” quanto aos estados próprios de sabor de dois neutrinos e aos estados próprios de massa sugeridos por Maki, Nakagawa, Sakata e Pontecorvo. Após a obtenção dos ângulos de “mistura” dos neutrinos atmosféricos (θ_{23}) e dos neutrinos solares (θ_{12}), iniciou-se a busca pelo terceiro ângulo (θ_{13}), onde:

1 = ν_1 = neutrino do elétron; 2 = ν_2 = neutrino do múon; 3 = ν_3 = neutrino do tau.
Esses ângulos representam a probabilidade de oscilação entre os sabores.

O ângulo θ_{13} foi medido a partir de 2011 em experimentos tais como: 1- acelerador T2K (Tokai to Kamioka: Tokai para Kamioka), que detectou a oscilação entre múon-neutrino e elétron-neutrino ao longo de uma distância de 280m; 2- Double Chooz (França); 4- RENO (Reactor Experiment for Neutrino Oscillation/ Oscilação de neutrino do experimento do reator /Coréia do Sul); 5- Daya Bay Reactor Neutrino Experiment/China (Experimento do Reator de neutrinos).

Até onde sabemos os neutrinos cosmológicos, oriundos de um grande sobressalto de energia (big bang) ocorrido há 13,8 bilhões de anos, e os fótons são as partículas mais abundantes do Universo. Ao estudar a Radiação Cósmica de Fundo²¹ (RCF) ou Cosmic Microwave background (CMB), o satélite Planck limitou a massa dos neutrinos a 1 eV. Markov, em 1960, afirmou que os neutrinos de alta energia oriundos de fontes astrofísicas galácticas e extragalácticas podem ser observados via grandes volumes de água via efeito Cerenkov²². Em 2013 no experimento *IceCube* Neutrino Observatory (IceCube Observatório de Neutrino) foi observado pela primeira vez Neutrinos de alta energia. A captação de neutrinos é feita em um volume de aproximadamente 1 km³ de gelo no pólo sul, totalmente instrumentalizado com fotomultiplicadores. Também no IceCube, em 2018, neutrinos de alta energia foram observados ao mesmo tempo que raios gama, ambos provenientes de um blazar²³, inaugurando assim novas fontes formadas de objetos

²¹Radiação eletromagnética muito homogênea vinda de todas as direções do céu (cosmológica) e cujo pico de emissão está no domínio da micro-onda.

²²Ocorre quando partículas carregadas propagando-se em um meio têm velocidade maior que a velocidade da luz naquele meio. É muito útil nos detectores de neutrinos de água pesada como o Super-Kamiokande. Funciona como um traçador.

²³Blazing quasi-stellar radio source (Blazar) é uma fonte de quasar muito compacta conectada a um buraco negro supermassivo localizado no centro de um núcleo ativo de uma galáxia. São fontes muito

astrofísicos. Juntamente com a detecção direta dos neutrinos solares vindos da fusão primária próto-próton no centro do Sol, esse fato completa a espectroscopia dos neutrinos solares. A primeira observação de difusão elástica neutrino-núcleo foi realizada pela colaboração COHERENT/EUA, abrindo uma “janela” para estudar as propriedades dos neutrinos, que desempenham um papel importante tanto em Física das partículas como nuclear assim como em astrofísica

Vamos resumir então alguns fatos sobre os neutrinos: *foi postulado por Pauli em 1930 e nomeado por Enrico Fermi em 1933; evidenciado experimentalmente por Reines et Cowan em 1956; em 1962, uma segunda família foi descoberta e uma terceira em 1975; em 1989, no Cern, foi demonstrado que três tipos de neutrinos são suficientes no modelo padrão de Física das partículas, isto é, neutrino do elétron ou eletrônico, Neutrino do múon ou muônico e Neutrino do tau ou tauônico; têm carga elétrica nula e uma massa muito pequena; interagem fracamente com a matéria de tal maneira que essa última lhe é praticamente transparente, podendo atravessar o Sol e a Terra praticamente sem interagir; nos reatores nucleares o fluxo de neutrinos é da ordem de 10^{20} neutrinos/segundo e também podem ser produzidos artificialmente em aceleradores de partículas; a principal fonte de neutrinos é o Universo; são verdadeiras sondas pré-históricas através das quais poderíamos compreender os processos físicos presentes no Universo três minutos após o Big Bang; estão por toda parte, com uma densidade estimada de aproximadamente 330 por cm^3 ; via fusão de dois prótons, as reações termonucleares no coração do Sol produzem 2×10^{38} neutrinos do elétron por segundo, o que corresponde a 65 bilhões de neutrinos por segundo por cm^2 incidindo sobre a superfície terrestre; as explosões de supernovas emitem 10^{58} neutrinos em poucos segundos; também um fluxo abundante de neutrinos é produzido nos núcleos das galáxias; em nosso planeta bilhões de neutrinos são produzidos pela interação de raios cósmicos altamente energéticos com a atmosfera superior, além de serem abundantemente produzidos pelos elementos radioativos da crosta e manto terrestres; são tão presentes em nossas vidas e extremamente difíceis de serem captados; é um fonte de informação insubstituível do centro do Sol; os neutrinos do elétron são observados desde 1968 e foram necessários 30 anos para resolver o problema do déficit dos neutrinos solares!* A descoberta da oscilação abre as portas para no

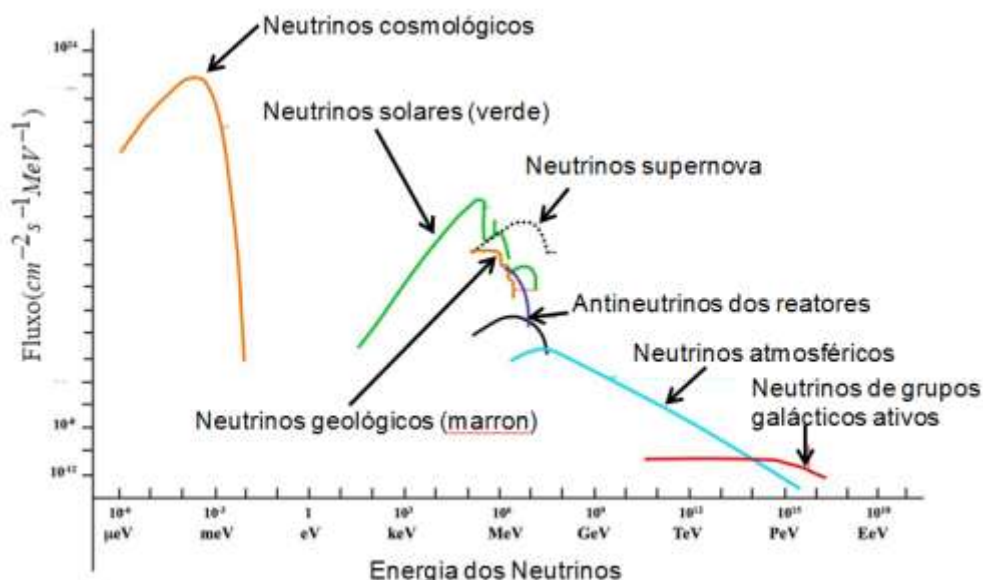
distantes da Terra.

mínimo terminar (?) o modelo padrão. Desde 1970, os feixes de neutrinos são muito empregados para estudar os próprios neutrinos, mas também para estudar profundamente o interior dos núcleons (prótons e nêutrons) a fim de conhecer sua estrutura fina [36].

3.3.2 Fontes de Neutrinos

Há várias fontes de neutrinos no Universo, sejam astrofísicas ou terrestres, e são observadas em uma gama de processos diferentes. As principais são: aceleradores de partículas; reatores nucleares; desintegração beta; Terra; big bang; atmosfera; supernovas; e núcleos ativos de galáxias. O gráfico da figura 8 abaixo representa aproximadamente a relação entre fluxo de neutrinos e energia com a qual incidem sobre a superfície terrestre. A figura 3 mostra o espectro de neutrinos e antineutrinos que incidem de maneira ininterrupta sobre a Terra.

Figura 3- Origem dos neutrinos que atingem a Terra



Fonte: History of the Neutrinos (<https://neutrino-history.in2p3.fr/introduction-to-neutrino-sources/>).

Quanto às potenciais aplicações dos neutrinos, podemos citar: *monitoramento de proliferação nuclear; computação quântica e telecomunicações; prospecção mineral e de petróleo; utilização dos geoneutrinos para realizar uma tomografia da*

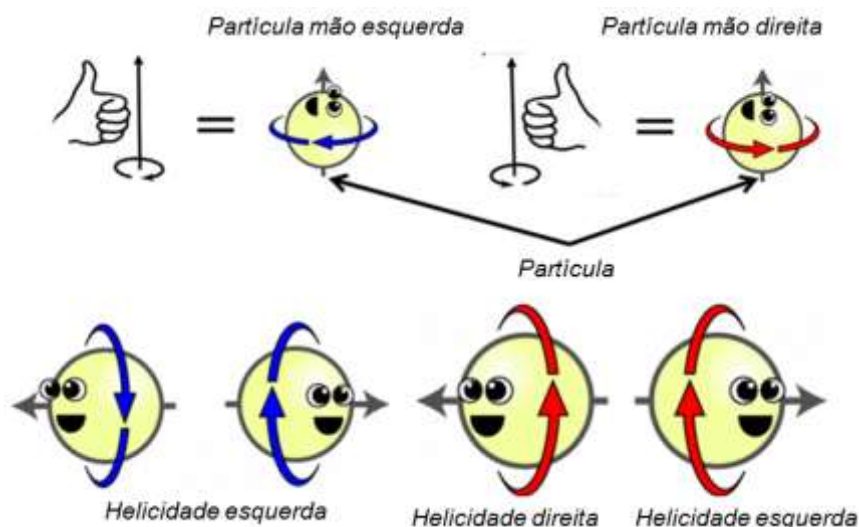
Terra, ou seja, um mapa da densidade de matéria no interior da Terra; instrumentação oceanográfica, geofísica e biológica em águas profundas com monitoramento em tempo real; telescópios que abrem nova alternativa de exploração do Universo [37].

3.3.3 Como os neutrinos adquirem massa?

- Quiralidade (simetria quiral) e Helicidade

Quiralidade é uma propriedade de todas as partículas e antipartículas do modelo padrão, isto é, são todas ambidestras, ou seja, podem ser de mão direita ou de mão esquerda. Todas as partículas em questão se manifestam nessas duas modalidades, exceto os neutrinos que são apenas de mão esquerda e os antineutrinos apenas de mão direita. Por exemplo, há prótons com quiralidade de mão esquerda ou de mão direita assim com há antiprótons de quiralidade de mão esquerda ou de mão direita. A quiralidade, propriedade quântica complexa, fica mais compreensível se conhecermos o conceito de helicidade, que é o resultado da interação entre o momento angular (spin) da partícula com seu deslocamento, resultando em partículas com helicidade de mão direita ou esquerda. A figura 4 é uma representação artística que explica a helicidade.

Figura 4- Helicidade



Fonte: Neutrinos

(<https://propg.ufabc.edu.br/mnpef-sites/neutrinos/index.php/propriedades/helicidade-quiralidade/>)

Como a helicidade não é absoluta, isto é, varia com a velocidade de quem ou do que a observa, uma mesma partícula pode ter um comportamento simultâneo de direita e de esquerda. Chegamos aqui à definição de quiralidade: partículas com velocidades próximas à velocidade da luz, quando, por exemplo, observadas da Terra, tem a mesma helicidade. Assim sendo, a quiralidade e a helicidade se superpõem para partículas se deslocando à velocidade da luz. Assim como a massa, a carga elétrica e o spin são propriedades intrínsecas dos prótons, por exemplo, a quiralidade também o é [40].

Tudo indica que os neutrinos não adquirem massa como as outras partículas do modelo padrão de Física de partículas. No entanto, esse modelo que explica a matéria ordinária (bariônica) e suas interações afirma que os neutrinos não têm massa. Mais uma vez o problema é de tecnologia de detecção: nas experiências de então os neutrinos pareciam se movimentarem com velocidades iguais à da luz, o que até onde sabemos só pode ser realizado por uma partícula sem massa. Todavia, a dúvida se os neutrinos eram massivos não durou muito tempo e físicos do Observatório Super-Kamiokande situado no Japão detectaram as primeiras evidências experimentais mostrando que os Neutrinos têm uma massa ínfima, mas não nula. Logo, a previsão do modelo padrão quanto aos neutrinos estava errada. Faltava um ingrediente. Aliás, o modelo atual não explica também a gravidade, a

matéria escura e a energia escura. Mas isso não é surpresa, pois tudo está em construção. Os neutrinos são pouco massivos: em torno de 10^{-6} da massa do elétron. Como interage muito pouco sabemos muito pouco sobre eles quanto ao sabemos sobre os férmions. Só para lembrar, os neutrinos se apresentam geralmente em três sabores, que não são fixos. Eles sofrem transmutações quando se deslocam no espaço, isto é, alternam seus sabores entre si. Isso só acontece porque têm massa. Mas de onde vem massa do Neutrino? Até onde sabemos os neutrinos são partículas classificadas no modelo padrão como partícula ou férmion de Dirac. Todos os outros férmions (quarks e léptons) ganham massa via interações com o Bóson de Higgs. Todavia, os neutrinos, ou talvez outras partículas desconhecidas, não seguem esse processo. Vários Físicos desenvolveram teorias para explicar como os neutrinos adquirem massa. Será que não existe outro tipo de massa que não conhecemos? Muitos sugerem que a massa do neutrino surge de sua interação com essa nova massa desconhecida.

De acordo com o modelo padrão os neutrinos deveriam ter ambas as quiralidades, todavia, a direita nunca foi observada experimentalmente. Mas qual é a importância da quiralidade? Ela é muito essencial para saber se uma partícula interage ou não via interação fraca.

Ao interagir com o campo de Higgs, algumas partículas passam de mão esquerda para direita e vice-versa. Essa alternância tem que ocorrer para que o campo de Higgs forneça massa às partículas. Para entendermos melhor o mecanismo de aquisição de massa pelas partículas no campo de Higgs, podemos fazer a seguinte analogia: temos que viajar em um carro hipotético sem massa (partícula) via estrada de chão (campo de Higgs) cheia de barro (partícula de Higgs) de Mutum-MG até Lajinha-MG. Ao chegarmos a Lajinha o carro (partícula) está repleto de barro (partícula de Higgs).

Como as partículas de esquerda e de direita têm um comportamento muito diferenciado é necessário um tipo de cola para mantê-las coesas e é justamente isso a função campo de Higgs. Porém, atualmente as observações experimentais evidenciam que os neutrinos não podem interagir com o campo de Higgs porque são partículas esquerdas. A inexistência aparente de Neutrinos de mão direita é uma questão em aberta na Física de neutrinos. Talvez essa partícula exista, mas seria tão inerte a ponto de interagir somente com o bóson de Higgs, tornando sua

detecção muito difícil.

Há uma teoria fora do modelo padrão que propõem novo mecanismo de massa via introdução de uma nova partícula super pesada que tivesse massa própria e semelhança com o neutrino de mão direita. Talvez esta partícula tivesse aparência com o bóson de Higgs ou com um elétron. Também poderíamos pensar não em uma partícula, mas várias partículas que conjuntamente transferiam suas massas aos neutrinos. Uma das formas mais conhecidas popularmente desta teoria é o mecanismo de “balança”, que explica o tamanho “de quase nada” dos neutrinos. Caso aja uma partícula pesada envolvida no mecanismo que fornece massa aos neutrinos, isso explicaria o porquê de os neutrinos esquerdos serem tão leves. Como parte do processo científico essas teorias são testadas experimentalmente para verificar sua validade ou não. Atualmente uma das principais questões em aberto é responder se os neutrinos são partículas (férmions) de Majorana. Há muita pesquisa nesse sentido e uma delas é o experimento GERDA²⁴ situado no laboratório subterrâneo do Gran Sasso. O decaimento beta funciona da seguinte maneira: um nêutron de um isótopo de germânio decai, emitindo um elétron e um neutrino. Caso dois nêutrons do mesmo isótopo se desintegre simultaneamente, temos um decaimento duplo beta.

No duplo decaimento beta sem neutrinos, o núcleo emitiria somente dois elétrons, pois os neutrinos teriam se aparelhado e se aniquilado mutuamente. Isso demonstraria que os neutrinos são férmions de Majorana, isto é, os neutrinos seriam sua própria antipartícula. Se a observação do duplo decaimento beta já é por si só rara, a dupla desintegração beta sem neutrinos é muito mais rara ainda. Parece que os neutrinos são a pedra fundamental para ajudar a responder alguns porquês tais como: Por que existe mais matéria do que antimatéria no Universo observável? Qual a origem da matéria escura? Qual o mecanismo que acelera cada vez mais o Universo Observável?

Numerosas extensões teóricas do modelo padrão foram criadas para tentar explicar a origem da massa dos neutrinos e compreender porque é tão pequena: no máximo 10^6 vezes menor que a massa do elétron. Os pesquisadores tentam encontrar alternativas ao modelo dito “do Bóson de Higgs” descoberto no LHC em

²⁴GERmanium Detector Array (Rede de detectores em germânio). Experimento que investiga a existência do duplo decaimento beta sem neutrinos. Localizado no *Laboratori Nazionali Del Gran Sasso*, Itália.

2012 que dá massa às outras partículas, mas não aos neutrinos. Para resolver isso é necessário conhecer a massa absoluta de cada um dos neutrinos. As pesquisas sobre oscilação de neutrinos permitem medir a diferença entre as massas dos três tipos de neutrinos.

Para obter essa massa, os pesquisadores se interessam ao processo de desintegração beta de certos núcleos atômicos, especialmente do trítio²⁵. Durante a reação de desintegração, um neutrino e um elétron são emitidos, com esse último levando quase toda a energia oriunda da transformação do Núcleo. O grande desafio consiste em medir a energia do elétron e a seguir compará-la com a energia da desintegração, obtendo assim a massa do neutrino. Todavia, para consegui-lo, precisamos melhorar muito ainda a sensibilidade dos instrumentos [41].

3.3.4 Neutrinos e Supernovas

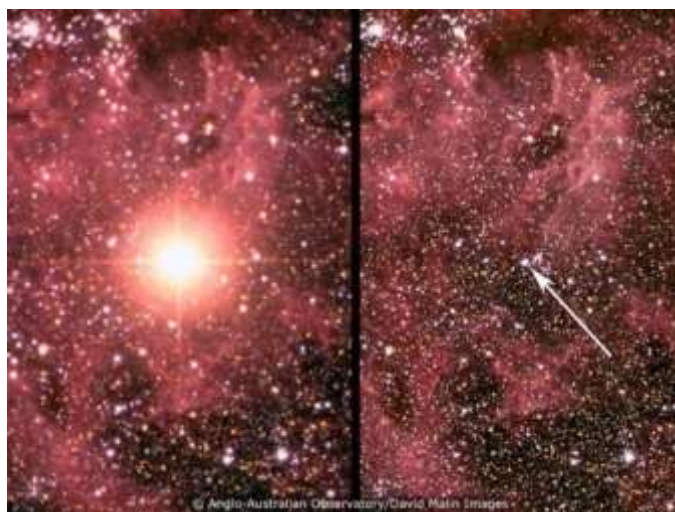
Grandes detectores subterrâneos foram construídos no início dos anos 80 para estudar a desintegração dos prótons em conformidade com as grandes teorias unificadas. Todavia nenhum decaimento foi observado, mas em fevereiro de 1987 duas experiências, uma nos EUA e outra no Japão, detectaram um sinal inesperado que em um intervalo de alguns segundos emitiu um fluxo enorme de neutrinos com uma energia média de 10 a 20 MeV. Esse fluxo está associado à observação óptica da supernova tipo SN1987A que explodiu há aproximadamente 150.000 anos. O sinal recebido foi interpretado como interações antineutrinos sobre os fótons (desintegração beta inversa). É uma prova de que as supernovas emitem 99% de sua energia sob a forma de neutrinos. Os modelos astrofísicos que descrevem o colapso gravitacional do núcleo de uma supernova mostram que aproximadamente 3×10^{53} ergs²⁶ de energia de ligações gravitacionais são liberados em um fluxo composto mais ou menos 10^{58} neutrinos em apenas alguns segundos. Gamow em 1941 antecipou que nesse tipo de evento com temperaturas e densidades muito elevadas no interior das estrelas em colapso gravitacional (contração) podemos

²⁵ É um raro isótopo do hidrogênio (representado por ^3H) cuja abundância está na forma de vestígios. Contém em seu núcleo 1 próton e 2 nêutrons. Trata-se de um isótopo radioativo cuja meia-vida é de $(12,32 \pm 0,02)$ anos.

²⁶ É a abreviação do grego de *ergon*. Trata-se de uma medida de trabalho no sistema CGS (centímetro/grama/segundos). Um erg equivale a 10^{-7} J (Joules). Fazendo uma analogia, um erg seria a energia utilizada por uma mosca, pousada sobre uma superfície, para voar.

esperar um tipo particular de processos nucleares associados à emissão de um grande número de neutrinos. O evento SN1987A representa a primeira observação direta em astronomia de neutrinos [42]. A figura 5 mostra supernova SM 1987A depois e antes da explosão, respectivamente.

Figura 5- Supernova SN1987A



Fonte: History of the Neutrino (<https://neutrino-history.in2p3.fr/supernovae-neutrinos/>).

3.3.5 Neutrinos e Cosmologia

Os neutrinos são juntamente com os fótons as partículas mais abundantes do Universo. Na teoria do big bang (modelo padrão do Universo) os neutrinos leves se desacoplaram termicamente dos quarks e léptons aproximadamente um segundo após o big bang quando a temperatura caiu para 10^{10} K. Esses neutrinos constituem o fundo de neutrinos cósmicos que são as primeiras testemunhas ainda viva do big bang já que o fundo de fótons ou fundo difuso cosmológico (CMB) é bem mais jovem com seu desacoplamento ocorrendo 380.000 anos mais tarde. Atualmente a temperatura desse fundo de neutrinos caiu para 1,95K e sua densidade, incluindo todos os sabores, é de 330 neutrinos por cm^3 .

A energia média do neutrino relíquia está em torno de 0,1 meV; sua seção eficaz é da ordem de 10^{-60} cm^2 (tornando-os atualmente difíceis de serem detectados); e seu comprimento de onda de de Broglie é macroscópico e está em

torno de 0,5 mm. Ao longo de mais de 50 anos várias ideias foram propostas para detectar esses neutrinos, a saber, a transferência de momento mecânico sobre objeto macroscópico; torque sobre uma placa ferromagnética; e balança de torção para medir a força mecânica exercida pela difusão elástica de neutrinos cósmicos sobre alvos macroscópicos. Steven Weinberg propôs em 1962 a ideia de pesquisar o sinal dos neutrinos relíquias no trítio.

Se nenhum método direto conseguiu ainda provar a existência dos neutrinos relíquias, existem abordagens indiretas que permitem acreditar que existem realmente, a saber, a nucleossíntese do big bang que produziu os núcleos leves (D ; ${}^3\text{He}$; ${}^4\text{He}$; ${}^4\text{Li}$) e que demanda um número de sabores de neutrinos inferior a 5; o ruído de fundo dos neutrinos cósmicos, que afeta a evolução das anisotropias do CMB e a formação das estruturas do Universo. Os últimos resultados do satélite Planck²⁷ necessitam igualmente de um número de neutrinos próximo de 3.

Desde os trabalhos de Zwicky em 1933 e Vera Rubin em 1970 sabemos que certa “matéria escura” observada unicamente via interação gravitacional está presente no Universo e é aproximadamente seis vezes mais abundante que a matéria visível. Desde que o déficit de neutrinos solares foi explicado pela oscilação dos neutrinos (provando que os neutrinos têm massa), os Físicos, sabendo que existe uma densidade de neutrinos cosmológicos de 330 por cm^3 , propuseram que os neutrinos poderiam ser a componente principal da matéria escura. No entanto era necessário que a massa do neutrino fosse ao menos $10 \frac{eV}{c^2}$. Os últimos resultados sobre os parâmetros de oscilação dos neutrinos e as restrições cosmológicas sobre a massa dos neutrinos fornecidas por experiências como Planck excluíram essa hipótese e a esperança de ter encontrado um bom candidato para a matéria escura. A ideia que um quarto neutrino seria massivo (da ordem de $\frac{KeV}{c^2}$) e estéril também foi sugerido, mas há necessidade de evidências experimentais [43].

3.3.6 A terra vista através dos neutrinos

²⁷Primeira missão europeia a estudar o fundo difuso cosmológico, que é uma radiação relíquia do Big Bang acontecido há 13,8 bilhões de anos.

Nosso planeta desde sua formação conserva vários núcleos atômicos radioativos de longa vida útil, tais como ^{238}U , ^{235}U , ^{232}Th , ^{40}K , que representam o que chamamos de radioatividade natural. Essa radioatividade é estimada em 20 TW²⁸ (equivalente a 20000 centrais nucleares) e os neutrinos provenientes dessa radiação terrestre (Geoneutrinos) são estimados em 6 milhões por segundo e por cm².

Desde meados dos anos 60 já existe a ideia de estudar a composição da Terra via detecção de antineutrinos vindos dessa radioatividade natural. Em 1984 alguns pesquisadores apresentaram cálculos detalhados do fluxo de geoneutrinos e as possibilidades experimentais para detectá-los. O local mais favorável para a detecção era a Nova Zelândia, local mais distante do hemisfério norte das numerosas centrais nucleares da época. Mesmo assim, a primeira detecção de geoneutrinos só ocorreu em 2005.

Existe uma proposição de utilizar neutrinos atmosféricos de alta energia ou feixes artificiais de neutrinos para realizar uma tomografia terrestre, ou seja, construir um mapa da densidade de matéria do interior da Terra. A mais espetacular dessas ideias consiste em um acelerador de partículas produzindo feixes orientados de neutrinos. Esse equipamento estaria localizado em um navio de dimensões de um porta-aviões. Os neutrinos tendo atravessado a Terra seriam detectados em outro detector situado do outro lado da Terra. Tal dispositivo poderia produzir uma imagem completa do interior da Terra, seja medindo a atenuação do feixe ou utilizando a mudança de sabor dos neutrinos induzida pelo efeito das colisões com a matéria [44].

3.3.7 Partículas das quais somos feitos

Além de sermos constituídos de partículas fundamentais (fabricadas nas estrelas), também as produzimos e somos bombardeados por elas o tempo todo. Há aproximadamente 14 bilhões de anos a matéria e a antimatéria que existiam deveriam ter se aniquilado, ficando apenas energia. Todavia, uma pequena quantidade de matéria sobreviveu. O fato é que nos encontramos em um mundo

²⁸ 1 TW = 10¹² W.

cheio de partículas, ou seja, o mundo é granulado. E não são quaisquer partículas, isto é, são partículas cujas massas e cargas eram justamente aquelas para permitir a vida

Aproximadamente 99% de nosso corpo são formados de átomos de hidrogênio, carbono, azoto e oxigênio e uma pequena quantidade de outros elementos essenciais à vida. Enquanto que a maior parte das células de nosso corpo se regenera a cada sete ou quinze anos, muitas partículas que compõem nossas células existem de fato desde bilhões de anos. Todos nossos átomos de hidrogênio foram produzidos no Big Bag (sobressalto de energia) enquanto os átomos de carbono, de azoto e de oxigênio foram fabricados em um reator termonuclear chamado estrela. Os elementos mais pesados foram fabricados em supernovas. O tamanho de um átomo depende da posição dos elétrons nesses átomos; os núcleos dos átomos são em torno de 10^5 vezes menor que os próprios átomos; caso o núcleo tivesse o tamanho de uma jabuticaba, o átomo teria as dimensões de uma bola de futebol; se o campo da cidade onde residio (Mutum/MG) tivesse as dimensões de um átomo, o núcleo teria o tamanho de uma azeitona colocado no centro do campo. Outra analogia intrigante: se todos os átomos de nosso corpo perdessem seus espaços vazios, caberíamos em uma partícula de poeira de chumbo e toda a raça humana dentro de um cubo de açúcar de 1cm^3 de volume. As partículas representam uma pequena parte da massa de nosso corpo. Também não existe contato direto entre as superfícies, mas entre os campos produzidos por essas partículas. O átomo é um imenso vazio assim como nosso Universo que é pontuado aqui e ali por galáxias, aglomerados de galáxias e outras estruturas. O infinitamente pequeno se reproduz no infinitamente grande. Coincidência...?

Os prótons e os nêutrons são formados por três quarks cuja massa, vinda da interação dos quarks com campo de Higgs, representa alguns por cento da massa de um próton ou de um nêutron; os glúons, veiculadores da interação nuclear forte que une os quarks, têm massa nula.

Nosso corpo é uma pequena fonte de partículas radioativas. Recebemos anualmente em torno de 40 millirens²⁹ de radiação natural produzida por nós

²⁹Milésima parte do rem (unidade de medida de radiação). O millirem é geralmente a ordem de grandeza das dosagens de radiação encontradas em raios x, por exemplo. A dose fatal para um homem adulto é 700 Rem.

mesmos, o que equivale a ser submetido a quatro radiografias pulmonares. Dormindo ao lado de pessoa, recebemos em média de 1 milirem a dois milirens a cada oito horas, caso a pessoa seja um fonte radioativa similar a você mesmo. Emitimos radiação porque os alimentos e as bebidas que ingerimos e o ar que respiramos contém radio-núcleos como o potássio-40 e o carbono-14. Esses elementos se aderem às nossas moléculas e muitos deles se decompõem, produzindo radiação no interior de nossos corpos. Ao se desintegrar, o potássio se decompõe com a emissão de um pósitron (antimatéria). Em um dia um homem médio produz mais de 4000 pósitrons por dia, ou seja, 180 por hora. No entanto, esses pósitrons têm vida muito curta por que ao se chocarem com os elétrons há um aniquilamento de ambos e o resultado é a emissão de radiação na forma de raios gama.

A radioatividade gerada no interior de nosso corpo representa uma pequena fração daquela que incide sobre nós cotidianamente. Por exemplo, sobre um americano médio incide 620 millirens por ano. Os alimentos ingeridos, a casa onde vivemos, as rochas e o solo sobre os quais andamos nos expõe a fracos fluxos de radioatividade. Ao comeremos um coco ou ir ao dentista aumentaria a dose incidente sobre nós em alguns millirems. Ao fumarem, os tabagistas podem aumentar sua dose em 16.000 millirems. Os raios cósmicos de alta energia oriundos do espaço ao incidirem na alta atmosfera terrestre entram em colisão com outros núcleos, produzindo mésons. Muitos desses mésons se desintegram em partículas como múons, neutrinos, pósitrons, elétron e fóton. A maioria dessas partículas cai sobre a superfície da Terra, atravessando-nos à aproximadamente 10m/s, aumentando assim nossa dose de radiação anual em 27 millirens. Suspeita-se que essas partículas possam perturbar nossa genética, provocando perturbações genéticas sutis que poderiam ser um fator que contribuiria com a evolução. Além de nos bombardear com fótons que permitem que enxerguemos o mundo ao nosso redor, o Sol nos premia com 100 trilhões de neutrinos por segundo nos transpassando a todo tempo assim como neutrinos produzidos durante os primeiros segundos de existência do universo primitivo. Também estamos expostos constantemente a um chuva de partículas de matéria escura. Talvez por não emitir, nem refletir e tampouco absorver a luz (fótons), a matéria escura (Weakly interacting massive particles ou Wimps?) é difícil de ser observada, pois não espalha fótons. Estimando

a densidade de matéria escura no Universo observável, os pesquisadores calculam que bilhões dessas partículas nos atravessariam a cada segundo, colidindo com nossos átomos uma vez por minuto. Contudo, como interage fracamente com os férmions, é pouco provável que provoque efeitos notáveis em nosso corpo. Então, quando nos perguntarmos sobre como a Física das partículas se aplica em nossas vidas, basta olhar para dentro de nós mesmos [45].

3.3.8 Pauli

Wolfgang Pauli Nasceu em Viena em 25 de abril de 1900. Nessa época Viena era uma cidade cheia de intelectuais. Sua família frequentava e formava esse ambiente da elite intelectual de Viena. Sua mãe, Berta, era jornalista conceituada enquanto seu pai Wolfgang Joseph Pauli era médico e professor de química. Frequentou o colégio humanista de sua cidade e obteve seu doutorado em 1921 na cidade de Munique. A figura 6 abaixo é uma fotografia de Einstein (à esquerda) e Pauli (à direita) tirada em 1925.

Fig. 6- Reflexões sobre mecânica quântica



Fonte: Futura Science (<https://www.futura-sciences.com/sciences/personnalites/physique-wolfgang-pauli-924/>).

Pauli foi um excelente aluno na escola e gostava de apelidar seus professores para divertir seus colegas. Ainda precoce começou a ler de maneira autônoma

alguns livros de Física. Isso o levou a publicar desde a idade de 18 anos artigos originais sobre a relatividade geral. Nesses artigos desenvolveu uma interpretação da relatividade geral e do formalismo matemático envolvido em sua construção. O próprio Einstein elogiou os escritos de Pauli.

Escapando à mobilização da primeira guerra mundial “graças” a um problema cardíaco, partiu para estudar em Munique em 1918, tendo Sommerfeld como Professor. Frequentava o curso na parte da manhã, contudo preferia passar a noite toda estudando seus livros de Física. Adjacente a esse curso, fazia pesquisas teóricas, mostrando-se muito produtivo.

É importante destacar o interesse de Pauli pela Física e suas primeiras descobertas. Pauli reencontrou Bohr, juntando-se rapidamente a ele para interpretar os espectros dos átomos. Na realidade quando um átomo é excitado ou por exemplo aquecido, emite luz (fótons) com um espectro formado por diferentes frequências bastante definidas. Esse espectro é chamado de raios espectrais e estão nitidamente separadas umas das outras. Mas havia um problema, a saber, os físicos de então não conseguiam explicar por que o número de raios experimentalmente comprovadas não coincidiam para todos os átomos. Pauli, então, apresentou uma solução bastante original - na época as partículas eram descritas por três números quânticos. Percebeu que para explicar isso era necessário postular um novo número quântico para dar conta de todos os outros estados. Esse número mais tarde chamado de spin assume os valores $+\frac{1}{2}$ e $-\frac{1}{2}$ e explica o princípio da exclusão que afirma que dois elétrons de um mesmo átomo não podem ocupar o mesmo estado quântico. Com esses saltos fundamentais, Pauli contribuiu para o entendimento do preenchimento progressivo da tabela periódica.

Nos anos 1921 e 1922 foi assistente nas universidades de Göttingen e de Hambourg. Logo em seguida, convidado por Niels Bohr, foi para a Universidade de Copenhague. Em 1924 descobriu o princípio da exclusão que mais tarde passou a se chamar princípio da exclusão de Pauli. Este princípio apareceu na revista "Zeitschrift Physik" em 1925. Recebeu, em 1926, o título de professor pela Universidade de Hambourg.

No início de 1928 assume uma cadeira de Física teórica no ETH Zürich³⁰, tornando-se parceiro de Paul Scherrer no domínio da Física experimental. No final de 1930 Pauli escreve uma carta postulando a existência do neutrino. Todavia, foi somente em 1933 que decidiu apresentar publicamente sua hipótese brilhante durante o sétimo congresso Solvay em Bruxelas.

Pauli casou-se em dezembro de 1929 com a dançarina, natural de Berlim, Käthe Deppert. Todavia após um ano de casado se divorciou. Bebia muito. E tentando voltar à normalidade da vida que tinha, procurou o psicólogo e psicanalista Carl Gustav Jung que o indicou a uma jovem colega, Erna Rosenbaum, para um tratamento psicanalítico. Casou-se novamente em abril de 1934 com Franca Bertram.

Pauli trabalhava com radioatividade e o grande desafio científico da época era explicar o decaimento beta. Após encontrar uma solução original para o problema, em 1931 viajou para Roma para encontrar-se com Dirac, explicando-o sua teoria. Pauli postulou que uma nova partícula era emitida toda vez que um átomo se desintegrasse por decaimento beta. Essa partícula denominada neutrino, observada 25 anos mais tarde, é atualmente sujeito de grandes pesquisas científicas.

Como a Áustria foi anexada pela Alemanha nazista e Pauli era descendente de judeus, sua situação era delicada. Após ter tido dois pedidos de naturalização rejeitados por Zurique, um em 1938 e outro em 1940, Pauli se licencia da Escola Técnica Federal de Zurique e aceita em 1940 um convite para trabalhar como professor convidado na Universidade de Princeton, Estados Unidos, no Instituto de Estudos Avançados. É importante ressaltar que no início Pauli se opôs à proposição do spin e foi um de seus grandes críticos. No entanto, voltou atrás e contribui muito o desenvolvimento dessa área [64].

Em 1925, Goudsmit e Uhlenbeck tiveram a ideia de um momento angular intrínseco do elétron. Pauli não conseguiu tornar compatível o magnetismo do elétron e a Relatividade Especial. Isso foi feito Professor Paul Dirac com sua equação $(i \gamma \cdot \partial - m) \psi = 0$, que unifica a Mecânica quântica e a Relatividade Especial e mostra o caráter relativístico do spin do elétron. [67]

³⁰Zürcher Eidgenössische Technische Hochschule (Instituto Federal Tecnologia de Zurique).

Após tantas descobertas, a notoriedade de Pauli era enorme nos meios científicos internacionais. Muito seguro de seus conhecimentos científicos, viu-se na posição de um personagem maior na validação ou não de novas teorias Físicas. Tudo aquilo que não tem rigor científico, critica e despreza. Seu amigo Ehrenfest o apelidou de o “chicote de Deus”. Contava-se que seu assistente queria publicar um artigo com um erro de cálculo que foi notado por Pauli e criticado com veemência por ele. Então seu assistente lhe disse que não iria trabalhar mais com Física, pois nunca mais se recuperaria da asneira cometida. Então Pauli lhe disse: “A única pessoa que não vê erros em meus artigos sou eu mesmo”. Pauli tornou-se professor, no entanto era um péssimo pedagogo.

As principais contribuições de Pauli vão do princípio da exclusão, passando pelas matrizes de Pauli, mecânica quântica, teoria quântica dos campos relativísticos, neutrino, invariância CPT³¹ até a teoria de Yang-Mills³².

Apesar de fortes divergências com Einstein sobre o papel e a importância da Física quântica, continuavam grandes amigos. Apaixonado pela interpretação dos sonhos torna-se adepto fervoroso de uma filosofia mística. De um lado, Newton procurava na Bíblia indícios do fim do mundo e afirmava-se que praticava alquimia, de outro, Pauli procurava elos entre a psicologia e o inconsciente, e a ciência. Chegou a publicar um livro cujo título era “A influência da noção de padrão na elaboração de teorias científicas”.

Recebeu o prêmio Nobel de Física em 1945 pela descoberta do princípio de exclusão e naturalizou-se americano em 1946. Mesmo tendo recebido uma proposta para tornar-se o sucessor de Einstein em Princeton e uma cadeira de professor na Universidade Columbia em Nova York, Pauli retornou à Escola Técnica Federal de Zurique, em 1946, obtendo a naturalização suíça em 1949 [46, 47, 48].

3.3.9 Decaimento beta menos e o duplo decaimento beta com e sem emissão de neutrinos

³¹ A simetria CPT (Carga/Paridade/Tempo) é uma hipótese fundamental em Física de partículas. É parte integrante da teoria quântica de campos. Sua construção está relacionada a um teorema demonstrado por Pauli, que a associa à invariância de Lorentz.

³² Teoria importante desenvolvida nos anos 50 pelos físicos Chen Ning Yang e Robert Mills para descrever a força nuclear forte, responsável pela união dos próton e nêutron no interior do átomo. Uma vez incorporada à teoria quântica de campos permite a descrição das quatro interações da natureza. É a base do modelo padrão de física de partículas.

Por um lado, o decaimento beta menos consiste na emissão de um elétron e de um antineutrino acompanhando a transformação de um nêutron em um próton [49]. Por outro, o duplo decaimento beta é um processo de desintegração nuclear no qual ocorre simultaneamente duas desintegrações beta em um mesmo núcleo atômico. No entanto, certas teorias prevêem a dupla desintegração beta sem emissão de neutrinos, evento jamais observado.

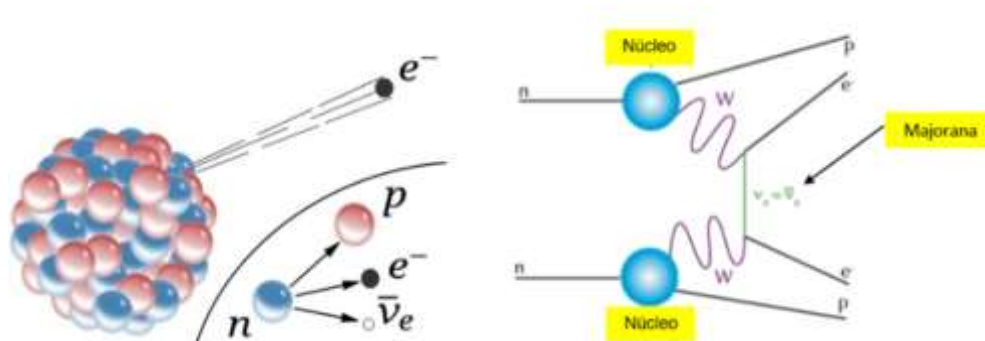
-Dupla desintegração beta com emissão de neutrinos

A dupla desintegração beta ($\beta\beta 2\nu$) é um processo inteiramente autorizado pelo modelo padrão de Física das partículas e consiste em uma transmutação ao mesmo tempo de dois nêutrons em dois prótons com emissão de dois antineutrinos, isto é, como duas desintegrações simples. Essa modalidade de decaimento se refere somente aos núcleos que possuem um número par de prótons e um número par de nêutrons (ricos em nêutrons). A $\beta\beta 2\nu$ já foi observada em uma dezena de radioisótopos na experiência NEMO (Neutrino Ettore Majorana Observatory). A ordem de grandeza da meia-vida desses isótopos é de 10^{20} anos.

-Dupla desintegração beta sem emissão de neutrinos ($\beta\beta 0\nu$)

Vários experimentos internacionais tentam evidenciar a dupla desintegração beta sem emissão de neutrinos. Esse processo foi proposto sob certa condição, ou seja, que o neutrino emitido seja um férmion (partícula) de Majorana (partícula e antipartícula ao mesmo tempo) e não um férmion de Dirac. A observação desse processo proibido pelo modelo padrão, pois não respeitaria a lei de conservação do número leptônico, demonstraria a existência de uma nova Física, ou seja, uma extensão do modelo padrão. Teoricamente, permitiria estimar com bastante precisão a massa do neutrino que é muito pequena para ser medida diretamente via técnicas experimentais atuais. A figura 7 abaixo representa o decaimento beta simples (à esquerda) e o duplo decaimento sem emissão de neutrinos (à direita).

Figura 7- Decaimento beta



Fonte: Wikipédia/Revista Reflets de la Physique n°24

(https://pt.wikipedia.org/wiki/Emiss%C3%A3o_beta

e <https://www.refletsdelaphysique.fr/articles/refdp/pdf/2011/02/refdp201124p11.pdf>)

Podemos resumir a dupla desintegração beta ($2\beta 0\nu$) sem emissão de neutrinos da seguinte forma: no interior de um mesmo núcleo radioativo, dois nêutrons “n” se desintegram simultaneamente em dois prótons “p” via interação fraca (de onde a emissão de bósons intermediários w) com emissão de dois elétrons e dois antineutrinos. O processo de decaimento beta simples é dado por ${}^A_ZX \rightarrow {}^A_{Z+1}Y + e^- + \bar{\nu}$ [50].

3.3.10 A partícula neutrino e o enigma de Majorana

“No ambiente científico há vários tipos de pesquisadores. De um lado, temos aqueles que dão de seu melhor, e aqueles, de primeira linha, que fazem grandes descobertas fundamentais para o desenvolvimento da ciência. De outro, há aqueles de grandes habilidades, tais como Galileu, Newton e Einstein. Ettore Majorana estava entre esses dois últimos”. Enrico Fermi, adaptado por Francisco Elias Gomes.

Ettore Majorana era um físico italiano de primeiro plano que desapareceu de forma misteriosa aos 31 anos. Formulou uma teoria, sempre atual, que postula que algumas partículas, tal como os neutrinos, seriam suas próprias antipartículas.

Nasceu na cidade de Catane, região italiana da Sicília, em 5 agosto de 1906. Após ter terminado seus estudos secundários inicia seu bacharelado, concluindo-o em 1923. Ingressa então no curso de engenharia da Universidade de Roma. Emílio Segré, um de seus colegas acadêmicos e futuro grande físico e professor na

Universidade de Berkeley (EUA), convence-o no outono de 1927 a se associar como ele a Enrico Fermi que tinha então 26 anos e acabava de ser nomeado professor de Física teórica na Universidade de Roma.

O grupo trabalhava em um ambiente tranquilo sob o comando de Enrico Fermi (vulgo “O Papa”). Ettore Majorana (vulgo o “Grande Inquisidor”) tinha como principais características intelectuais o rigor de seu pensamento crítico e a perspicácia de seu pensamento.

Conforme Emilio Segré o jovem pesquisador era o único que exibía condições de igualdade com Enrico Fermi, futuro prêmio Nobel de Física. Contudo, Ettore Majorana tinha dificuldades de se integrar totalmente ao grupo. Era introspectivo e secreto e com um comportamento bastante diferente de seus colegas. Mas rapidamente impressiona a todos pela agudeza de seu pensamento, pela compreensão e pela amplitude de seu conhecimento, revelando sua superioridade intelectual quanto aos colegas.

Suas pesquisas são de altíssima qualidade, demonstrando um domínio ímpar dos dados experimentais disponíveis à época e uma facilidade incomum quanto à manipulação de conceitos teóricos de mecânica quântica e à seleção das melhores aproximações, além de altas habilidades de cálculo. Antes de Werner Heisenberg, Nobel de Física, formulou uma teoria do núcleo constituído de prótons e nêutrons (“teoria do elétron e do pósitron” ou “teoria do neutrino de Majorana”), no entanto, não permite sua publicação e mesmo impede Enrico Fermi de divulgá-la durante um congresso de Física em Paris. Quando Werner Heisenberg publica sua própria teoria, Ettore Majorana, longe de se sentir triste, desenvolve uma grande admiração pelo físico alemão.

Foi um físico exemplar, enigmático, sensível e introvertido, contudo bastante gentil. Não gostava de falar, de se comunicar ou de se expor e só publicava seus trabalhos sob forte persuasão de seus colegas mais próximos, ressalta Enrico Fermi. De acordo com o relato de Laura Capon Fermi, escritora italiana naturalizada americana e esposa de Enrico Fermi, Ettore Majorana tinha uma característica estanha qual seja era excessivamente tímido e introvertido. Atendendo a um pedido de Enrico Fermi em 23 de janeiro de 1933, viajou a Leipzig para se encontrar apenas com o físico Werner Heisenberg. Durante um seminário, Werner Heisenberg comenta sobre as pesquisas teóricas de Ettore Majorana sobre forças

nucleares e o convida para comentar seus trabalhos, mas Ettore Majorana recusa o pedido. Werner Heisenberg, devido às suas excelentes relações com o Físico italiano, convence-o a publicar suas pesquisas na revista “Zeitschrift für Physik”. Imediatamente após retornar da Alemanha, passou por um período difícil marcado pela procura de solidão. De 1933 a 1937 raramente saía de casa e comparecia poucas vezes no Instituto de Física até cessar completamente sua presença. Publica a “teoria simétrica do elétron e do pósitron” (“teoria do neutrino de Majorana”) em 1937. Suspeita-se que essa teoria tenha sido elaborada antes de sua estadia na Alemanha.

Em novembro de 1937 Ettore Majorana foi nomeado, por méritos excepcionais, Professor de Física da Universidade de Nápoles. Tanto em Roma como em Nápoles vivia na solidão. No dia 26 de março de 1938 viajou na parte da manhã de navio postal de Nápoles a Palermo e à noite embarca novamente para Nápoles. Desde esse dia ninguém nunca mais ouviu falar do jovem prodígio da Física teórica. Ettore Majorana então com 31 anos desapareceu. À época várias versões sobre o fato de seu desaparecimento foram aventadas, tais como suicídio e o isolamento na zona rural ou em um mosteiro. Pessoas próximas, exceto a família e especialmente sua mãe, pensavam que a causa mais provável fora a depressão. Todavia, era uma época atípica devido ao fascismo italiano e ao nazismo alemão e véspera da segunda guerra mundial. Será que Ettore Majorana previu as aplicações militares da Física nuclear e preferiu desaparecer? Mesmo que essa hipótese não pareça verossímil, lembra-nos o ambiente tenso vivido pelos cientistas da época, levando o Físico Enrico Fermi a ir para os Estados Unidos em 1938 enquanto Werner Heisenberg ficou na Alemanha.

- A Teoria do neutrino de Majorana

O Físico e matemático britânico Paul Dirac, no início dos anos 30, postula que cada partícula tem sua antipartícula, tal como o elétron cuja antipartícula é o pósitron (a partícula de Dirac só foi explicada mais tarde). Como a simetria parece ser uma característica inerente à natureza, o elétron carrega uma carga negativa e o pósitron uma carga positiva. Essa predição teórica foi verificada em 1932 pelo americano Carl Anderson que observou em uma câmara de bolhas que pósitrons inseridos em

um campo magnético descreviam uma trajetória curva oposta à do elétron. A partir dessa evidência experimental ficou evidenciado que toda partícula possui sua antipartícula.

Como seriam chamadas então as partículas de carga nula tal como os neutrinos? Ettore Majorana propõe entre 1932-1933 em sua “teoria simétrica do elétron e do pósitron”, a seguinte hipótese: as partículas neutras seriam suas próprias antipartículas. Então, será que os neutrinos obedecem à teoria do italiano ou do britânico, ou seja, o neutrino é uma partícula de Dirac ou de Majorana? Caso a teoria do italiano seja verificada experimentalmente teríamos fortes indicações sobre a massa do neutrino. Isso explicaria por que é tão pequena em relação às outras partículas. Ou melhor, isso abriria novos caminhos para nossa compreensão da constituição da matéria.

Há várias montagens experimentais investigando a hipótese de Ettore Majorana. Uma delas é o NEMO (“Neutrino Ettore Majorana Observatory” ou Observatório do Neutrino de Majorana), detector que investiga a existência de um novo tipo de desintegração da matéria chamado DBD (double beta decay ou dupla desintegração beta) sem emissão de neutrinos. Se esse processo for verificado o neutrino seria uma partícula idêntica à sua antipartícula, isto é, a teoria de Ettore Majorana sobre os neutrinos estaria validada.

A colaboração internacional NEMO 3 investiga essa modalidade de desintegração desde 1989. Por um lado, dois tipos de protótipos de detectores foram desenvolvidos, construídos e utilizados até 1997. Por outro, essa colaboração internacional projetou e construiu o detector NEMO 3 que é um detector de teor radioativo fraco que permite observar processos de dupla desintegração com vida útil de 10 a 24 anos. Após 10 anos de pesquisa, desenvolvimento e construção, somente em 2003 o detector começou a coleta de dados experimentais. Instalado no Laboratório Subterrâneo de Modane nos Alpes a 1700 m abaixo da superfície rochosa, NEMO só pôde ser construído devido a uma colaboração internacional. A França participa do empreendimento experimental por meio do Centro de Estudos Nucleares de Bordaux Draguignan (CENBG); do Laboratório de Física corpuscular de Caen; do Instituto de pesquisas subatômicas de Strasbourg; do Laboratório do Acelerador Linear d’Orsay (LAL); e do Laboratório de Ciências do Clima e meio ambiente de Gif-sur-Yvette (LSCE).

Podemos descrever o NEMO-3 como um compartimento com um emaranhado de fios em seu interior e com 3 metros de altura e 6m de diâmetro. O detector está dividido em 24 módulos que serão montados para formar um cilindro. No centro de cada módulo estão suspensas verticalmente lâminas metálicas de 60 μm de espessura constituídas de um metal suscetível de emitir uma dupla desintegração beta. Espera-se que com essa espessura os elétrons produzidos dissipem pouca energia. Tanto de um lado como do outro dessas folhas, estão suspensos verticalmente 40.000 fios metálicos que ocupam o interior do compartimento que tem 95% de seu volume preenchido com hélio gasoso.

O elétron então produzido pela fonte metálica entra na câmara onde estão os fios. Ao atravessar esse meio colide com os núcleos de hélio. Nesse choque o elétron cede energia ao hélio e arranca alguns de seus elétrons que vão se propagar ao longo dos fios. Com as informações coletadas nos fios podemos reconstruir a trajetória do elétron em 3-D.

A câmara em questão está cercada com blocos de resina cintilante. Quando um elétron termina sua trajetória no interior de um desses blocos deposita sobre ele toda sua energia, provocando a emissão de luz por cintilação. Sabemos que a intensidade da onda luminosa produzida é proporcional à energia do elétron ($E=hf$). A intensidade dessa luz é muito pequena, ou seja, infinitamente menor que aquela que pode ser detectada por nossos olhos. Um fotomultiplicador a detecta e a transforma em um sinal elétrico. Esse equipamento mede a energia dos elétrons com uma precisão em torno de 10%.

Reconstruindo a trajetória e medindo o tempo de chegada dessas partículas o detector deverá “enxergar” um evento que corresponde à dupla desintegração beta, distinguindo-a de ruídos de fundo. NEMO armazena anualmente 200 milhões de eventos ou aproximadamente 7 eventos a cada segundo. Porém, Ettore Majorana terá que ser paciente! Esse tipo de desintegração sem emissão de neutrinos ocorre raramente, logo se trata de um enorme desafio, ou seja, encontrar dois ou três sinais desse tipo ao longo de 200 milhões de eventos registrados anualmente. O sucesso da experiência NEMO-3 desencadeou a pesquisa e o desenvolvimento do detector de nova geração SuperNEMO-3. A meta desse empreendimento científico é aumentar de uma ordem de grandeza a sensibilidade de detecção da NDBD (double neutral beta decay ou dupla desintegração beta neutra) quanto à massa absoluta

dos neutrinos de Majorana. Essa região de precisão foi sugerida pelas recentes pesquisas de oscilação de neutrinos. Acredita-se que seja o único meio de conhecer a natureza fundamental do neutrino. Sua massa de isótopos (100 Kg) é dez vezes maior que a do NEMO-3, isto se traduz de uma sensibilidade à massa dos neutrinos de 50meV.

A abordagem SuperNEMO-3 tem como escopo medir a assinatura integral do processo e também será o único capaz de identificar e estudar o mecanismo desencadeador do NDBD além de representar o único experimento desse tipo que opera com numerosos isótopos. Como consequência, caso provas sejam obtidas por técnicas alternativas, isso fornecerá o cruzamento de dados para confirmação das observações [51].

Capítulo 4

Metodologia

A metodologia utilizada nessa investigação na sala de aula foi quantitativa e qualitativa e ao longo de seu desenvolvimento foram observadas a motivação, a reação e o envolvimento dos estudantes nas aulas e na execução das atividades da sequência didática. Essa intervenção deu ênfase a estratégias pedagógicas preconizadas pela teoria de Ausubel (2003).

O principal mecanismo de ação da SD na forma de UEPS (caracterizada pelo aumento progressivo da complexidade dos novos conhecimentos) é a metodologia ativa Ensino sob Medida (EsM), desenvolvida pelo Professor Gregory M. Novak e outros em 1996.

É pertinente destacar que a maioria dos estudantes, dos professores e do pessoal de outras áreas da escola jamais tinha ouvido falar de neutrinos e muito menos ainda os habitantes menos instruídos, tanto da área urbana como rural. Nesse ambiente onde predomina certo grau de obscurantismo intelectual é que a intervenção pedagógica foi aplicada e desenvolvida. Por um lado, todas as aulas da SD foram ministradas aos estudantes via *meet* e, por outro, as atividades foram enviadas aos mesmos via nosso grupo de *whatsapp* (Fig.13). É importante destacar que mesmo que o processo de implantação e desenvolvimento da SD tenha sido à distância, acredito que o grau de confiabilidade dos resultados é bastante aceitável.

4.1 O que é uma sequência didática?

Ao longo dos anos, a maioria de nós teve aulas que não nos motivavam a aprender e ainda hoje grande parte das aulas do ensino médio “ensinam” a mesma coisa e do mesmo jeito. Para atenuar esse fato pedagógico indesejável foram desenvolvidas as sequências didáticas, que surgiram na França aproximadamente em meados de 1980 e só foram aparecer no Brasil somente na década de 1990. Em síntese, uma SD é uma maneira de organizar sequencialmente os conteúdos e as

atividades a serem ensinados, por exemplo, pelo Professor aos estudantes. Uma SD bem elaborada melhora a negociação de significados e a socialização do conhecimento entre o Professor e os estudantes e entre esses últimos quanto aos temas abordados pelo BNCC³³ (Base Nacional Comum Curricular) ou não.

O fluxo de informações generalizadas na internet, novos equipamentos e métodos de ensino oferecem ao Professor uma forma de construir e aplicar no ensino básico uma SD de caráter formativo e não apenas informativo [52].

4.2 Os dados da Sequência Didática

- Número de aulas: 06;
 - Turma de aplicação: 01 turma da terceira série do ensino médio;
 - Número de alunos participantes da pesquisa: 11;
 - Dia e horário das aulas: Quartas feiras às 19 horas;
 - Duração das aulas: Aulas 01 e 02: 55 minutos cada uma; Aulas 03; 04; 05; e 06: 90 minutos cada uma;
 - Tempo de duração da pesquisa: 01 mês e meio (06 semanas);
 - Modalidades das aulas: Expositiva dialogada³⁴ (dialógica) interativa com ou sem PowerPoint, via meet (em função da pandemia Covid 19);
 - Avaliações: Modalidade objetiva (múltipla escolha); modalidade discursiva (questões abertas) e interlocuções com os estudantes;
- Obs.: Ao avaliar as atividades da sequência foram analisadas as respostas dos estudantes como um esforço de argumentação e não como algo certo ou errado

-Atividades da SD:

- a) Representação do átomo e do neutrino;
- b) Questionário diagnóstico;
- c) Questionários conceitual 1;

³³ Norma que define o conjunto orgânico e progressivo da aprendizagem essenciais que todos os estudantes devem desenvolver ao longo das etapas e modalidades da Educação Básica.

³⁴ Aula onde o professor tenta motivar o estudante, tirando-o da passividade via questionamentos orais e/ou verbais a serem respondidos por ele, provocando assim a troca de significados entre os estudantes e entre esses últimos e o Professor.

- d) Questionário conceitual 2;
- e) Avaliação conceitual;
- f) Questionário de opinião; e
- g) Fala dos estudantes.

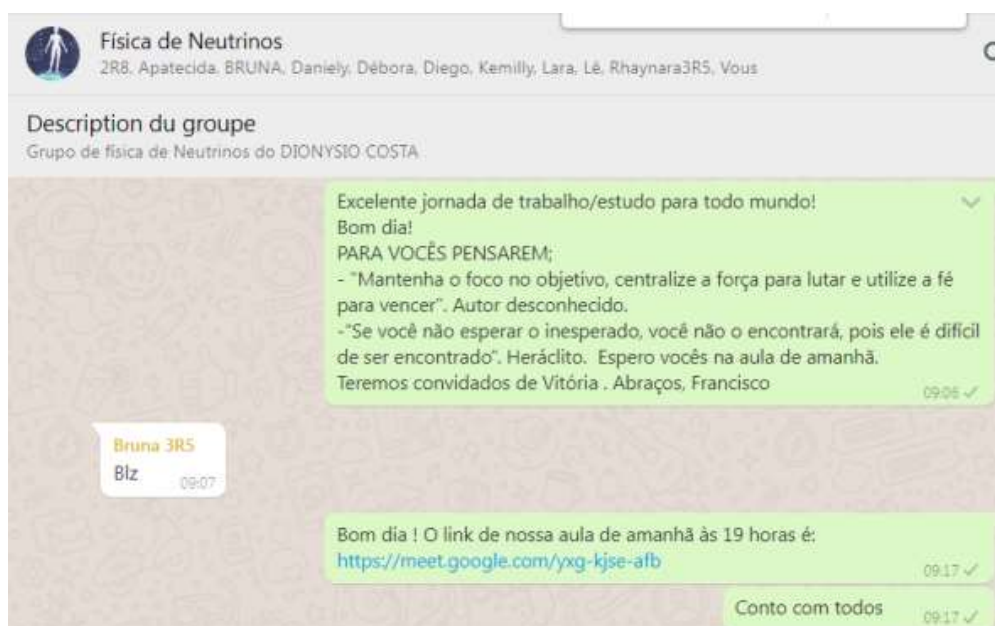
Observações:

-Todas as atividades acima foram avaliadas ao logo do desenvolvimento da SD.

-Para viabilizar o fluxo de informações criamos o Grupo *WhatsApp* “Dionísyo Costa de Física de neutrinos” tanto para o envio das Tarefas de Leitura (TL), dos questionários e das avaliações dos estudantes durante a aplicação da SD quanto outras interlocuções de cunho educativo.

A figura 8 abaixo mostra uma captura de quadro de uma interlocução no “Grupo *WhatsApp* “Dionísyo Costa de Física de Neutrinos”

Figura 8-Trecho de uma interlocução no Grupo



Fonte: Própria, 2021

O quadro 1 abaixo mostra o cronograma de aplicação da SD sob a forma de uma UEPS para o ensino de Física de neutrinos.

Quadro 1: Cronograma

Aulas (2021)	04/Ago	11//Ago	18/Ago	25/Ago	01/Set	08/Set
Aula 1	X					
Aula 2		X				
Aula 3			X			
Aula 4				X		
Aula 5					X	
Aula 6						X

Fonte: Própria, 2021

O quadro 2 abaixo mostra o resumo dos passos de uma SD sob a forma de uma UEPS para o ensino de Física de neutrinos.

Quadro 2 – Resumo

Aula 1	-Definição do tópico específico a ser abordado: Física dos neutrinos. -Representação do átomo e do neutrino.
Aula 2	-Criar/propor situações que levem os estudantes a manifestar seus conhecimentos prévios escritos aceitos ou não aceitos no contexto do assunto abordado. -Questionário diagnóstico.
Aula 3	-Propor situações-problema, em nível bem introdutório, levando em conta o conhecimento prévio do aluno. -Questionário conceitual 1.
Aula 4	-Aprofundando o conhecimento. -Nova Representação do átomo e do neutrino. -Questionário conceitual 2.
Aula 5	-Avaliação conceitual discursiva em sala de aula. -Entrega aos estudantes de questionário de opinião.
Aula 6	-Aula expositiva dialogada com slides sobre o LHC. -Observando a diferenciação progressiva via aula dialogada interativa.

***Fonte:** Adaptado de Moreira (2011).

Podemos resumir o funcionamento da SD da seguinte maneira: Antes de cada aula o Professor envia para os estudantes o material potencialmente significativo acompanhado de um questionário. Após lerem o material os estudantes respondem o questionário, enviando-o para o Professor antes da próxima aula.

Então, de posse das dúvidas dos estudantes o Professor elabora essa próxima aula. Esse método é ótimo para que os estudantes desenvolvam o hábito de leitura antes das aulas. Já fiz muito isso, tanto no ensino básico como na graduação e na pós-graduação e, verdadeiramente, funciona.

4.2.1 Aula 1

Nesse primeiro encontro foi apresentado durante 15 minutos para os 11 estudantes o tema da pesquisa que iríamos desenvolver; a metodologia de ensino que seria empregada para isso; as metas gerais e específicas; e as etapas da SD. Também foi enfatizado com os estudantes que o sucesso de nossa empreitada investigativa dependeria da motivação e da dedicação de cada um de nós; da cooperação entre nós mesmos; e do envolvimento de cada um em seu processo de aprendizagem. No tempo restante, interagimos verbalmente e lhes foi perguntado do que as coisas são feitas ou qual a natureza de nosso mundo, e também foi solicitado que fizessem um desenho do átomo e um desenho do que achavam que seria um neutrino e que os enviassem para mim imediatamente após essa aula.

.A seguir foram formados 03 pequenos grupos (também não poderia ser diferente com um número tão reduzido de estudantes) e solicitado que cada grupo chegasse a um consenso sobre o questionamento feito e depois apresentasse oralmente suas respostas e que as discutissem entre si. Foi uma aula muito animada onde os estudantes falaram bastante. A partir das informações colhidas nessa aula, foi preparado um questionário para a segunda aula.

4.2.2 Aula 2

Aproximadamente 10 minutos antes do início desse segundo encontro foi enviado aos estudantes via nosso grupo de WhatsApp um questionário diagnóstico (Anexo A). Logo em seguida os solicitei para que o respondesse individualmente em 30 minutos com suas próprias palavras e que não se preocupassem em “acertar” ou “errar” as perguntas. Depois de terem terminado o questionário foi escolhida uma resposta de cada grupo que tem potencial de agitar as ideias dos estudantes, fazendo-os interagirem e trocar informações. Cinco minutos antes do término da

aula foi solicitado a todos que enviassem as respostas das perguntas do questionário para nosso grupo de zap. Mais uma vez a meta é incentivar os estudantes a manifestarem seus conhecimentos prévios de maneira que tenha subsídios para elaborar minha terceira aula.

Vinte minutos após o final dessa aula, foi enviado aos estudantes via zap as Tarefas de Leitura (TL) elencadas abaixo e o questionário diagnóstico 1 (Anexo B), que deveriam ser lidas/estudadas e respondido, respectivamente.

As Tarefas de Leitura têm a função de “exercício de aquecimento”, representando uma preparação prévia para a próxima aula. O Professor solicita aos estudantes para lê-las (pois são materiais potencialmente significativos) e logo após responderem um questionário, enviando-o a seguir para o Professor. As questões avaliativas de aquecimento visam promover o pensamento crítico sobre o texto lido, introduzir o que será trabalhado em aula, posteriormente, e estimular os alunos a elaborem argumentações com suas próprias palavras, reforçando, desse modo, suas respostas (ARAUJO; MAZUR, 2013) [14].

Tarefas de Leitura enviadas aos estudantes:

-Sociedade Brasileira de Física (SBF). Revista Brasileira de Ensino de Física, v.31, n.1, 1306 (2009). O Modelo Padrão da Física de Partículas. Disponível em: <<http://moreira.if.ufrgs.br/modelopadrao.pdf>>.

-Sociedade Brasileira de Física (SBF). Física na Escola. Partículas e interações, v. 5, n. 2, 2004. Disponível em: <<http://www.sbfisica.org.br/fne/Vol5/Num2/v5n1a03.pdf>>.

Com as respostas do questionário diagnóstico (Anexo A) e do questionário diagnóstico 1 (Anexo B), foi preparado os slides da terceira aula (Anexo 1).

4.2.3 Aula 3

Nessa terceira aula expositiva dialogada via slides foi realizada uma abordagem muito dinâmica no sentido de tirar as dúvidas dos estudantes quanto ao questionário 1. Foi abordado desde a definição de ciências, passando por partículas clássicas e quânticas e a noção de trajetória, princípio da incerteza de Heisenberg, átomo de Rutherford e de Schödinger, até evolução histórica do MPFP.

Vinte minutos após o final dessa aula foi enviado aos estudantes via WhatsApp as Tarefas de Leitura (TL) abaixo e o questionário diagnóstico 2 (ANEXO C), que

devem ser lidas/estudadas e respondido, respectivamente.

-NEUTRINO ENERGY.WIKIPEDIA. Neutrino.

Disponível em:<<https://en.m.wikipedia.org/wiki/Neutrino>>

- MacTutor. History of Mathematics Archive, 2003. Wolfgang Pauli.

Disponível em:<<https://mathshistory.st-andrews.ac.uk/Biographies/Pauli/>>.

- Ministério da Ciência, Tecnologias e Inovações. Centro Brasileiro de Pesquisas Físicas (CBPF). Ettore Majorana: O Drama de Consciência de um Jovem Cientista.

Disponível em:

<http://www.cbpf.br/~cirto/MecEstNaoExten_HTML/AULAS/Aula_03/Morcelle_&_Campbell_&_Tavares_&_Vugman_%28Ettore_Majorana_O_Drama_De_Consciencia_De_Um_Jovem_Cientista%29_%5BCBPF_Ciencia_E_Sociedade_2006%5D.pdf>.

Em posse das respostas do questionário diagnóstico 2 (Anexo C), preparei os slides da quarta aula (Anexo 2).

4.2.4 Aula 4

Nessa quarta aula expositiva dialogada via slides também foi realizada uma abordagem muito interativa com o intuito de tirar as dúvidas dos estudantes quanto ao questionário 2. Abordei desde a definição de neutrinos, passando por sua importância na compreensão daquilo que teria acontecido três minutos após o *Big Bang*, sua baixa interação com a matéria, pelas fontes de neutrinos, pela quantidade de neutrinos que atravessa uma de nossas unhas em 01 segundo, pela incerteza quanto ao valor de sua velocidade, pela possibilidade de os neutrinos explicarem porque existe mais matéria que antimatéria no Universo, pela proposição teórica de Pauli, pelo decaimento beta, pela descoberta experimental dos neutrinos, pela explicação detalhada dos léptons, pela oscilação de neutrinos, pelo neutrino de Majorana, pelo decaimento simples e decaimento duplo beta com ou sem emissão de neutrinos, pelos experimentos T2K e Ice-Cube, pelas aplicações já em curso e pelas possíveis aplicações futuras dos neutrinos, até a composição atual do Universo. Foi solicitado que fizessem novamente um desenho do átomo e do neutrino e que os enviassem para mim imediatamente após essa aula.

4.2.5 Aulas 5

Nessa penúltima aula com vinte minutos de antecedência foi enviada aos estudantes uma avaliação discursiva individual (Anexo D), que foi respondida individualmente durante a aula e, a priori, sem consultas, espero. Nessa avaliação discursiva, além de observar se houve indícios de aprendizagem significativa quis verificar se os estudantes sabiam escrever corretamente utilizando palavras específicas da literatura científica. As questões foram respondidas no caderno, fotografadas e enviadas para o Professor em nosso grupo de WhatsApp antes da próxima aula. Logo após essa aula foi enviado aos estudantes um questionário de opinião (Anexo E).

4.2.6 Aula 6

Durante 30 minutos desse último encontro, achei oportuno e relevante ministrar uma aula expositiva dialogada com slides sobre o LHC (Grande Colisor de Hádrons) (Anexo 3). O objetivo desse primeiro momento dessa aula foi oportunizar aos participantes da pesquisa o conhecimento do lado experimental da Física de partículas, mostrando-lhes, por exemplo, que as teorias para serem validadas pela comunidade internacional devem explicar o fenômeno observado além de prever sua recorrência. Enfim, em última análise, que fazer ciência significa criar e testar modelos.

Nos 60 minutos restantes, fiz uma revisão bastante dialogada (sem slides) dos conteúdos das aulas 3 (Anexo 1) e 4 (Anexo 4). O objetivo desse segundo momento foi observar a diferenciação progressiva.

4.3 Coletas de dados

Os instrumentos ou técnicas de coleta de dados são um conjunto de regras ou processos utilizados por uma ciência, ou seja, corresponde à parte prática da coleta de dados (LAKATOS & MARCONI, 2001) [53]. Podemos classificar os instrumentos (técnicas) de coleta de dados em: Entrevista; Questionário; Observação; Pesquisa documental; Pesquisa bibliográfica; Pesquisa; Triangulação; Pesquisa-ação; e Experimento [54].

Ao longo da aplicação da SD, a coleta de dados foi realizada via os seguintes instrumentos: Representação do átomo e do neutrino pelos estudantes; questionário diagnóstico (Anexo A); questionários conceituais 1 e 2 (Anexo B e Anexo C, respectivamente); avaliação discursiva tradicional (anexo D); observação da diferenciação progressiva via aula dialogada interativa sem slides; e questionário de opinião. As Tarefas de Leitura (TL) foram selecionadas pelo Professor. Excetuando algumas questões dos Anexos A e B, todas as outras foram elaboradas pelo Professor; os Anexos C e D foram formulados pelo Professor.

Os questionários foram elaborados com questões de múltipla escolha e questões abertas enquanto a avaliação só possui questões abertas. O questionário diagnóstico (Anexo A) teve como objetivo levantar os conhecimentos prévios dos estudantes, ou seja, aquilo que conhecem sobre o tema da investigação em questão.

Resumindo, a aquisição de dados foi feita de maneira contínua e teve como principais fontes as aulas dialogadas no *meet*, os desenhos do átomo e do neutrino e as respostas dos questionários e da avaliação discursiva pelos estudantes. Pude verificar a eficácia das aulas expositivas dialogadas para coletar dados por se tratar de uma interlocução “face a face” interativa (mesmo que virtual) entre Professor e estudantes, proporcionando assim um relato bastante confiável no sentido de saber o que o estudante sabe e aquilo que está ou não aprendendo.

4.3.1 Representação do átomo e do neutrino pelos estudantes

Nesse primeiro encontro além de conversarmos sobre a implantação e desenvolvimento do tema da pesquisa, foi solicitado aos estudantes que fizessem uma representação do átomo e uma representação daquilo que eles pensavam que seria o neutrino. A meta aqui é conhecer o que os estudantes sabem sobre o átomo e sua estrutura e do que as coisas são feitas.

4.3.2 Questionário diagnóstico

Nessa segunda aula, um questionário diagnóstico (Anexo A) foi enviado aos estudantes 10 minutos antes da aula para ser respondido durante essa mesma aula e era composto de 13 questões abertas. Por exemplo, a primeira pergunta visa

conhecer a concepção prévia dos estudantes sobre o que é uma partícula; a segunda e a quarta perguntas buscam saber o que os estudantes acham sobre o que é átomo e o que tem dentro dele e ao seu redor.

O objetivo da aplicação desse questionário é conhecer o que os estudantes sabem para que possa inserir ajustes necessários que atenderiam suas demandas específicas.

4.3.3 Questionário conceitual 1

A meta dessa aula expositiva e dialogada na formadeslides era verificar se os estudantes compreenderam o conteúdo das Tarefas de Leitura e se evoluíram conceitualmente quanto à compreensão do que são os quarks, os léptons e suas interações e também tirar as dúvidas deles referentes ao questionário conceitual 1 (Anexo B), composto de 08 questões objetivas retiradas de exames do ENEM e 09 questões discursivas elaboradas pelo Professor. Todos os questionamentos eram sobre quarks, léptons, bósons e suas interações.

4.3.4 Nova representação do átomo e do neutrino e Questionário conceitual 2

Os estudantes redesenharam o átomo e aquilo que pensavam que fosse o neutrino. A meta dessa aula expositiva dialogada na formade slides era verificar se os estudantes compreenderam o conteúdo das Tarefas de Leitura e se evoluíram conceitualmente quanto à compreensão do que são os átomos e o neutrinos e também tirar as dúvidas deles referentes ao questionário conceitual 2 (Anexo C), com de 21 questões discursivas elaboradas pelo Professor. Todos os questionamentos eram sobre neutrinos.

4.3.5 Avaliação Tradicional

Nesse quinto encontro, os estudantes fizeram uma avaliação individual (Anexo N) composta de cinco questões discursivas cuja meta era abordar todos os conceitos e definições desenvolvidos durante a intervenção. Nessa avaliação solicitei os estudantes para escreverem um texto sobre o que aprenderam sobre o

modelo padrão; neutrinos e suas aplicações tecnológicas; e impactos científicos, tecnológicos e sociais da proposição dos neutrinos por Pauli. Também solicitei que sugerissem alguma ideia para melhorar a aprendizagem deles em Física. Tal recurso avaliativo-investigativo visa verificar se aconteceu ou não a aprendizagem significativa.

4.3.6 Observando a diferenciação progressiva e indícios de aprendizagem significativa na fala dos estudantes através de aula dialogada interativa

A meta da coleta de dados dessa aula foi verificar, sobretudo se os estudantes sabiam explicar o que é uma partícula; um átomo; um neutrino e o porquê dele ter sido proposto por Pauli; a proposta de Majorana; entre outros. Em suma, verificar se os estudantes sabiam explicar conceitos mais elaborados a partir de conhecimentos mais simples a partir da diferenciação progressiva.

Capítulo 5

Análise de dados

Neste capítulo é feita a análise dos dados coletados durante a aplicação da das aulas da SD. Em cada seção, são analisados a fala dos estudantes, os dados das atividades da SD, ou seja, a representação do átomo e do neutrino; o questionário diagnóstico; o questionário conceitual 1; o questionário conceitual 2; a avaliação discursiva tradicional; a observação da diferenciação progressiva através de aula dialogada interativa sem slides

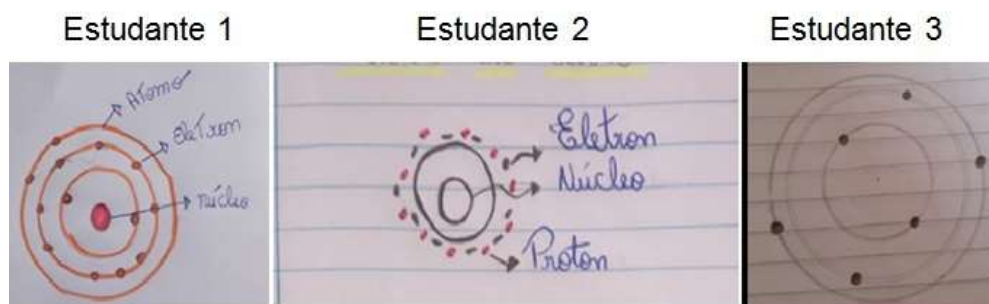
5.1 Aula 1: Fala dos estudantes e representação do átomo e do neutrino pelos estudantes

Nessa primeira seção, de um lado, solicitei aos estudantes que respondessem oralmente “Do que as coisas são feitas ou qual a natureza das coisas”. Observei que a maioria deles tem uma ideia muito vaga sobre isso. No entanto, três estudantes responderam: “O mundo é feito de pelotinhas ou átomos”, mas não sabiam definir o átomo, o que revela sintomas de aprendizagem mecânica, pois já ouviram falar de átomos inúmeras vezes. Meu objetivo era conhecer qual a ideia que faziam disso. Que bom se soubessem que tudo é feito de átomos e que esses são, por sua vez, fabricados nas estrelas!

De outro, solicitei novamente aos estudantes que fizessem uma representação do átomo e uma representação daquilo que eles pensavam que seria o neutrino.

O objetivo era conhecer a concepção/representação mental prévia que os estudantes tinham do átomo e de sua estrutura e dos neutrinos e, assim, conhecer os ajustes necessários para intervir nas próximas etapas da SD e atender às necessidades conceituais dos estudantes. A figura 9 abaixo mostra uma representação do átomo feita por três estudantes participantes da pesquisa.

Figura 9- Amostra

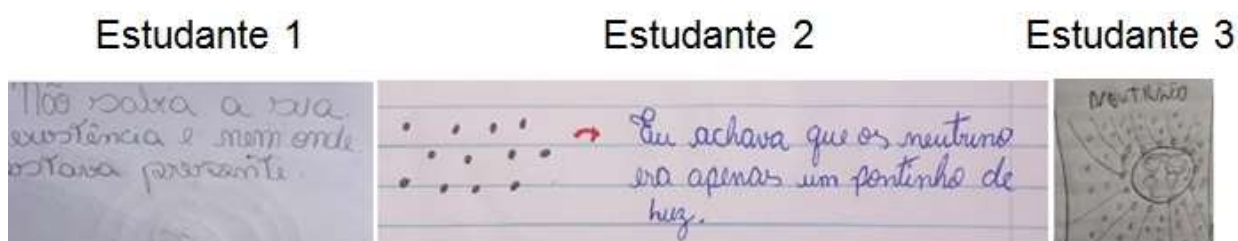


Fonte: Própria, 2021.

Na figura 9 logo acima podemos constatar que o estudante 1 sabe que o átomo tem um núcleo e elétrons orbitando ao seu redor, mas desconhece que o núcleo tem prótons e nêutrons em seu interior e ainda menos que esses últimos são formados por quarks; que o estudante 2 sabe que o átomo tem um núcleo com elétrons orbitando ao seu redor, mas que desconhece também que o núcleo tem prótons e nêutrons em seu interior e ainda menos que esses últimos são formados por quarks e além disso situa os prótons fora do núcleo; que o estudante 3 não sabe que o átomo possui um núcleo, mas sabe que os elétrons orbitam em torno de alguma coisa. É importante destacar que todos os três alunos associam átomos às circunferências, mostrando como a concepção de objetos regulares e perfeitos estão arraigados em suas estruturas cognitivas.

A figura 10 abaixo mostra a representação do neutrino feita pelos mesmos três estudantes da figura 9.

Figura 10- Amostra



Fonte: Própria, 2021.

Na figura 10 acima observamos que o estudante 1 nunca ouviu falar sobre neutrino; que o estudante 2 o confunde com fótons; que o estudante 3 sabe da existência do neutrino e que ele está em toda parte e que também pode atravessar o planeta Terra, o que para mim era inesperado, pois esse estudante desconhece que o átomo tem um núcleo. A resposta esperada como certa era que os estudantes

fizessem uma representação gráfica qualquer do que eles pensavam que fosse o neutrino.

Pela análise dos fatos acima, fiquei surpreso com o nível de desconhecimento científico da turma. Nesse primeiro encontro comecei a conhecer o que esses jovens estudantes conhecem sobre o tema Física de neutrinos e logo senti o tamanho do desafio para fazê-los aprender de forma significativa, já que seria necessário começar do zero para desconstruir mitos e lendas e tentar refazer o caminho lógico da rede cognitiva de cada um deles. Mas, de modo geral acredito que consegui socializar das ideias veiculadas nessa aula através de uma discussão bastante “acalorada”.

De um lado, foi observado também que alguns estudantes se sentiam acanhados (sobretudo as meninas) quando era pedido para abrir a câmera do *meet* quando desejam se expressar. De outro, tive que intervir algumas vezes para que uns deixassem os outros falarem. Também notei que quando somos “parceiros” dos estudantes e eles respeitam a gente, as aulas fluem de forma impressionante. Isso mostra duas coisas, a saber: que quando o nível de sentimento de pertencimento dos estudantes ao ambiente escolar é alto, a motivação para conhecer o novo é outra; e que o Professor que tem boa comunicação social e um bom domínio do conteúdo tem tudo para promover a aprendizagem significativa.

5.2 Aula 2: Fala dos estudantes e questionário diagnóstico

Nessa segunda seção os estudantes responderam durante a aula um questionário diagnóstico com 13 questões abertas (Anexo A).

Durante a resolução do questionário os estudantes fizeram algumas afirmações e questionamentos, a saber: “Professor claro que já ouvi falar desse tal de átomo, mas não lembro mais o que é não. Não sei escrever com minhas palavras; sei que o elétron é negativo e o próton positivo; partícula é a menor coisa que existe e aí então não tem nada dentro dela? O átomo é uma partícula? Existe máquina para ver o átomo? Neutrino é aquilo que passou na televisão e que explica como o mundo era?”

Obviamente que não pude confirmar as afirmações e nem responder as perguntas, pois não era o momento, mas senti uma coisa muito boa: os 11

estudantes estavam extremamente motivados e não paravam de perguntar. A partir dessa aula observei que teria que me esforçar bastante para fazer o melhor para esses estudantes. Na fala acima desses estudantes nota-se que o que pensavam que foi aprendido, na verdade foi decorado, por isso o esquecimento do que é um átomo. Mas o que poderia nos explicar o esquecimento pelos estudantes do que é um átomo, se o “estudaram” durante no mínimo sete anos (04 anos no ensino fundamental e três anos no ensino médio)?

Serão analisadas abaixo as respostas dos estudantes das 13 questões do questionário diagnóstico, a saber: 1- O que são átomos? 2- O que tem dentro deles? 3- O que é uma partícula? 4- Qual a carga do elétron, do próton e do nêutron? 5-Já ouviram falar de neutrinos?6- Onde os átomos são produzidos? 7- O que significa partícula elementar? 8- Existe alguma coisa imediatamente próxima ao redor do átomo? Se sim, o quê? 9-Se prótons repelem prótons, por que o átomo não desmancha? 10- Por que o elétron não cai sobre o núcleo? 11- Quais são as quatro interações da natureza? 12-Por que é mais fácil ocorrer uma reação química do que uma reação nuclear?13-Se bilhões de neutrinos nos atravessam a cada segundo, por que não sentimos nada?

O quadro 3 abaixo mostra as respostas dos estudantes às treze questões acima.

Quadro 3: Amostra do desempenho dos estudantes

Questões	Respostas dos 11 participantes
Questão 1	80% responderam: são partículas que ocupam lugar no espaço.
Questão 2	95% responderam: tem prótons, elétrons e nêutrons.
Questão 3	80% responderam: são átomos.
Questão 4	100% responderam: carga negativa, carga positiva e carga zero.
Questão 5	30% responderam: sim.
Questão 6	90% responderam: no ar.
Questão 7	70% responderam: não divisível/sem estrutura interna.
Questão 8	80% responderam: elétrons.
Questão 9	70% responderam: por ser indivisível.
Questão 10	60% responderam: por ser pequeno.
Questão 11	70% responderam: interação gravitacional e eletromagnética.
Questão 12	90% responderam: a reação química o homem consegue

	fazer, já a nuclear somente os átomos conseguem.
Questão 13	80% responderam: por serem muito pequenos.

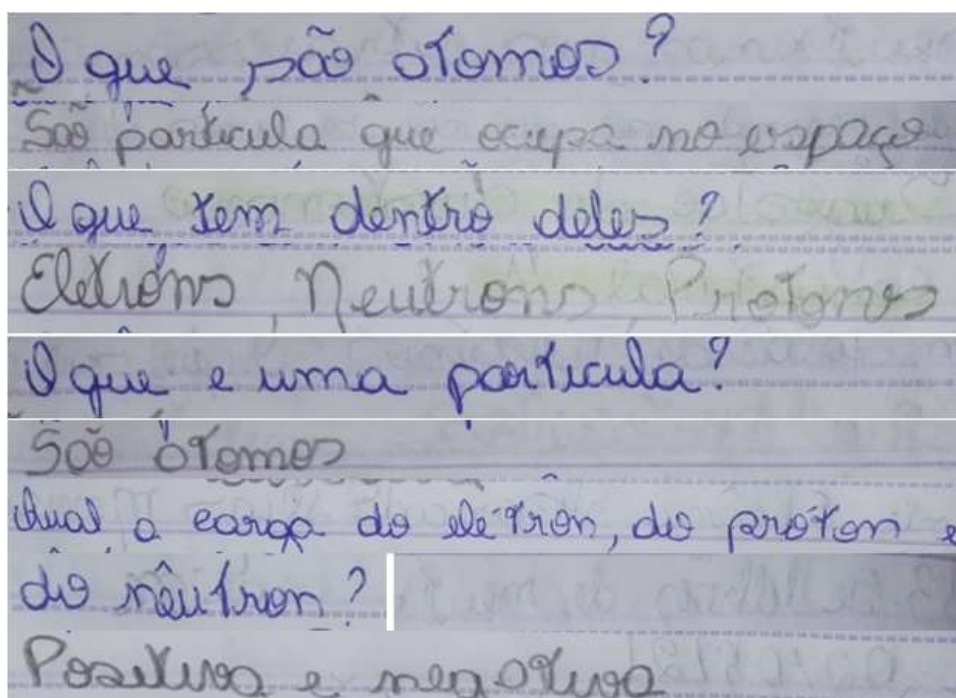
Fonte: Própria, 2021.

Então, podemos concluir que, excetuando o neutrino (muitos nunca ouviram falar dele), pelo menos quanto às cinco primeiras questões, os participantes conhecem razoavelmente bem as partes clássicas principais da estrutura do átomo.

Isso representa um grande passo que pode facilitar um bom entendimento pelos estudantes das Tarefas de Leitura da SD.

A figura 11 abaixo mostra as respostas da estudante 1 de cinco questões abertas do questionário diagnóstico.

Figura 11- Amostra



Fonte: Própria, 2021.

A meta era conhecer os conhecimentos prévios que os estudantes tinham dos componentes da estrutura atômica e assim executar os ajustes necessários para intervir nas próximas etapas da SD, atendendo assim às necessidades conceituais dos estudantes. Pois conforme Ausubel a aprendizagem acontece a partir do que o aluno já sabe e a partir do que ele sabe introduzir os novos conhecimentos [4]

[p.9].Todavia, o mais importante até aqui é a alta motivação observada nos 11 integrantes da pesquisa.

5.3 Aula 3: Fala do estudante e questionário conceitual 1

Nessa terceira seção, observando os comentários e questionamento dos participantes durante essa aula expositiva dialogada via slides, pude perceber mais uma vez que a palavra átomo já está bastante presente na estrutura conectiva deles, mas de uma forma não contextualizada, o que talvez pudesse justificar o porquê de não saberem o que são átomos. Simplesmente sabem que existem e imaginam que têm a forma geométrica de bolinhas de gude. Mas ao serem perguntados por que uma árvore sofre flexão ao ser atingida por uma ventania, simplesmente respondem que é por causa do ar, não associando isso a átomos.

Uma estudante muito aplicada da zona rural pediu para que eu simplificasse a explicação do princípio da incerteza de Heisenberg. Para isso recorri ao seguinte artifício: ao viajar de ônibus de Mutum a Manhuaçu posso saber ao mesmo tempo onde estou na estrada e a velocidade do ônibus? Mas se for uma partícula, poderia saber a posição e a velocidade dela ao mesmo tempo?

Quanto à primeira pergunta ela respondeu: “sim, com um GPS ou olhando os piquetes de quilometragem na estrada e o velocímetro do carro ao mesmo tempo”. Já em relação à segunda, respondeu: não, pois ou sei um ou outro. Na verdade a estudante não tinha dúvida, mas queria como sempre (pois já foi minha aluna no primeiro e segundo anos do ensino médio), mostrar que tinha compreendido bem a Tarefa de Leitura e respondido o questionário.

Esses dois fatos acima reforçam a ideia de que a Física deve sempre que possível ser ensinada de preferência de forma contextualizada e deve permitir aos estudantes que consigam explicar coisas de sua vivência ou não. Mais uma vez fiquei bastante emocionado e motivado por perceber durante a aula que os estudantes leram o material de apoio pedagógico (Tarefa de Leitura). Percebi também que 95% desses jovens nunca tinham lido ou ouvido falar de férmions e bósons e muito menos ainda de neutrinos. No entanto acho que consegui responder a maioria das dúvidas dos estudantes quanto ao questionário conceitual 1, sempre tentando contextualizar as dúvidas na vivência dos estudantes ou utilizando a

abstração para criar imagens que pudessem resolver as dúvidas deles. Também fui surpreendido pelas seguintes perguntas, a saber: “Professor Francisco, já que dentro dos prótons temos os quarks, o que tem dentro dos quarks? ”Respondi que até onde sabemos não tem nada lá dentro, por isso o quark é uma partícula elementar; “Tava assistindo o jornal da Record e o cara tava falando sobre o *big bang* e o cara falou também de fóton e neutrino. Fóton já tinha ouvido falar, mas de neutrino não”. Nesse último comentário podemos justificar um dos porquês de introduzir a Física contemporânea no ensino médio, ou seja, para explicar para as pessoas fatos relacionados à vivência delas, no caso compreender o que é divulgado nos meios de comunicação.

De um lado, primeiramente serão analisadas as respostas do questionário conceitual 1, composto de oito questões de múltipla escolha do ENEM e logo após, de outro, as 12 questões abertas sobre o Modelo Padrão desse mesmo questionário.

O quadro 4 abaixo mostra as repostas dos onze estudantes quanto às questões de múltipla escolha do questionário conceitual 1.

Quadro 4: Amostra do desempenho dos estudantes

Questões	Respostas	A	B	C	D	E	Acertos (%) (aprox.)
Questão 1	D	-	-	3	8	-	72,7
Questão 2	B	2	9	-	-	-	81,8
Questão 3	B	-	9	1	-	1	81,8
Questão 4	A	9	2	-	-	-	81,8
Questão 5	C	-	-	10	1	-	90,9
Questão 6	D	1	-	-	9	1	81,8
Questão 7	C	1	-	10	-	-	90,9
Questão 8	B	-	10	1	-	-	90,9

Fonte: Própria, 2021.

Serão analisadas agora as respostas dos estudantes às 12 questões abertas retro mencionadas. Vamos lá então:

Questão 1: Cite as quatro interações fundamentais da Natureza, descrevendo a

função de cada uma no micromundo da Física das partículas.

-80% responderam: interação gravitacional, gerada talvez pelos grávitons e responsável pela gravidade; interação eletromagnética, gerada pelos fótons e responsável pelo brilho do Sol; interação fraca, geradas por bósons vetoriais, responsável pela radiação; *força forte, gerada pelos glúons, responsável pelo núcleo não desmanchar;*

Questão 2: Se o núcleo do átomo é constituído por partículas carregadas positivamente (prótons), por que esse núcleo não explode?

-70% escreveram: devido a uma cola chamada glúon;

Questão 3: Se cargas elétricas negativas e positivas se atraem, por que os elétrons não são absorvidos pelo núcleo?

-80% responderam de forma clássica: porque ocupam órbitas fixas em torno do núcleo;

Questão 4: Se elétrons e prótons têm massa, qual o papel da interação gravitacional na estabilidade do átomo?

-90% responderam: desprezível, pois é muito pequena;

Questão 5: E os nêutrons, qual o papel deles na estrutura do átomo?

-80% escreveram: estabilidade do núcleo;

Questão 6: Quais são as partículas veiculadoras da força nuclear forte? Como se chama o campo no interior do qual elas se manifestam?

-80% escreveram: quarks, mas não sabiam que o campo é o campo forte;

Observação: talvez a palavra campo os tenha confundido.

Questão 7: Quais são as partículas veiculadoras da força eletromagnética? Como se chama o campo no interior do qual elas se manifestam?

-100% responderam: fótons, mas não sabiam que o campo é o campo eletromagnético;

Questão 8: Quais são as partículas veiculadoras da força fraca? Como se chama o campo no interior do qual elas se manifestam?

-100% responderam: bósons vetoriais, mas não sabiam que o campo é o campo forte;

Questão 9: No seu entendimento, o que é o Modelo Padrão de Física das Partículas (MPFP)?

-90% responderam: é um modelo explica as partículas e como interagem em nosso

Universo;

Questão 10: Conforme o MPFP atual, qual o número total de partículas que compõem a matéria ordinária?

-100% erram essa questão: responderam 36. A resposta é: 61

Questão 11: O modelo padrão identifica e especifica a matéria escura? E a energia escura?

-100% escreveram: não e não.

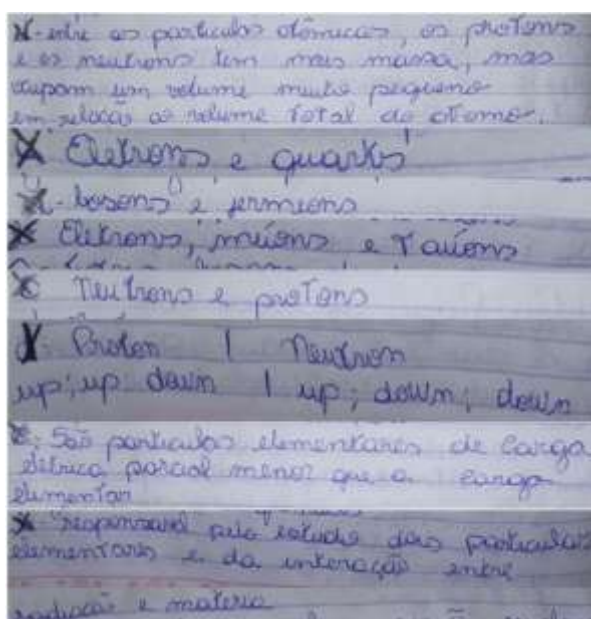
Questão 12: O modelo padrão identifica e especifica a partícula portadora da força gravitacional?

-100% responderam: não.

Os dados do quadro 4 acima e as respostas das questões abertas imediatamente acima refletem algo muito importante, a saber, que os estudantes não apenas leram as Tarefas de Leitura, mas estudaram-na verdadeiramente. Uma prova disso é que em 99% das frases das respostas das questões abertas deles não há indícios de frases prontas ou palavras rebuscadas. Escreveram utilizando as palavras que conhecem. Podemos observar nisso aspectos mesmo que tênues de aprendizagem significativa.

A figura 12 abaixo mostra as respostas da estudante 1 quanto às oito questões de múltipla escolha questionário conceitual 1.

Figura 12- Amostra



Fonte: Própria, 2021.

5.4 Aula 4: Fala dos estudantes e questionário conceitual 2

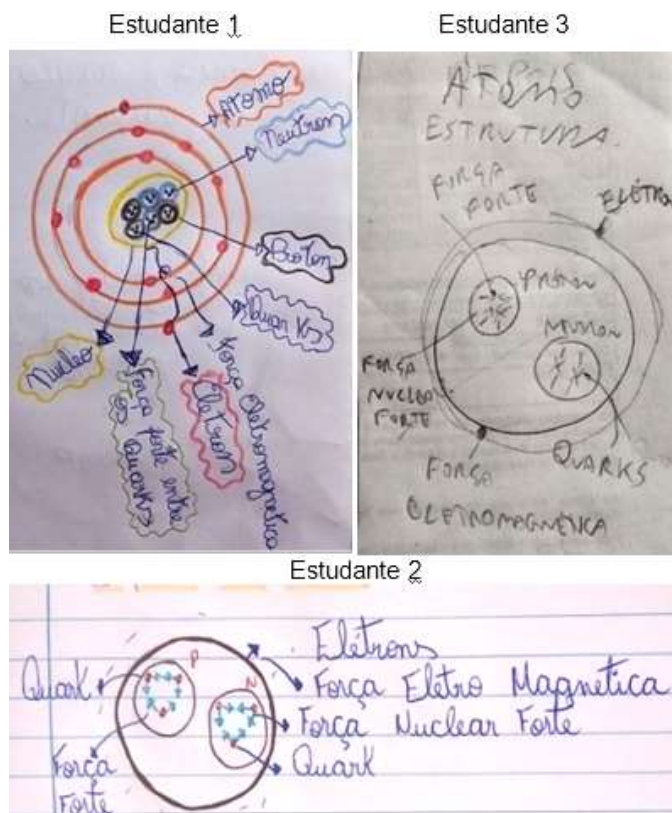
Nessa quarta seção, observando os comentários e questionamento dos participantes durante essa aula expositiva dialogada via slides, notei que houve um ganho de aprendizagem significativa: alguns estudantes já entendiam o que era o subunçor partícula elementar e a partir dele já conseguiam “explicar” que o átomo não era uma partícula elementar. Sabiam explicar que dentro dos prótons e nêutrons haviam outras partículas, no caso os quarks. Nessa aula comecei a perceber que minhas exposições dialogadas até aqui começavam a se afastar da aprendizagem decorada para entrar no campo da aprendizagem significativa, isto é, a partir de um conceito mais simples o estudante explicar um conceito mais elaborado. Um estudante me disse: “Professor agora eu já sei o que faz uma árvore balançar quando o vento bate nela. São os átomos, que são formados de pedacinho ainda menores que estão dentro dos prótons e nêutrons e que o átomo não desmancha por que tem uma “cola” dentro dos prótons e nêutrons. Em suma, o estudante manifestou que sabe o que significa a palavra elementar!

É pertinente ressaltar que 90% dos estudantes da pesquisa jamais tinham ouvido falar de neutrinos! Esse fato nos mostra o quão distante a Física Contemporânea está dos espaços escolares do ensino básico. Falo isso com propriedade, já que ministrei aulas de Física por bastante tempo em escolas estaduais de Minas Gerais; Espírito Santo e Brasília.

Mais uma vez percebi que os estudantes estudaram as Tarefas de Leitura, pois a fala dele é ao vivo e em tempo real.

Na figura 13 abaixo estão representadas as concepções do átomo, após a intervenção pedagógica, dos mesmos três estudantes das figuras 9 e 10.

Figura 13- Amostra



Fonte: Própria, 2021.

Fazendo uma análise comparativa entre as figuras 9 (aula 1) e 13 (aula 4), podemos inferir que o átomo continua tendo a forma geométrica de uma circunferência ; que os elétrons ainda gravitam em órbitas predeterminadas; que o átomo passa a ter um núcleo composto de prótons e nêutrons, que por sua vez são formados por quarks; que a força forte une os quarks; que a força eletromagnética atua entre o prótons e os elétrons. Mais uma vez vemos que houve uma evolução quanto ao entendimento da estrutura atômica. Isso é um sinal de aprendizagem significativa.

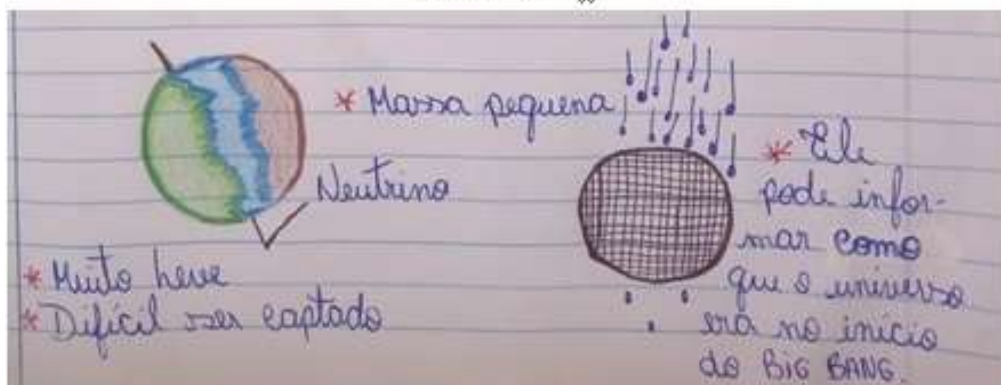
Na figura 14 abaixo estão representadas as concepções do neutrino, após a intervenção pedagógica, dos mesmos três estudantes da figura 13.

Figura 14- Amostra

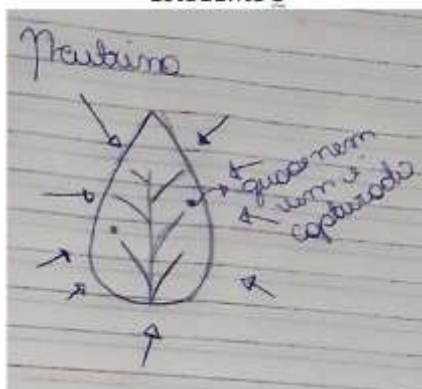
Estudante 1



Estudante 2



Estudante 3



Fonte: Própria, 2021

Fazendo novamente uma nova análise comparativa dessa vez entre as figuras 10 (aula 1) e 14 (aula 4), verificamos um salto qualitativo enorme quanto à

compreensão do que seja o neutrino. A estudante 1 não sabia que o neutrino existia, mas agora sabe que existe e até onde são produzidos e que são dificilmente capturados em detectores, não escreve no desenho que tem pouca massa e é Neutro, mas o faz muito bem nas repostas do questionário conceitual 2. Sabe também até que dentre todas as partículas que tem massa, o neutrino é a mais leve e a mais abundante no Universo.

Já a estudante 2 que confundia o neutrino com pontinhos de luz (fótons), já o descreve bem quanto à dificuldade de capturá-lo em detectores, quanto à sua infinitamente pequena massa e sua carga e até que reage muito pouco com a matéria. Quanto à estudante 3, prefere ressaltar a propriedade que o neutrino tem de atravessar a matéria interagindo muito pouco com a matéria bariônica.

Novamente a estudante 1 me surpreendeu: as estudantes 2 e 3 não sabiam explicar por que os neutrinos interagem raramente com a matéria. Prontamente a estudante 1 respondeu: “Eu sei responder isso. É por que reage com a matéria pela tal de força fraca que tem uma pegada muito pequena”. Fantástico saber que a SD está funcionando e os estudantes estão interagindo e cooperando uns com os outros. Isso é troca de significado! É assim que funciona a ciência: equipes unidas e que se auxiliam nas dificuldades de entendimento das coisas desse mundo.

Agora é hora de analisar as respostas dos estudantes quanto ao questionário conceitual 2, composto de 20 questões abertas sobre os neutrinos. Vamos lá então:

Questão 1: O que são neutrinos?

-90% basicamente responderam: Férmion que interage apenas via interação fraca e interação gravitacional; pequena massa e sem carga. O restante respondeu aproximadamente que é uma partícula subatômica sem carga elétrica e que interage com outras partículas;

Questão 2: Quem o postulou pela primeira vez? Por quê?

-80% escreveram: Wolfgang Pauli. Para salvar o princípio da conservação da energia e quantidade de movimento. Os 20% restantes responderam apenas Wolfgang Pauli;

Questão 3: Quem o identificou experimentalmente?

-99% responderam: Clyde Cowan e Frederick Reines. 1% respondeu Enrico Fermi;

Questão 4: Cite algumas fontes geradoras de neutrinos.

-100% responderam: estrelas/buracos negros e outros;

Questão 5: O neutrino é um bóson ou um férmion?

-100% escreveram: férmion;

Questão 6: Quantos tipos de neutrinos existem atualmente? Qual o nome de cada um deles?

-100% responderam: 3, neutrino do elétron, do tau e do múon;

Questão 7: Quantos antineutrinos existem atualmente? Qual o nome de cada um deles?

-90% escreveram apenas: 03. Os 20% restante responderam 03 e o nome de cada um dos antineutrinos;

Questão 8: Os neutrinos possuem carga elétrica?

-100% responderam: não;

Questão 9: O que são neutrinos cósmicos?

-95% escreveram: neutrinos de alta energia produzidos nas supernovas e no big bang;

Questão 10: O neutrino é sensível a quais das quatro interações fundamentais?

-85% responderam: apenas interação fraca. Os outros 15% responderam que não encontraram a resposta ou responderam apenas interação gravitacional;

Questão 11: Os neutrinos podem ser capturados facilmente? Por quê?

-99% responderam não. Mas apenas a estudante 1 (a mesma de sempre) soube explicar o porquê;

Questão 12: Confirme ou refute a frase: o neutrino é mais massivo que o elétron.

-99% responderam: não. Apenas 1% escreveu sim;

Questão 13: Cite algumas possíveis aplicações dos neutrinos.

-80% não souberam responder adequadamente escrevem respostas como "luz que vaza por um material transparente e radiação". 20% responderam: para estudar o Universo;

Questão 14: Conforme o genial físico Ettore Majorana, o neutrino seria uma antipartícula ou seria sua própria antipartícula?

-90% escreveram: sua própria antipartícula. 10% escreveram que não encontraram a resposta ou escreveram outras coisas;

Questão 15: Os neutrinos sofrem oscilação, isto é, se transformam uns nos outros?

-99% responderam: sim. Dois estudantes disseram que não sabiam responder;

Questão 16: Qual a importância dos neutrinos para a cosmologia?

-100 % escreveram: ajudam os cientistas a estudarem as galáxias e as estrelas;

Questão 17: Teoricamente, por que os neutrinos poderiam nos trazer informações importantes de como era o Universo 2 minutos após o Big Bang?

-90% basicamente responderam: “que o neutrino estava presente na hora do big bang e podia falar como ele era”;

Questão 18: O que é uma desintegração beta?

-100% basicamente escreveram: transformação de um núcleo em outro núcleo;

Questão 19: Qual foi a maior contribuição de Bruno Pontecorvo quanto aos neutrinos?

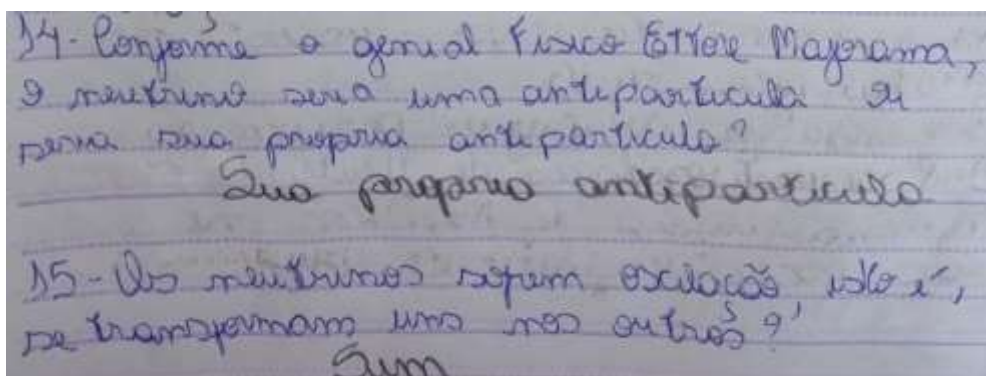
-90% responderam: propôs a ideia da oscilação dos Neutrinos; e

Questão 20: O que são oscilações de neutrinos?

-90% escreveram: é quando um neutrino pode ter os três sabores ao mesmo tempo. Um pode transformar no outro.

A figura 15 mostra as respostas da estudante 1 de duas questões da avaliação tradicional.

Figura 15-Amostra



Fonte: Própria, 2021

Analisando as respostas acima do questionário conceitual 2, podemos constatar um grau avançado de compreensão de alguns termos da Física de neutrinos, tal como oscilação. Isso confirma que a maioria dos estudantes compreendeu bem os conteúdos das Tarefas de Leitura.

5.5 Aula 5: Avaliação discursiva tradicional

Nessa quinta seção será analisada cada uma das cinco questões discursivas

da avaliação tradicional (Anexo D). Mas antes é pertinente destacar que em todas as respostas dos estudantes nessa avaliação podemos observar que não há frases prontas, copiadas das Tarefas de Leitura (TL) propostas. Isso é um sinal de que essas foram estudadas e as repostas foram construídas com as próprias palavras dos estudantes. Isso revela o alto grau de confiabilidade das respostas dos estudantes, fato essencial em qualquer pesquisa científica. Vamos então às análises das questões:

-Primeira questão: Escreva um texto relatando tudo o que você aprendeu sobre o Modelo Padrão de Física das Partículas (mínimo de 20 linhas).

A maioria dos estudantes escreve que o Modelo padrão identifica as partículas e explica como elas interagem umas sobre as outras; que é dividido em dois grandes grupos (férmions e bósons); que os férmions têm spin semi-inteiro e os bósons spin inteiro; que temos 06 quarks (06 antiquarks), seis léptons (citam o nome de cada deles) (06 antiléptons) e cinco bósons (citam o nome de cada um deles); que temos as cargas cores (citam as cores); que os fótons veiculam a interação eletromagnética, que os glúons veiculam a força forte, que os W e Z veiculam a força fraca e que o gráviton veicula a força gravitacional. Um participante afirmou que o gráviton poderia ser a matéria escura e também escreve que tem ainda muita coisa para descobrir. Vemos que na fala “tem muita coisa ainda para descobrir” indiretamente o estudante fala que o Modelo Padrão está incompleto;

-Segunda questão: Escreva um texto relatando tudo o que você aprendeu sobre neutrinos e suas aplicações tecnológicas (mínimo de 20 linhas).

Grande parte dos estudantes (90%) responde que os neutrinos são difíceis de serem detectados; interagem pouco; não podem ser quebrados; estão presentes nas estrelas; só interagem via força fraca e gravitacional; são neutros; têm massa muito pequena; presenciaram o big bang; transformam-se uns nos outros; são muito importantes para estudar o Universo, pois viajam pelo Universo e quase não são absorvidos pela matéria estelar;

-Terceira questão: No seu entendimento quais foram os impactos científicos, tecnológicos e sociais atuais da proposição do neutrino em 1930 por Pauli?

Por um lado, todos os estudantes não souberam escrever sobre o impacto social da proposta de Pauli. Por outro, a maioria respondeu que a proposição de Pauli permitiu salvar o princípio de conservação da energia e do momento linear, a

descoberta da oscilação dos neutrinos e fabricação de detectores.

Quanto ao impacto social, minha ideia era que soubessem que a “simples” proposição de uma partícula provocou, além do desenvolvimento teórico e do avanço tecnológico enorme na forma de detectores de partículas, uma grande geração de emprego e renda;

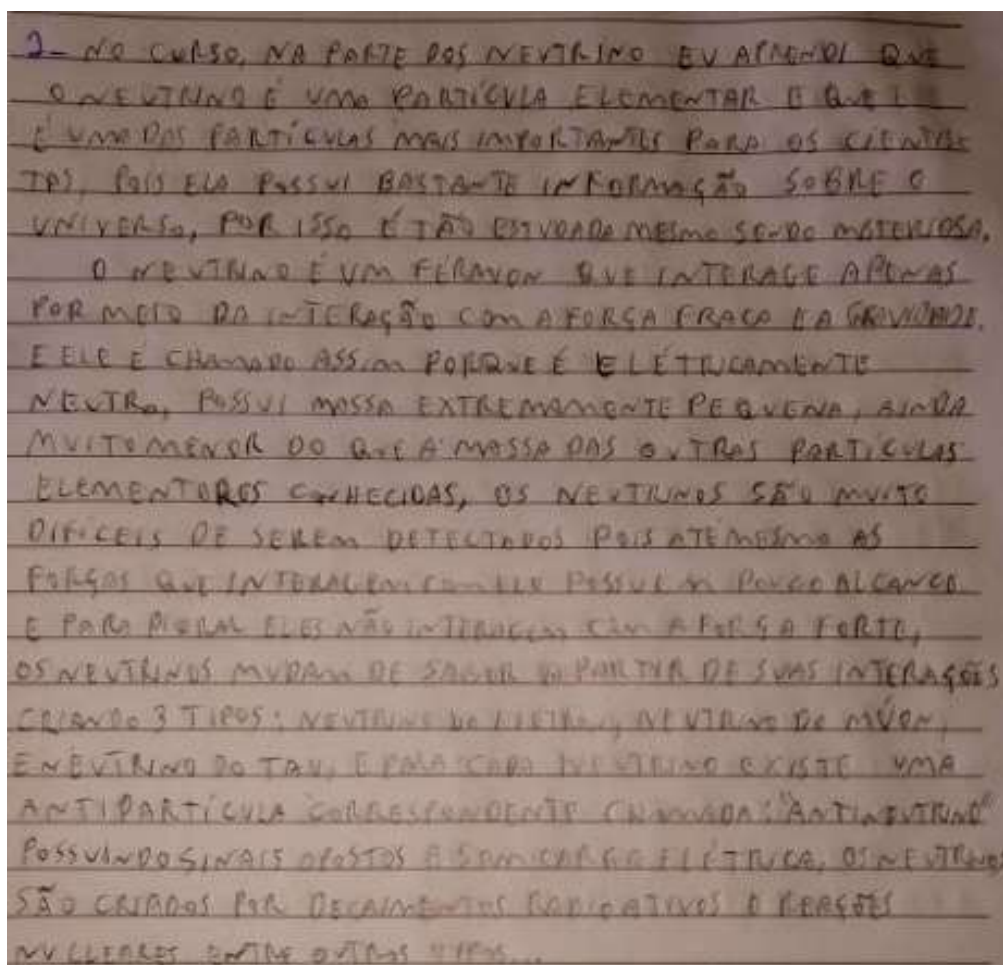
-Quarta questão: Oque você sugere para melhorar sua aprendizagem em Física?

Uma participante respondeu que deveria ter mais aula no *meet*. Respondi que achei essa sugestão excelente e analiso-a como enriquecedora. Também vejo que minhas aulas despertaram o interesse da estudante em ser protagonista de sua aprendizagem. Outra participante sugeriu que fossem utilizados nas aulas, vídeos, músicas e experimentos. Respondi que analiso também sua sugestão como uma forma inovadora de ensinar Física de neutrinos.

Mais uma vez é evidente que não há em qualquer área humana um projeto pronto, acabado. Tudo pode sofrer alterações inovadoras ou não. Prefiro as inovadoras.

As figuras 16, 17 e 18 abaixo mostram as respostas de três questões da avaliação tradicional de três estudantes participantes da pesquisa.

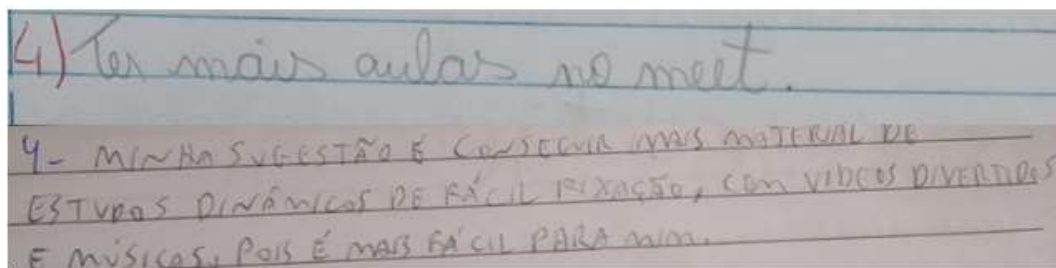
Figura 16- Pergunta: “Escreva um texto relatando tudo o que você aprendeu sobre neutrinos e suas aplicações tecnológicas”.



2- NO CURSO, NA PARTE DOS NEUTRINO EU APRENDI QUE O NEUTRINO É UMA PARTÍCULA ELEMENTAR E QUE É UMA DAS PARTÍCULAS MAIS IMPORTANTES PARA OS CIENTISTAS, POIS ELA POSSUI BASTANTE INFORMAÇÃO SOBRE O UNIVERSO, POR ISSO É TÃO PROVÁVEL MESMO SER DE MATÉRIAS, O NEUTRINO É UM FÉRMION QUE INTERAGE APENAS POR MEIO DA INTERAÇÃO COM A FORÇA FRACA E A GRAVITAÇÃO. ELE É CHAMADO ASSIM PORQUE É ELÉTRICAMENTE NEUTRO, POSSUI MASSA EXTREMAMENTE PEQUENA, BASTANTE MENOR DO QUE A MASSA DAS OUTRAS PARTÍCULAS ELEMENTARES CONHECIDAS, OS NEUTRINOS SÃO MUITO DIFÍCEIS DE SEREM DETECTADOS POIS ATÉ MESMO AS FORÇAS QUE INTERAGEM COM ELA POSSUEM POUCA ALCANCE E POR ISSO MESMO ELAS NÃO INTERAGEM COM A FORÇA FORTI, OS NEUTRINOS MUDAM DE SABOR NA PARTIR DE SUAS INTERAÇÕES CRIANDO 3 TIPOS: NEUTRINO DO UP, NEUTRINO DO DOWN, E NEUTRINO DO TAU, E PARA CADA NEUTRINO EXISTE UMA ANTI PARTÍCULA CORRESPONDENTE CHAMADA "ANTI NEUTRINO" POSSUINDO SINAIS OPOTOS À SÓM CARREGA ELÉTRICA, OS NEUTRINOS SÃO CRIADOS POR DECAÍMENTOS RADIOATIVOS E REAÇÕES NUCLEARES ENTRE OUTROS TIPOS...

Fonte: Própria, 2021

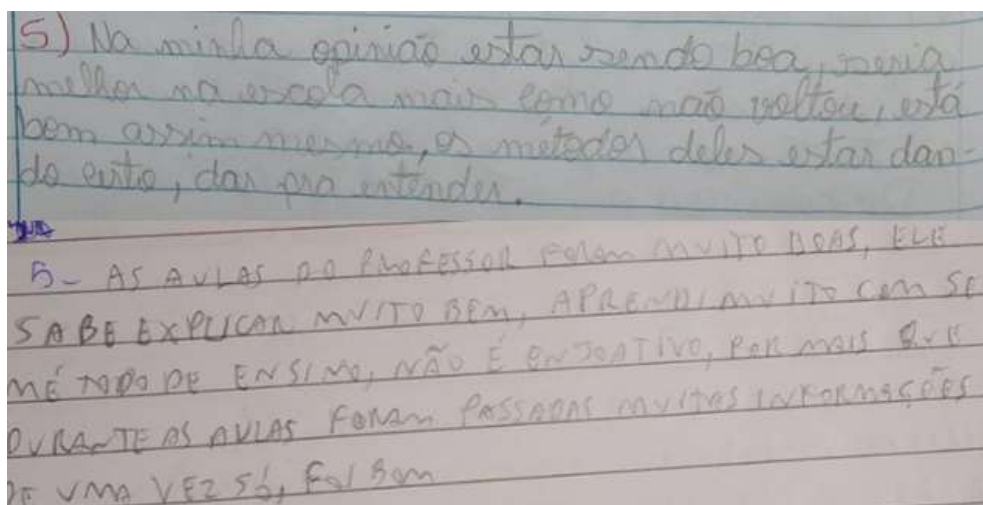
Figura 17- Pergunta: “O que você sugere para melhorar sua aprendizagem em Física?”



4) Ter mais aulas no meet.
4- MINHA SUGESTÃO É CONSEGUIR MAIS MATERIAL DE ESTUDOS DINÂMICOS DE FÁCIL FIXAÇÃO, COM VÍDEOS DIVERSOS E MÚSICAS, POIS É MAIS FÁCIL PARA MIM.

Fonte: Própria, 2021.

Figura 18- Pergunta: “Dê sua opinião sobre as aulas do Professor e do método de ensino utilizado por ele”.



Fonte: Própria, 2021.

5.6 Aula 6: Observando a diferenciação progressiva e indícios de aprendizagem significativa na fala dos estudantes através de aula dialogada interativa

Durante esse último encontro pude fazer uma análise pormenorizada das falas dos estudantes tanto durante a exposição sobre o LHC como durante a revisão geral sobre as atividades da SD.

Notei que os estudantes se familiarizaram bastante com os férmions, com os bósons e, sobretudo com os neutrinos. O mais interessante é que sabiam da ligação inseparável entre esses dois primeiros, isto é, que férmions e bósons através de interações se juntavam para criar coisas.

Não entendiam por que não conhecíamos ainda a massa absoluta dos neutrinos e para alguns era muito difícil aceitar que somos transpassados continuamente por neutrinos. Para explicar por que a matéria é quase transparente aos neutrinos fiz uma analogia com o único campo de futebol da cidade: “Imaginem que o átomo seja do tamanho do campo de futebol de Mutum. O núcleo desse átomo seria uma azeitona no centro do campo e todo o gramado do campo seria um espaço vazio. É por isso que os neutrinos podem passar pelas coisas sem serem percebidos: o átomo para ele é um vazio”. A partir desse artifício mental pude explicar o porquê de apenas 2 ou 3 neutrinos serem detectados entre bilhões que

passam pelos detectores. Outros questionaram o porquê de os neutrinos terem sido descobertos somente recentemente (1956) se são tão abundantes no Universo. Respondi que era uma questão tecnológica.

Dois estudantes me surpreenderam com a pergunta: “Professor então tudo que existe são tipo grãos de café?” Então respondi: Sim. Tudo é granulado, inclusive suspeita-se que o espaço também é formado por grãos de espaço (10^{-98} m?). Também acharam muito estranho conhecermos somente 0,5% da composição do Universo. Outro questionamento de um estudante: “Por que os neutrinos podem me falar como o Universo era pouco tempo depois do *big bang*?”. Respondi que é porque não perdem nem um pedacinho quando chegam a Terra. Outra pergunta interessante: “Professor, se o neutrino oscilar, então é igual a um pêndulo? Respondi: Não é a mesma coisa não. Oscilar aqui é no sentido de um neutrino poder se transformar em outro. Também acharam fantástico que todos os átomos são formados dentro das estrelas e disseram que leram que os neutrinos poderiam ser uma coisa (matéria) escura do Universo.

Nos parágrafos procurei sempre responder às perguntas do estudante de forma contextualizada. Agora, no quadro 5 abaixo transcrevo alguns questionamentos que fiz aos estudantes ao longo desse último encontro da pesquisa e suas respectivas respostas. As frases das repostas dos estudantes são palavras deles mesmos que anotei durante a aula.

Quadro 5: Dados do desempenho dos alunos durante aula dialogada.

Perguntas do Professor	Respostas dos Estudantes
O que é uma partícula?	Algo muito pequenininho. Tem também quando ela é elementar e ai não tem nada dentro dela.
O átomo é uma partícula elementar?	Não, dentro dele tem prótons e nêutrons. Esses também têm coisas pequenas dentro deles que se chamam quarks e que ficam colados no outro por uma cola chamada glúons. É a força nuclear forte.
O que é modelo padrão?	Tipo um bula que fala as propriedades das partículas e como se juntas para formar as coisas do mundo.
O elétron e o quark são elementares?	Não, por que não precisam de outros pedacinhos para formas eles. Não

	tem nada dentro deles.
O que é em Física um campo?	Por exemplo, se joga uma pedra em uma lagoa lá de casa vai aparecer um monte de ondinhas. O campo seria a água e a ondinha correndo na água é uma partícula. Vi isso em um vídeo na internet e tava escrita no texto que você enviou no zap pra gente.
O que é um neutrino? É mais leve ou mais pesado que o elétron?	Sei que é uma coisa muito pequena e está para tudo quanto é lado e também li que passa um monte em minha unha agora. É muito levinho mesmo, muito menos que o elétron. E também não é positivo e nem negativo e por isso é neutro.
Quem falou pela primeira vez que o neutrino existe? Por quê?	Foi um cara chamado Pauli em 1930 acho. Mas só viram ele mesmo só em 1956. Tá no texto que o senhor enviou para gente. Ele resolveu um problema para salvar uma teoria.
O que quer dizer que o neutrino pode oscilar?	Eu sei responder. É por que um pode virar outro. É como camaleão, que fica verde de repente. Tinha confundido com o balanço de pêndulo de relógio. O neutrino carrega com ele tipo os três sabores ao mesmo tempo.
Onde os átomos são feitos.	Essa eu quero responder. Pensei que era no ar, mas nas aulas lembro que você disse que são fabricas dentro da estrelas.
O que é o átomo de Bohr?	É aquele que o elétron só pode caminhar em círculo em alguns lugares permitidos.
Como era o átomo Schrödinger, aquele que falei durante as aulas?	Professor Francisco, essa vou responder, essa ai. O átomo dele é tipo uma caixa de maribondos com todos os maribondos voando do lado de fora, mas na verdade é um só que está em todos os lugares ao mesmo tempo. O maribondo é um elétron, mas ninguém pode saber onde ele está.
Qual foi a proposta Majorana quanto aos neutrinos?	Tem uma pergunta dessa no questionário 2 e eu sei responder. Pode? O neutrino e antineutrino é a mesma coisa. Lembro disso quando o Senhor falou na aula. Mas ninguém provou nada disso ai ainda.
Para quê servem om neutrinos?	Essa eu acho que sei. Serva para falar como era o Universo pouquinho depois que começou a existir. Serve também para ver o mundo com o

	telescópio de neutrinos. Você falou disso e tem também no questionário número dois.
Lembra quando comparei um detector com uma peneira? É fácil pegar o neutrino?	Opa já usei peneira para panhar café. Por isso lembrei do que o senhor falou. Não. É muito difícil.
Por que é difícil pegar ele então?	Tem essa questão também no questionaram. É por que quem comanda ele são duas forças muito fraquinhas, a fraca e gravitacional.
Os prótons são formados de quê? E os nêutrons?	Vou responder essa. De 2 quarks para cima e um para baixo e ficam juntos por causa da cola da força forte e o nêutron de dois quarks para baixo e um pra cima.
Qual o sabor de neutrinos que você mais gosta?	Lembrei de sorvete, por isso quando você falou disso nas aulas aprendi o nome deles e também dos antisorvetes. Então é Neutrino do elétron, do múon e do tau e os outros é antineutrino do elétron, do múon e do tau. Acertei?
Em uma de nossas aulas falei do neutrino estéril. Sabem falar para mim o que é?	Opa. Estéril que sei é quando uma pessoa não pode ter filho. Brincadeira professor. Lembro sim. Quase morri para ler aqueles textos que mandou para gente. Esse neutrino só sente a força gravitacional, mas não foi achado ainda.
Falei na aula do problema dos neutrinos solares. Vou explicar melhor. Por exemplo, sai 100 Neutrinos do Sol e só chegava na Terra. Sabe explicar isso?	Se eu pudesse seria como os neutrinos. Posso ser três coisas ao mesmo tempo. É assim oh Francisco: é que muitos neutrinos do sol viram os outros dois e assim dá diferença, né.
Quais benefícios científicos e sociais a previsão de Pauli dos neutrinos trouxeram para a sociedade?	Sei fazer esses. Quase ninguém acertou na avaliação. E você já tinha respondido aqui. É assim oh: apareceu novas teorias, tecnologias e muita emprego e renda em várias partes do mundo.
No questionário de opinião todos vocês avaliaram nossa pesquisa sobre neutrinos com com uma nota de 95 pontos em 100 pontos. O que acham que faltou para aprenderem mais?	Pode falar Professor? Todos gostaram e aprenderam muito. Podia ter mais aulas no meet; vídeos; também música e até algumas experiências Não teria como fazer experiências não?
Podem falar um pouco ai sobre os neutrinos e supernovas.	Espera ai essa eu quero fazer. Gosto de tudo que fala de estrelas. Professor é uma grande explosão. Você falou muito disso. Tava até meio repetido. Lá é feito os átomos de carbono do esqueleto de um boi; o metal de uma roçadeira de pasto.

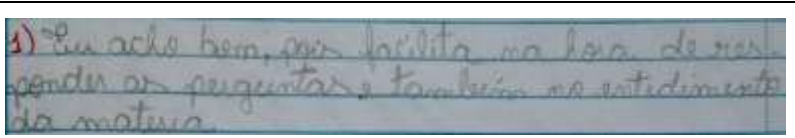
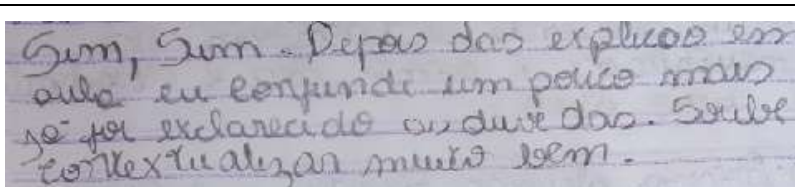
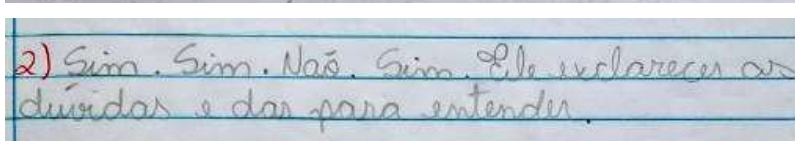
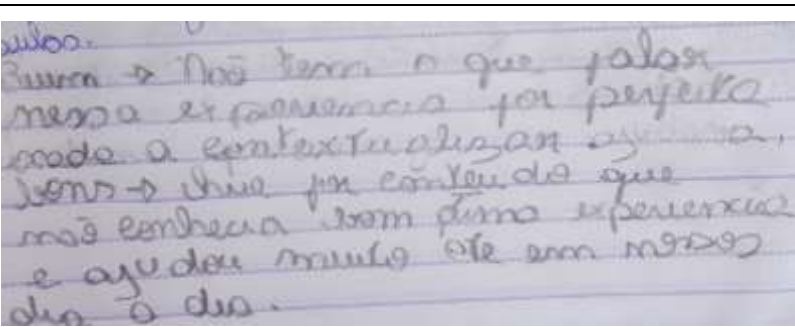
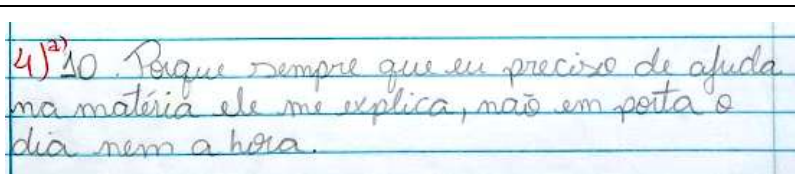
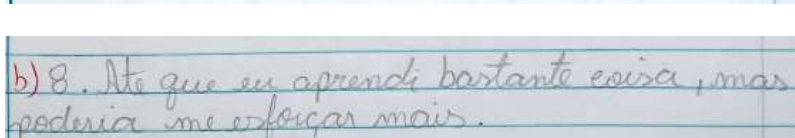
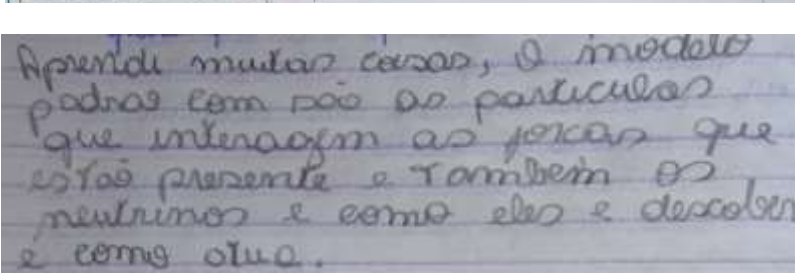
	Essa tal de supernova cospi um monte de neutrinos de muita energia: 99% desse estrondo é levado pelos neutrinos. Tô certo? Então valeu Professor.
--	---

Fonte: Própria, 2021

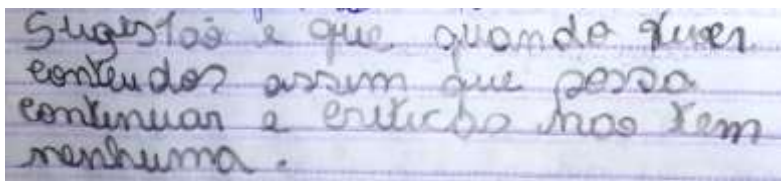
No final dessa análise senti que cumpri uma de minhas metas principais: qual seja que os estudantes percebessem que tudo que existe são “grãos”, são partículas elementares de alguma coisa e que se relacionam via interações para fazer tudo que conhecemos. Somente nesse instante tive a segurança e a certeza que minha pesquisa teve êxito, pois pude modificar pessoas para que enxergassem o mundo de uma forma radicalmente diferente daquela que tinham antes da intervenção investigativa.

Aproveitei o ensejo também para analisar algumas respostas dos estudantes quanto ao questionário de opinião (Anexo E). Para isso, no quadro 6 abaixo são apresentadas as perguntas (coluna esquerda) e a síntese das respostas dos estudantes a cada questão (coluna da direita) do questionário de opinião.

Quadro 6: Perguntas versus respostas

<p>Qual sua opinião sobre o uso de textos em nossas atividades em sala de aula?</p>	
<p>-O professor foi receptivo com você quanto à suas dúvidas? -Você entendeu a explicação do professor? -Você ainda teve dúvidas após as explicações do Professor? -O Professor soube colocar em sua vivência ou não a matéria ensinada?</p>	 
<p>Ressalte os pontos ruins e bons da metodologia empregada em nossas aulas.</p>	
<p>Em uma escala de (0 a 10) pontos qual sua nota para: a) Atuação do Professor: a.1) Justificativa: b) Aquilo que você aprendeu: b1) Justificativa:</p>	  

Escreva algumas sugestões e críticas à nossa sequência didática.



Sugestão é que quando tiver conteúdos assim que possa continuar a criticar não tem nenhuma.

Fonte: Própria, 2021.

Considerações finais

Ao longo de mais vinte anos de docência em Física exercida nos estados do Espírito Santo, Minas e Distrito federal jamais tinha presenciado estudantes tão motivados por conhecimentos da Física de fronteira. Em nosso entendimento, a motivação é a base sobre a qual podemos edificar conhecimentos significativos que podem ficar para sempre na rede cognitiva desses estudantes.

Durante vários momentos ao longo da aplicação da SD desse empreendimento investigativo fiquei impressionado e meio perdido quanto a alguns questionamentos profundos feitos pelos estudantes. Na volta às aulas presenciais fui abordado várias vezes nos corredores da escola pelos mesmos 11 estudantes dessa pesquisa além de outros interessados em Física de fronteira. Ambos falavam a mesma língua: *“se o senhor for dar outros cursos eu quero participar. Não me deixa de fora, hein!”* Que maravilha ensinar para quem quer verdadeiramente aprender!

Pudemos verificar na análise da fala dos estudantes e nas respostas das atividades que a SD permitiu que esses adolescentes adquirissem um conhecimento significativo e sabemos que estão aptos a desenvolverem a compreensão de conhecimentos mais complexos.

Os estudantes conseguiram passear pelos conceitos de férmions e bósons com uma destreza que me impressionou; sabem que tudo são grãos e que por intermédio dos bósons esses férmions formam a matéria bariônica que conhecemos; também estão conscientes de que o Modelo Padrão está em construção e que também a “verdade” que conhecemos é provisória.

Também verificamos que através da contextualização podemos facilitar muito a compreensão das quatro interações da natureza pelos estudantes.

Outro fato marcante é que compreenderam com profundidade o motivo da proposição do neutrino por Pauli tanto no sentido do desenvolvimento da Física teórica advindo disso como seu impacto na geração de emprego e renda. “Um dos estudantes me disse: Professor penso que na época que Pauli postulou o neutrino nem ele sabia da repercussão disso”.

Não poderia deixar de testemunhar que ao conversar informalmente com esses estudantes após nossa pesquisa, constatei que sabem definir razoavelmente bem os neutrinos e suas aplicações tecnológicas, que têm massa e são bastante numerosos. Também notei que sabem o que é um férmion de Dirac e que neutrino poderia ser uma partícula de Majorana.

Esses jovens, em sua maioria, conseguiram progressivamente diferenciar cada subunção partícula do Modelo padrão, reconciliando-os para formarem o todo.

Ao longo do processo tivemos indícios de que a SD no formato de UEPS associada ao Ensino sob Medida com tarefas de leitura potencialmente significativas promoveram sim a aprendizagem significativa. Tanto é que o método foi elogiado e aprovado pelos estudantes da pesquisa, pela diretora da escola e por alguns Professores mais abertos a desafios educacionais.

Sabe-se que não há investigação científica com 100% de eficiência. E isso não poderia ser diferente conosco. Como podemos verificar nos resultados obtidos ao longo da aplicação da SD, há vários pontos positivos no sentido de os estudantes terem aprendido de maneira significativa. Mas também podemos destacar pontos negativos tais como talvez um pouco de excesso quanto às atividades na forma de tarefas de leitura e questionários. Mas também podemos justificar esse fato no sentido de querer dar uma *formação* de qualidade para nossos estudantes e não apenas *informações*. Sem sombra de dúvidas nossa pesquisa foi um sucesso! Um exemplo de responsabilidade com a formação de nossos estudantes; de resiliência frente ao caos pandêmico; de perseverança e de *esperança* de dias melhores na vida intelectual e profissional desses estudantes. Nossa equipe de pesquisa se sente orgulhosa em saber que podemos ensinar com sucesso tópicos de Física Contemporânea no ensino médio da escola Dionysio Costa.

Também afirmamos que o sucesso da investigação deveu-se, sobretudo: à motivação dos estudantes-pesquisadores e do Professor-pesquisador; ao material potencialmente significativo e à metodologia ativa Ensino sob Medida; à UEPS e às aulas expositivas dialogadas e interativas; e à sólida formação acadêmica do aplicador.

Também acreditamos que com adequações pertinentes podemos estender a aplicação da SD para o ensino fundamental. O desafio está lançado, boa sorte!

Referências Bibliográficas

[1] COMBES, Françoise. **A matéria escura no Universo** (cadeira de Cosmologia e Galáxias): aula inaugural no Collège de France, pronunciada em 18 de dezembro de 2014. Tradução: Professor Francisco Elias Gomes.
Disponível em: <<https://www.college-de-france.fr/site/francoise-combes/inaugural-lecture-2014-12-18-18h00.htm>>. Acesso em: 15 dez. 2020.

[2] de Paulo, I.J.C. **O TEXTO DIDÁTICO DE APOIO COMO UM PRODUTO EDUCACIONAL -UMA OPÇÃO VIÁVEL**. Coordenadora CPG Nacional MNPEF-SBF.

[3] Moreira, M.A. (1995). **Monografia nº 10 da Série Enfoques Teóricos** Instituto de Física da UFRGS.
Disponível em: <https://wp.ufpel.edu.br/ayala/files/2019/09/ausubel_moreira.pdf>. Acesso em: 20 set. 2021.

[4] Moreira, Marco A. **O QUE É AFINAL APRENDIZAGEM SIGNIFICATIVA?**(After all, what is meaningful learning?). Instituto de Física – UFRGS.
Disponível em: <<http://moreira.if.ufrgs.br/oqueeafinal.pdf>>. Acesso em: 23 ago. 2021.

[5] DAusubelCV-**David Ausubel**.
Disponível em: <www.davidausubel.org>. Acesso em: 14 set. 2021.

[6] yes, therapy helps. **La théorie de l'apprentissage significative de David Ausubel**. Disponível em: <<https://yestherapyhelps.com/the-significant-learning-theory-of-david-ausubel-11782>>. Acesso em: 17 jul. 2020.

[7] Base nacional Comum Curricular. **Aprendizagem significativa, um conceito cognitivista**.
Disponível em:
<<http://basenacionalcomum.mec.gov.br/implementacao/praticas/caderno-de-praticas/aprofundamentos/191-aprendizagem-significativa-breve-discussao-acerca-do-conceito>>. Acesso em 20 set. 2021.

[8] Moreira, Marco A. (2006). **UNIDADES DE ENSINO POTENCIALMENTE SIGNIFICATIVAS – UEPS*** Potentially Meaningful Teaching Units – PMTU. Instituto de Física – UFRGS/Porto Alegre-RS.
Disponível em: <<https://www.if.ufrgs.br/~moreira/UEPSport.pdf>>. Acesso em: 16 mai. 2021.

[9] Sociedade Brasileira de Física (SBF). **O Modelo Padrão da Física de Partículas**. Revista Brasileira de Ensino de Física, v.31, n.1, 1306 (2009). Disponível em: <<http://moreira.if.ufrgs.br/modelopadrao.pdf>>. Acesso em: 24 jul. 2020.

[10] Sociedade Brasileira de Física (SBF). **Partículas e interações**. Física na Escola, v. 5, n. 2, 2004.

Disponível em: <<http://www.sbfisica.org.br/fne/Vol5/Num2/v5n1a03.pdf>>.
Acesso em: 24 jul. 2020.

[11] NEUTRINO ENERGY/WIKIPEDIA. **Neutrino**.
Disponível em: < <https://en.m.wikipedia.org/wiki/Neutrino/> >. Acesso em: 19 jan. 2020.

[12] MacTutor. History of Mathematics Archive, 2003. **Wolfgang Pauli**.
Disponível em:<<https://mathshistory.st-andrews.ac.uk/Biographies/Pauli/>>.
Acesso em: 25 jul. 2020.

[13] Ministério da Ciência, Tecnologias e Inovações. Centro Brasileiro de Pesquisas Físicas (CBPF). **Ettore Majorana: O Drama de Consciência de um Jovem Cientista**. Disponível em:
<http://www.cbpf.br/~cirto/MecEstNaoExten_HTML/AULAS/Aula_03/Morcelle_&_Campbell_&_Tavares_&_Vugman_%28Ettore_Majorana_O_Drama_De_Consciencia_De_Um_Jovem_Cientista%29_%5BCBPF_Ciencia_E_Sociedade_2006%5D.pdf>.
Acesso em: 19 jan. 2020.

[14] ARAUJO, I. S. ; MAZUR, E. **INSTRUÇÃO PELOS COLEGAS E ENSINO SOB MEDIDA: UMA PROPOSTA PARA O ENGAJAMENTO DOS ALUNOS NO PROCESSO DE ENSINO/APRENDIZAGEM DE FÍSICA**. Caderno Brasileiro de Ensino de Física, v.30, n.2 (2013). Instituto de Física UFRGS -Porto Alegre- RS Harvard University -Cambridge -Massachusetts –EUA.
Disponível em: <<https://periodicos.ufsc.br/index.php/fisica/article/view/2175-7941.2013v30n2p362/24959>>. Acesso em: 20 fev. 2021.

[15] THEGIST (The Glasgow Insight into Science and Technology).
Can Neutrino Oscillation Explain the Universe?
Disponível em: <<https://the-gist.org/2016/09/can-neutrino-oscillation-explain-the-universe/>>. Acesso em: 15 jan. 2021.

[16] TERRAZZAN, E. A.. **Inserção de física moderna e contemporânea no ensino de física na escola de 2º Grau**. Caderno Catarinense de Ensino de Física, Florianópolis, SC, v. 9, n. 3, p. 209-214, 1992.
Disponível em: <https://periodicos.ufsc.br/index.php/fisica/article/view/7392/6785>.
Acesso em: 20 abr. 2021.

[17] CAVALCANTE, M. A.; TAVOLARO, C. R. C. **Uma oficina de física moderna que vise a inserção no ensino médio**. Caderno Catarinense de Ensino de Física, Florianópolis, SC, v. 18, n. 3, p. 298-316, 2001.
Disponível em: <<https://periodicos.ufsc.br/index.php/fisica/article/view/10027/9274>>.
Acesso em: 20 set. 2021.

[18] SOARES, T.C; JÚNIOR, H.B; HELAYEL-NETO, J.A.; SANTOS, A, (ilustração). **Física de Partículas vista pelas Interações Fundamentais e Formação de Professores**. Editora São Paulo: Editora Livraria de Física, 2018.

[19] OSTERMANN, F. **Um Texto para Professores do Ensino Médio sobre Partículas Elementares**. Revista Brasileira de Ensino de Física, vol. 21, nº. 3, Setembro, 1999. UFRS, Instituto de Física/Porto Alegre - RS – Brasil. Disponível em: <<https://www.fisica.net/nuclear/fisicaparticulas.pdf>>. Acesso em: 15 dez. 2020.

[20] MOREIRA, Marco Antônio. **O Modelo Padrão da Física de Partículas**. Revista Brasileira de Ensino de Física, v. 31, n. 1, 1306 (2009). Disponível em: <https://www.scielo.br/j/rbef/a/sMFh5cP7J9S8RzcXGsmV3fR/?lang=pt>. Acesso em: 19 nov. 2020.

[21] Wikipédia. **Physique des Particules**. Disponível em: http://fr.wikipedia.org/wiki/physique_des_particules. Acesso em: 25 Ago. 2021.

[22] MOREIRA, Marco A. (2006). **A Teoria da aprendizagem Significativa e sua implementação em sala de aula**. Brasília: Editora Universidade de Brasília. Disponível em: https://madmunifacs.files.wordpress.com/2016/04/a_teor%C3%ADa_da_aprendizagem_significativa.pdf. Acesso em: 10 dez. 2020.

[23] TEGMARK, M. **Our Mathematical Universe: My Question for the ultimate Nature of Reality**. New York: Vintage Paperbacks, 2015. 432 pages.

[24] MOREIRA, Marco Antônio. **Partículas e interações**. Física na Escola, v. 5, n. 2, 2004. Disponível em: <http://www.sbfisica.org.br/fne/Vol5/Num2/v5n1a03.pdf>. Acesso em: 30 jul. 2021.

[25, 26] Laboratoire d'Astrophysique de Marseille. **Physique des Particules**. Disponível em: <http://astronomie.fr/6eme_partie/physiqueParticules.php#Repr%C3%A9atome>. Acesso em: 20 Mai. 2021.

[27] NOGUEIRA, J.A. **Aula de Mecânica Quântica do MNPEF/UFES**.

[28] WIKIPÉDIA. **Estatística de Bose-Einstein**. Disponível em: <https://fr.wikipedia.org/wiki/Statistique_de_Bose-Einstein>. Acesso em: 25 Out. 2021.

[29] WIKIPÉDIA. **Estatística de Fermi-Dirac**. Disponível em: <https://fr.wikipedia.org/wiki/Statistique_de_Fermi-Dirac>. Acesso em: 25 Out. 2021.

[30] Laboratoire d'Astrophysique de Marseille. **Principe d'exclusion de Pauli, comportement des particules**. Disponível em: <http://astronomie.fr/6eme_partie/physiqueParticules.php#Repr%C3%A9atome>. Acesso em: 02 Nov. 2021

[31] Laboratoire d'Astrophysique de Marseille. **État quantique.**

Disponível em:

<http://astronomia.fr/6eme_partie/physiqueParticules.php#Repr%C3%A9atome>

Acesso em: 27 Jun. 2021.

[32] Symmetry: dimensions of the particles. **The legace of César Lattes**

Disponível em: <<https://www.symmetrymagazine.org/article/the-legacy-of-cesar-lattes>>.

Acesso em: 27 fev. 2021.

[33] Wikipédia. **Neutrino.**

Disponível em: <<https://en.m.wikipedia.org/wiki/Neutrino>>. Acesso em: 20 jul. 2021.

[34]THE GLASGOW INSIGTH INTO SCIENCE AND TECHNOLOGY (THEGIST) **Can Neutrino Oscillation Explain the Universe? .**

Disponível em: <https://the-gist.org/2016/09/can-neutrino-oscillation-explain-the-universe/>. Acesso em: 30 set. 2021.

[35] Antares, un télescope à neutrinos de haute énergie. **Commissariat à l'énergie atomique et aux énergies alternatives.**

Disponível em:

<http://irfu.cea.fr/dedip/Phoce/Vie_des_labos/Ast/ast_technique.php?id_ast=368&id_unit=5>. Acesso em: 30 mai. 2021.

[36] History of the Neutrino. **Brief Overview.**

Disponível em: <<https://neutrino-history.in2p3.fr/brief-overview/>>. Acesso em: 28 Out. 2021.

[37].History of the Neutrino. **Introduction to Neutrino Sources**

Disponível em: <https://neutrino-history.in2p3.fr/introduction-to-neutrino-sources/>)

Acesso em: 28 Out. 2021.

[38] APOLLONIO, M. et al. **CHOOZ Collab.** Phys.Lett. B 466 415 (1999)

[39] DE KERRET, H. et al. **Double Chooz θ_{13} measurement via total neutron capture detection.** 25/04/2020.

Disponível em:<https://www.nature.com/articles/s41567-020-0831-y?error=cookies_not_supported&code=5acf2064-eeed-45d9-80e5-a148e14a3f96>.

Acesso em: 24 fev. 2021.

[40] Helicidade e Quiralidade. **NEUTRINOS.**

Disponível em: <<https://propg.ufabc.edu.br/mnpef-sites/neutrinos/index.php/propriedades/helicidade-quiralidade/>>.

Acesso em: 26 mar. 2021.

[41] ROMEO, J. **How do neutrinos get their mass?**, 2020.

Disponível em: < <https://www.symmetrymagazine.org/article/how-do-neutrinos-get-their-mass#:~:text=But%20where%20does%20that%20mass,interactions%20with%20the%20Higgs%20boson>>.

Acesso em: 24 mar. 2021.

[42] History of the Neutrino. **Supernovae Neutrinos.**

Disponível em: <https://neutrino-history.in2p3.fr/supernovae-neutrinos/>.

Acesso em: 20 Jul. 2021.

[43] History of the Neutrino. **Neutrino and Cosmology.**

Disponível em: <https://neutrino-history.in2p3.fr/neutrino-and-cosmology/>.

Acesso em: 20 Jul. 2021

[44]History of the Neutrino. **The Earth seen through Neutrinos**

Disponível em: <https://neutrino-history.in2p3.fr/the-earth-seen-through-neutrinos/>.

Acesso em: 22 Jul. 2021.

[45] ENERGY.GOV. **The particle of Physics of you.**

Disponível em: <https://www.energy.gov/articles/particle-physics-you>.

Acesso em: 28 Jul. 2021

[46] Wolfgang Pauli (1900-1958).**ETH Zürich (ETH library).**

Disponível em :<<https://library.ethz.ch/en/locations-and-media/platforms/short-portraits/pauli--wolfgang.html>>. Acesso em: 21 mar. 2021.

[47] KLEIN. E. Wolfgang Pauli (1900 – 1958). **Site de vulgarization scientifique d'Etienne Klein.**

Disponível em:<<http://etienneklein.fr/wolfgang-pauli/#:~:text=Wolfgang%20Pauli%20est%20n%C3%A9%20%C3%A0,professeurs%20pour%20amuser%20ses%20camarades>>.

Acesso em: 21 mar. 1921.

[48] Wolfgang Pauli. **FUTURA SCIENCE.**

Disponível em: <https://www.futura-sciences.com/sciences/personnalites/physique-wolfgang-pauli-924/>>. Acesso em: 21/03/2021.

[49] LA RADIOACTIVITÉ.COM. **Radioactivité beta (β)**

Disponível em: <https://www.laradioactivite.com/site/pages/laradioactivitebeta.htm>

Acesso em: 28 nov. 2021.

[50] Reflets de le Physique n^o 24/mai-2011. **Le neutrino est-il identique à son antiparticule?**

Disponível :<<https://www.refletsdelaphysique.fr/articles/refdp/pdf/2011/02/refdp201124p11.pdf>>. Acesso em 20 out. 2021.

[51] Banque de Savoirs. **Le neutrino et l'énigme Majorana.**

Disponível em: <http://www.savoirs.essonne.fr/thematiques/la-matiere/physique/le-neutrino-et-lenigme-majorana/>. Acesso em: 30 dez. 2021.

[52] UNICARIOCA. **Você sabe o que é uma sequência didática?**

Disponível em: <https://www.unicarioca.edu.br/acontece/noticias/voce-sabe-o-que-e-uma-sequencia-didatica>>. Acesso em: 12 nov. 202.

[53] LAKATOS, E. M.; MARCONI, M. A. **Fundamentos metodologia científica.**

4.ed. São Paulo: Atlas, 2001.

Disponível em: http://docente.ifrn.edu.br/olivianeta/disciplinas/copy_of_historia-

i/historia-ii/china-e-india/view>

Acesso em: 10 out. 2021.

[54] DE OLIVEIRA, M.F. **METODOLOGIA CIENTÍFICA: um manual para a realização de pesquisas em administração**. Universidade Federal de Goiás/Campus Catalão-GO/2011.

Disponível em:

<https://files.cercomp.ufg.br/weby/up/567/o/Manual_de_metodologia_cientifica_-_Prof_Maxwell.pdf>

Acesso em: 12 out. 2021.

[55] UOL. **BRASIL ESCOLA**. EXERCÍCIOS SOBRE PARTÍCULAS DE UM ÁTOMO.

Disponível em: <<https://exercicios.brasilecola.uol.com.br/exercicios-quimica/exercicios-sobre-particulas-um-atomo.htm>>.

Acesso em: 20 dez. 2020.

[56, 57, 58, 59] UOL. **BRASIL ESCOLA**. EXERCÍCIOS SOBRE MODELO-PADRÃO DA FÍSICA DE PARTÍCULAS.

Disponível em <<https://exercicios.brasilecola.uol.com.br/exercicios-fisica/exercicios-sobre-modelo-padrao-fisica-particulas.htm#:~:text=Os%20dois%20grupos%20principais%20do,f%C3%A9rmions%20s%C3%A3o%20pr%C3%B3pria%20mat%C3%A9ria>>.

Acesso em: 20 dez. 2020.

[60] Qconursos.com. **Questões de Concursos**.

Disponível em <<https://www.qconursos.com/questoes-de-vestibular/questoes/4b5df869-30>>.

Acesso em: 20 dez. 2020.

[61] UOL. **BRASIL ESCOLA**. EXERCÍCIOS SOBRE FÍSICA DE PARTÍCULAS.

Disponível em:

<<https://exercicios.brasilecola.uol.com.br/exercicios-fisica/exercicios-sobre-fisica-particulas.htm#:~:text=Quest%C3%A3o%20,recebem%20o%20nome%20de%20b%C3%B3sons>>.

Acesso em: 20 dez. 2020.

[62] FERNANDO, J. L. L **Teoria de Campo e Supersimetria**

Disponível em: <<https://sites.google.com/view/professorfernandoleal/teoria-de-campo-e-supersimetria?authuser=0>>.

Acesso em 11 abr. 2022.

[63] WIKIPÉDIA. **Particule virtuelle**.

Disponível em:

<https://fr.wikipedia.org/wiki/Particule_virtuelle#:~:text=En%20physique%2C%20une%20particule%20virtuelle,fait%20du%20principe%20d'incertitude>.

Acesso em: 12 abr. 2022.

[64] O experimento de Stern-Gerlach e o spin do elétron: um exemplo de quasi-história. Disponível em:

<<https://www.scielo.br/j/rbef/a/g7F4wDfZYtBSGjB66bg9B8L/?format=pdf&lang=pt>>

Acesso em: 12 abr. 2022.

[65] DIAS, S.A. Centro Brasileiro de Pesquisas Físicas-CBPF. **A TEORIA QUÂNTICA DE CAMPOS E SEU PAPEL NA DESCRIÇÃO DAS INTERAÇÕES FUNDAMENTAIS**. Caderno de Física da UEFS 04 (01 e 02):161-175, 2006
Disponível em: < <https://sites.google.com/view/professorfernandoleal/f%C3%ADsica-e-outras-ci%C3%A4ncias>>. Acesso em 12 sbr. 2022.

[66] PEREIRA, R. G; MIRANDA, E. **Introdução à Teoria Quântica de Campos: do Oscilador Harmônico ao Campo Escalar Livre**. Rev. Bras. Ensino Fís. JUN 2002.
Disponível em: <<https://doi.org/10.1590/S1806-11172002000200021>>.
Acesso em: 12 abr. 2022.

[67] HELAYËL-NETO, J. A. **Aquele auspicioso 2 de Janeiro de 1928: $(i \gamma \cdot \partial - m) \psi = 0$** . Disponível em: <http://www.sbfisica.org.br/v1/home/index.php/pt/acontece/646-ha-90-anos-fisica-iniciava-o-casamento-entre-a-mecanica-quantica-e-a-relatividade>.
Acesso em: 15 abr. 2022.

Apêndice

Anexo 1



Terceira aula

Inserindo o estudo dos Neutrinos no ensino médio

“Um mundo com profusão de informações falsas precisa de verdadeiros professores”.

Conferência dos professores ganhadores do prêmio Nobel

“Quem aqui fala de harmonia? Você ignora o que é o “mundo” (Universo)? Uma luta atroz, monstruosa, na sombra que agita a discórdia... Ó quedas, colapsos, acasos, luta, espuma, choques sem número!” . Elémir Bourges (La Nef, 1904)

1



- Definição de Ciência: método científico para criar e testar modelos (Rosenfeld Instituto de Física Teórica, UNESP)
- Metodologia científica
 - Definição: ferramenta de investigação científica e/ou tecnológica
 - Pilares: observação e formulação de hipóteses; realização de simulações e/ou experimentações; compilação e interpretação dos resultados; construção de teoria; redação de artigo; análise dos pares; e publicação em um periódico reconhecido e replicação
 - Tudo que não é consistente com os fatos deve ser descartado ou revisto
 - Exemplos
- Simulação Computacional (Numérica) e Modelagem (Numérica ou analógica)
 - Para que serve?
 - Aspectos físicos da Natureza tomados como grandezas matemáticas e equacionados algebricamente;
 - Fenômenos determinísticos (homogêneo ou lineares) e indeterminísticos (não-homogêneos ou não-lineares)
 - Modelizar/prever/antecipar
 - Confiabilidade

2



PARTÍCULA ELEMENTAR

-Partícula não é um corpúsculo, um corpo diminuto: por exemplo, podem não ter massa e além disso não têm posição situada, *i.e.*, não podem ser localizadas com precisão (MOREIRA, M.A. Física na Escola, v. 5, n. 2, 2004)

-Partícula quântica não tem trajetória definida

-Podemos pensar o campo quântico como a superfície de um lago calmo onde não vemos nada de anormal. De repente você lança uma pequena pedra nesse lago e então a água sobe um pouco. Essa perturbação é uma partícula

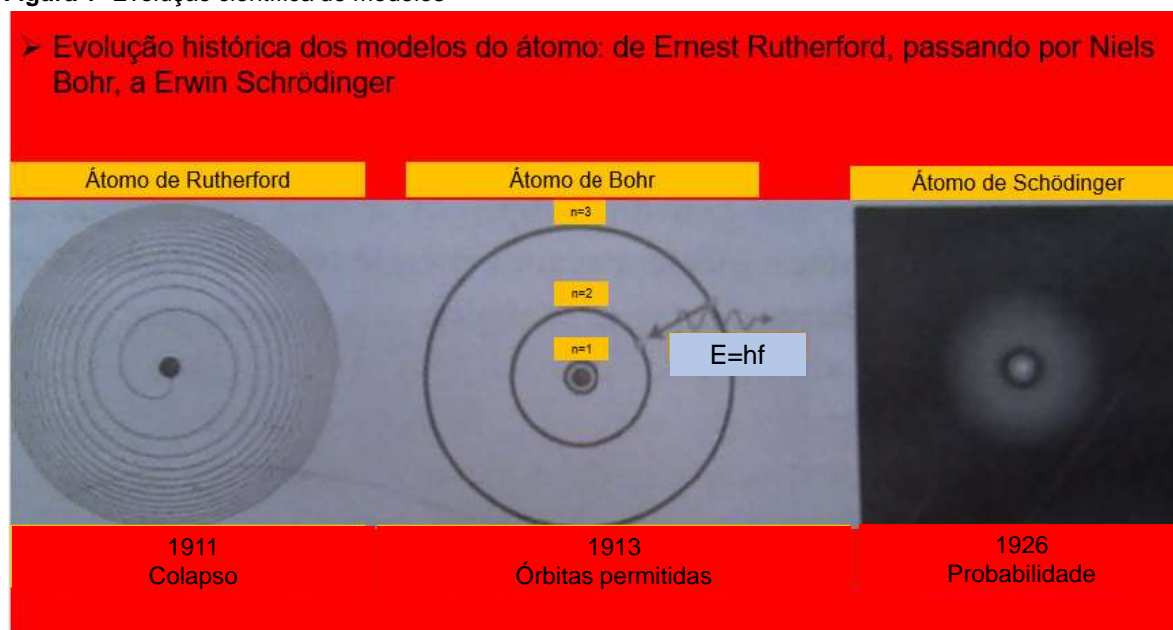
-Princípio da incerteza: um insight de Werner Karl Heisenberg: não podemos determinar simultaneamente a posição e o momento linear de uma partícula quântica

"Se sei onde estou, não sei para onde vou e se sei onde vou, não sei onde estou"

(Prof. José Alexandre/departamento de Física/Ufes)

3

Figura 1- Evolução científica de modelos



Fonte: própria

5

Figura 2- Modelo Padrão da Física das Partículas (MPFP)



Fonte: symmetry magazine |dimensions of particle physics
(<https://www.symmetrymagazine.org/article/six-fabulous-facts-about-the-standard-model>)

5



PPGEEnFis
Programa de Pós-Graduação em Ensino de Física

Universidade Federal do Espírito Santo
Centro de Ciências Exatas
Programa de Pós-Graduação em Ensino de Física - Polo 12/MNPEF/SBF

MNPEF

Mestrado Nacional
Profissional em
Ensino de Física

➤ MPFP (Modelo Padrão de Física de Partículas)

-Formulação físico-matemática que descreve as interações entre os blocos de construção elementares ou fundamentais (quarks e léptons) e os portadores de força (bósons). Esse MPFP ainda não contempla formulações para a gravidade (gravity/gravité); matéria escura (dark matter/matière noire); energia escura (dark energy/énergie noire)

- "...o Modelo Padrão é, na história, a mais avançada teoria matemática sobre a natureza. Apesar da palavra "modelo" em seu nome, o Modelo Padrão é uma teoria compreensiva que identifica as partículas básicas e especifica como interagem. Tudo o que acontece em nosso mundo (exceto os efeitos da gravidade) resulta das partículas do Modelo Padrão interagindo de acordo com suas regras e equações."

(MOREIRA, M.A. Revista Brasileira de Ensino de Física, v. 31, n. 1, 1306 (2009) www.sbfisica.org.br)

6

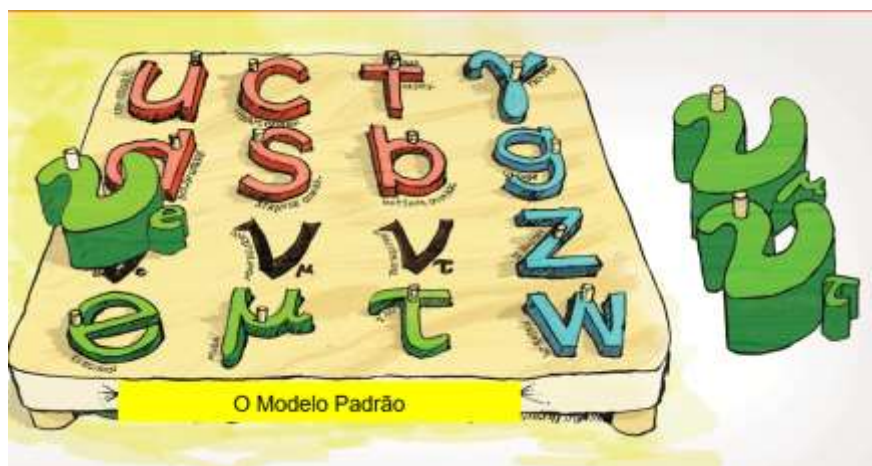
Figura 5- Modelo Padrão da Física das Partículas (MPFP)



Fonte: symmetry magazine |dimensions of particle physics
(<https://www.symmetrymagazine.org/article/august-2015/the-mystery-of-particle-generations>)

9

Figura 6- Modelo Padrão da Física das Partículas (MPFP)



Fonte: symmetry magazine |dimensions of particle physics
([symmetrymagazine.org/article/august-2015/the-mystery-of-particle-generations](https://www.symmetrymagazine.org/article/august-2015/the-mystery-of-particle-generations))

10



➤ *Interações fundamentais da natureza*

Tipos: até onde sabemos há 04 tipos elementares de forças que agem entre as partículas:

Força nuclear forte (FNF)/força nuclear fraca (fnf)/eletromagnética/gravitacional ou UNIFICADAMENTE: Força nuclear forte/força eletrofraca/gravitacional

➤ *Características:*

-FNF: manter os quarks colados uns aos outros para formar prótons/neutrons/partículas afins

- fnf: facilitar a desintegração de partículas pesadas em “irmãos” e “irmãs” menores

- Força eletromagnética: ligar os elétrons aos núcleos para formar os átomos

- Força gravitacional: atuar entre todos objetos massivos; é dominante em nossa vida cotidiana e no Universo; é irrelevante no microcosmo

11



➤ *Bósons ou portadores de força*

- Noções de campo: substrato de ocorrência das atividades quânticas. É via um substrato chamado campo que os bósons transmitem as forças entre as partículas

- As partículas absorvem (destroem) ou emitem (criam) bósons. Esses bósons transportam quantidades discretas de energia (quanta) de uma partícula à outra

- Podemos imaginar essa transferência de energia como a passagem de uma bola de basquete entre dois jogadores

➤ *Algumas características de cada portador de interação (bóson)*

- Glúon (cola): portador da FNF/substrato: campo gluônico ou de glúons

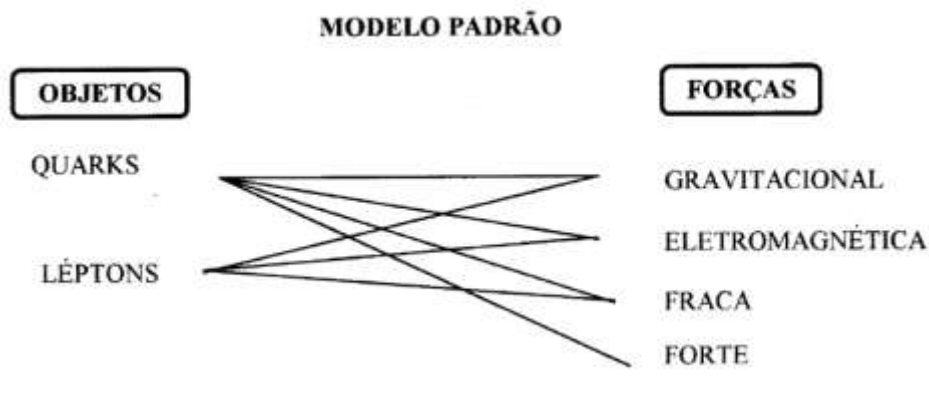
- Bósons w e z ou bósons vetoriais: portador da fnf/responsável por diferentes tipos de desintegrações/substrato: campo fraco

- Fóton: portador da força eletromagnética (espalha a luz)/ substrato: campo de fótons ou fotônico

- Gráviton (ainda não detectado): seria o responsável pela força gravitacional/substrato: campo gravitacional

12

Figura 8- Objetos (férmions e bosons), forcas e partícula



Fonte: Revista Brasileira de Ensino de Física, vol. 21, no. 3, Setembro, 1999

14

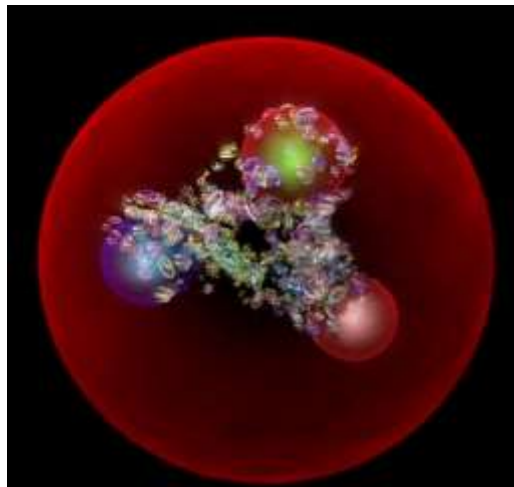
Figura 9- Forças fundamentais da natureza

Teoria	Interação	Mediador	Magnitude relativa	Comportamento	Faixa
Cromodinâmica	Força nuclear forte	Glúon	10^{41}	$1/r^2$	1.4×10^{-15} m
Eletrodinâmica	Força eletromagnética	Fóton	10^{39}	$1/r^2$	Infinito
Flavordinâmica	Força nuclear fraca	Bósons W e Z	10^{29}	$1/r^6$ até $1/r^2$	10^{-18} m
Geometrodinâmica	Força gravitacional	gráviton	10	$1/r^2$	Infinito

Fonte: Wikipédia
(https://pt.wikipedia.org/wiki/For%C3%A7a_fundamental)

15

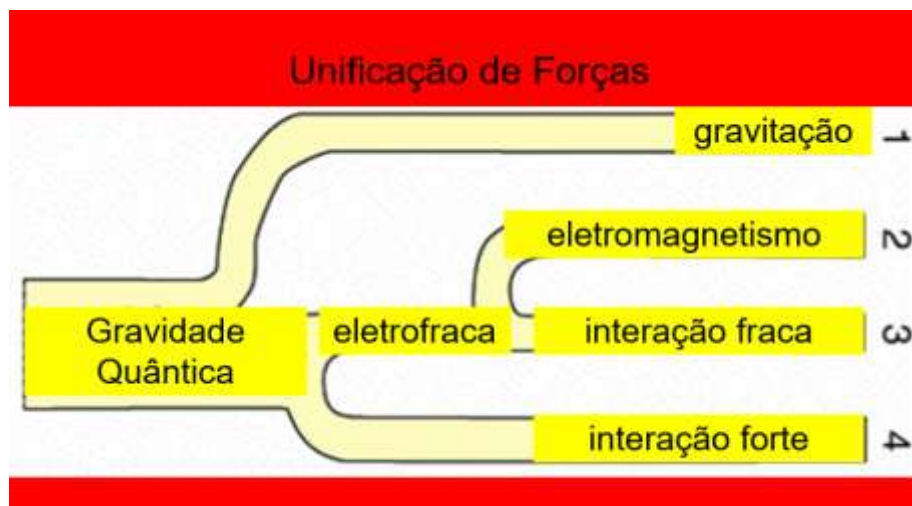
Figura 10- Dois quarks up e um quark down trocando glúons (manifestação da força nuclear forte)



Fonte: Cern
(<https://home.cern/resources/video/physics/proton-animation>)

16

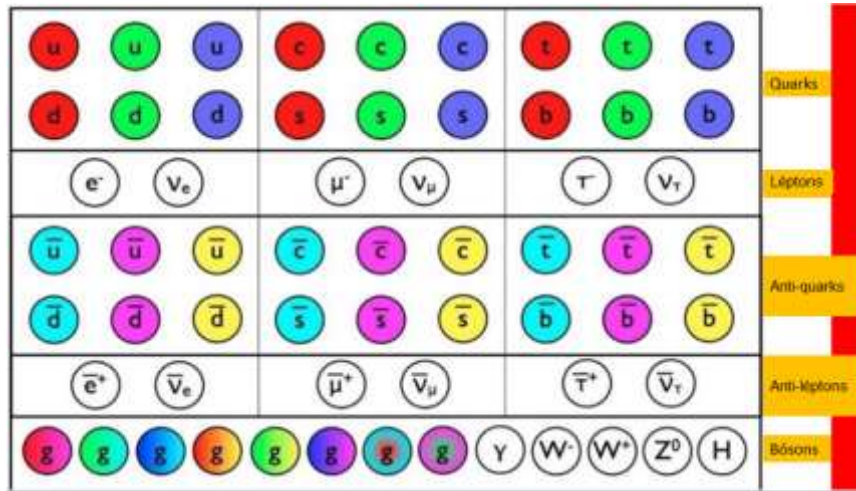
Figura 11- Unificação



Fonte: Própria

17

Figura 12- Toda a matéria bariônica conhecida: 61 tijolos fundamentais



Fonte: Forbes

(forbes.com/sites/startswithabang/2021/07/27/the-standard-model-is-an-orphan-theory-now/?sh=4da24bbe25ff)

18

Evolução Hstórica do MPFP

- 1897: descoberta do elétron
- 1905: prova da existência dos átomos
- 1909: descoberta do núcleo atômico
- 1915: relatividade geral
- Descoberta do próton (1918) e neutro (1932)
- Anos 1920: descoberta de outras galáxias
- 1932: descoberta da antimatéria
- 1936: descoberta do múon
- Anos 1930: reações nucleares no Sol
- 1948: eletrodinâmica quântica
- Aproximadamente em 1950: descoberta das partículas estranhas
- 1956 : descoberta do neutrino do elétron

19



- 1962 : descoberta do neutrino do múon
- 1968 : descoberta da estrutura do próton
- 1974 : descoberta do quarto quark (charme)
- 1975-1976 : descoberta do lépton tau
- 1977 : descoberta do quinto quark (bottom)
- 1979 : descoberta do glúons
- 1983 : descoberta dos bósons W et Z
- 1995 : descoberta do sexto quark (top)
- 2000 : descoberta do neutrino do tau
- 2012 : descoberta do bóson de Higgs

20



AGRADECIDO!

21

Anexo 2

Quarta aula

Neutrinos

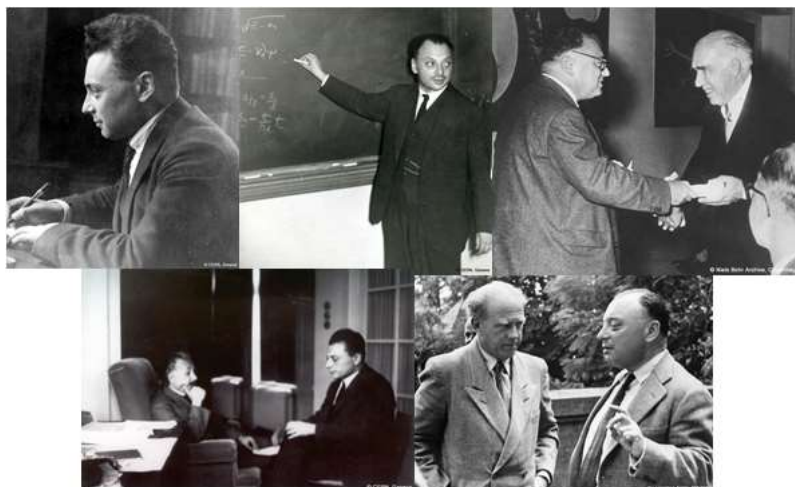
“De toda maneira, é muito complicado para os seres humanos; teria preferido jamais ter ouvido falar de Física”. São nesses termos que se exprimia o físico suíço Wolfgang Pauli (1900-1958) quanto aos problemas apresentados pela desintegração radioativa dos núcleos atômicos.”

1

- Dez fatos intrigantes sobre os Neutrinos
- Bilhões de partículas inofensivas atravessam vocês a cada segundo, tanto de dia como de noite
- É a segunda partícula mais abundante do universo, após os fótons (partículas de luz)
- Também é a partícula de menor massa mais abundante do universo
- Interagem raramente com qualquer coisa: um anos luz de chumbo pararia somente a metade dos Neutrinos vindos do Sol
- Cerca de 15 bilhões de Neutrinos do Big Bang se encontram dentro de uma sala de tamanho médio
- Os Neutrinos somente interagem via duas das quatro forças conhecidas: a força fraca e a gravitacional
- Até onde sabemos, os pesquisadores descobriram três sabores de Neutrinos: Neutrino do elétron , Neutrino , Neutrino
- Os Neutrinos oscilam ou mudam de sabor à medida que se deslocam
- Suas massas são muito pequenas, mas ainda desconhecidas
- Sua velocidade é próxima à da luz, mas não conhecemos exatamente seu valor
- Poderia ser a razão pela qual a matéria existe no Universo

2

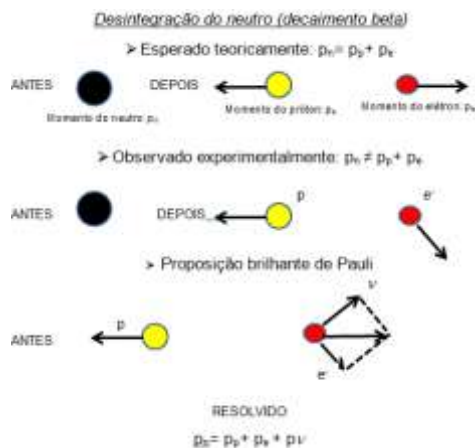
Figura 1- Fotos de Pauli: quarta e quinta fotos, com Eintein e Heisemberg, respectivamente.



Fonte: ETH Zürich Bibliothek
 (<https://library.ethz.ch/en/locations-and-media/platforms/short-portraits/pauli-wolfgang.html>)

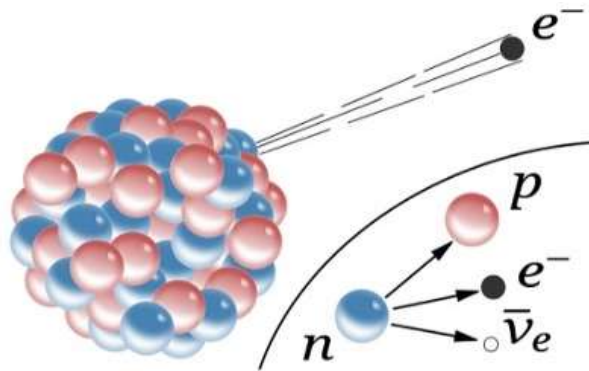
- Postulado em 1930 por Pauli para "salvar" o princípio de conservação da energia e do momento em um experimento sobre desintegração beta e observado e em 1956 por Frederick Reines et Clyde Cowan

Figura 2- Os momenta do proton e do eletron apos o decaimento.



Fonte: Revista Brasileira de Ensino de Física, vol. 21, no. 3, Setembro, 1999

Figura 3- Emissão beta



Fonte: Revista Brasileira de Ensino de Física, vol. 21, no. 3, Setembro, 1999

5

 **PPGE nFis** Universidade Federal do Espírito Santo
Centro de Ciências Exatas
Programa de Pós-Graduação em Ensino de Física – Polo 12/MNPEF/SBF

MNPEF Mestrado Nacional Profissional em Ensino de Física

Em 1956, os físicos americanos Cowan e Reines provaram que o Neutrino era uma partícula real, sua existência foi admitida, mas já foi considerada indetectável. Reines e Cowan começaram suas experiências de detecção de Neutrinos com um reator a Hanford no Estado de Washington. Em seguida, mudaram para um reator mais potente em Savannah na Carolina do Sul. Nessa fotografia de 1953 da equipe a Hanford, Cowan aparece na extrema esquerda e Reines na extrema direita. Essa experiência pioneira, chamada projeto Poltergeist, provou definitivamente a existência do Neutrino, dando início assim ao desenvolvimento da Física de Neutrinos.

Figura 4- 1956 : descoberta dos Neutrinos



Fonte: radioactivity.eu.com (https://www.radioactivity.eu.com/site/pages/Neutrino_Discovery.htm)

6

Figura 5- Léptons


LEPTONS	ELETRON	MUON	TAU
	0,511 MeV/c ²	105,7 MeV/c ²	1,777 GeV/c ²
	-1	-1	-1
	1/2	1/2	1/2
	e	μ	τ
	NEUTRINO DO ELETRON	NEUTRINO DO MUON	NEUTRINO DO TAU
<2,2 eV/c ²	<0,17 MeV/c ²	<15,5 MeV/c ²	
0	0	0	
1/2	1/2	1/2	
ν _e	ν _μ	ν _τ	

Fonte: Fermilab (<https://www.fnal.gov/>)

O Neutrino pertence à mesma família do elétron (lépton); tem carga elétrica nula; massa extremamente pequena (10⁶ vezes menor que a massa do elétron); difícil de ser detectado (a matéria lhe é praticamente transparente). Até onde sabemos é elementar (não é formada por outros pedaços menores). São incrivelmente comuns: a mais abundante partícula massiva do Universo. Os Neutrinos poderiam se revelar idênticos aos antineutrinos, seus homólogos da antimatéria; estar ligados a partículas massivas que teriam influenciado sobremaneira a formação do Universo; informar-nos-ia sobre outros domínios da Física e as razões pelas quais as partículas as partículas parecem naturalmente se organizarem em três gerações; revelar-nos princípios sobre a natureza


7

Figura 6- O que é um Neutrino




Fundamental

Neutrinos são partículas fundamentais (não podem ser "quebrados") assim como os quarks, fótons e elétrons



Abundante

Dentre as partículas massivas, os neutrinos são os mais abundantes, todavia quase não interagem com a matéria. A cada segundo 10¹² atravessam incensivamente nosso corpo



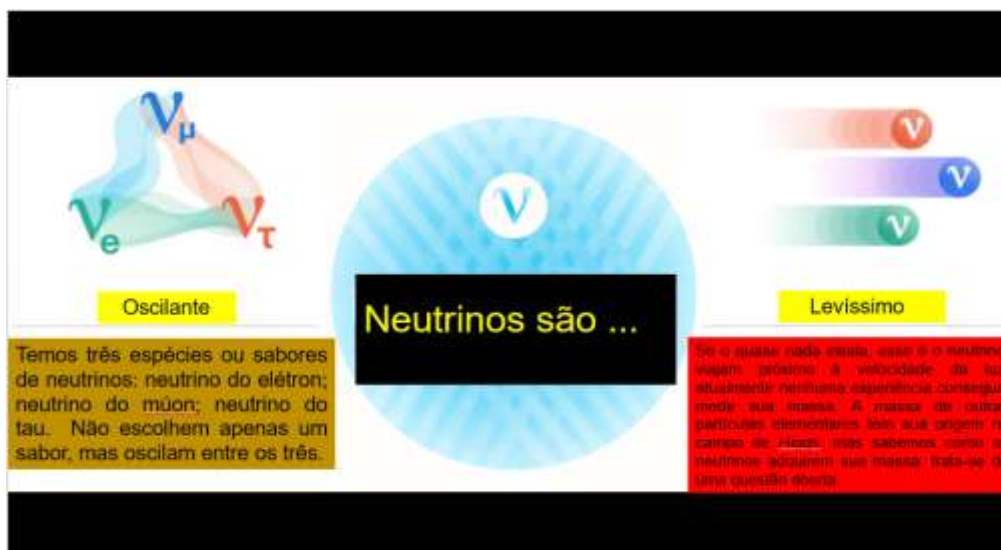
Fugidio

Engenheiros, projetistas e cientistas constroem diferentes tipos de detectores para estudá-los. No entanto, os neutrinos são muito arredios, mas não impossíveis de serem detectados

Fonte: all things neutrino (<https://neutrinos.fnal.gov/whats-a-neutrino/>)

8

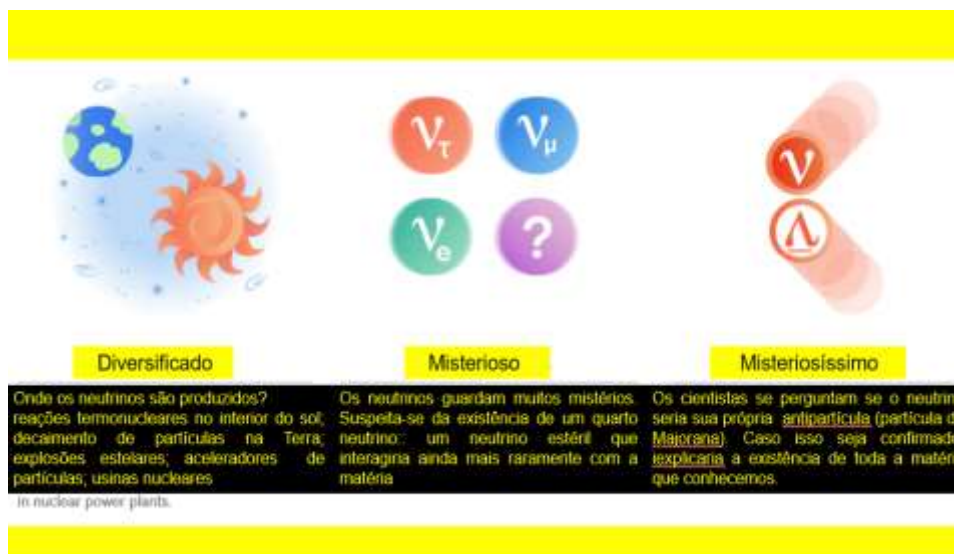
Figura 7- O que é um Neutrino



Fonte: all things neutrino (<https://neutrinos.fnal.gov/whats-a-neutrino/>)

9

Figura 8- O que é um Neutrino



Fonte: all things neutrino (<https://neutrinos.fnal.gov/whats-a-neutrino/>)

10

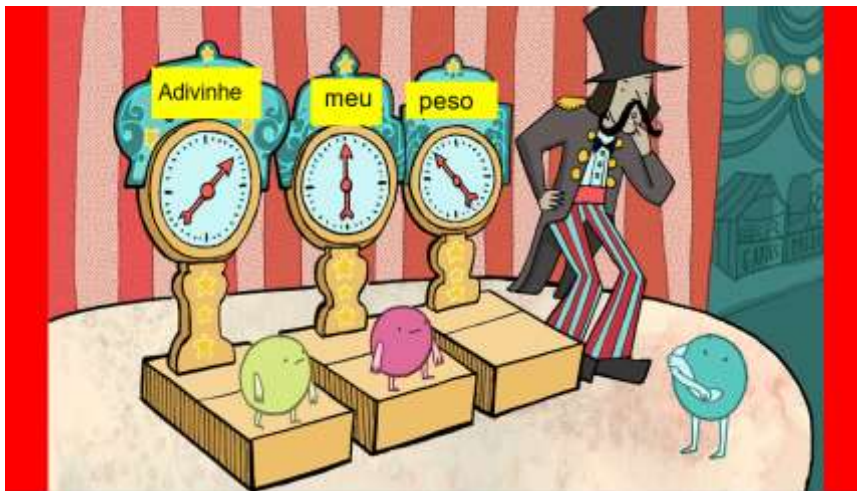
Figura 9- Fontes de Neutrinos

- Aceleradores de partículas
- Reatores nucleares
- Desintegração beta
- Terra
- Big Bang
- Atmosfera
- Supernova
- Fontes extragalácticas



Fonte: all things neutrino/Sandbox Studio, Chicago (<https://neutrinos.fnal.gov/sources/>)

Figura 10- Qual é peso de um Neutrino?



Fonte: symmetry magazine | dimensions of particle physics/ Sandbox Studio, Chicago (<https://www.symmetrymagazine.org/article/how-heavy-is-a-neutrino>)

Figura 12- Membros da colaboração T2K (estudo de oscilação de Neutrinos)



Fonte: T2K experiment (<https://t2k-experiment.org/>)

Figura 13- Capturando Neutrinos



Fonte: IceCube Neutrino Observatory: IceCube (<https://icecube.wisc.edu/>)

15

Figura 14- Telescópio Neutrinos



Fonte: KMENeT (<https://www.km3net.org/>)

16

E agora?

Dirac: todas as partículas têm sua antipartícula, que são diferentes entre si.

Majorana: O Neutrino é sua própria antipartícula, isto é, pode ser partícula e antipartícula

Então: O Neutrino é um férmion (partícula) de Dirac ou um férmion (partícula) de Majorana?

Figura 15- Neutrinos : Majorana ou Dirac ?

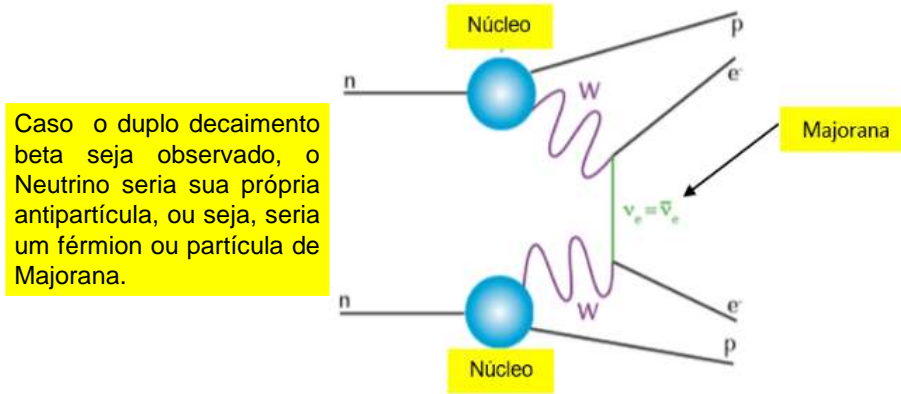


Fonte: Fermilab (<https://news.fnal.gov/2012/09/neutrinos-majorana-or-dirac/>)

17

Figura 16- Duplo decaimento beta

- Se o duplo decaimento beta seja observado, o Neutrino seria sua própria antipartícula, ou seja, um férmion ou partícula de Majorana.



Fonte: Revista Reflets de la Physique n°24
(<https://www.refletsdelaphysique.fr/articles/refdp/pdf/2011/02/refdp201124p11.pdf>)

18

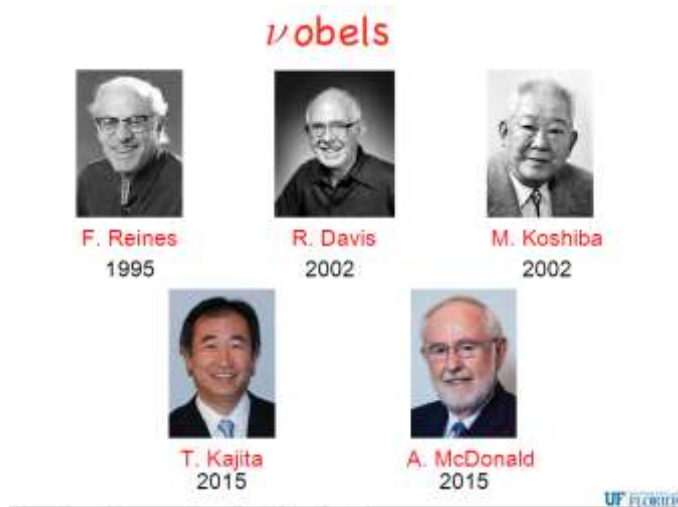
Figura 17- Prêmios Nóbeis



Fonte: University of Florida (<https://www.ufl.edu/>)

19

Figura 18- Prêmios Nóbéis



Fonte: University of Florida (<https://www.ufl.edu/>)

20

Figura 19- Famosos devido aos Neutrinos



Fonte: University of Florida (<https://www.ufl.edu/>)

21



Aplicações científica e tecnológica

- ✓ Monitoramento de proliferação nuclear
- ✓ Computação quântica e tele comunicações com NU's
- ✓ Prospecção mineral e de petróleo
- ✓ Utilização dos geoneutrinos
- ✓ Grandes estruturas de telescópios a NU's como instrumentação oceanográfica, geofísica e biológica em águas profundas: monitoramento em tempo real
- ✓ TÉLESCOPE À NEUTRINOS KM3NET (abrindo uma nova janela sobre nosso universo)
- ✓ Utilização de neutrinos atmosféricos de alta energia ou feixes de neutrinos artificiais para realizar uma tomografia da Terra, ou seja, um mapa da densidade de matéria no interior da Terra

22



NU's e a Cosmologia

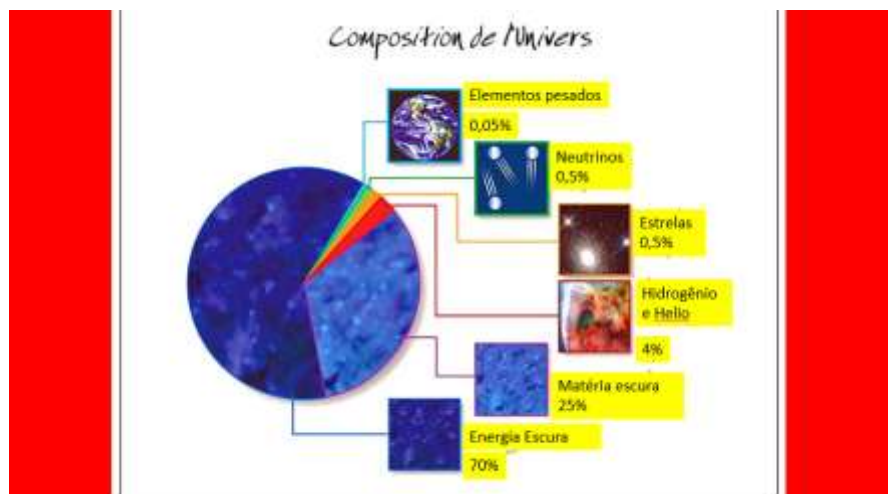
- Em 1s Após o Big-Bang: neutrinos leves se desacoplaram termicamente dos quarks e léptons quando temp. caiu para 10^{10} K (\sim MeV).
- Primeiras testemunhas ainda vivas (reliquia) do Big-Bang (reliquia dos NU's cósmicos)
- Hoje: temperatura(1,95K: todos os tipos juntos)/densidade(330 neutrinos par cm^{-3})
Difícil de detectar: energia muito fraca (0,1meV)/seção eficaz de 10^{-60}cm^2
- 99% da energia emitida nas explosões de supernovas estão na forma de NU's
- *Alguns pesquisadores propuseram que os NU's seriam a principal componente da matéria escura. Mas seria necessário que a massa dos neutrinos fossem ao menos 10eV.*
- *Os últimos resultados dos parâmetros de oscilação dos NU's e dados cosmológicos do satélite Planck excluíram essa hipótese*
- *Cogita-se a existência de um quarto NU que seria massivo e estéril*

23



Após tanta informação e formação, perguntamo-nos: o que conhecemos sobre nossa Natureza, ou seja, sobre a natureza do Universo?

Figura 20- O conteúdo do Universo



Fonte: Profa. Maria de Fátima O. Saraiva (<http://www.if.ufrgs.br/~fatima/ead/universo-atual.htm>)



Qual a natureza do universo ou Do que o Universo é feito?

Até onde sabemos:

- Matéria bariônica normal (nós, planetas, estrelas, galáxia e etc) =5%
- Matéria escura =25%
- Energia escura=70%
- Não conhecemos nada sobre a natureza tanto da matéria escura como da energia escura=95%
- Conhecemos 10% da matéria bariônica (10% de 5%)=0,5%

Conclusão

Conhecemos apenas 0,5% daquilo do que o Universo é feito!

26



AGRADECIDO!

27

Anexo 3

Quinta aula

LHC

Large Collider Hadrons/Grande Colisor de H ádrons/Grand Colisionneur d'Hádrons

Ciência não se faz em um dia....

1

- ✓ Maior laboratório de Física de partículas do mundo
- ✓ 2500 empregados
- ✓ 10000 cientistas visitantes por ano
- ✓ 1000 estagiários
- ✓ Criado em 24 de setembro de 1954
- ✓ 21 países membros mais países observadores
- ✓ Situado perto de Genebra (próximo à fronteira franco-suíça)

2

Figura 1: Vista área da localização do Cern (Conseil Européen pour la Recherche Nucléaire: organização europeia para a Pesquisa Nuclear)



Fonte: Cern (<https://home.cern/>)

3

Figura 2: Foto área indicando a circunferência do LHC no Cern (Conseil Européen pour la Recherche Nucléaire: organização europeia para a Pesquisa Nuclear)



Fonte: ESTUDARFORA.ORG (<https://www.estudarfora.org.br/estagio-no-cern/>)

4

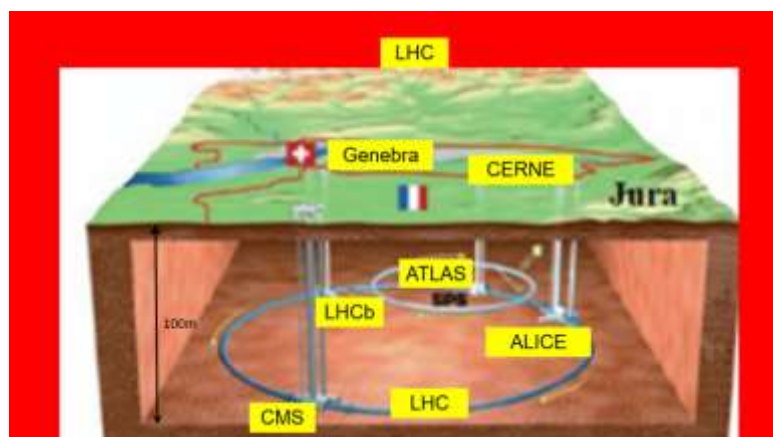
Figura 3: Técnico realizando manutenção em um dos trechos do LHC



Fonte: Mundo da Educação (<https://mundoeducacao.uol.com.br/quimica/lhc-maior-acelerador-particulas-mundo.htm>)

5

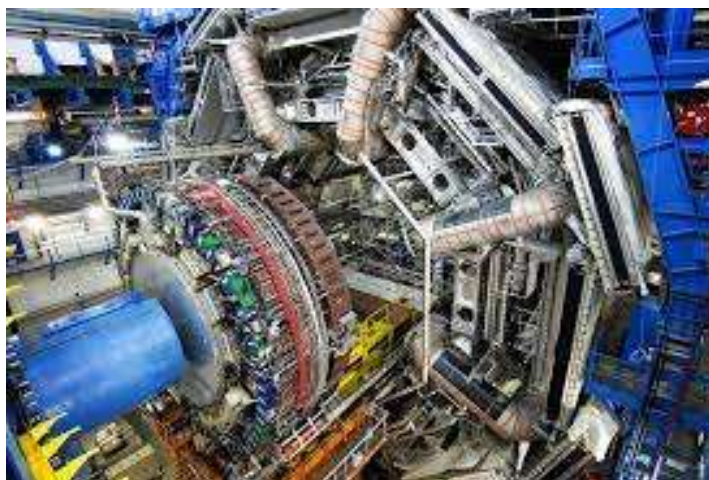
Figura 4: Esquema ilustrativo da posição do LHC com seus detectores no Cern(Conseil Européen pour la Recherche Nucléaire: organização europeia para a Pesquisa Nuclear)



Fonte: Cern (<https://home.cern/>)

6

Figura 5: Detector Atlas (A Toroidal LHC Apparatus Experiment, Aparato Experimental Toroidal do LHC, em tradução livre)



Fonte: ATLAS experiment/Cern (<https://atlas.cern/discover/detector>)

7

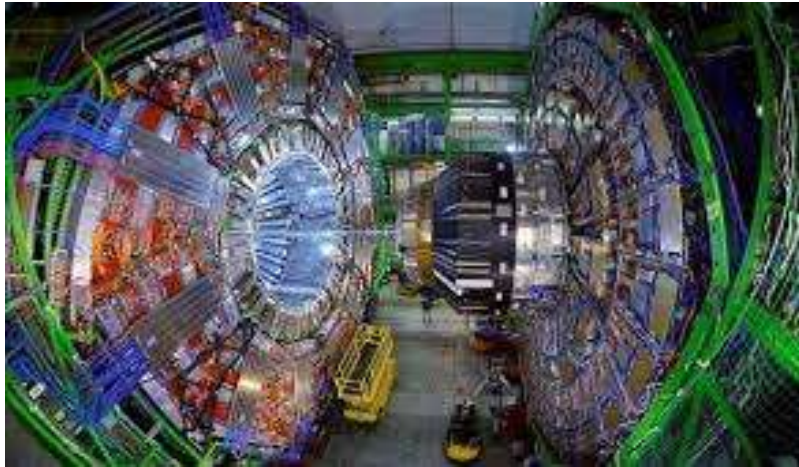
Figura 6: Detector Alice (A Large Íon Collider Experiment, Grande Colisor de Íons, em tradução livre)



Fonte: ALICE experiment/Cern (<https://home.cern/science/experiments/alice>)

8

Figura 7: Detector CMS (Compact Muon Detector, Detector Compacto de Múons, em tradução livre)



Fonte: CMS experiment (<https://cms.cern/>)

9

Alguns números do LHC

- Forma geométrica: anel de 27 km de comprimento no interior de um túnel a 100m de profundidade
- Energia total em seu centro de massa é de 14 Tev (sete vezes maior que o Tevatron do Fermilab)
- Luminosidade: $10^{34} \text{ cm}^{-2} \text{ s}^{-1}$ (100 vezes maior que o Tevatron)
- Frequência de revolução: 11,2 KHz 11.200 vezes por segundo
- Consumo de energia: ~ 120MW
- Cada feixe de prótons: 2800 pacotes de partículas: ~ $1,15 \times 10^{11}$ protons
- Comprimento total dos cabos supercondutores: 7000 km
- Cada cabo sendo constituído de filamentos, o comprimento total dos filamentos é 10 vezes a distância entre a Terra e o Sol
- Vácuo onde circulam os feixes de prótons é de 10^{-10} torr (~ 3millions moléculas/cm³) para evitar no máximo as colisões com as moléculas do gás:

isso equivale a uma pressão a uma altitude de 1000 km

- Os ímãs supercondutores são resfriados a 1,9 K com hélio superfluido
- Cada feixe de partículas armazena 360 MJ, o que pode ser comparado a:
 - a) ENERGIA CINÉTICA de um pequeno navio de cruzeiro de 10 toneladas a 30km/h ou 450 veículos de 02 toneladas a 100km/h
 - b) ENERGIA QUÍMICA da explosão de 80 Kg de TNT ou a metabolização de 70 kg de chocolate
 - c) ENERGIA TÉRMICA para derreter 500kg de cobre ou elevar a temperatura de um metro cúbico de água a 85 ° C ou preparar uma tonelada de chá

10



PPGEnFis
Programa de Pós-Graduação em Ensino de Física

Universidade Federal do Espírito Santo
Centro de Ciências Exatas
Programa de Pós-Graduação em Ensino de Física – Polo 12/MNPEF/SBF

MNPEF Mestrado Nacional
Profissional em
Ensino de Física

Agradecido!

Anexo A

Questionário diagnóstico

Estudante:

Série:

Data:

- 1- O que são átomos?
- 2- O que tem dentro deles?
- 3- O que é uma partícula elementar?
- 4- Qual a carga do elétron, do próton e do nêutron?
- 5- Já ouviram falar de neutrinos?
- 6- Onde os átomos são produzidos?
- 7- O que significa a palavra elementar?
- 8- Existe alguma coisa imediatamente próxima ao redor do átomo? Se sim, o quê?
- 9- Se prótons repelem prótons, por que o átomo não desmancha?
- 10- Por que o elétron não cai sobre o núcleo?
- 11- Quais são as quatro interações (forças) da natureza?
- 12- Por que é mais fácil ocorrer uma reação química do que uma reação nuclear?
- 13- Se bilhões de neutrinos nos atravessam a cada segundo, por que não sentimos nada?

Anexo B

Sugestão de questionário conceitual 1

Assunto: O Modelo Padrão de Física das Partículas (MPFP).

Estudante:

Série:

Data:

Questões

1-[55]

O átomo é a menor partícula que identifica um elemento químico. Ele possui duas partes, a saber: uma delas é o núcleo, constituído por prótons e nêutrons, e a outra é a região externa- a eletrosfera-, por onde circulam os elétrons. Alguns experimentos permitiram a descoberta das características das partículas constituintes do átomo.

Em relação a essas características, indique a alternativa correta.

- a) prótons e elétrons possuem massas iguais e cargas elétricas de sinais opostos.
- b) entre as partículas atômicas, os elétrons têm maior massa e ocupam maior volume no átomo.
- c) entre as partículas atômicas, os prótons e os nêutrons têm maior massa e ocupam maior volume no átomo.
- d) entre as partículas atômicas, os prótons e os nêutrons têm mais massa, mas ocupam um volume muito pequeno em relação ao volume total do átomo.

2- [56]

O Modelo-Padrão da Física de Partículas pode ser dividido em dois grandes grupos principais. São eles:

- a) hádrons e léptons
- b) bósons e férmions
- c) mésons e bárions
- d) táuons e múons
- e) bósons e quarks

3- [57]

Assinale a alternativa abaixo que apresenta somente léptons:

- a) Nêutrons, prótons e elétrons
- b) Elétrons, múons e táuons
- c) Fótons, bósons de Higgs e glúons
- d) Neutrinos, quarks e bósons Z e W
- e) Nêutrons e neutrinos

4-[58]

Assinale a alternativa abaixo que apresenta somente partículas elementares:

- a) Elétrons e quarks
- b) Nêutrons e prótons
- c) Átomos e moléculas
- d) Múons e nêutrons
- e) Táuons e prótons

5- [59]

Assinale, entre as alternativas abaixo, aquela que apresenta apenas bárions:

- a) Fótons e glúons
- b) Prótons e elétrons
- c) Nêutrons e prótons
- d) Neutrinos e nêutrons
- e) Glúons e bósons de Higgs

6- [60]

Em Física de Partículas, uma partícula é dita elementar quando não possui estrutura interna. Por muito tempo se pensou que prótons e nêutrons eram partículas elementares, contudo as teorias atuais consideram que essas partículas possuem estrutura interna. Pelo modelo padrão da Física de Partículas, prótons e nêutrons são formados, cada um, por três partículas menores denominadas *quarks*. Os *quarks* que constituem tanto os prótons quanto os nêutrons são dos tipos *up* e *down*, cada um possuindo um valor fracionário do valor da carga elétrica elementar **e** ($e = 1,6 \times 10^{-19} \text{ C}$).

A tabela abaixo apresenta o valor da carga elétrica desses *quarks* em termos da carga elétrica elementar **e**.

	<i>Quark up</i>	<i>Quark down</i>
Carga elétrica	$\frac{+2}{3}e$	$\frac{-1}{3}e$

Assinale a alternativa que melhor representa os *quarks* que constituem os prótons e os nêutrons.

- (A)

Próton	Nêutron
<i>up; up; down</i>	<i>up; up; up</i>
- (B)

Próton	Nêutron
<i>down; down; down</i>	<i>up; down; down</i>
- (C)

Próton	Nêutron
<i>up; down; down</i>	<i>up; up; down</i>
- (D)

Próton	Nêutron
<i>up; up; down</i>	<i>up; down; down</i>
- (E)

Próton	Nêutron
<i>up; down; down</i>	<i>down; down; down</i>

7- [61]

Os *quarks* são partículas que, quando ligadas em trios, formam partículas como prótons e nêutrons. Em relação aos *quarks*, assinale a alternativa correta:

- São partículas que não têm massa e, por isso, recebem o nome de bósons
- São partículas não elementares, pois apresentam estruturas internas feitas de partículas ainda menores.
- São partículas elementares de carga elétrica parcial menor que a carga elementar.
- Quem são os responsáveis pela força de atração que mantém os núcleos atômicos estáveis.
- São destruídos nas reações nucleares para a obtenção de energia nuclear.

8-[61]

A Física de Partículas é uma área da Física:

- a) que estuda os diferentes tipos de ligações e reações químicas.
- b) responsável pelo estudo das partículas elementares e da interação entre radiação e matéria.
- c) responsável por explicar reações nucleares.
- d) destinada a formular teorias capazes de unificar a força gravitacional com outras forças da natureza.
- e) que explica, exclusivamente por meio da Física Clássica, as interações entre átomos e moléculas.

9-Cite as quatro interações fundamentais da Natureza, descrevendo a função de cada uma no micromundo da Física das partículas.

10- Se o núcleo do átomo é constituído por partículas carregadas positivamente (prótons), por que esse núcleo não explode?

11- Se cargas elétricas negativas e positivas se atraem, por que os elétrons não são absorvidos pelo núcleo?

12- Se elétrons e prótons têm massa, qual o papel da interação gravitacional na estabilidade do átomo?

13- E os nêutrons, qual o papel deles na estrutura do átomo?

14- Quais são as partículas veiculadoras da força nuclear forte? Como se chama o campo no interior do qual elas se manifestam?

15- Quais são as partículas veiculadoras da força eletromagnética? Como se chama o campo no interior do qual elas se manifestam?

16- Quais são as partículas veiculadoras da força fraca? Como se chama o campo no interior do qual elas se manifestam?

17-No seu entendimento, o que é o Modelo Padrão de Física das Partículas (MPFP)?

18-Conforme o MPFP atual, qual o número total de partículas que compõem a matéria ordinária?

19-O modelo padrão identifica e especifica a matéria escura? E a energia escura?

20-O modelo padrão identifica e especifica a partícula portadora da força gravitacional?

Anexo C

Sugestão de questionário conceitual 2

Assunto: Neutrinos

Estudante:

Série:

Data:

Questões

- 1-O que são neutrinos?
- 2- Quem o postulou pela primeira vez? Por quê?
- 3-Quem o identificou experimentalmente?
- 4-Cite algumas fontes geradoras de neutrinos.
- 5-O neutrino é um bóson ou um férmion?
- 6-Quantos tipos de neutrinos existem atualmente? Qual o nome de cada um deles?
- 7-Quantos antineutrinos existem atualmente? Qual o nome de cada um deles?
- 8-Os neutrinos possuem carga elétrica?
- 9-O que são neutrinos cósmicos?
- 10- O neutrino é sensível a qual das quatro interações fundamentais?
- 11- Os neutrinos podem ser capturados facilmente? Por quê?
- 12-Confirme ou refute a frase: o neutrino é mais massivo que o elétron.
- 13-Cite algumas possíveis aplicações dos neutrinos.
- 14-Conforme o genial físico Ettore Majorana, o neutrino seria uma antipartícula ou seria sua própria antipartícula?
- 15-Os neutrinos sofrem oscilação, isto é, se transformam uns nos outros?
- 16-Qual a importância dos neutrinos para a cosmologia?
- 17-Teoricamente, por que os neutrinos poderiam nos trazer informações importantes de como era o Universo 2 minutos após o Big Bang?
- 18-O que é uma desintegração beta?
- 19-Qual foi a maior contribuição de Bruno Pontecorvo quanto aos neutrinos?
- 20- O que são oscilações de Neutrinos?

Anexo D

Sugestão de avaliação tradicional

Questões

- 1-Escreva um texto relatando tudo o que você aprendeu sobre o Modelo Padrão de Física das Partículas (mínimo de 20 linhas)
- 2-Escreva um texto relatando tudo o que você aprendeu sobre neutrinos e suas aplicações tecnológicas (mínimo de 20 linhas)
- 3-No seu entendimento quais foram os impactos científicos, tecnológicos e sociais atuais da proposição do neutrino em 1930 por Pauli?
- 4-O que você sugere para melhorar sua aprendizagem em Física?
- 5-Dê sua opinião sobre as aulas do Professor e do método de ensino utilizado por ele.

Anexo E

Sugestão de questionário de opinião

Observação: Não é necessário se identificar.

1- Qual sua opinião sobre o uso de textos em nossas atividades em sala de aula?

2- O professor foi receptivo com você quanto à suas dúvidas? Você entendeu a explicação do professor? Você ainda teve dúvidas após as explicações do Professor? O Professor soube contextualizar em sua vivência ou não a matéria ensinada?

3- Ressalte os pontos ruins e bons da metodologia empregada em nossas aulas.

4-Em uma escala de (0 a 10) pontos qual sua nota para:

a) Atuação do Professor:

a.1) Justificativa:

b) Aquilo que você aprendeu:

b1) Justificativa:

5-Escreva algumas sugestões e críticas à nossa sequência didática.

Anexo F

Termo de Consentimento Livre e Esclarecido assinado pelos alunos sujeitos da pesquisa



Universidade Federal do Espírito Santo
Centro de Ciências Exatas

Programa de Pós-Graduação em Ensino de Física
Mestrado Profissional

TERMO DE CONSENTIMENTO LIVRE E ESCLARECIDO

Você está sendo convidado (a) para participar como voluntário (a) do Processo de Validação a priori de uma Sequência Didática (SD) de ensino no formato de uma Unidade de Ensino Potencialmente Significativa (UEPS) intitulada “Norteando em sala de aula do ensino médio o ensino sobre Neutrinos via transcrição da Aprendizagem Significativa de Ajzenberg proposta por Moreira com o emprego da UEPS”. Após ler os esclarecimentos e as informações abaixo, e aceitando participar do processo, assine ao final deste documento. Tendo dúvidas sobre a pesquisa, por gentileza, faça contato com qualquer um dos responsáveis, a saber, com o Prof. Francisco Elias Gomes (e-mail: harps1925@hotmail.com) e com o coordenador e orientador da pesquisa Dr. Flávio Gimenes Alvarenga (UFES) (e-mail: flavio.alvarenga@ufes.br).

Nesse trabalho a meta é, a priori, validar a UEPS concebida para o estudo dos Neutrinos em uma ou duas turmas do terceiro ano do ensino médio. Os dados serão coletados ao longo da aplicação da referida UEPS, utilizando-se para isso aulas expositivas (dialogadas) em PowerPoint ou não via o aplicativo Google Meet, questionários e avaliações escritas. Os dados oriundos dessa pesquisa ficarão restritos ao domínio da investigação. De maneira nenhuma haverá transmissão dessas informações para outras pessoas.

Esclarecemos ainda que o participante dessa pesquisa não receberá qualquer tipo de remuneração e/ou gratificação financeira. Garantimos total sigilo, quanto aos dados confidenciais coletados para a pesquisa.



Universidade Federal do Espírito Santo
Centro de Ciências Exatas

Programa de Pós-Graduação em Ensino de Física
Mestrado Profissional

CONSENTIMENTO DA PARTICIPAÇÃO DA PESSOA COMO SUJEITO DA PESQUISA

Eu, _____,
declaro que fui informado e esclarecido sobre o presente documento,
entendendo todos os termos acima expostos, e que voluntariamente aceito
participar desta pesquisa. Estou ciente dos procedimentos nela envolvidos,
assim como os possíveis riscos e benefícios, caso existam, decorrentes de
minha participação. Foi-me garantido que posso interromper minha
participação e retirar meu consentimento a qualquer momento, sem que isto
leve a qualquer penalidade.]

Local e data _____, _____ de _____ de 2020.

Assinatura do participante



Universidade Federal
do Espírito Santo



PPGEnFis
Programa de Pós-Graduação em Ensino de Física



Sandbox, Chicago

PRODUTO EDUCACIONAL

Ensinando a Física de neutrinos no ensino médio

"Mantenha o foco no objetivo, centralize a força para lutar e utilize a fé para vencer!"



Sandbox, Chicago



PPGEnFis
Programa de Pós-Graduação em Ensino de Física



UNIVERSIDADE FEDERAL DO ESPÍRITO SANTO – UFES
CENTRO DE CIÊNCIAS EXATAS PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO
EM ENSINO DE FÍSICA
MESTRADO NACIONAL PROFISSIONAL EM ENSINO DE FÍSICA
(MNPEF/SBF)

Francisco Elias Gomes

PRODUTO EDUCACIONAL
Ensinando a Física de neutrinos no ensino médio

VITÓRIA-ES
2022

Francisco Elias Gomes

Ensinando a Física de neutrinos no ensino médio

Produto educacional exigido pelo Programa de Pós-Graduação
em Ensino de Física da Universidade Federal do Espírito
Santo.

Orientador: Prof. Dr. Flávio Gimenes Alvarenga.

**VITÓRIA-ES
2022**

Dedico esse construto humano a um processo dinâmico-inteligente onipotente, onisciente e onipresente, gerador de uma pluralidade infinita de mundos e vida: Deus, a causa não causada.

VITÓRIA-ES
2022

Sou grato ao Professor Dr. Flávio Gimenes Alvarenga, a todos os professores e funcionários do MNPEF/UFES e ao apoio financeiro da CAPES. Sempre sonhei em fazer mestrado profissional em ensino de Física, por isso meus agradecimentos especiais e sinceros vão para a SBF e para a CAPES, sem o apoio das quais jamais realizaria esse sonho. Parabéns à CAPES, SBF e UFES pela excelência desse programa. Vocês conseguiram mudar absolutamente minha prática docente. Não parem. Vamos juntos mudar o ensino de Física em nosso Brasil! Também de maneira alguma poderia deixar de agradecer à Lucimar Alixandrina de Souza Soares e Flávia Cristina Duarte Brandão Oliveira Silva, diretora e vice-diretora, respectivamente, da Escola Dionysio Costa de Mutum-Mg, e também à atuação comprometida e exemplar da estudante Edivânia Aparecida Dias Moreira, moradora da zona rural de Mutum-Mg e participante ativa da pesquisa em questão.

“Aquilo que observamos não é a natureza em si, mas a natureza exposta aos nossos métodos de investigação”.

Werner Heisenberg, Nobel de Física.

**VITÓRIA-ES
2022**

Apresentação

Saudações, estimado (a) leitor (a)!

Acredito que os docentes de Física do ensino médio devem oferecer aos estudantes do ensino médio uma oportunidade para aprender noções, conceitos, modelos e aplicações de Física Moderna e Contemporânea (FMC) de tal maneira que possam desenvolver habilidades e competências para um melhor entendimento contextualizado de processos científicos e tecnológicos de sua vivência ou não.

O material ora apresentado aqui é uma Sequência Didática (SD) inspirada na Teoria da Aprendizagem Significativa (TAS) de David Ausubel denominada Unidade de Ensino Potencialmente Significativa (UEPS) cujo principal mecanismo didático de ação é a metodologia ativa denominada Ensino sob Medida (EsM). Essa SD poderá ser utilizada como prática pedagógica para ensinar Física de neutrinos no ensino médio.

Os neutrinos são partículas difíceis de serem detectadas e representam verdadeiras sondas pré-históricas que nos desvendariam um panorama bastante rico em detalhes do cenário físico-caótico que reinava no Universo há aproximadamente dois minutos após uma expansão inflacionária abrupta- e não uma explosão como é frequentemente referida em muitos livros de Física do ensino médio - popularmente chamada “big bang”. O Neutrino foi postulado em 1930 por Pauli para reafirmar o princípio da conservação da energia e do momento linear. Também acreditamos que esse produto poderá contribuir bastante para a qualificação profissional em Física de neutrinos daqueles que estão na linha de frente do ensino básico: O Professor.

Enfim, caso o Professor se interesse em aplicar este produto educacional é imprescindível, ao nosso ver, que antes de fazê-lo estude de forma minuciosa os conteúdos de Física de neutrinos contidos nos capítulos 4 e 5 (Física de neutrinos e Suporte didático-pedagógico ao Professor, respectivamente) e nas aulas 3; 4; 5 do Apêndice.

Sumário

Capítulo 1	9
Introdução.....	9
Capítulo 2	11
O Referencial Teórico.....	11
2.1 A Teoria da Aprendizagem Significativa (TAS).....	11
2.2 "Transcrição" da Aprendizagem Significativa de Ausubel proposta por Moreira com o emprego da UEPS.....	12
2.3 A UEPS.....	12
2.4 O método Ensino sob Medida (EsM).....	13
Capítulo 3	15
Construindo uma UEPS sobre Física de neutrinos.....	15
3.1 Resumo das atividades da Sequência Didática (SD).....	15
3.2 Descrição detalhada das atividades da SD.....	17
Capítulo 4	27
A Física de neutrinos.....	27
4.1 O Modelo Padrão.....	27
4.2 Partículas de massa.....	28
4.3 Forças e partículas portadoras.....	29
4.4 Neutrinos, o que são?.....	30
Capítulo 5	33
Suporte didático pedagógico ao Professor: Física de neutrinos	33
5.1 Os átomos.....	33
5.1.1 Qual a natureza da matéria?.....	33
5.1.2 Massa de um átomo.....	35
5.1.3 Os isótopos.....	36
5.1.4 Tamanho de um átomo.....	37
5.1.5 Cortejos eletrônicos.....	39
5.1.6- Estabilidade.....	39
5.1.7 A ideia de força.....	39
5.1.8 Interação eletromagnética.....	40

5.1.9 Interação forte.....	40
5.1.10 Interação fraca.....	42
5.1.11 Interação gravitacional.....	43
5.1.12 Química, Física nuclear e Fusão nuclear.....	44
5.1.13 Modelo padrão de Física de partículas ou simplesmente Modelo Padrão.....	45
Referências Bibliográficas.....	58
Apêndice: Aulas 3, 4 e 5 da SD.....	61

Capítulo 1

Introdução

O mundo enfrenta graves ameaças tais como a crise sanitária mundial (pandemia) causada pelo novo vírus corona vírus; as mudanças climáticas; a guerra e os conflitos; a falta e o desrespeito dos direitos dos homens; as desigualdades; a negação de ciência e o extremismo (terrorismo). Todavia muitos cientistas mostram que ideias brilhantes, a ciência, a compaixão e o trabalho podem melhorar o mundo. Os professores e a profissão de professor e bons e interessados estudantes são fundamentais para promover isso. Um mundo com falsos fatos tem necessidade de verdadeiros Professores.

Precisamos refletir sobre o que e como ensinamos e sobre o que o estudante é capaz de fazer com o que aprendeu. *Dessa forma ter compreendido significa que somos capazes de mostrar evidências de nossa capacidade de transferir o que sabemos, ou seja, de demonstramos um entendimento fluente e fluido, não um entendimento rígido e estereotipado baseado apenas em recordar e inserir a informação correta nos espaços destinados a ela* (BLOOM, 1956).

Esse produto educacional foca o desenvolvimento e a confecção de uma sequência didática no formato de uma UEPS (Unidades de Ensino Potencialmente Significativas) [1] para estudar especificamente a Física de neutrinos em turmas do ensino médio. A introdução de conceitos e princípios de Física Contemporânea com foco em Física de neutrinos vem com o intuito de preencher uma lacuna no ensino médio, a saber, a maioria das escolas não ensina esses tópicos e quando o fazem a abordagem é rápida, precária e superficial.

Por um lado, o objetivo geral desse produto é facilitar o ensino de Física Contemporânea no ensino médio. Por outro, o objetivo específico é ensinar Física de neutrinos via uma UEPS sobre o Modelo Padrão de Física das Partículas, fundamentada nos pressupostos da Teoria da Aprendizagem Significativa (TAS) [2].

Ao decidir pela inovação e/ou mudança radical de sua prática pedagógica escolar, o Professor tem a chance de formar estudantes com capacidade cognitiva

para questionar, criticar, compreender e melhorar de maneira progressiva o nosso mundo. Para isso precisamos mudar, mas sempre respeitando a grade curricular do ensino clássico (tradicional) presente na maioria das escolas brasileiras: do ensino infantil, passando pelo ensino fundamental e médio, até as pós-graduações. Para reforçar meus dizeres recorro àqueles de Ives Solano Araújo e Eric Mazurem “INSTRUÇÃO PELOS COLEGAS E ENSINO SOB MEDIDA: UMA PROPOSTA PARA O ENGAJAMENTO DOS ALUNOS NO PROCESSO DE ENSINO-APRENDIZAGEM DE FÍSICA” [3] (p.392):

Melhorar a formação profissional e acadêmica dos indivíduos nos mais diversos níveis passa por repensar o papel das estratégias formais de ensino. Em termos educacionais, pesquisa após pesquisa tem mostrado os problemas de se investir quase exclusivamente na apresentação oral dos conteúdos como estratégia didática. Seja por falta de infraestrutura para implementar novas soluções, inércia do sistema escolar ou mesmo desconhecimento de alternativas viáveis de mudança, essa estratégia quase milenar ainda hoje é onipresente no ambiente escolar. Em sua face mais visível, o chamado ensino tradicional está fortemente associado com a evasão escolar, a aprendizagem mecânica e a desmotivação para aprender, por parte dos estudantes. Diversas são as recomendações abstratas e gerais de cunho pedagógico feitas aos professores para reverter esse quadro. Contudo, poucas são as alternativas concretas apresentadas, em especial no Ensino de Física em nível médio e nas disciplinas básicas de nível superior. Tendo em vista esse cenário, o presente artigo tem como objetivos divulgar as potencialidades do uso combinado de dois métodos de ensino, focados na aprendizagem significativa de conceitos e procedimentos; e também fornecer conselhos práticos para favorecer a implementação deles em sala de aula.

É fácil verificar que na maioria das escolas do ensino básico os estudantes não aprendem de forma significativa os conteúdos de Física (acredito que o mesmo ocorra com as outras disciplinas da grade curricular), mas simplesmente durante as aulas os ouvem e/ou os copiam, decorando-os e assim esquecendo-os instantes após. Trata-se de uma aprendizagem tradicional (mecânica) que não condiz com o papel preponderante da educação qual seja formar alunos críticos capazes de questionar a “verdade” atual, propor inovações ou novos conhecimentos para melhorar seu meio de vivência social e, conseqüentemente, o mundo. É importante mencionar que os processos de aprendizagem tradicional e processos inovadores, no caso a aprendizagem significativa, devem ser respeitados e coexistirem. A Sequência Didática (SD) aqui descrita é inspirada no formato de UEPS e pretende contribuir para uma mudança progressiva no emaranhado e complexo sistema cognitivo dos estudantes aos quais será aplicada.

Capítulo 2

O Referencial Teórico

2.1 A Teoria da Aprendizagem Significativa (TAS)

A teoria da aprendizagem de David Paul Ausubel¹ foi construída a partir do conceito de aprendizagem significativa, variável central de sua teoria.

Conforme Ausubel a aprendizagem significativa ocorre quando novos conhecimentos adquiridos pelos estudantes se ancoram nos conhecimentos que esses já possuíam e quanto mais intercambiável for essa conexão entre conhecimentos prévios e novos conhecimentos melhor a qualidade da aprendizagem adquirida pelos estudantes. Em sua teoria, Ausubel define esse conhecimento preexistente como subsunçor (ideia-âncora)², que é um conhecimento específico já presente no sistema cognitivo do estudante. O subsunçor dá sentido e significado a um novo conhecimento apresentado ao estudante ou que ele descobriu e também, dependendo da frequência que é solicitado, sofre maturação ou um processo de inovação. Vê-se, logo, que é um processo dinâmico e evolutivo.

De forma resumida, Ausubel afirma que só haverá aprendizagem significativa se uma nova informação se conectar consistentemente na estrutura cognitiva do estudante. É importante ressaltar a definição que Ausubel atribui às estruturas cognitivas: “são estruturas mentais hierárquicas de conceitos que são representações de experiências sensoriais do indivíduos”. Ainda conforme Ausubel, a aprendizagem significativa provoca o crescimento e modificação do conceito de subsunçor e novas informações inseridas na estrutura cognitiva só podem ser aprendidas e retidas de forma útil caso se relacionem a conceitos prévios, que são verdadeiras âncoras.

¹Nasceu em Nova York e foi psicólogo da educação. Os primeiros passos de sua teoria foram dados em 1963. Desenvolveu-a durante 10 anos (de 1960 a 1970). Teve a contribuição importante de Joseph Donald Novak (educador americano), que apurou e divulgou mundialmente sua teoria.

²Definido por David Ausubel (1918-2008) como um conhecimento imprescindível à nova aprendizagem. Pode ser um símbolo já significativo, um conceito, uma proposição, um modelo mental, uma imagem.

2.2 "Transcrição" da Aprendizagem Significativa de Ausubel proposta por Moreira com o emprego da UEPS

A investigação em questão é orientada pelas Unidades de Ensino Potencialmente Significativas (UEPS) [1]; pela Teoria da Aprendizagem Significativa (TAS) [2]; pelo método Just-in-Time Teaching ou Ensino sob Medida (EsM) [3], em tradução livre.

Por um lado, a Teoria da Aprendizagem Significativa acontece quando ocorre de forma não-literal, isto é, não-mecânica. O estudante aprende de forma significativa quando um novo conhecimento se articula com os conhecimentos prévios existentes em sua estrutura cognitiva. Essa “miscelânea” de conhecimentos sofre uma maturação e passa a compreender conhecimentos mais complexos. Por outro, a UEPS seria um “impulso cognitivo” que potencializaria a aprendizagem dos alunos, levando-os à compreensão progressiva de conteúdos mais elaborados e sofisticados. Conforme Marco Antônio Moreira: “É uma sequência didática fundamentada em teorias de aprendizagem, particularmente a da aprendizagem significativa”.

2.3 A UEPS

De acordo com Marco Antônio Moreira as UEPS são sequências didáticas sustentadas pela Teoria da Aprendizagem Significativa (TAS) e sua meta seria permitir aos estudantes internalizar um conhecimento consolidado para que possam compreender e desenvolver conhecimentos mais complexos, ou melhor, o objetivo da SD sob a forma de uma UEPS é fazer com que o sistema cognitivo dos alunos adquira progressivamente conhecimentos novos, ou melhor, que conhecimentos mais simples permitam a compreensão progressiva de conhecimentos mais elaborados.

Nessa teoria pedagógica alguns pontos podem ser destacados, a saber:

- O que o estudante já sabe (conhecimento prévio) é o parâmetro mais importante para que aprenda de forma significativa;
- O triplo de pensamentos, sentimentos e ações formam um só corpo no sistema cognitivo do estudante, orientando-o, teoricamente, para a aprendizagem significativa;

- O ensino está centrado no estudante com mediação do Professor;
- A decisão quanto a aprender de maneira significativa certo conteúdo é do estudante;
- Existe uma relação estreita entre novos conhecimentos e conhecimentos prévios, demonstrada pelos organizadores prévios;
- As situações-problema são o que despertam e motivam os estudantes a adquirirem novos conhecimentos;
- A detecção e avaliação de vestígios de aprendizagem significativa são fundamentais no processo de construção de novos conhecimentos;
- A aprendizagem significativa é progressiva e permite que novos modelos de aprendizagem sejam construídos;
- A todo instante existe uma interação importante entre estudante, mediador e material instrucional;
- A troca ou negociação de significados entre estudantes e entre esses e o mediador são essenciais para a captação de signos pelos estudantes; e
- A aprendizagem significativa é o oposto da aprendizagem mecânica, tradicional, mas ambos devem coexistir.

2.4 O método Ensino sob Medida (EsM)

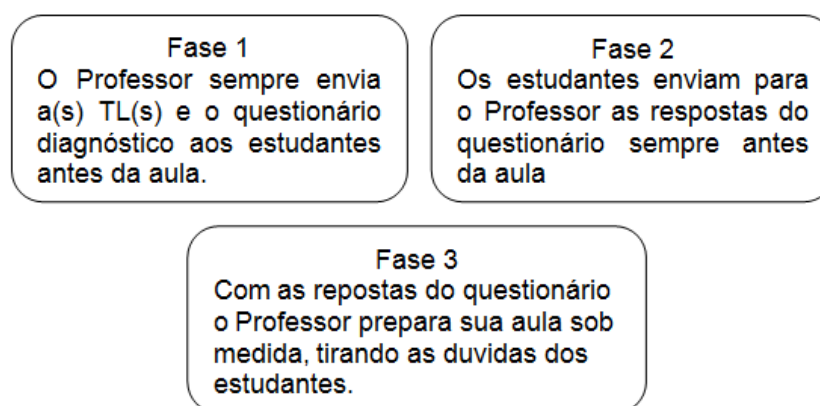
A busca incessante de novos métodos de ensino é uma prioridade internacional no meio educacional. A meta é inovar para que o Professor tenha subsídios para motivar e engajar os estudantes em seu processo de aprendizagem (protagonismo) de tal forma que desenvolva uma aprendizagem significativa dos temas estudados no ambiente escolar ou não. No entanto, há muitas ideias fáceis de defender, todavia difíceis ou inviáveis na prática.

O EsM é um método relativamente simples de ser empregado. Foi construído por Gregor Novak e colaboradores (NOVAK et. al., 1999). O Professor pode aplicá-lo para saber os conhecimentos prévios de seus alunos e assim elaborar suas aulas. Também tem se mostrado muito eficiente para habituar os estudantes a estudarem antes das aulas. Em síntese, a meta do EsM é dar ao Professor alternativas para elaborar suas aulas tendo como ponto de partida aquilo que o estudante sabe e aquilo que ele não sabe, manifestado em repostas fornecidas por eles em atividades

antes dos encontros presenciais, isto é, enviamos atividades para os estudantes e planejamos nossa próxima aula a partir das respostas deles.

Essencialmente o método EsM pode ser resumido em três fases, a saber: (a) *o Professor solicita aos estudantes para ler/estudar previamente materiais de apoio potencialmente significativos (chamados Tarefas de Leitura ou TL) que serão discutidos em sala de aula, propondo-lhes questões conceituais que devem ser respondidas antes da próxima aula. A partir dessas respostas o Professor prepara suas aulas sob medida para os alunos. É importante ressaltar que a avaliação das respostas dos alunos seja pautada no esforço de argumentação do aluno e não no método certo ou errado;* (b) *o Professor promove a discussão em sala de aula, rerepresentando as questões conceituais e escolhendo algumas respostas dos alunos que têm potencial para desencadear a troca de significados entre eles;* e (c) *o professor propõe atividades em grupos referentes aos conceitos desenvolvidos nas questões conceituais e na discussões em sala de aula.*

Esquema único- Resumo do Mecanismo de funcionamento do EsM



Fonte: Própria, 2022.

É importante destacar aqui que o Professor deve avaliar a turma antes de selecionar/elaborar as Tarefas de Leitura (TL) potencialmente significativas e os questionários, ambos sob medida, para a turma. Em suma, as TL's e os questionários sob medida têm que ser elaborados tendo como referência o questionário diagnóstico da turma aplicado pelo Professor.

Capítulo 3

Construindo uma UEPS sobre Física de neutrinos

A seguir apresentamos as etapas da UEPS que utilizamos na construção da SD cuja característica principal é o aumento progressivo da complexidade das atividades em estrita conformidade com aquilo que é preconizado por Moreira.

Total de aulas da SD: 06 aulas de 55 minutos

3.1 Resumo das atividades da Sequência Didática (SD)

O quadro 1 mostra um resumo da proposta de uma SD na forma de UEPS para o ensino de Física de neutrinos.

Quadro 1 – SD na forma de UEPS

Aula 1	Definição do tópico específico a ser abordado. Tema: Física dos neutrinos.
Aula 2	Criar/propor situações que levem os estudantes a manifestar seus conhecimentos prévios escritos aceitos ou não aceitos no contexto do assunto abordado.
Aula 3	Propor situações-problema, em nível bem introdutório, levando em conta o conhecimento prévio do aluno.
Aula 4	Aprofundando o conhecimento.
Aula 5	Avaliação somativa em sala de aula.
Aula 6	Observando a diferenciação progressiva via aula dialogada interativa e entrega aos estudantes de um questionário de opinião.

Fonte: Adaptado de Moreira (2011).

O quadro 2 é um resumo da proposta de uma SD na forma de UEPS para o ensino de Física de neutrinos

Quadro 2 – Atividades da SD (55 minutos/aula)

Aula 1	-Nessa aula o Professor interage verbalmente com a turma, promovendo uma discussão em sala de aula sobre qual a natureza da matéria. Os dados resultantes dessa interação oral Professor-estudantes servirão para o Professor elaborar o questionário diagnóstico da segunda aula.
Aula 2	<p>- Ao longo dessa aula, o Professor aplica o questionário diagnóstico. Se o tempo permitir, o Professor pode escolher algumas respostas do questionário diagnóstico que têm o potencial para promover a socialização do conhecimento ou a troca de significados entre os estudantes e entre esses últimos e o Professor.</p> <p>- Após essa aula o Professor entrega/envia aos estudantes as Tarefas de Leitura, a saber, o Modelo Padrão da Física de Partículas (http://moreira.if.ufrgs.br/modelopadro.pdf) e Partículas e Interações (http://www.sbfisica.org.br/fne/Vol5/Num2/v5n1a03.pdf), para serem estudados em casa, além do questionário conceitual 1 cujas respostas devem ser entregues ao Professor antes da terceira aula.</p> <p>- De posse das repostas do questionário diagnóstico e do questionário conceitual 1, o professor elabora sua terceira aula sob medida para os estudantes, tirando suas dúvidas.</p>
Aula 3	<p>- Durante essa aula o Professor corrige e tira as dúvidas dos estudantes quanto ao questionário conceitual 1. Também se houver tempo, o Professor pode escolher algumas respostas do questionário conceitual 1 que têm o potencial para promover a socialização do conhecimento ou a troca de significados entre os estudantes e entre esses últimos e o Professor. <i>Observação: No Apêndice (pág.61) apresento para o Professor uma sugestão dessa aula 3 expositiva dialoga e interativa sob medida para os estudantes.</i></p> <p>- Após essa aula o Professor entrega/envia aos estudantes as Tarefas de Leitura, a saber, Neutrino (https://en.m.wikipedia.org/wiki/Neutrino); Wolfgang Pauli (https://mathshistory.st-andrews.ac.uk/Biographies/Pauli/); e O Drama de Consciência de um Jovem Cientista http://www.cbpf.br/~cirto/MecEstNaoExten_HTML/AULAS/Aula_03/Morcelle_&_Campbell_&_Tavares_&_Vugman_%28Ettore_Majorana_O_Drama_De_Consciencia_De_Um_Jovem_Cientista%29_%5BCBPF_Ciencia_E_Sociedade_2006%5D.pdf , para serem estudados em casa, além do questionário conceitual 2 cujas respostas devem ser entregues ao Professor antes da quarta aula.</p> <p>-De posse das repostas do questionário conceitual 2, o professor elabora sua quarta aula sob medida para os estudantes, tirando suas dúvidas.</p>
Aula 4	-Durante essa aula o Professor corrige e tira as dúvidas dos estudantes quanto ao questionário conceitual 2. Também se houver tempo, o Professor pode escolher algumas respostas do questionário conceitual

	2 que têm o potencial para promover a socialização do conhecimento ou a troca de significados entre os estudantes e entre esses últimos e o Professor. <i>Observação: No Apêndice (pág.71) apresento para o Professor uma sugestão dessa aula 4 expositiva dialoga e interativa sob medida para os estudantes.</i>
Aula 5	-Nessa penúltima aula, o Professor entrega aos estudantes a avaliação conceitual dissursiva. Cada questão deve ser respondida em uma folha separada fornecida pelo Professor juntamente com a avaliação.
Aula 6	-Durante os 30 primeiros minutos, o Professor promoverá debates individuais ou em equipes entre os estudantes e entre esses e ele mesmo com o intuito de verificar se os estudantes sabem explicar a regressão molécula, átomo, núcleo, prótons, nêutrons, quarks, elétrons, neutrinos. Em suma: se os estudantes são capazes de perceber que há um processo natural que constrói tudo que existe via interações entre partículas e campos. O professor deverá inferir se houve de fato indícios de aprendizagem significativa, isto é, se novos conhecimentos inseridos na rede cognitiva dos estudantes se associaram convenientemente a subsunçores pré-existentes para explicar o que os estudantes não sabiam. -Nos 25 minutos restantes, o Professor se quiser pode ministrar a aula 5 expositiva dialoga e interativa sob medida para os estudantes. <i>Observação: No apêndice (pág.84) apresento para o Professor uma sugestão dessa aula 5 expositiva dialoga e interativa sob medida para os estudantes.</i> - No final da aula o Professor entrega aos estudantes o questionário de opinião que deverá ser espondido em casa e entregue posteriormente ao professor.

Fonte: Própria, 2022.

3.2 Descrição detalhada das atividades da SD

Aula1

-Tempo estimado: 55 minutos

-Descrição: Nessa primeira aula o Professor interage verbalmente com a turma, promovendo uma discussão em sala de aula sobre qual a natureza da matéria ou do que as coisas são feitas. O objetivo dessa aula é o Professor incentivar os estudantes a participar do tema Física dos neutrinos e conhecer (anotar) o que estudantes sabem sobre a composição do Universo observável. O professor utilizará essas informações para elaborar um questionário para a segunda aula.

Aula 2

-Tempo estimado: 55 minutos

-Descrição: No início dessa aula o Professor entrega aos estudantes o questionário diagnóstico sugerido logo abaixo, recolhendo-o tão logo os estudantes o tenham respondido. Se der tempo o Professor pode promover uma discussão em sala de aula a partir de algumas respostas dos estudantes que têm o potencial de promover a negociação de significados entre eles. O objetivo dessa aula é, mais uma vez, levar os estudantes a manifestarem seus conhecimentos prévios. O professor utilizará esses dados para elaborar sua terceira aula.

Sugestão de questionário diagnóstico

Estudante:

Série:

Data:

- 1- O que é uma partícula?
- 2- O que são átomos?
- 3- Onde os átomos são produzidos?
- 4- O que tem dentro deles?
- 5- O que significa a palavra elementar?
- 6- Qual a carga do elétron, do próton e do nêutron?
- 7- Existe alguma coisa imediatamente próxima ao redor do átomo? Se sim, o quê?
- 8- Se prótons repelem prótons, por que o átomo não desmancha?
- 9- Por que o elétron não cai sobre o núcleo?
- 11- Quais são as quatro interações (forças) da natureza?
- 12- Por que é mais fácil ocorrer uma reação química do que uma reação nuclear?
- 13- Já ouviram falar de neutrinos? O que são? Se bilhões de neutrinos nos atravessam a cada segundo, por que não sentimos nada?

Aula 3

-Tempo estimado: 55 minutos

-Descrição: O Professor entrega aos estudantes as Tarefas de Leitura: Modelo

Padrão da Física de Partículas (<http://moreira.if.ufrgs.br/modelopadrao.pdf>) e Partículas e interações (<http://www.sbfisica.org.br/fne/Vol5/Num2/v5n1a03.pdf>) para serem estudados em casa, propondo-lhes que também respondam o questionário conceitual 1 sugerido logo abaixo. Esse questionário deve ser respondido em casa e enviado para o Professor antes da aula. De posse dessas respostas o Professor elabora a aula 03 (constante no apêndice) sob medida para os estudantes, tirando suas dúvidas. Durante a aula, o Professor pode promover uma discussão em sala de aula a partir de algumas respostas dos estudantes que têm o potencial de promover a negociação de significados entre eles. Ao corrigir o questionário, o Professor deve avaliar as respostas dos estudantes como um esforço de argumentação e não como algo certo ou errado adotado em exames de classificação, por exemplo.

Sugestão de questionário conceitual 1

Assunto: O Modelo Padrão de Física das Partículas (MPFP).

Estudante:

Série:

Data:

Questões

1-[22]

O átomo é a menor partícula que identifica um elemento químico. Ele possui duas partes, a saber: uma delas é o núcleo, constituído por prótons e nêutrons, e a outra é a região externa- a eletrosfera-, por onde circulam os elétrons. Alguns experimentos permitiram a descoberta das características das partículas constituintes do átomo.

Em relação a essas características, indique a alternativa correta.

- a) prótons e elétrons possuem massas iguais e cargas elétricas de sinais opostos.
- b) entre as partículas atômicas, os elétrons têm maior massa e ocupam maior volume no átomo.
- c) entre as partículas atômicas, os prótons e os nêutrons têm maior massa e ocupam maior volume no átomo.
- d) entre as partículas atômicas, os prótons e os nêutrons têm mais massa, mas ocupam um volume muito pequeno em relação ao volume total do átomo.

2- [23]

O Modelo-Padrão da Física de Partículas pode ser dividido em dois grandes grupos principais. São eles:

- a) hádrons e léptons
- b) bósons e férmions
- c) mésons e bárions
- d) táuons e múons
- e) bósons e quarks

3- [24]

Assinale a alternativa abaixo que apresenta somente léptons:

- a) Nêutrons, prótons e elétrons
- b) Elétrons, múons e táuons
- c) Fótons, bósons de Higgs e glúons
- d) Neutrinos, quarks e bósons Z e W
- e) Nêutrons e neutrinos

4-[25]

Assinale a alternativa abaixo que apresenta somente partículas elementares:

- a) Elétrons e quarks
- b) Nêutrons e prótons
- c) Átomos e moléculas
- d) Múons e nêutrons
- e) Táuons e prótons

5- [26]

Assinale, entre as alternativas abaixo, aquela que apresenta apenas bárions:

- a) Fótons e glúons
- b) Prótons e elétrons
- c) Nêutrons e prótons
- d) Neutrinos e nêutrons
- e) Glúons e bósons de Higgs

6- [27]

Em Física de Partículas, uma partícula é dita elementar quando não possui estrutura interna. Por muito tempo se pensou que prótons e nêutrons eram partículas elementares, contudo as teorias atuais consideram que essas partículas possuem estrutura interna. Pelo modelo padrão da Física de Partículas, prótons e nêutrons são formados, cada um, por três partículas menores denominadas quarks. Os quarks que constituem tanto os prótons quanto os nêutrons são dos tipos up e down, cada um possuindo um valor fracionário do valor da carga elétrica elementar e ($e = 1,6 \times 10^{-19} \text{ C}$).

A tabela abaixo apresenta o valor da carga elétrica desses quarks em termos da carga elétrica elementar e .

	<i>Quark up</i>	<i>Quark down</i>
Carga elétrica	$\frac{+2}{3}e$	$\frac{-1}{3}e$

Assinale a alternativa que melhor representa os quarks que constituem os prótons e os nêutrons.

- A**
- | Próton | Nêutron |
|---------------------|-------------------|
| <i>up; up; down</i> | <i>up; up; up</i> |
- B**
- | Próton | Nêutron |
|-------------------------|-----------------------|
| <i>down; down; down</i> | <i>up; down; down</i> |
- C**
- | Próton | Nêutron |
|-----------------------|---------------------|
| <i>up; down; down</i> | <i>up; up; down</i> |
- D**
- | Próton | Nêutron |
|---------------------|-----------------------|
| <i>up; up; down</i> | <i>up; down; down</i> |
- E**
- | Próton | Nêutron |
|-----------------------|-------------------------|
| <i>up; down; down</i> | <i>down; down; down</i> |

7- [28]

Os quarks são partículas que, quando ligadas em trios, formam partículas como prótons e nêutrons. Em relação aos quarks, assinale a alternativa correta:

- a) São partículas que não têm massa e, por isso, recebem o nome de bósons.
- b) São partículas não elementares, pois apresentam estruturas internas feitas de partículas ainda menores.
- c) São partículas elementares de carga elétrica parcial menor que a carga elementar.
- d) São as responsáveis pela força de atração que mantém os núcleos atômicos estáveis.
- e) São destruídos nas reações nucleares para a obtenção de energia nuclear.

8-[29]

A Física de Partículas é uma área da Física:

- a) que estuda os diferentes tipos de ligações e reações químicas.
- b) responsável pelo estudo das partículas elementares e da interação entre radiação e matéria.
- c) responsável por explicar reações nucleares.
- d) destinada a formular teorias capazes de unificar a força gravitacional com outras forças da natureza.
- e) que explica, exclusivamente por meio da Física Clássica, as interações entre átomos e moléculas.

9-Cite as quatro interações fundamentais da Natureza, descrevendo a função de cada uma no micromundo da Física das partículas.

10- Se o núcleo do átomo é constituído por partículas carregadas positivamente (prótons), por que esse núcleo não explode?

11- Se cargas elétricas negativas e positivas se atraem, por que os elétrons não são absorvidos pelo núcleo?

12- Se elétrons e prótons têm massa, qual o papel da interação gravitacional na estabilidade do átomo?

13- E os nêutrons, qual o papel deles na estrutura do átomo?

14- Quais são as partículas veiculadoras da força nuclear forte? Como se chama o substrato no interior do qual elas se manifestam?

15- Quais são as partículas veiculadoras da força eletromagnética? Como se chama o substrato no interior do qual elas se manifestam?

16- Quais são as partículas veiculadoras da força fraca? Como se chama o substrato no interior do qual elas se manifestam?

17-No seu entendimento, o que é o Modelo Padrão de Física das Partículas (MPFP)?

18-Conforme o MPFP atual, qual o número total de partículas que compõem a matéria ordinária?

19-O modelo padrão identifica e especifica a matéria escura? E a energia escura?

20-O modelo padrão identifica e especifica a partícula portadora da força gravitacional?

Aula 4

-Tempo estimado: 55 minutos

-Descrição: O professor entrega aos alunos as Tarefas de Leitura:

Neutrino (<<https://en.m.wikipedia.org/wiki/Neutrino>>) ; Wolfgang Pauli

:(<<https://mathshistory.st-andrews.ac.uk/Biographies/Pauli/>>); e O Drama de Consciência de um Jovem Cientista:

<http://www.cbpf.br/~cirto/MecEstNaoExten_HTML/AULAS/Aula_03/Morcelle_&_Campbell_&_Tavares_&_Vugman_%28Ettore_Majorana_O_Drama_De_Consciencia_De_Um_Jovem_Cientista%29_%5BCBPF_Ciencia_E_Sociedade_2006%5D.pdf>),

para serem estudados em casa, propondo-lhes que respondam o questionário conceitual 2 sugerido abaixo que deve ser respondido e enviado para o Professor antes da aula. De posse dessas respostas o Professor elabora a aula 04 (constante no apêndice) sob medida para os alunos, tirando suas dúvidas. Durante a aula, o Professor pode promover uma discussão em sala de aula a partir de algumas respostas dos estudantes que têm o potencial de promover a negociação de significados entre eles. Ao corrigir o questionário, o Professor deve avaliar as respostas dos estudantes como um esforço de argumentação e não como algo certo ou errado adotado em exames de classificação, por exemplo.

Sugestão de questionário conceitual 2

Assunto: Neutrinos

Estudante:

Série:

Data:

Questões

- 1- O que são neutrinos?
- 2- Quem o postulou pela primeira vez? Por quê?
- 3- Quem o identificou experimentalmente?
- 4- Cite algumas fontes geradoras de neutrinos.
- 5- O neutrino é um bóson ou um férmion?
- 6- Quantos tipos de neutrinos existem atualmente? Qual o nome de cada um deles?
- 7- Quantos antineutrinos existem atualmente? Qual o nome de cada um deles?
- 8- Os neutrinos possuem carga elétrica?
- 9- O que são neutrinos cósmicos?
- 10- O neutrino é sensível a qual das quatro interações fundamentais?
- 11- Os neutrinos podem ser capturados facilmente? Por quê?
- 12- Confirme ou refute a frase, justificando sua escolha: o neutrino é mais massivo que o elétron.
- 13- Cite algumas possíveis aplicações dos neutrinos.
- 14- Conforme o genial físico Ettore Majorana, o neutrino teria uma antipartícula ou seria sua própria antipartícula?
- 15- Os neutrinos sofrem oscilação, isto é, se transformam uns nos outros?
- 16- Qual a importância dos neutrinos para a cosmologia?
- 18- Teoricamente, por que os neutrinos poderiam nos trazer informações importantes de como o Universo era 2 minutos após o Big Bang?
- 19- O que é uma desintegração beta?
- 20- Qual foi a maior contribuição de Bruno Pontecorvo quanto aos neutrinos?
- 21- O que são oscilações de neutrinos?

Aula 5

Tempo estimado: 55 minutos

O Professor entrega aos alunos a avaliação individual sem consulta sugerida logo abaixo. Instruções: Cada questão deverá ser respondida em uma folha separada fornecida aos alunos pelo Professor.

Sugestão de avaliação conceitual

- 1- Escreva um texto relatando tudo o que você aprendeu sobre o Modelo Padrão de Física das Partículas (mínimo de 20 linhas)
- 2- Escreva um texto relatando tudo o que você aprendeu sobre neutrinos e suas aplicações tecnológicas (mínimo de 30 linhas)
- 3- No seu entendimento quais foram os impactos científicos, tecnológicos e sociais atuais da proposição do Neutrino em 1930 por Pauli?
- 4- O que você sugere para melhorar sua aprendizagem em Física?
- 5- Dê sua opinião sobre as aulas do Professor e do método de ensino utilizado por ele.

Aula 6

-Tempo estimado: 55 minutos

Descrição: O professor promoverá debates individuais ou em equipes entre os alunos e entre esses e ele mesmo com o intuito de verificar se os estudantes sabem explicar o que é, por exemplo, uma molécula; um átomo; uma partícula; o modelo padrão e para que serve; os neutrinos; oscilação de neutrinos e etc. Em suma: se os estudantes são capazes de perceber que há um processo natural que constrói tudo que existe via interações entre partículas e campos. O professor deverá inferir se houve de fato indícios de aprendizagem significativa, isto é, se novos conhecimentos inseridos na rede cognitiva dos estudantes se associaram convenientemente a subsunçores pré-existentes para explicar o que os estudantes não sabiam. No final da aula o Professor entregará aos alunos o questionário de opinião abaixo para ser respondido em casa e entregue posteriormente ao professor. De posse desse questionário o professor poderá otimizar sua SD no formato UEPS, pois nada em educação, tanto nas áreas científicas como tecnológicas, está pronto, acabado.

Tudo pode sofrer inovações, sempre a todo o momento.

Questionário de opinião

1- Qual sua opinião sobre o uso de textos em nossas atividades em sala de aula?

2- O professor foi receptivo com você quanto à suas dúvidas? Você entendeu a explicação do professor? Você ainda teve dúvidas após as explicações do Professor? O Professor soube contextualizar em sua vivência ou não a matéria ensinada?

3- Ressalte os pontos ruins e bons da metodologia empregada em nossas aulas.

4-Em uma escala de (0 a 10) pontos qual sua nota para:

a) Atuação do Professor:

a.1) Justificativa:

b) Aquilo que você aprendeu:

b1) Justificativa:

5-Escreva algumas sugestões e críticas à nossa sequência didática.

Capítulo 4

A Física de Neutrinos

Desde sempre a humanidade questiona-se sobre a natureza do Universo, isto é, do que ele é feito, ou seja, qual sua composição quanto à natureza da matéria e da energia que o compõem. Cientistas do mundo inteiro visitam o acelerador de partículas do CERN [4] para procurar respostas a essas questões fundamentais, contribuindo assim para aumentar os limites científicos e tecnológicos atuais. Outro acelerador de partículas tão ou mais visitado por pesquisadores e estudantes que o do CERN, devido a seu pioneirismo, está localizado no FERMILAB [5].

A matéria até onde sabemos é formada por moléculas, que por sua vez são constituídas de átomos. Dentro dos átomos, há elétrons gravitando em torno do núcleo, que é composto de prótons e nêutrons, que também não são elementares, ou seja, são compostos por quarks que parecem ser elementares, sem estrutura interna/indivisível, tal como os elétrons.

Tanto os quarks como os elétrons fazem parte de um grupo de partículas ditas elementares estudadas em vários laboratórios ao redor do mundo. Como em diversas experiências foram encontradas uma gama enorme de partículas, os pesquisadores deveram organizá-las tal como Mendeleiev [6] o fez em sua tabela periódica. Atualmente todo o conhecimento consolidado sobre partículas elementares está contido em uma teoria de ponta denominada Modelo Padrão de Física das Partículas (MPFP), que identifica as partículas elementares e especifica suas interações.

Em síntese não representa uma discrepância a afirmação de que na época atual temos uma boa ideia da composição da matéria, de como tudo isso se mantém coeso e da maneira como essas partículas interagem entre si [7].

4.1 O Modelo Padrão

Desde 1930 modelos teóricos e descobertas experimentais feitas pela comunidade internacional de Físicos de várias nacionalidades e culturas construíram um panorama extraordinário da estrutura primordial da matéria: tudo que conhecemos no Cosmos (tudo que existiu, existe e existirá) seria oriundo de partículas fundamentais governadas (até onde sabemos, obviamente) por três interações fundamentais, a saber, a gravitacional; a eletrofraca (unificação entre as interações eletromagnética e nuclear fraca); e a nuclear forte. O melhor entendimento da relação entre esses entes quânticos fundamentais e as interações que os regem está brilhantemente caracterizado no Modelo Padrão de Física das Partículas que desde 1970 explica boa parte dos resultados experimentais e os prevê também com boa precisão. No decorrer dos anos, e após intermináveis e exaustivos testes experimentais, podemos dizer que o Modelo padrão de Física das Partículas representa uma teoria bastante consolidada e confiável [7].

4.2 Partículas de massa

Até onde sabemos toda a matéria ao nosso redor é formada por partículas elementares, isto é, os constituintes da matéria. Essas partículas estão compartimentadas em dois grupos: quarks e léptons, chamados de férmions. Cada grupo é composto de seis partículas, unidas por pares ou famílias. Por um lado, na primeira família temos as partículas mais leves e mais estáveis. De outro, as mais pesadas e menos estáveis estão contidas na segunda e terceira famílias. As partículas da primeira família formam a matéria estável do Universo Observável e todas as partículas mais pesadas se desintegram rapidamente em partículas mais estáveis. Os seis quarks estão separados em três famílias: o “quark up” e o “quark down” constituem a primeira; o “quark charm” e o “quark strange”, a segunda; o “quark top” e o “quark bottom”, a terceira. Há igualmente três cores diferentes de quarks que, por sua vez, só se misturam de uma maneira para formar objetos incolores. Quanto aos seis léptons, também se distribuem do mesmo jeito em três famílias, a saber, o elétron e o neutrino do elétron; o múon e o neutrino do múon; o tau e o neutrino do tau. Não possuem carga cor. Enquanto que o elétron, o múon e o tau têm uma carga elétrica e uma massa considerada, os neutrinos são bastante

poucos massivos, eletricamente neutros e muito difíceis de serem capturados em detectores.

4.3 Forças e partículas portadoras

Conforme o Modelo Padrão há quatro interações fundamentais atuando no Universo observável, ou seja, a interação forte, a interação fraca, a interação eletromagnética e a interação gravitacional. Essa última é menos intensa, mas tem alcance ilimitado. Já a eletromagnética também tem alcance infinito, todavia é bastante mais intensa que a gravitacional. As forças fraca e forte passam a atuar em escalas subatômicas e tem alcance bastante pequeno. Apesar de a força fraca ser muito mais forte que a gravitacional, na realidade é a menos intensa entre as outras duas. Como seu nome o diz, a interação forte é a mais intensa de todas as interações fundamentais.

Essas três forças fundamentais são resultantes da troca de partículas portadoras de força, pertencentes a um grupo chamado “bósons”. Como isso ocorre? As partículas de matéria fornecem quantidades discretas de energia trocando bósons umas com as outras. Cada tipo de interação fundamental tem seu bóson correspondente: a interação forte é transportada pelo “glúon” (um tipo de “cola”); a eletromagnética é veiculada pelos fótons; a fraca é transportada pelos “bósons vetoriais” W^\pm e Z^0 (neutro). Teoriza-se que, mesmo não tendo ainda sido detectada experimentalmente, o “gráviton” seria a partícula de gravidade que transportaria a interação gravitacional. É importante mencionar que o Modelo Padrão engloba as interações eletromagnéticas, fortes e fracas e todas suas partículas portadoras, explicando bem como essas interações atuam sobre toda a gama de partículas conhecidas. Contudo, ironicamente, a interação que governa as grandes estruturas do Universo observável (a gravitacional), tal como os superaglomerados³ de galáxias, não é contemplada pelo Modelo Padrão. Por quê? Porque a teoria quântica que descreve o microcosmo e a teoria da relatividade geral que explica o macrocosmo, não são intercambiáveis (não se “encaixam”) em um modelo físico-matemático único. Mas no mundo do infinitamente pequeno o efeito gravitacional é

³Estruturas de grande escala do Universo observável compostas por um conjunto de aglomerados de galáxias menores gravitacionalmente reunidas.

tão pequeno que pode ser desprezado. A gravitação passa a dominar em escalas bastante maiores que a convencional.

O Modelo Padrão de Física das Partículas é uma construção científica bastante sofisticada e bastante bem-sucedida da Física em geral. Explica e prevê muito bem o mundo subatômico. Contudo, omite a gravitação além de não responder a três questionamentos fundamentais: O que é matéria escura⁴? O que é energia escura⁵? O que aconteceu com a antimatéria após o big bang, ou melhor, por que há mais matéria do que antimatéria no Universo observável?

Sabemos que há muitas questões em aberto, contudo, em seu domínio de atuação é incontestável que o Modelo Padrão é uma teoria de sucesso. Talvez seja apenas a imagem incompleta de uma nova Física profundamente submersa no universo subatômico, ou melhor, a ponta de um imenso “iceberg”. O Modelo Padrão é exaustivamente estudado no Grande Colisor de Hádrons (LHC) [8] e no FERMILAB [5], entre outros, representantes dos mais sofisticados engenhos científico-experimentais planejados e construídos pela engenharia de ponta em nível internacional [9].

4.4 Neutrinos, o que são?

O Neutrino foi proposto por Wolfgang Pauli [10] em 1930 para “salvar” a teoria da conservação da energia e do momento linear. Se o quase nada existe certamente poderia ser chamado de Neutrino, partícula subatômica que oferece grande resistência à sua captura. São produzidas em uma variedade de processos nucleares e termonucleares: dos reatores nucleares a aceleradores de partículas, passando pelas estrelas, aos superaglomerados de galáxias e às supernovas. Também nós mesmos e a Terra o produzimos abundantemente. Seu nome foi inventado por Enrico Fermi [11] e tem origem no diminutivo de nêutron, ou seja, pequeno neutro ou simplesmente neutrino, e faz referência ao fato de não terem

⁴Trata-se de uma componente desconhecida da natureza do Universo observável. Seria provavelmente constituída de partículas elementares não bariônicas (prótons, nêutrons e elétrons) e neutras, interagindo fracamente com a componente gravitacional do Universo. Certamente, uma pequena parte dessa matéria exótica seria composta por neutrinos. Há outras proposições tais como mini-buracos negros; partículas supersimétricas; axions; Wimps.

⁵Tratar-se-ia de uma componente hipotética do Universo observável. É vista como uma pressão negativa. Seria responsável pela aceleração da expansão cósmica evidenciada experimentalmente em 1998.

carga elétrica. Das quatro interações fundamentais do Cosmos, o Neutrino é sensível apenas à interação gravitacional e à interação fraca (responsável pela desintegração ou decaimento atômico). Como os neutrinos são muito pouco massivos talvez inferior a $1,5 \times 10^{-37} \text{ kg} \approx 0,086 \frac{\text{MeV}}{c^2}$) atravessam o Cosmos com velocidade próxima à da luz e raramente interagem com outros átomos (são invisíveis quanto às interações eletromagnética e forte). Na expressão acima eV⁶ é uma unidade de medida de energia chamada elétron-volt e “c”⁷ representa a velocidade da luz no vácuo, que representa a máxima velocidade que conhecemos no Universo observável.

Uma quantidade extraordinária e inimaginável de neutrinos foi produzida frações de segundos após o big bang, o que significaria que teríamos 10⁹ mais neutrinos do que prótons no Universo Observável conforme o Físico Karsten Heeger da Universidade de Yale. Apesar de serem tão abundantes no Cosmos, e obviamente em nossas vidas, os neutrinos representam um mistério para a Física, pois são dificilmente capturados, sendo necessários bilhões deles para detectarmos 1 ou 2! Como o átomo é quase um vazio o Neutrino não encontra dificuldades em atravessá-lo, interagindo raramente com o núcleo. Poderíamos afirmar que a matéria lhe é quase transparente! Nesse instante em torno de 10¹¹ neutrinos atravessam o corpo do leitor (a)! Até onde sabemos há três tipos de neutrinos [12]. No livro Buracos negros e distorções do tempo [13], Kip S. Thorne (Nobel de Física) define o Neutrino como uma partícula muito leve que se parece com os fótons, exceto que praticamente quase não interage com a matéria. Os neutrinos, por exemplo, produzidos no centro do sol atravessam quase instantaneamente todo o plasma solar sem serem absorvidos ou difundidos, contrariamente aos fótons que levaram milhares ou milhões de anos para poderem atravessá-lo.

É pertinente comentar a disputa intelectual amigável entre Paul Dirac [14] e Ettore Majorana [15] cuja intelectualidade era comparada às de Galileu, Newton e Einstein. De um lado, Dirac postulou a existência da antimatéria, com a confirmação

⁶1MeV=10⁶ eV. O elétron-volt (eV) é uma unidade de energia adaptada ao mundo microscópico. É a energia cinética adquirida por um elétron quando acelerado no vácuo por uma diferença de potencial (ddp) de 1 Volt (1V). No Sistema Internacional de Medidas (SI) 1eV ≈ 1,602x10⁻¹⁹ Joules (J). O elétron-volt é uma unidade de energia extremamente pequena. São necessários 6x10¹⁸ eV (6 bilhões de bilhões) para elevar 100 gramas à uma altura de 1 metro, isto é, 400.00 vezes a energia do LHC.

⁷A velocidade da luz no vácuo é aproximadamente $3 \times 10^8 \frac{m}{s}$.

experimental acontecendo anos mais tarde. De outro, Majorana postulou que o neutrino seria sua própria antipartícula [16]. Há vários experimentos [17] em andamento atualmente para resolver a seguinte questão: o Neutrino é uma partícula (férmion) de Dirac ou partícula (férmion) de Majorana? Tudo indica que Majorana ganhará essa disputa, explicando de vez um pouco de “o porquê” de haver mais matéria que antimatéria no Universo observável, isto é, por que existimos.

Capítulo 5

Suporte didático pedagógico ao Professor: Física de neutrinos

“Quem aqui fala de harmonia? Você ignora o que é o “mundo” (Universo)? Uma luta atroz, monstruosa, na sombra que agita a discórdia... Ó quedas, colapsos, acasos, luta, espuma, choques sem número!” Elémir Bourges (La Nef, 1904).

5.1 Os átomos

5.1.1 Qual a natureza da matéria?

Esta questão esconde uma grande dificuldade que ainda hoje não é totalmente respondida. A matéria é aquilo que conhecemos e da qual somos feitos. Sua análise ocupou praticamente todo o século XX. O resultado é o Modelo Padrão de Física das Partículas, que compreende 12 partículas consideradas atualmente como elementares. Mas a matéria que vemos todos os dias não é a única possível. Em parte, os raios cósmicos são constituídos de partículas instáveis, assim, não podendo existir em nosso meio ambiente. São produzidas a partir de certas reações altamente energéticas e se desintegram rapidamente, tendo como produto partículas ordinárias.

Os átomos são os constituintes da matéria. Foram imaginados pelos filósofos gregos na antiguidade (Démocrito, no século IV antes de Cristo) que lhes deram o nome de átomo, que significa literalmente indivisível, sem estrutura interna.

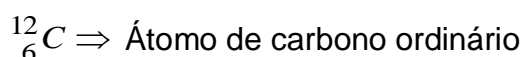
Mas os átomos são complexos e algumas descobertas o demonstraram: a descoberta do elétron é uma longa história. Tudo começou com a classificação periódica dos elementos por Dmitri Mendeleiev que forneceu os primeiros indícios. Em seguida Georges Stoney em 1874 obteve outras informações a partir da eletrólise e enfim o elétron foi evidenciado experimentalmente por J.J. Thomson em

1897 em feixes de raios catódicos, o que lhe valeu o prêmio Nobel de Física em 1906. Essas pesquisas evidenciaram que o átomo continha elétrons, partículas negativas. Concomitante à descoberta do elétron, o núcleo foi descoberto em 1911 por Ernest Rutherford.

Rutherford bombardeou uma folha muito fina de ouro com partículas alfa (núcleo de hélio) e observou que a maioria delas atravessava a folha de ouro sem ser perturbadas enquanto que algumas delas são desviadas fortemente. Então, concluiu que a matéria era formada de partículas minúsculas separadas por um vazio bem mais vasto. Essas partículas são os núcleos atômicos, no caso de ouro. A experiência de Rutherford, além de descobrir os núcleos, permitiu calcular seu volume e a distância entre eles nos dá o tamanho do átomo, que podemos comparar com seus núcleos.

Os átomos são neutros. Caso contrário a matéria da qual somos feitos seria carregada, o que obviamente não é o caso. Como os átomos contêm elétrons negativos, é necessário que uma carga positiva equivalente seja associada. É natural pensar que se localiza no núcleo, o que é confirmado pelas experiências. É a atração eletromagnética entre a carga positiva do núcleo e os elétrons que mantém coesos esses últimos ao núcleo do átomo.

Resumidamente, os átomos são constituídos de um núcleo, comportando Z prótons (carga elétrica +Z) e N nêutrons, circundado por uma nuvem de Z elétrons, o que lhe assegura sua neutralidade. O número Z de prótons é chamado número atômico do átomo cuja função é caracterizar o átomo. O número total de núcleons (prótons e nêutrons), $A=Z+N$, é denominado número de massa do átomo, que é por definição um número inteiro. O átomo é representado por seu símbolo, apresentando como índice seu número atômico e seu número de massa, os dois do lado esquerdo:



Nuvem eletrônica e neutralidade são realizadas em condições de temperatura (energia) normal. Isso constitui o modelo planetário do átomo de Niels Bohr, onde o, por analogia, o Sol representaria o núcleo do átomo e os elétrons representariam os planetas. Em Mecânica Quântica isso não é válido, no entanto o modelo de Bohr explica bastante bem o átomo de hidrogênio.

5.1.2 Massa de um átomo

A massa do átomo está concentrada quase unicamente em seu núcleo que comporta aproximadamente o mesmo número prótons e de nêutrons. Isso é verdadeiro, sobretudo para os átomos mais pesados. A massa do próton é aproximadamente de $1,7 \times 10^{-27}$ kg, ou seja, 1,7 milésimos do bilionésimo do bilionésimo do miligrama. A massa do nêutron é quase igual. A massa do elétron é ainda menor: $9,11 \times 10^{-31}$ kg, ou seja, 1836 vezes menor que a massa do próton. 99,97% da massa do átomo está concentrada em seu núcleo.

Atualmente, utiliza-se outro sistema de unidades, melhor adaptado aos valores das massas. Os Físicos trabalham com as partículas⁸ em grandes aceleradores, provocando colisões de uma partícula projétil sobre um alvo fixo ou de dois jatos de partículas opostas um contra o outro. Assim, determinam-se as características do choque pela energia que é comunicada às partículas projéteis. Como nos primeiros aceleradores as partículas eram aceleradas por campos elétricos, adquiriu-se o hábito de determinar a energia comunicada à uma partícula pela diferença de potencial que lhe é aplicada. O elétron-volt (eV) é uma unidade de energia adaptada ao universo microscópico. Relembrando, 1 eV é a energia cinética que é fornecida a um elétron acelerado no vácuo por uma diferença de potencial de 1 volt. No (SI) $1\text{eV}=1,602 \times 10^{-19}$ joules. Podemos também utilizar os múltiplos: KeV (Kilo eV= 10^3 eV); MeV (Mega eV= 10^6 eV); GeV (Giga eV= 10^9 eV); TeV (Tera eV= 10^{12} eV). A energia do acelerador mais poderoso já construído, o LHC⁹, é atualmente de 6,5 TeV. Trata-se de um acelerador de partículas que acelera prótons ou íons a uma velocidade próxima à velocidade da luz. Consiste de um anel de 27 km de circunferência situado a 100 m abaixo da superfície, composto essencialmente de ímãs supercondutores e equipado de estruturas de aceleradoras que aumentam a energia das partículas que circulam em seu interior. Relembrando, 1eV é uma energia extremamente pequena. Seriam necessários 6×10^{18} eV (6 bilhões de bilhões) para erguer 100g a um metro de altura, ou seja, 400.000 vezes a

⁸Partícula não é um corpúsculo, um corpo diminuto. Por exemplo, podem não ter massa e, além disso, não têm posição situada, *i.e.*, não podem ser localizadas com precisão (MOREIRA, M.A. Física na Escola, v. 5, n. 2, 2004)

⁹LHC (Large Hadron Collider: Grande Colisor de Hádrons, em tradução livre). É um laboratório de Física de Partículas, ou de altas energias, situado perto de Genebra (na fronteira franco-suíça) e instalado no CERN (European Council for Nuclear Research/Conseil Européen pour la Recherche Nucléaire : Organização Europeia para a Pesquisa Nuclear, em tradução livre).

energia do LHC! A principal meta do LHC é coletar dados sobre colisões de feixe de partículas de prótons a uma energia cinética de 7eV (1,12 microjoules) por partícula, ou núcleos de chumbo a uma energia cinética de 574 TeV (92,0 microjoules).

Mas, por que esse laboratório é chamado de Grande Colisor de Hádrons?

- “Grande”, porque faz referência às suas dimensões de aproximadamente 27 km de circunferência;

- “Colisor”, porque permite a dois feixes de partículas, deslocando-se em sentido oposto, de entrar em colisão em quatro pontos da máquina; e

- “Hádrons”, porque acelera prótons ou íons, que pertencem à família de partículas chamada hádrons.

Quando dispomos em um acelerador com energia suficiente podemos criar energia suficiente para produzir um par elétron-pósitron (matéria-antimatéria) .

Isso em virtude da equação da Einstein $E = mc^2$, que indica que matéria e energia são equivalentes: uma pode se transformar na outra, isto é, duas facetas de uma mesma realidade. No sentido inverso, um par elétron-pósitron pode desaparecer e a energia correspondente é criada. Devido à essa equivalência, os Físicos têm o costume de exprimir as massas das partículas em unidades de energia. Desde que

$E = mc^2 \Rightarrow m = \frac{E}{c^2}$, a unidade escolhida é $\frac{MeV}{c^2}$ ou $\frac{GeV}{c^2}$, todavia e muito frequentemente, por abuso de linguagem, anota-se simplesmente MeV ou GeV , omitindo $\frac{1}{c^2}$. Caso o leitor encontre a massa de uma partícula em GeV , deve lembrar que na realidade é $\frac{GeV}{c^2}$.

5.1.3 Os isótopos

Consideremos um átomo cujo núcleo contenha apenas um próton e um nêutron. Já que tem apenas uma carga elétrica, terá apenas um elétron (número de prótons é igual ao número de elétrons). Ora, são os elétrons que determinam as propriedades químicas dos corpos, por isso será o hidrogênio, como se existisse apenas um só próton. Como sua massa é maior, é chamado de hidrogênio pesado e quando combina com o oxigênio, temos a famosa água pesada. Esse hidrogênio

pesado é chamado de isótopo e é comumente chamado de deutério cujo símbolo é D. Associando um segundo neutro ao núcleo (1próton + 2 nêutrons), ainda teremos o hidrogênio, contudo mais pesado ainda, chamado Trítium (T). O hidrogênio é o único átomo cujos isótopos têm nomes distintos.

O vocábulo isótopo vem do grego isos = mesmo, e topos= lugar. Isso quer dizer que todos os isótopos de um elemento químico ocupam o mesmo lugar na tabela periódica, pois essa foi construída conforme propriedades químicas que não dependem do número de nêutrons. Há também outro elemento que possui dois prótons e 1 nêutron, logo tem duas cargas elétricas e assim sendo não tem as mesmas propriedades químicas que o hidrogênio: é o hélio. Como comporta três núcleons, é chamado de hélio 3. Há ainda outra variante: o hélio 4, segundo isótopo do hélio. Esse último contém exatamente dois prótons, senão não seria o hélio, e dois nêutrons. É mais pesado que o hélio 3, mas têm as mesmas propriedades químicas, o que não quer dizer que possuem as mesmas propriedades físicas.

Podemos concluir que todos os núcleos atômicos que têm o mesmo número de prótons e número diferente de nêutrons têm as mesmas propriedades químicas e ocupam o mesmo lugar na tabela periódica. São os isótopos desse elemento. Somente os isótopos cujo número de nêutrons é próximo do número de prótons (menos do dobro) possuem estabilidade.

5.1.4 Tamanho de um átomo

Quanto às dimensões dos átomos, podemos afirmar que é minúscula qual seja da ordem de 10^{-10} m, isto é, um décimo do bilionésimo do metro. A unidade dimensional utilizada como unidade de comprimento é o fermi (fm) ($1\text{fm}=10^{-15}$: um um bilionésimo do bilionésimo do metro). Assim a dimensão de um átomo é da ordem de 100.000 fermis enquanto o núcleo mede somente alguns fermis. O núcleo do átomo é 100.000 vezes menor que o átomo. O átomo é um vazio!

Muitos estudantes perguntam se a noção de tamanho de um núcleo atômico tem sentido. É impossível fotografar um núcleo para medir seu diâmetro. Utiliza-se outra técnica, bombardeando o núcleo com projéteis suficientemente pequenos. A maior parte destes projéteis continua sua trajetória sem ser perturbados. No entanto, alguns deles colidem com o núcleo e quicam para cima, ou seja, são difundidos. Por analogia, suponhamos que enviemos com os olhos vendados pequenas flechas

sobre um alvo. O ruído da flecha que colide com o alvo permite apenas contar quantas delas atingiram o alvo. Imaginemos agora que enviemos aleatoriamente várias flechas na região do alvo, a razão entre aquelas que atingiram o alvo e o número total de flechas permite deduzir a superfície do alvo em relação àquela do muro, assim o diâmetro do alvo. O problema reside no fato de que, dependendo do tipo de flecha (nêutron, próton e elétron), os resultados são um pouco diferentes, mas apenas a ordem de grandeza é o suficiente.

Em relação ao elétron sabemos pouco sobre seu tamanho, já que não temos meios para sabê-lo. Todavia, sabe-se que é menor que 10^{-18} m, ou melhor, 10^{-3} fm. O elétron é 1.000 vezes menor que o núcleo e 10^8 vezes menor que o átomo. Se o núcleo de um átomo de hidrogênio (um próton) tivesse 1 mm de diâmetro (uma cabeça de alfinete), o elétron mediria menos de um micrometro (uma bactéria) e gravitaria ao redor do próton à 100m de distância. Nessa mesma escala, o núcleo teria uma massa de 170 milhões de toneladas e o elétron 9.000 toneladas. Na demonstração abaixo, considerando o átomo como uma esfera, podemos verificar que o átomo é totalmente vazio!

$$\frac{V_{\text{núcleo}}}{V_{\text{átomo}}} = \frac{\frac{4}{3}\pi \phi_{\text{núcleo}}^3}{\frac{4}{3}\pi \phi_{\text{átomo}}^3} \rightarrow \frac{V_{\text{núcleo}}}{V_{\text{átomo}}} = \frac{\phi_{\text{núcleo}}^3}{\phi_{\text{átomo}}^3}. \text{ Como } \frac{\phi_{\text{núcleo}}}{\phi_{\text{átomo}}} = 10^{-5} \Rightarrow \frac{V_{\text{núcleo}}}{V_{\text{átomo}}} = \left(\frac{\phi_{\text{núcleo}}}{\phi_{\text{átomo}}}\right)^3$$

$$\rightarrow \frac{V_{\text{núcleo}}}{V_{\text{átomo}}} = (10^{-5})^3 \rightarrow \frac{V_{\text{núcleo}}}{V_{\text{átomo}}} = 10^{-15} \rightarrow V_{\text{núcleo}} = 10^{-15} V_{\text{átomo}} \rightarrow \text{O volume do núcleo}$$

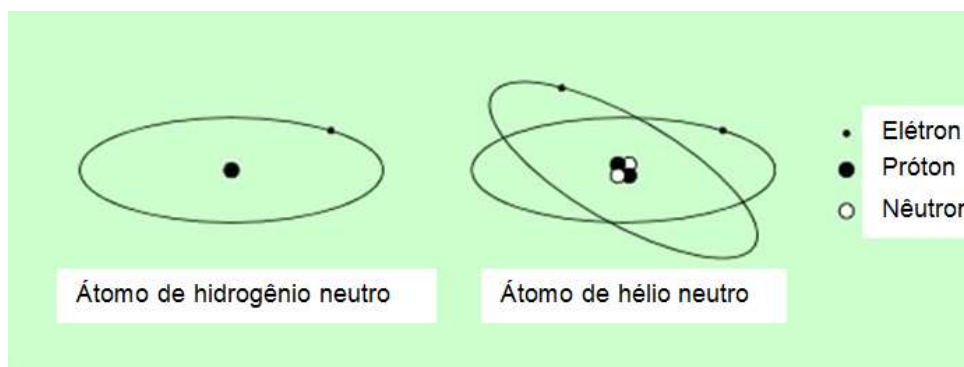
é de um milionésimo de um bilionésimo daquele do núcleo ou ainda 99,99999999999999% do átomo é vazio!

A analogia acima tem como consequência uma reflexão pertinente: todo o estado de equilíbrio da matéria da qual somos feitos é construído pelos elétrons, bastante pequenos, mas essenciais à manutenção do Cosmos¹⁰. Além do mais, também são responsáveis pela estabilidade das anãs brancas¹¹. A figura 1 a seguir representa dois átomos com o auxílio do modelo planetário.

¹⁰Cosmologicamente, tudo que existiu, existe e existirá: definição informal de Carl Sagan, astrônomo americano.

¹¹Astro extremamente denso, com uma massa menor ou igual a 1,44 vezes a massa do Sol. Trata-se de um resíduo de uma estrela modesta de aproximadamente 8 vezes a massa do Sol cujo combustível nuclear esgotou e suas camadas superiores foram ejetadas para o espaço sob forma de nebulosa planetária.

Figura 1: Modelo planetário



Fonte: Física de Partículas (http://astronomia.fr/6eme_partie/physiqueParticules.php)

Sem levar em conta as proporções, o esquema da figura acima representa o modelo planetário do átomo de Bhor. Elaborado antes da Mecânica Quântica, este modelo clássico representa satisfatoriamente os níveis eletrônicos de energia do hidrogênio, explicando bem seu espectro desde o infravermelho até o ultravioleta. Esse modelo falha ao tentar explicar a maioria dos átomos. Trata-se de um modelo determinístico oposto ao modelo da Mecânica Quântica, onde a noção de trajetória definida não existe. A Mecânica Quântica é uma ciência absolutamente probabilística.

5.1.5 Cortejos eletrônicos

Ao redor dos átomos orbitam um conjunto de elétrons que, ligados ao núcleo, asseguram sua neutralidade. Esses elétrons são responsáveis pelas propriedades química dos átomos. E também de numerosas propriedades físicas, como a fluorescência.

5.1.6 Estabilidade

No entanto, qual a origem da estabilidade dessas estruturas atômicas? Por que os núcleons se mantêm coesos uns aos outros no interior do núcleo? Por que há interações que os unem uns aos outros.

5.1.7 A ideia de força

Historicamente, a noção de força foi introduzida por Newton para explicar que o Sol atrai a Terra, fazendo-a gravitar em torno dele. Essa noção de força está em desuso pelo menos no campo do infinitamente pequeno (Física de partículas) e do infinitamente grande (Cosmologia: Einstein geometrizou a gravitação, por exemplo). O termo força teve sua contribuição na tentativa de explicação do mundo, todavia parecia um pouco misterioso devido sua ação à distância e instantânea. Foi brilhantemente substituída por Einstein pela noção relativística de interação, que é transmitida por um campo que se propaga com velocidade finita (aquela da luz) via ondas. *Um campo materializa a presença, em cada ponto de espaço, da influência da fonte da interação.* As interações em questão são a eletromagnética; a gravitacional; a nuclear fraca; e a nuclear forte. Segue abaixo, a descrição de cada uma delas.

5.1.8 Interação eletromagnética

Desde a antiguidade, a interação magnética é conhecida sob duas formas, a saber, o ímã natural (magnetita, Fe_3O_4), capaz de atrair o ferro, e o âmbar (elétrons em grego), que, atritado, atrai os corpos leves como poeiras. O ímã age por interação magnética e o âmbar por interação elétrica. Todavia, essas duas formas, fortemente desiguais na aparência (o ímã natural não age sobre o âmbar), foram unificadas por Maxwell e passaram a se chamar força eletromagnética. A fundamentação dessa unificação é justificada por dois casos, a saber: por fios de cobre que giram no interior de um campo magnético fixo, produzindo assim uma força motriz; e pelo dínamo, no interior do qual é um ímã que gira no interior de uma bobina de fios de cobre. O campo magnético variando por causa da rotação, induz uma corrente elétrica no fio. Conclui-se então que a corrente elétrica e o campo magnético induzem um ao outro. A interação eletromagnética foi estudada quanto à luz e atua entre partículas carregadas, as mais conhecidas sendo os prótons e os elétrons. É responsável pela manutenção dos elétrons em torno do núcleo, em número igual ao dos prótons, assegurando a neutralidade elétrica dos átomos.

5.1.9 Interação forte

Sabemos que é necessária uma interação que atue tanto sobre os prótons como sobre os nêutrons, para explicar a estabilidade do núcleo dos átomos. Como os nêutrons são nêutrons, a interação eletromagnética não é viável. A interação gravitacional é exatamente muito fraca, como veremos em breve. Logo, devemos propor uma interação específica com propriedades bastante específica. Para ilustrar, peguemos o núcleo de hélio que tem dois prótons colados um ao outro. Como os prótons têm cargas positivas, deveriam se afastar violentamente. Para que isso não ocorra deve existir uma interação bem mais intensa que a eletromagnética que foi chamada de interação forte e que deve agir indiferentemente sobre prótons e nêutrons já que esses estão fixos no núcleo. Todavia, para haver a estabilidade do núcleo de hélio precisamos acrescentar pelo menos um nêutron para participar da reação e reter os dois prótons sem com isso aumentar a repulsão, pois é neutro. Sem esse nêutron os dois prótons se separariam. É por esse motivo que o hélio 2 (2 prótons, sem nêutrons) não existe.

A interação forte é bem mais intensa que a interação eletromagnética: 10^{37} vezes maior, isto é, 10 bilhões de bilhões de bilhões de bilhões! Um número inteiramente inimaginável. Por isso é infinitamente mais fácil provocar uma reação química cuja natureza é eletromagnética do que uma reação nuclear, que demandaria, obviamente, muito mais energia. Se a interação forte fosse de longo alcance, todos os núcleons estariam reunidos em um só núcleo atômico! Nesse caso o Universo seria um buraco negro. Manifestamente não é o caso, e isso somente pode ser explicado admitindo que a interação forte tenha um curtíssimo alcance. De fato, seu domínio de influência é da ordem de grandeza das dimensões do núcleo atômico e é exatamente isso que determina essas dimensões: se o alcance da interação forte fosse maior, os núcleos atômicos teriam dimensões bem, maiores! É bastante forte a menos de 1 fermi (10^{-15} m), contudo praticamente sem influência acima desse patamar dimensional. O diâmetro de um núcleo atômico mede um pequeno número de fermis, uma dúzia para os maiores.

Ressaltamos duas implicações importantes advindas do curto alcance da interação nuclear forte, a saber:

- O domínio da interação forte sobre a repulsão eletromagnética é válido apenas para pequenas distâncias. Colocando vários prótons em um mesmo núcleo, já que não podem estar todos em um mesmo lugar, sua distância dois a dois aumenta e

assim a interação forte diminui para os mais afastados mais rapidamente que a interação eletromagnética. A certa distância então, a interação eletromagnética sobrepujará a interação forte. Dessa forma, podemos pensar em propor uma fronteira para a solidez dos núcleos. Esse limite se manifesta de duas formas distintas: primeiramente quanto à limitação do peso dos átomos, o mais pesado tendo somente 92 prótons (urânio natural) e em segundo quanto à ruptura espontânea de certos núcleos ou radioatividade e quanto à energia estelar. A repulsão eletromagnética torna muito difícil a fusão quando mantemos os prótons distantes uns dos outros. Assim, seria difícil a fusão de dois núcleos leves para formar um mais pesado: em parte, é exatamente isso que permite que uma estrela viva muito tempo em vez de explodir imediatamente após sua formação.

5.1.10 Interação fraca

Observamos na natureza algumas transformações de partículas, tal como a desintegração do nêutron: $n^0 \rightarrow p^{+1} + e^{-1} + \bar{\nu}_e$, onde $\bar{\nu}_e$ representa o antineutrino do elétron ou eletrônico. Como o nêutron é eletricamente neutro, não há carga elétrica antes da reação (antes da flecha). O mesmo deve ocorrer depois da flecha, pois o princípio da conservação da carga elétrica deve ser observado. Ora, o próton que substitui o neutro tem carga positiva e assim essa carga deve ser anulada por uma carga de valor absoluto $-e$. E é justamente o aparecimento de um elétron que provê isso. No entanto, ao fazer o balanço energético da desintegração, o resultado é catastrófico: a energia não é conservada, isto é, detecta-se mais energia antes da reação que depois dela. Onde está a diferença? O princípio da conservação da energia, tido como fundador da Física, tem que ser respeitado. Brilhantemente, Wolfgang Pauli postulou a existência de uma nova partícula que transportaria com ela a energia faltante. De um lado, essa partícula deveria ser neutra, pois o equilíbrio elétrico ocorria. De outro, como o equilíbrio de massas ocorria, a massa dessa nova partícula deveria ser nula ou muito pequena, ou seja, menor que os erros de medida. Enrico Fermi nomeou-a neutrino (pequeno neutro). Todavia essa reação abundante na natureza despertava um problema fundamental: tanto a interação eletromagnética como a interação forte não explicavam essas alterações. Assim, invocou-se uma nova interação que foi chamada de interação fraca, pois medidas

mostravam que era mais fraca ainda que a interação eletromagnética. Manifesta-se em todas as reações onde participam elétrons e neutrinos.

5.1.11 Interação gravitacional

Desde tempos remotos essa quarta interação é bastante natural e evidente. Todavia poucas pessoas, ainda no século XXI, imaginam que é necessária uma força para nos manter no solo. As interações eletromagnética e gravitacional compartilham uma característica comum: ambas possuem um alcance infinito. Também são aditivas: se temos um elétron e passarmos a utilizar dois elétrons, dobramos a força eletromagnética. De modo análogo, dois planetas se atraem duas vezes mais que um só. Temos outra diferença ainda quanto à intensidade delas: a interação gravitacional é 10^{34} vezes mais fraca que a interação eletromagnética. Para a gravidade, realmente a união faz a força. No Sol, todos os átomos que o constituem se aglomeram para criar a interação gravitacional que arrasta consigo todos os planetas. O motivo é simples: como todas as massas são positivas, elas se adicionam, não se neutralizando. O oposto ocorre com as cargas elétricas: como possuem sinais opostos, uma anula a outra. Apesar de ter alcance infinito, a interação eletromagnética tem limite por causa da neutralidade da matéria.

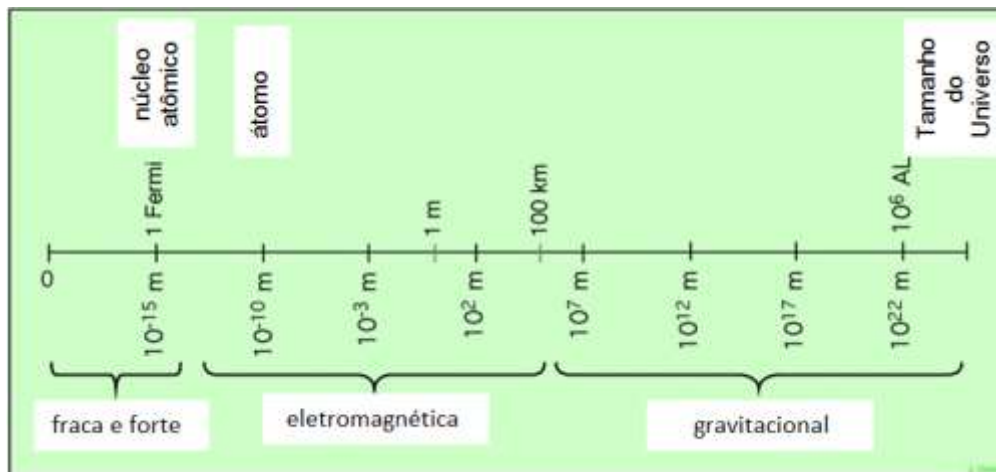
Por um lado, em nível microscópico a interação gravitacional é tão fraca que não apresenta influência alguma sobre as partículas. Por outro, em níveis astronômico e cosmológico, é sentida por todas as estruturas cósmicas, pois seu aspecto associativo tanto em pequenas como em grandes escalas, permite-a ultrapassar todas as outras interações. De resto, a escala das outras é desprezível, isto é, as interações forte e fraca têm alcance curto enquanto a eletromagnética tem alcance infinito, mas limitado pela neutralidade natural global da matéria. Agora então podemos fazer uma distinção entre os dois domínios, a saber:

- Microscópico (infinitamente pequeno), onde reinam as interações eletromagnética, fraca e forte; e
- Macroscópico (infinitamente grande), onde domina em absoluto (sem compartilhar) a gravidade, pelo menos até onde sabemos.

Em última análise, essas quatro interações bastam para explicar toda a Física dos bárions, desde as partículas até o Universo observável. A figura 2 abaixo

representa o alcance das quatro interações da natureza.

Figura 2: Interações fundamentais



Fonte: Física de Partículas (http://astronomia.fr/6eme_partie/physiqueParticules.php)

5.1.12 Química, Física nuclear e Fusão nuclear.

Quando nos referimos a reações químicas, falamos em “colar” átomos completos uns aos outros e essa “cola” é denominada força eletromagnética. Contudo, são os elétrons que orbitam ao redor do núcleo que são responsáveis pela formação das moléculas (conjunto de átomos). Ao contrário, as reações nucleares ocorrem nos constituintes dos núcleos (prótons e neutros), que se mantêm coesos devido à interação forte.

Assim, o domínio da química ocorre em uma escala de distâncias 100.000 maior que aquela da Física nuclear. Porém a energia típica de uma reação química é de alguns elétron-volts enquanto em reações nucleares essa energia é de MeVs (milhões de elétron-volts).

É remarcável que a luz solar transporte uma energia da ordem de 1eV, ou seja, da mesma ordem de grandeza que aquela requerida para as reações químicas. Essa concordância permite a ocorrência da fotossíntese sem a qual não existiríamos.

De um lado, a fusão constrói núcleos pesados a partir de núcleos mais leves (fusão do hidrogênio, do hélio, do carbono...). De outro, a fissão destrói os núcleos pesados para formar núcleos mais leves (fissão do urânio...). A fusão do hidrogênio

fornece 27 MeV por núcleo de hélio produzido enquanto a fissão do urânio restitui 200 MeV por átomo desintegrado. Assim a energia nuclear é dezenas de milhões de vezes maior que a energia química. Esses dados podem nos levar a acreditar que a fissão é mais energética que a fusão. Para produzir 27 MeV, a fusão utiliza 4 prótons ou uma massa de $4m_p$. Então temos $27/4 = 6,75$ MeV por núcleon (por unidade de massa). Para produzir 200 MeV, a fissão desintegra um átomo de urânio 235, de massa $235m_p$, isto é, somente $200/235 = 0,85$ MeV por núcleon. Concluindo: a fusão do hidrogênio produz oito vezes mais energia que a fissão do urânio.

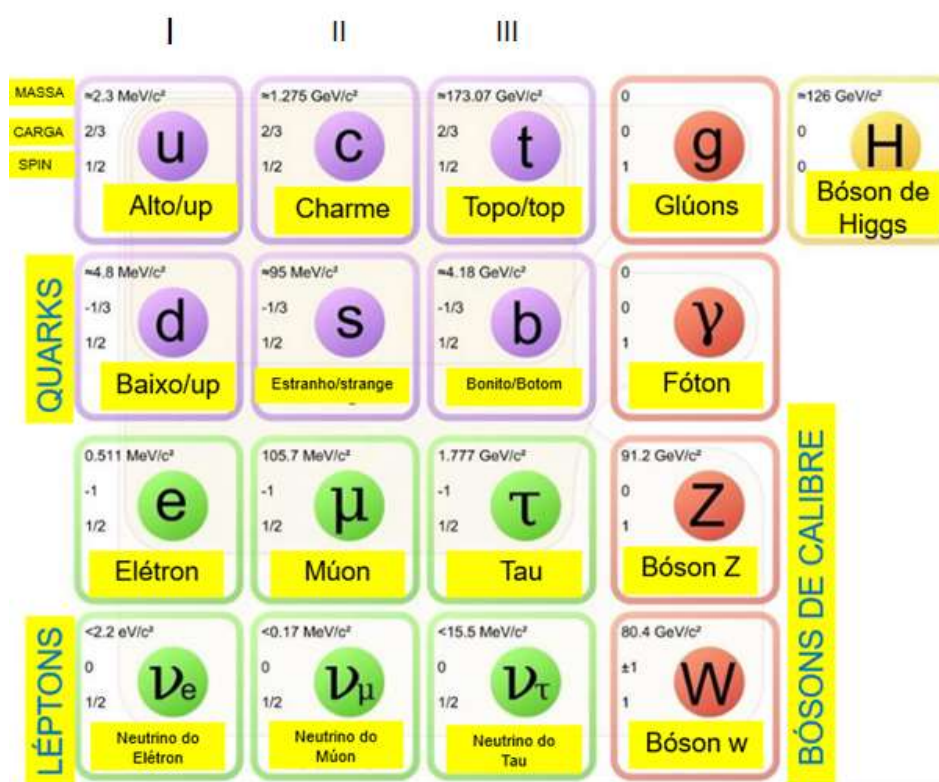
Grosseiramente, podemos comparar as distâncias e as energias nos dois domínios, químico e nuclear (átomos para a química e núcleons para o núcleo atômico). Por um lado, na química a distância está em torno de 10.000 fm^{12} e a energia 1eV. Por outro, na Física nuclear a distância está entre 1fm e a energia 100.000.000 eV [18].

5.1.13 Modelo padrão de Física de partículas ou simplesmente Modelo Padrão

A figura 3 abaixo detalha o modelo padrão atual de Física das partículas. Observe que a gravitação, a matéria escura e a energia escura não são contempladas.

¹² O fentometro (símbolo fm) é uma mediana de unidade de comprimento derivada do metro. Vale 01 milionésimo do bilionésimo, ou seja: $10^{-15} \text{ m} = 0,000000000000001 \text{ m}$

Figura 3- Modelo Padrão



Fonte: Wikipédia

(https://fr.wikipedia.org/wiki/Mod%C3%A8le_standard_de_la_physique_des_particules).

O Modelo Padrão é uma teoria que concerne o eletromagnetismo, as interações nuclear fraca e forte e a classificação de todas as partículas subatômicas conhecidas. Foi desenvolvida durante a segunda metade do século XX em um ambiente colaborativo internacional, sobre os alicerces teóricos da mecânica quântica¹³. Sua formulação atual terminou em meados dos anos 70 após a confirmação experimental dos quarks. A credibilidade do Modelo Padrão aumentou muito com a descoberta do quark top (1995), do Neutrino do tau (2000) e do bóson de Higgs (2012). Todas as partículas do Modelo Padrão foram observadas experimentalmente. Consegue explicar uma variedade de resultados experimentais e muitas vezes o Modelo Padrão é visto como uma teoria de quase tudo.

Trata-se de uma representação teórica específica para ser aplicada a objetos

¹³Parte da Física teórica que sucedeu à teoria dos quanta e à mecânica ondulatória para estudar, descrever e prever a ocorrência de fenômenos fundamentais presentes nos sistemas físicos, particularmente em escalas atômica e subatômica.

quânticos, tentando explicar suas interações. Está construída sobre o tripleto partícula, interação e mediador, isto é, distingue as famílias das partículas pelas forças às quais são sensíveis, com cada força se exercendo via mediadores “trocados” pelas partículas submetidas à essas interações. Esses mediadores emitidos (criados) e recebidos (destruídos) são chamados de bósons enquanto que as partículas que formam a matéria são chamadas de férmions, que são quarks e léptons.

O Modelo Padrão tinha em 2016 dezenove parâmetros livres para explicar a massa de três léptons, de seis quarks e do bóson de Higgs, além de oito constantes para descrever as diferentes acoplagens entre partículas. Esses parâmetros não são fixos, sendo determinados experimentalmente.

O Modelo Padrão aborda várias classes de partículas elementares (léptons/quarks/bósons de calibre/bóson de Higgs), que podem ser diferenciadas por outras características, tais como sua carga cor.

Por um lado, temos os férmions compostos de doze partículas elementares de spin $\frac{1}{2}$. Os férmions respeitam o princípio de exclusão de Pauli¹⁴ e para cada um deles temos uma antipartícula. Também obedecem à estatística de Fermi-Dirac¹⁵ e nunca coexistem no mesmo estado quântico, isto é, na mesma órbita atômica. Estabelece a distribuição estatística de férmions indistinguíveis (similares) sobre os estados de energia de um sistema em equilíbrio termodinâmico.

Os férmions elementares se dividem em léptons e em quarks, de acordo com três gerações diferentes uma da outra apenas pela massa que aumenta a cada geração. A matéria ordinária que conhecemos (bariônica) é formada pela primeira geração: somos quarks up + quarks down + elétrons. As partículas de segunda e terceira geração são instáveis, desintegrando-se de forma muito rápida em partículas de primeira geração, mais leves.

Mesmo sendo elementares (sem estrutura interna), nunca foram observados isoladamente. Agrupam-se em hádrons, apresentando-se na forma de pares de quark-antiquark (mésons) ou bárions na forma de três quarks. Por exemplo, os prótons são formados de dois quarks up e um down enquanto que os nêutrons são

¹⁴Princípio da mecânica quântica formulado por Wolfgang Pauli em 1925. Afirma que dois férmions idênticos não podem ocupar o mesmo estado quântico simultaneamente.

¹⁵Estabelece a distribuição estatística de férmions indistinguíveis (similares) sobre os estados de energia de um sistema em equilíbrio termodinâmico.

formados de dois quarks down e o up.

Além do férmion de Dirac e de Majorana, temos também o férmion de Weyl que representa uma partícula quiral (partícula que não é idêntica a sua imagem no espelho) sem massa proposta em 1929 pelo Físico Hermann Weyl. No interior de um cristal essa partícula se comporta como matéria e antimatéria. A simetria de Lorentz é quebrada por uma quase-partícula chamada férmion de Weyl tipo II. Wolfgang Pauli, um ano depois, postula a existência do neutrino que foi considerado por muito tempo como solução da equação de Dirac encontrada por Weyl [30].

Por outro, temos os bósons de calibre ou simplesmente bósons, que são suportes ou vetores veiculadores de força e tem a função de mediador entre as forças fundamentais, a saber, nuclear, fraca e forte, e eletromagnética.

Os bósons obedecem a estatística de Bose-Einstein¹⁶, têm spin inteiro e podem coexistir num mesmo estado quântico. Por exemplo, bilhões de fótons idênticos coabitam um mesmo feixe de laser. O bóson de Higgs não é um mediador de força, não pertencendo à classe de bósons de calibre.

As partículas de campo podem ser reais ou virtuais. Nesse último caso, têm uma vida útil muito pequena e se manifestam indiretamente por sua ação, qual seja a de transmitir interações fundamentais. Por isso são também denominadas mensageiras ou mediadoras. Os fótons, de spin 1 e carga elétrica nula, são mediadores da interação eletromagnética entre partículas eletrizadas; os bósons vetoriais W^\pm e Z^0 (de spin 1 e de massa elevada) intermediam a interação fraca entre partículas de diferentes sabores (tipos) (quarks e léptons); os oito glúons (cola), de spin 1 e massa nula, veiculam a interação forte entre partículas tendo carga cor, ou seja, os quarks.

Já o bósons de Higgs (de spin 0) é um campo escalar. Suspeita-se que confere massa às outras partículas via uma mecanismo de quebra espontânea de simetria chamado mecanismo de Higgs¹⁷ [19].

A figura 4 abaixo mostra a origem etimológica de várias partículas.

¹⁶Estabelece a distribuição estatística de bósons indistinguíveis (similares) sobre os estados de energia de um sistema em equilíbrio termodinâmico.

¹⁷Mecanismo imaginado para tentar explicar que certos bósons de calibre têm uma massa, o que é um fato a priori incompatível como o Modelo Padrão, interpretando o conceito de massa como a resultante de uma interação entre esse bósons e o campo escala de Higgs.

Figura 4: Resumo etimológico

Partícula	Origem	Etimologia	Explicação
Átomo	grega	a=privativo; tomein = cortar	-Indissociável; que não se subdivide em elementos menores.
Lépton	grega	leptos = leve	-Os léptons são partículas leves: elétron, múon, tau e os neutrinos.
Hádrion	grega	hadros = forte	-Os hádrons são as partículas que são sensíveis à interação forte.
Bárion	grega	barys=pesado	-Os bárions são as partículas pesadas: prótons, nêutrons e etc.
Méson	grega	mésos = médio; intermediário	-Os mésons são as partículas de massa intermediária; são bósons formados de um quark e um antiquark
Bóson	nome próprio	Bose, físico indiano	-Os bósons são partículas que se apresentam de preferência em um mesmo estado quântico. -São as partículas de interação
Férmion	nome próprio	Fermi, físico italiano	-Os férmions são partículas que se apresentam de preferência em estados quânticos diferentes. -São as partículas de matéria.
Bósons W^+ e Z_0	inglesa	weak = fraco	-Os bósons W^+ e W^- são os dois vetores carregados da interação fraca. -O bóson Z_0 é neutro.

Fonte: Física de Partículas (http://astronomia.fr/6eme_partie/physiqueParticules.php)

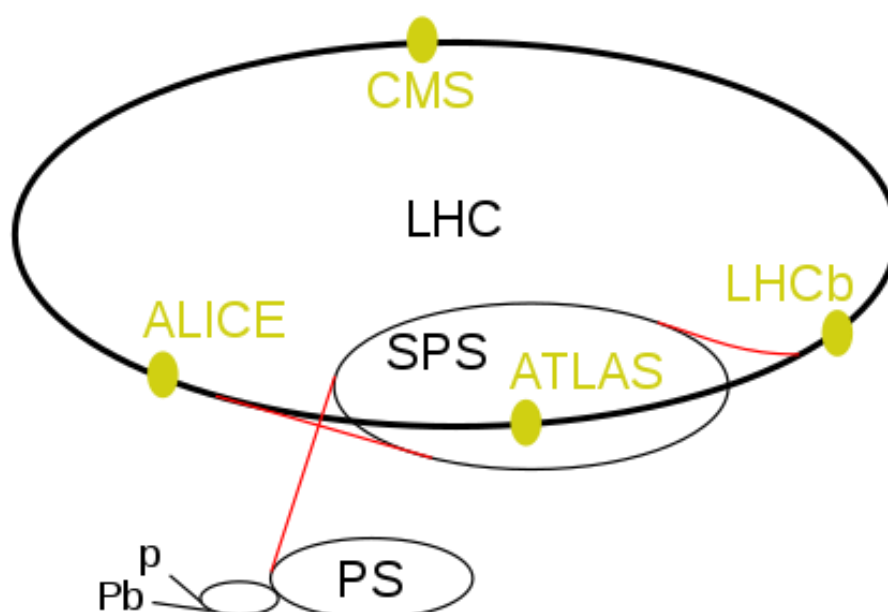
No interior do LHC dois feixes de partículas se deslocam a uma velocidade próxima da velocidade da luz, antes de entrar em colisão. Os feixes circulam em sentido contrário no interior de tubos distintos no interior dos quais há um supervácuo. Os feixes são guiados ao longo do anel tubular do acelerador via um campo magnético mantido por ímãs supercondutores¹⁸. Abaixo de determinadas temperaturas específicas, certos materiais tornam-se supercondutores, não oferecendo resistência alguma à passagem da corrente elétrica. Para aproveitar esse fenômeno, os ímãs do LHC são resfriados a -271,25 °C (1,9K), temperatura mais fria que a do espaço sideral. Para isso o acelerador está conectado a um grande sistema de distribuição de hélio líquido que resfria os ímãs assim como outros sistemas agregados.

Em síntese, O LHC funciona atualmente com uma energia de 6,5 TeV por feixe. A essa energia, os bilhões e bilhões de partículas percorrem os 27 km do túnel do acelerador 11245 vezes por segundo! Antes de atingir o LHC, as partículas são aceleradas por uma cadeia de aceleradores lineares e circulares conectados entre

¹⁸São materiais que a certas temperaturas apresentam o fenômeno da supercondutividade, que é caracterizada pela ausência de resistência elétrica e expulsão do campo magnético- Efeito Meissner. A supercondutividade permite o transporte de energia elétrica sem perdas. Suas aplicações são potenciais e estratégicas. O grande desafio científico e tecnológico atual é produzir materiais que apresentam a supercondutividade à temperatura ambiente.

eles. Assim que essas partículas atingem a energia cinética máxima produzida por um dos aceleradores, são injetadas no acelerador seguinte. Deixadas à própria sorte, essas partículas se dispersariam e seguiriam uma trajetória em linha reta. Assim, 50 ímãs diferentes são necessários para mantê-las ao longo de trajetórias complexas de modo que não conservem sua energia. Todos os ímãs do LHC são eletroímãs. Os dipolos principais criam poderosos campos magnéticos de 8,3 Teslas¹⁹, 100.000 vezes maior que o campo magnético terrestre. Esses eletroímãs produzem esse campo via um corrente elétrica de 11.080 ampères e o material supercondutor permite à essas correntes de alta intensidade de circular sem perderem energia devido à resistência elétrica nula dos supercondutores. O esquema da figura 5 posiciona em um planta de pesquisa os detectores e outros equipamentos do LHC

Figura 5: Detectores e outros equipamentos do LHC



Fonte: Wikipédia (https://pt.wikipedia.org/wiki/Grande_Colisor_de_H%C3%A1drons)

De forma planejada, os choques entre as partículas são planejados para acontecerem em quatro posições específicas, ou seja, exatamente nos detectores ATLAS; CMS; LHcB; ALICE. De um lado, o ATLAS e o CMS são detectores genéricos que detectam inúmeros tipos de partículas, mesmo as desconhecidas. De

¹⁹1T (Tesla)=1N/Cm/s.

outro, o LHCb e Alice foram construídos para detectar partículas bem conhecidas.

-Nomenclatura dos principais equipamentos do LHC:

- ALICE (A Large Ion Collider Experiment, Grande Colisor de Íons, em tradução livre);
- ATLAS (A Toroidal LHC Apparatus Experiment, Aparato Experimental Toroidal do LHC, em tradução livre);
- LHCb (Large Hadron Collider beauty experiment): LHC-beauty (nome alternativo ao quark bottom);
- CMS (Compact Muon Detector, Detector Compacto de Múons, em tradução livre);
- SPS (Super Proton Synchrotron, Supwe-Syncroton de Prótons);
- P y Pb: Acelerador Linear de Prótons; e
- PS: Síncroton de Prótons.

O Modelo Padrão de Física das Partículas (MPFP) é uma teoria elaborada no início dos anos 1970 que descreve as partículas fundamentais e suas interações. O MPFP prevê com bastante precisão uma gama de fenômenos e chega a explicar atualmente quase todos os resultados experimentais em Física das partículas. Contudo, o MPFP é incompleto. Deixa em aberto várias questões às quais o LHC pode contribuir com novos dados explicativos. Vamos lá então a algumas destas questões em aberto:

-De onde vem a massa?

O MPFP não explica a origem da massa e nem por que certas partículas são mais pesadas enquanto outras sequer possuem massa. No entanto, os teóricos Robert Brout, François Englert e Peter Higgs propuseram uma teoria para solucionar esse problema: as partículas adquirem massa, via um mecanismo chamado Brout-Englert-Higgs, interagindo com um campo invisível chamado “campo de Higgs” que preenche todo o Universo. Por um lado, as partículas que interagem fortemente com o campo de Higgs são ditas pesadas. Por outro, aquelas que interagem fracamente são ditas leves. No final dos anos 1980, os Físicos iniciaram uma busca teórica-experimental intensa à procura do Bóson de Higgs, a partícula associada ao campo de Higgs. Finalmente em julho de 2012, O CERN anunciou a descoberta do Bóson

de Higgs, confirmando assim a existência do mecanismo de Brout-Englert-Higgs. Essa descoberta não representa porém o fim dessa aventura. Ainda precisamos estudar o Bóson de Higgs em detalhes afim de medir suas propriedades e observar suas desintegrações raras.

- *A supersimetria²⁰ existe?*

Os físicos acham complicado construir uma teoria da gravidade similar às teorias das outras forças. No entanto, a supersimetria emite a hipótese de que haveria para cada partícula do Modelo padrão um parceiro mais massivo (superparceiro). Talvez isso facilitaria a unificação das forças fundamentais.

A supersimetria procura unificar a matéria e as forças, ou seja, os férmions e os bósons. Para realizá-lo, é necessário que toda partícula tenha seu superparceiro. Por exemplo, o quark estaria associado a um quark supersimétrico e o elétron a um quark supersimétrico...

O quadro 3 abaixo estabelece um paralelo entre as partículas “normais” e as partículas supersimétricas. Para encontrar o superparceiro de um férmion, basta colocar um “s” na frente dele. Analogamente, para encontrar o superparceiro de um bóson, basta colocar um “ino” na final dele. A supersimetria multiplica por dois ou mais o número de partículas.

Quadro 3: Partículas supersimétricas

Partícula Normal	Símbolo	Spin	Superparceiro	Símbolo	Spin
elétron	e	1/2	selétron	\tilde{e}	0
muon	μ	1/2	smuon	$\tilde{\mu}$	0
tau	τ	1/2	stau	$\tilde{\tau}$	0
neutrino	ν	1/2	sneutrino	$\tilde{\nu}$	0
quark	q	1/2	squark	\tilde{q}	0

²⁰Teoria que prediz uma partícula parceira para cada uma das partículas do Modelo Padrão, para explicar a origem da massa dessas partículas.

fóton	γ	1	fotino	$\tilde{\gamma}$	1/2
bósons W	W^+, W^-	1	Wino	$\sim W$	1/2
bóson Z	Z^0	1	Zino	$\sim Z$	1/2
glúons	g	1	gluino	$\sim g$	3/2
gráviton	G	2	gravitino	$\sim G$	3/2
bóson de Higgs	h	0	Higgsino	$\sim h$	1/2

Fonte: Física de Partículas (http://astronomia.fr/6eme_partie/physiqueParticules.php)

De um lado, em Teoria Quântica de Campos, os campos transportam muitos spins e representam o grupo de Lorentz; de outro, as partículas têm uma massa e um spin bem estabelecidos e representam o grupo de Poincaré. Todos esses graus de liberdade em “excesso” são extintos por algum mecanismo de gauge (calibre)

Também, por um lado, a simetria de calibre para o spin $\frac{1}{2}$ leva ao eletromagnetismo de Maxwell; por outro, na simetria de calibre para o spin 2 as mudanças gerais de coordenadas levam à Teoria da Relatividade Geral. A casualidade sofre violação em teorias cujos spins são maiores que 2.

O Modelo Padrão é uma teoria bastante consolidada e só funciona numa certa faixa de energia. Para os bósons de gauge terem massa nula, a simetria de gauge funciona como uma proteção [31].

-O que são e qual a natureza da matéria escura e da energia escura?

A matéria que conhecemos (matéria bariônica) e que compõem todas as estrelas e todas as galáxias representa apenas 5% do conteúdo do universo. A procura pelas partículas ou pelos fenômenos responsáveis pela matéria escura (25%) e pela energia escura (75%) está absolutamente em aberto.

- Onde está a antimatéria²¹?

No momento do Big Bang, matéria e antimatéria deveriam ter sido produzidas

²¹Conjunto de antipartículas que têm a mesma massa e o mesmo spin, contudo as cargas, os números bariônicos e os números leptônicos são opostos àqueles da matéria ordinária.

em quantidades iguais, no entanto ao observamos o Universo encontramos apenas matéria.

-No inicio do Universo, com era a matéria?

Em certos períodos do ano, o LHC provoca a colisão de íons de chumbo entre si na tentativa de recriar condições parecidas àquelas que existiram imediatamente depois do Big Bang. Na verdade, quando íons de chumbo a altas energias cinéticas colidem uns com os outros, há a formação durante um lapso de tempo de um plasma quarks-glúons (popularmente chamado de sopa de glúons) semelhante à uma bola de fogo constituída de matéria quente e densa que pode ser estudada pelos experimentos [20].

O Neutrino é uma partícula elementar de spin $\frac{1}{2}$ (um férmion ou mais especificamente um lépton), desprovido de carga elétrica. É insensível às interações eletromagnética e forte; não entra na composição dos átomos, contrariamente ao elétron e aos quarks; é produzido em numerosas reações e governado pela interação fraca e pela interação gravitacional. Sua existência foi postulada pelo físico austríaco Wolfgang Pauli em 1930. Ela explicava o espectro contínuo dos elétrons emitidos pela radioatividade beta, que parecia violar o princípio da conservação da energia. Enquanto que em outras transições nucleares a energia da partícula ejetada (fóton ou partícula alfa) adquire um valor bem determinado, correspondente à diferença “Q” entre a energia de massa do estado inicial e aquela do estado final, a energia dos elétrons beta pode assumir qualquer valor entre zero e “Q”. Assim, Pauli sugeriu que na desintegração beta o elétron é acompanhado por outra partícula leve e quase não interagindo com a matéria- com a qual divide a energia produzida pela reação: o neutrino. Esse último era considerado como de massa nula, o que era bastante coerente com todas as observações experimentais antes da descoberta das oscilações.

A detecção de neutrinos só foi possível mais de duas décadas depois. Dois avanços maiores permitiram que os neutrinos deixassem de ser uma hipótese e passassem a ser uma realidade observada e mensurável.

De um lado, o primeiro avanço é devido a Enrico Fermi que propôs em 1934 a primeira teoria da desintegração beta, baseado em uma nova força fundamental, a

interação fraca. Graças a essa teoria, os físicos puderam calcular a taxa de interação dos neutrinos com a matéria. Essa taxa é muito fraca, menor, para um Neutrino de um gigaelétron-volt ($1\text{GeV}=10^9\text{eV}$), que quinze ordens de grandeza em relação a um fóton de mesma energia.

De outro, o segundo avanço é de ordem experimental. Desde 1942, os físicos e engenheiros sabiam construir reatores nucleares. No coração desses reatores, os núcleos oriundos das fissões do urânio e do plutônio, muito ricos em nêutrons, passam por uma série de desintegrações beta, produzindo enormes quantidades de antineutrinos (em torno de 5×10^{20} por segundo para uma central de 1 gigawatt). Assim é próximo de um reator que será feita a primeira experiência que detectará os Neutrinos (na realidade, como será observado mais tarde, antineutrinos eletrônicos ν_e), no sítio nuclear de Savannah nos USA, em 1956. Essa descoberta laureou Frederick Reines em 1995 (Clyde Cowan faleceu em 1974). Então, tendo sido estabelecida a existência dessa partícula, os físicos se voltaram naturalmente para o estudo de outras fontes intensas de neutrinos, começando pelo Sol. Não sem antes ter descoberto em 1962 (prêmio Nobel de 1988) uma segunda espécie de Neutrino, o Neutrino do múon ou muônico ν_μ . Somente em 2000, uma terceira espécie de neutrino foi descoberta, a saber, o Neutrino do tau ou tauônico ν_τ . É importante mencionar que o múon é 200 vezes mais pesado que o elétron e o tau 3500 vezes. Chamamos de sabor leptônico o número quântico que os distingue. Assim ν_e, ν_μ, ν_τ são estados próprios de sabor.

A observação dos neutrinos solares e atmosféricos (oriundos dos raios cósmicos) colocou os físicos na pista das oscilações e cujo estudo continua via colaborações internacionais. O fato de os neutrinos oscilarem implica que têm uma massa. Essa comprovação aparentemente simples é revolucionária, pois o modelo padrão postula que a massa os neutrinos é nula.

Em que as massas dos neutrinos seriam diferentes das massas das outras partículas? Primeiramente, são extremamente pequenas, isto é, em torno de 10^6 menores que aquela do elétron. Em seguida, sendo eletricamente neutro, o Neutrino seria sua própria antipartícula, ou seja, um férmion de Majorana²² e os outros

²²Ettore Majorana (Catane, Sicília, 5 de agosto de 1906- supostamente falecido após 1959), físico italiano. Conhecido, sobretudo por seus trabalhos em Física de partículas, com aplicações

constituintes elementares da matéria sendo os férmions de Dirac²³.

Quanto às habilidades de Ettore Majorana, repito os dizeres de Enrico Fermi, à época seu diretor de tese em Física quântica: *“No mundo temos várias categorias de cientistas, a saber, aqueles que fazem o melhor que podem; aqueles de primeiro plano, que fazem grandes descobertas, fundamentais para o desenvolvimento da ciência; e após, há os gênios, como Galileu, Newton, Einstein. Ettore estava também entre eles”*.

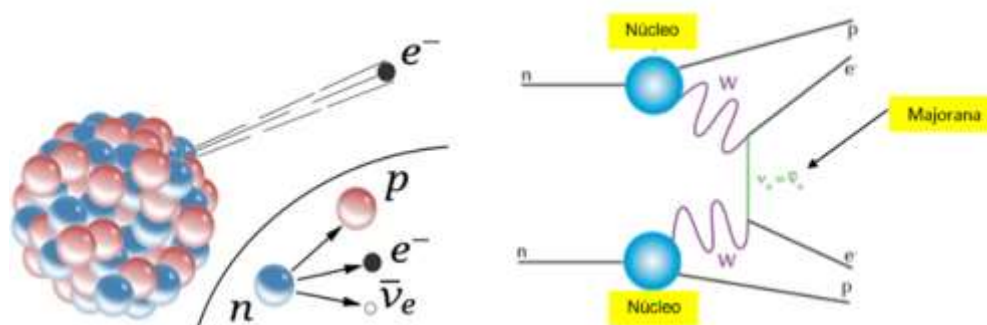
Supor que os neutrinos são férmions de Majorana permite explicar sua massa infinitamente pequena e torna possível explicar novos fenômenos associados à violação do número leptônico, cuja origem poderia estar em uma teoria mais fundamental que o Modelo Padrão. Definido como número quântico igual a +1 para um neutrino ou um lépton carregado negativamente como o elétron, e a -1 para suas antipartículas, o número quântico é acidentalmente conservado no Modelo Padrão, mas violado na presença de neutrinos de Majorana (aos quais não podemos associar um número leptônico, pois são ao mesmo tempo neutrino e antineutrino). Entre as consequências de sua violação, figura, além da dupla desintegração beta sem emissão de neutrinos, a possibilidade de explicar a origem da assimetria matéria-antimatéria do Universo pelo mecanismo de leptogênese (formação de léptons) [21].

A figura 6 representa um esquema ilustrativo do decaimento beta simples e do duplo decaimento beta sem emissão de Neutrons, respectivamente.

particulares à Física de neutrinos.

²³Paul Adrien Maurice Dirac (8 de agosto de 1902 em Bristol, Inglaterra- 20 de outubro de 1984 em Tallahassee, Flórida, Estados Unidos) foi um Físico e matemático britânico; considerado como um dos pais da mecânica quântica; previu a existência da antimatéria. Foi laureado com o prêmio de Física de 1933, juntamente com Erwin Schrödinger, pela descoberta de formas novas e úteis em teoria atômica.

Figura 6- Decaimento beta e duplo decaimento beta



Fonte: Revista Reflets de laPhysique n°24

(<https://www.refletsdelaphysique.fr/articles/refdp/pdf/2011/02/refdp201124p11.pdf>)

A descoberta das oscilações dos neutrinos coroou anos de intensas pesquisas experimentais [17], permitindo demonstrar que essas partículas têm uma massa, abrindo novos caminhos sobre hipotéticas novas leis físicas, que poderiam estar na origem da assimetria matéria-antimatéria do Universo. Todavia, apesar desse sucesso, os neutrinos escondem outros mistérios. Ainda há várias questões em aberto sobre os neutrinos, a saber:

- Qual a origem e escala de sua massa?
- Qual sua natureza? (férmions de Dirac ou de Majorana?)
- Há outros tipos de neutrinos?
- Os neutrinos oscilam como os antineutrinos?

Referências Bibliográficas

- [1] MOREIRA, M.A. (2006). **UNIDADES DE ENSINO POTENCIALMENTE SIGNIFICATIVAS– UEPS***. Instituto de Física – UFRGS/ Porto Alegre, RS
Disponível em: <<https://www.if.ufrgs.br/~moreira/UEPSport.pdf>>.
Acesso em: 20 jul. 2020.
- [2] MOREIRA, M.A. **O QUE É AFINAL APRENDIZAGEM SIGNIFICATIVA?**
Instituto de Física-UFRS/Porto Alegre - RS.
Disponível em: <<http://moreira.if.ufrgs.br/oqueefinal.pdf>>. Acesso em: 20 jul. 2020.
- [3] SOLANO, I.A e MAZUR, E. **Caderno Brasileiro de Ensino de Física**, vol.30, n^o2 (2013). “INSTRUÇÃO PELOS COLEGAS E ENSINO SOB MEDIDA: UMA PROPOSTA PARA O ENGAJAMENTO DOS ALUNOS NO PROCESSO DE ENSINO-APRENDIZAGEM DE FÍSICA”.
Disponível em: <<https://periodicos.ufsc.br/index.php/fisica/article/view/2175-7941.2013v30n2p362>>. Acesso em: 20 jul. 2020.
- [4] Centre Européen pour la Recherche Nucléaire (CERN). **Páginas de acolhimento**.
Disponível em: <<https://home.cern/>>. Acesso em: 21 abr. 2020.
- [5] Department of the energy. **Fermi National Accelerator Laboratory (FERMILAB)**. Disponível em: <<https://www.fnal.gov/>>. Acesso em: 21 abr. 2021.
- [6] FOGAÇA, J.R.V.: Mendeleiev- O criador da tabela periódica. **MANUAL DA QUÍMICA**. Disponível em: <<https://www.manualdaquimica.com/cientistas-que-contribuiram-para-quimica/mendeleiev-criador-tabela-periodica.htm>>.
Acesso em: 21 abr. 2020.
- [7] Centre Européen pour La Recherche Nucléaire (CERN): **Subatomic Particles**.
Disponível em: <<https://home.cern/science/physics/subatomic-particles>>.
Acesso em: 15 jul. 2020.
- [8] Centre Européene pour La Recherchenucléaire. **The large Collider Hadron**.
Disponível em: <<https://home.cern/science/accelerators/large-hadron-collider>>.
Acesso em: 22 abr. 2021.
- [9] Centre Européene pour la Recherche Nucléaire. **The Standart Model**.
Disponível em: <<https://home.cern/science/physics/standard-model>>.
Acesso em: 15 jul. 2020.
- [10] PAULI, W. Wikipédia, 2021.
Disponível em: <https://pt.wikipedia.org/wiki/Wolfgang_Pauli>.
Acesso em: 22 abr. 2021.
- [11] FERMI, E. **Wikipédia, 2021**.

Disponível em: <https://pt.wikipedia.org/wiki/Enrico_Fermi>.
Acesso em: 22 abr. 2021.

[12] What Are Neutrinos? **LIVESCIENCE**, 2019.
Disponível em: <<https://www.livescience.com/64827-neutrinos.html>>.
Acesso em: 17 jul. 2020.

[13] TORNE, K. S. **Trous noirs et distorsions de temps**.
New York: Edições Flammation, 1997. 652p.

[14] DIRAC, P. Wikipédia, 2021.
Disponível em: <https://pt.wikipedia.org/wiki/Paul_Dirac>.
Acesso em: 22 abr. de 2021.

[15] Majorana. **Wikipédia**.
Disponível em: <https://pt.wikipedia.org/wiki/Ettore_Majorana>.
Acesso em: 22 abr. 2021.

[16] Department of the energy. **Fermi National Accelerator Laboratory (FERMILAB)**, 2012. Neutrinos: Majorana or Dirac?
Disponível em: <<https://news.fnal.gov/2012/09/neutrinos-majorana-or-dirac/>>.
Acesso em: 15 jul. 2020.

[17] The T2K Experiment. **About Neutrinos**.
Disponível em: <<https://t2k-experiment.org/>>. Acesso em: 24 jul. 2020.

[18] Laboratoire d'Astrophysique de Marseille. **Physique des Particules**.
Disponível em:
<http://astronomie.fr/6eme_partie/physiqueParticules.php#Repr%C3%A9atome>.
Acesso: 20 mai. 2021.

[19] MOREIRA, M. A. **Física na Escola**. Partículas e interações, v. 5, n. 2, 2004.
Disponível em: <<http://www.sbfisica.org.br/fne/Vol5/Num2/v5n1a03.pdf>>.
Acesso em: 24 jul. 2020.

[20] Centre Européene pour la Recherche Nucléaire. **The Standard Model**.
Disponível em: <<https://home.cern/science/physics/standard-model>>.
Acesso em: 15 jul. 2020.

[21] NEUTRINO ENERGY. **WIKIPEDIA**. Neutrino.
Disponível em: <<https://en.m.wikipedia.org/wiki/Neutrino> / >.
Acesso em: 19 jan. 2020

[22] UOL. **BRASIL ESCOLA**. EXERCÍCIOS SOBRE PARTÍCULAS DE UM ÁTOMO.
Disponível em: <<https://exercicios.brasilecola.uol.com.br/exercicios-quimica/exercicios-sobre-particulas-um-atomo.htm>>. Acesso em: 20 dez. 2020.

[23, 24, 25, 26] UOL. **BRASIL ESCOLA**. EXERCÍCIOS SOBRE MODELO-PADRÃO DA FÍSICA DE PARTÍCULAS.
Disponível em: <<https://exercicios.brasilecola.uol.com.br/exercicios->

fisica/exercicios-sobre-modelo-padrao-fisica-particulas.htm#:~:text=Os%20dois%20grupos%20principais%20do,f%C3%A9rmions%20s%C3%A3o%20a%20pr%C3%B3pria%20mat%C3%A9ria>. Acesso em: 20 dez. 2020.

[27] Qconcursos.com. **Questões de Concursos.** Disponível em: <<https://www.qconcursos.com/questoes-de-vestibular/questoes/4b5df869-30>>. Acesso em: 20 dez. 2020.

[28, 29] UOL. **BRASIL ESCOLA. EXERCÍCIOS SOBRE FÍSICA DE PARTÍCULAS.** Disponível em: <<https://exercicios.brasilecola.uol.com.br/exercicios-fisica/exercicios-sobre-fisica-particulas.htm#:~:text=Quest%C3%A3o%202,recebem%20o%20nome%20de%20b%C3%B3sons>>. Acesso em: 20 dez. 2020.

[30] WIKIPÉDIA. **Férmion de Weyl.** Disponível em: <https://pt.wikipedia.org/wiki/F%C3%A9rmion_de_Weyl#:~:text=F%C3%A9rmion%20de%20Weyl%20%C3%A9%20uma,regra%20chamada%20simetria%20de%20Lorentz>. Acesso em: 18 abr. 2022.

[31] FERNANDO, J. L. L. **Teoria de Campo e Supersimetria.** Disponível em: <<https://sites.google.com/view/professorfernandoleal/teoria-de-campo-e-supersimetria?authuser=0>>. Acesso em 11 abr. 2022.

Apêndice: Aulas 3, 4 e 5 da SD



Terceira aula

Inserindo o estudo dos Neutrinos no ensino médio

“Um mundo com profusão de informações falsas precisa de verdadeiros professores”.

Conferência dos professores ganhadores do prêmio Nobel

“Quem aqui fala de harmonia? Você ignora o que é o “mundo” (Universo)? Uma luta atroz, monstruosa, na sombra que agita a discórdia... Ó quedas, colapsos, acasos, luta, espuma, choques sem número!” . Elémir Bourges (La Nef, 1904)

1



- Definição de Ciência: método científico para criar e testar modelos (Rosenfeld Instituto de Física Teórica, UNESP)
- Fenômenos determinísticos (homogêneo ou lineares) e indeterminísticos (não-homogêneos ou não-lineares)
- Equação matemática: Aspectos físicos da Natureza tomados como grandezas matemáticas e equacionados algebricamente;
- Lei (antes de 1900): relação direta/relação crua/sem muita profundidade/descrição do fenômeno como ele acontece/ não explica por que o fenômeno acontece ou o quê o originou. Exemplos: leis de Newton/lei da gravitação Universal não explica por que a gravidade acontece/lei dos gases ideais/não e mais válido que uma teoria.
- Teoria (depois de 1900): nasce de um modelo do que você quer descrever/mais profunda que uma lei/uma forma de não apenas descrever o fenômeno, mas enter por que acontece/o quê o originou. Exemplos: teoria do big bang/teoria da evolução/teoria do buraco negro:TRG (nasce de um modelo)
- Modelo: Modelisar/prever/antecipar
- Metodologia científica
- Pilares: observação e formulação de hipóteses; realização de experimentações/observação/simulações e/ou e; compilação e interpretação dos resultados; construção de teoria; redação de artigo; análise dos pares; e publicação em um periódico reconhecido e replicação
- Tudo que não é consistente com os fatos deve ser descartado ou revisto
- Simulação Computacional (Numérica) e Modelagem (Numérica ou analógica):Para que serve?

2



PARTÍCULA ELEMENTAR

- Definição de campo: quantidade que apresenta um valor em cada ponto do espaço; é uma força da posição
- Partícula não é um corpúsculo, um corpo diminuto: por exemplo, podem não ter massa e além disso não têm posição situada, *i.e.*, não podem ser localizadas com precisão (MOREIRA, M.A. Física na Escola, v. 5, n. 2, 2004)
- Partícula quântica não tem trajetória definida
- Podemos pensar o campo quântico como a superfície de um lago calmo onde não vemos nada de anormal. De repente você lança uma pequena pedra nesse lago e então a água sobe um pouco. Essa perturbação é uma partícula
- Princípio da incerteza: um insight de Werner Karl Heisenberg: não podemos determinar simultaneamente a posição e o momento linear de uma partícula quântica

“Se sei onde estou, não sei para onde vou e se sei onde vou, não sei onde estou”

(Prof. José Alexandre/departamento de Física/Ufes)

4

Figura 1- Evolução científica de modelos

➤ Evolução histórica dos modelos do átomo: de Ernest Rutherford, passando por Niels Bohr, a Erwin Schrödinger

Átomo de Rutherford	Átomo de Bohr	Átomo de Schrödinger
1911 Colapso	1913 Órbitas permitidas	1926 Probabilidade

Fonte: própria

6

Figura 2- Modelo Padrão da Física das Partículas (MPFP)



Fonte: symmetry magazine |dimensions of particle physics
(<https://www.symmetrymagazine.org/article/six-fabulous-facts-about-the-standard-model>)

5



➤ MPFP (Modelo Padrão de Física de Partículas)

-Formulação físico-matemática que descreve as interações entre os blocos de construção elementares ou fundamentais (quarks e léptons) e os portadores de força (bósons). Esse MPFP ainda não contempla formulações para a gravidade (gravity/gravité); matéria escura (dark matter/matière noire); energia escura (dark energy/énergie noire)

- "...o Modelo Padrão é, na história, a mais avançada teoria matemática sobre a natureza. Apesar da palavra "modelo" em seu nome, o Modelo Padrão é uma teoria compreensiva que identifica as partículas básicas e especifica como interagem. Tudo o que acontece em nosso mundo (exceto os efeitos da gravidade) resulta das partículas do Modelo Padrão interagindo de acordo com suas regras e equações."

(MOREIRA, M,A. Revista Brasileira de Ensino de Física, v. 31, n. 1, 1306 (2009) www.sbfisica.org.br)

6



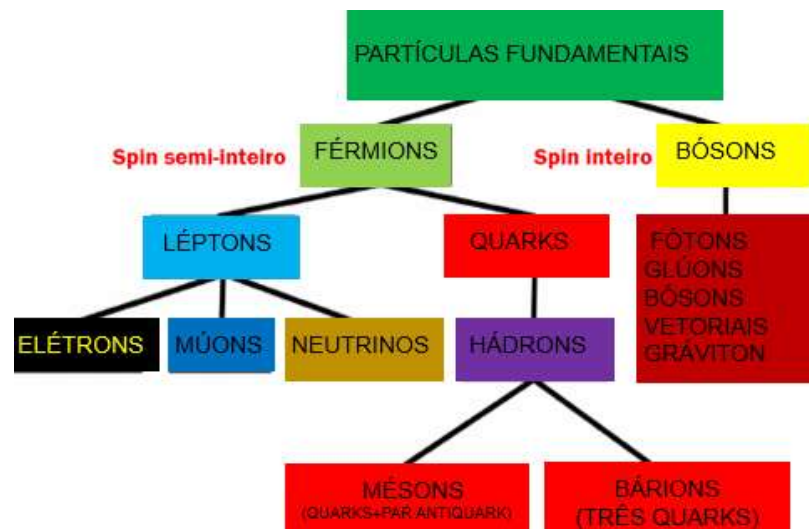
- **Férmion (partícula) de Dirac:** partícula não é sua própria antipartícula
 - Todos os férmions do modelo padrão são férmions de Dirac (exceto talvez o Neutrino)

- **Férmion de Majorana:** seria sua própria antipartícula. Esse conceito foi proposto pelo físico italiano Ettore Majorana em 1937.
 - O Neutrino seria uma partícula que funcionaria como antipartícula

- **Férmion de Weyl:** partícula sem massa teorizada proposta em 1929 pelo físico Hermann Weyl. Essa partícula se comporta como matéria e como antipartícula no interior de um cristal¹²

7

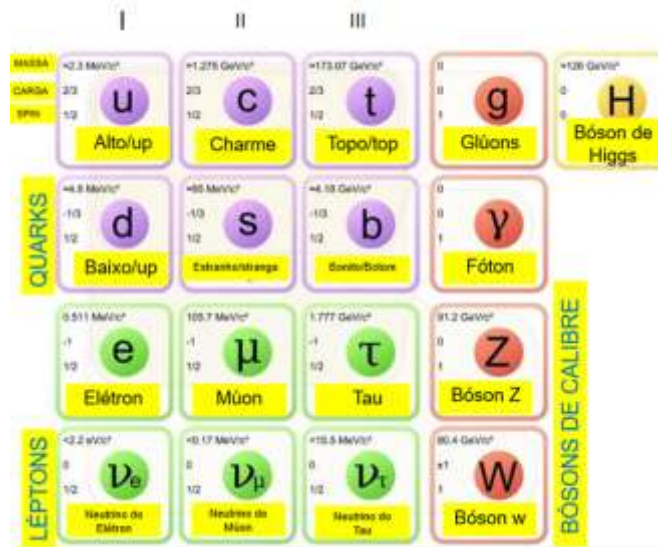
Figura 3- Modelo Padrão da Física das Partículas (MPFP)



Fonte: Minicurso de Física de Partícula/ José Alexandre Nogueira/Ufes

7

Figura 4- Modelo padrão das partículas elementares com três gerações de férmions (colunas I, II, III), os bósons de calibre (quarta coluna) e o bóson de Higgs (quinta coluna).



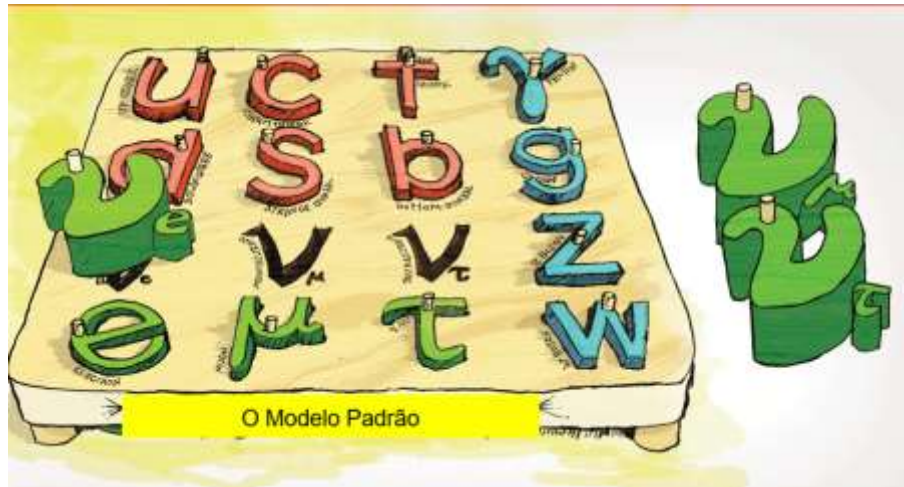
Fonte: Wikipédia
(https://fr.wikipedia.org/wiki/Mod%C3%A8le_standard_de_la_physique_des_particules)

Figura 5- Modelo Padrão da Física das Partículas (MPFP)



Fonte: symmetry magazine |dimensions of particle physics
(<https://www.symmetrymagazine.org/article/august-2015/the-mystery-of-particle-generations>)

Figura 6- Modelo Padrão da Física das Partículas (MPFP)



Fonte: symmetry magazine |dimensions of particle physics
(symmetrymagazine.org/article/august-2015/the-mystery-of-particle-generations)

10



➤ *Interações fundamentais da natureza*

Tipos: até onde sabemos há 04 tipos elementares de forças que agem entre as partículas:

Força nuclear forte (FNF)/força nuclear fraca (fnf)/eletromagnética/gravitacional ou UNIFICADAMENTE: Força nuclear forte/força eletrofraca/gravitacional

➤ *Características:*

-FNF: manter os quarks colados uns aos outros para formar prótons/neutrons/partículas afins

- fnf: facilitar a desintegração de partículas pesadas em “irmãos” e “irmãs” menores

- Força eletromagnética: ligar os elétrons aos núcleos para formar os átomos

- Força gravitacional: atuar entre todos objetos massivos; é dominante em nossa vida cotidiana e no Universo; é irrelevante no microcosmo

11



➤ *Bósons ou portadores de força*

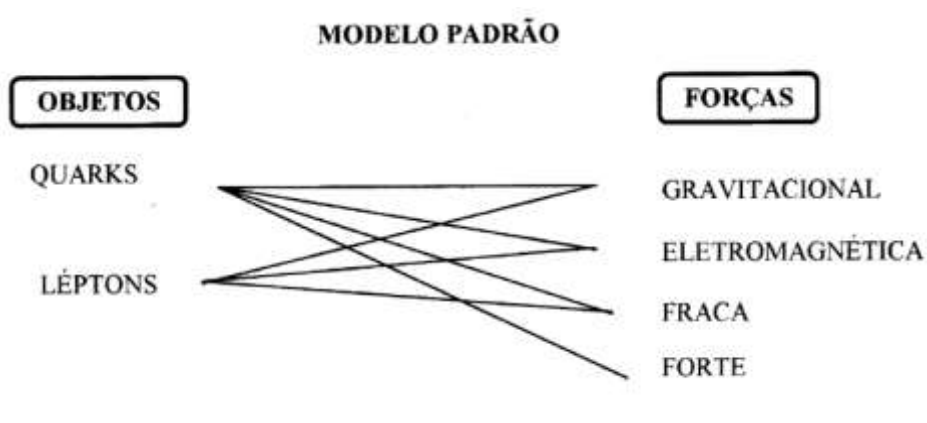
- Noções de campo: substrato de ocorrência das atividades quânticas. É via um substrato chamado campo que os bósons transmitem as forças entre as partículas
- As partículas absorvem (destroem) ou emitem (criam) bósons. Esses bósons transportam quantidades discretas de energia (quanta) de uma partícula à outra
- Podemos imaginar essa transferência de energia como a passagem de uma bola de basquete entre dois jogadores

➤ *Algumas características de cada portador de interação (bóson)*

- Glúon (cola): portador da FNF/substrato: campo gluônico ou de glúons
- Bósons w e z ou bósons vetoriais: portador da fmf/responsável por diferentes tipos de desintegrações/substrato: campo fraco
- Fóton: portador da força eletromagnética (espalha a luz)/ substrato: campo de fótons ou fotônico
- Gráviton (ainda não detectado): seria o responsável pela força gravitacional/substrato: campo gravitacional

12

Figura 8- Objetos (férmions e bósons), forças e partícula



Fonte: Revista Brasileira de Ensino de Física, vol. 21, no. 3, Setembro, 1999

14

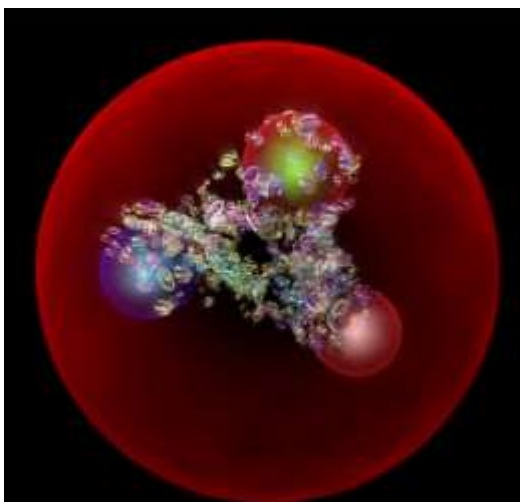
Figura 9- Forças fundamentais da natureza

Teoria	Interação	Mediador	Magnitude relativa	Comportamento	Faixa
Cromodinâmica	Força nuclear forte	Glúon	10^{41}	$1/r^2$	1.4×10^{-15} m
Eletrodinâmica	Força eletromagnética	Fóton	10^{39}	$1/r^2$	Infinito
Flavordinâmica	Força nuclear fraca	Bósons W e Z	10^{29}	$1/r^6$ até $1/r^2$	10^{-18} m
Geometrodinâmica	Força gravitacional	gráviton	10	$1/r^2$	Infinito

Fonte: Wikipédia
(https://pt.wikipedia.org/wiki/For%C3%A7a_fundamental)

15

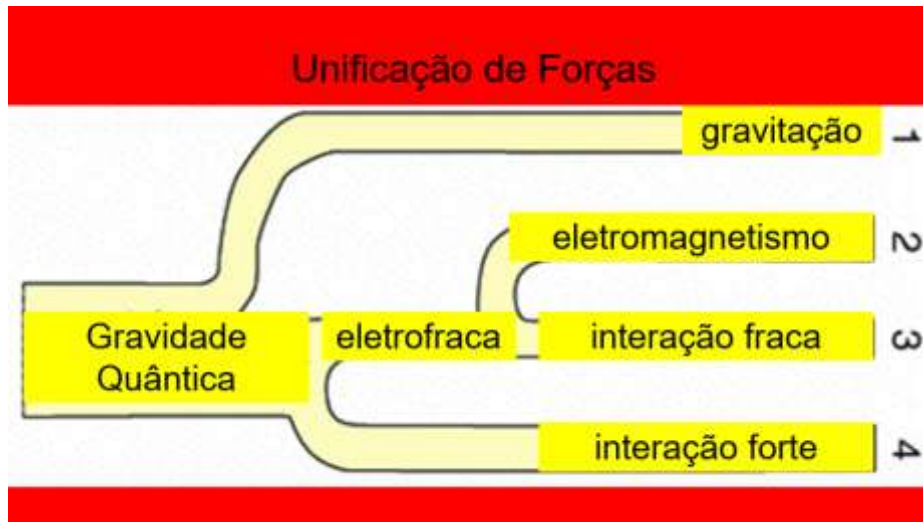
Figura 10- Dois quarks up e um quark down trocando glúons (manifestação da força nuclear forte)



Fonte: Cern
(<https://home.cern/resources/video/physics/proton-animation>)

16

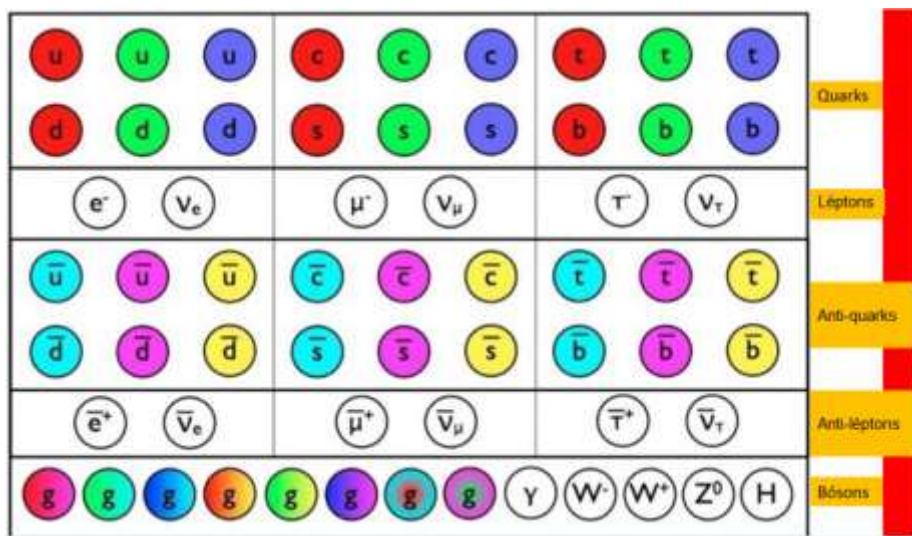
Figura 11- Unificação



Fonte: Própria

17

Figura 12- Toda a matéria bariônica conhecida: 61 tijolos fundamentais



Fonte: Forbes

(forbes.com/sites/startswithabang/2021/07/27/the-standard-model-is-an-orphan-theory-now/?sh=4da24bbe25ff)

18



Evolução Hhstórica do MPFP

- 1897: descoberta do elétron
- 1905: prova da existência dos átomos
- 1909: descoberta do núcleo atômico
- 1915: relatividade geral
- Descoberta do próton (1918) e neutro (1932)
- Anos 1920: descoberta de outras galáxias
- 1932: descoberta da antimatéria
- 1936: descoberta do múon
- Anos 1930: reações nucleares no Sol
- 1948: eletrodinâmica quântica
- Aproximadamente em 1950: descoberta das partículas estranhas
- 1956 : descoberta do neutrino do elétron

19



- 1962 : descoberta do neutrino do múon
- 1968 : descoberta da estrutura do próton
- 1974 : descoberta do quarto quark (charme)
- 1975-1976 : descoberta do lépton tau
- 1977 : descoberta do quinto quark (bottom)
- 1979 : descoberta do glúons
- 1983 : descoberta dos bósons W et Z
- 1995 : descoberta do sexto quark (top)
- 2000 : descoberta do neutrino do tau
- 2012 : desxcoberta do bóson de Higgs

20

AGRADECIDO!

21

Quarta aula

Neutrinos

“De toda maneira, é muito complicado para os seres humanos; teria preferido jamais ter ouvido falar de Física”. São nesses termos que se exprimia o físico suíço Wolfgang Pauli (1900-1958) quanto aos problemas apresentados pela desintegração radioativa dos núcleos atômicos.”

1

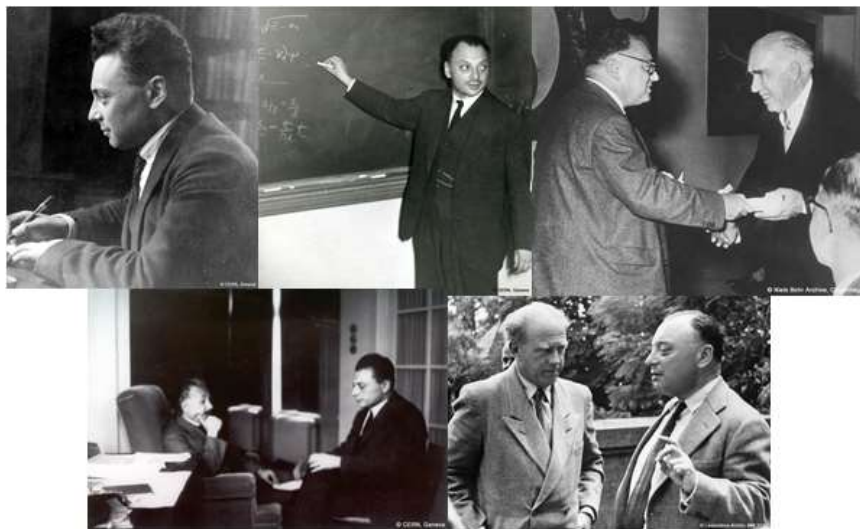


➤ Dez fatos intrigantes sobre os Neutrinos

- Bilhões de partículas inofensivas atravessam vocês a cada segundo, tanto de dia como de noite
- É a segunda partícula mais abundante do universo, após os fótons (partículas de luz)
- Também é a partícula de menor massa mais abundante do universo
- Interagem raramente com qualquer coisa: um anos luz de chumbo pararia somente a metade dos Neutrinos vindos do Sol
- Cerca de 15 bilhões de Neutrinos do Big Bang se encontram dentro de uma sala de tamanho médio
- Os Neutrinos somente interagem via duas das quatro forças conhecidas: a força fraca e a gravitacional
- Até onde sabemos, os pesquisadores descobriram três sabores de Neutrinos: Neutrino do elétron , Neutrino , Neutrino
- Os Neutrinos oscilam ou mudam de sabor à medida que se deslocam
- Suas massas são muito pequenas, mas ainda desconhecidas
- Sua velocidade é próxima à da luz, mas não conhecemos exatamente seu valor
- Poderia ser a razão pela qual a matéria existe no Universo

2

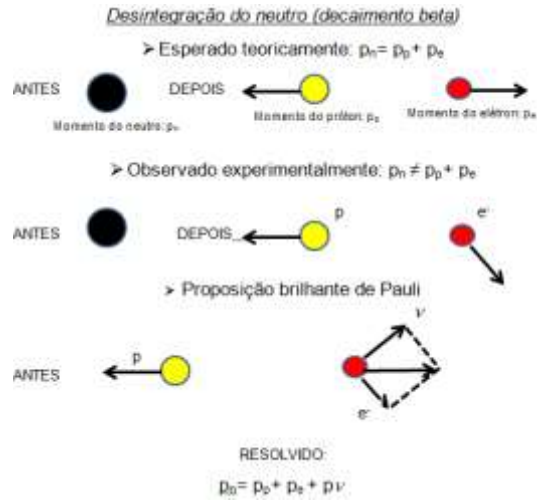
Figura 1- Fotos de Pauli: quarta e quinta fotos, com Einstein e Heisenberg, respectivamente.



Fonte: ETH Zürich Bibliothek
(<https://library.ethz.ch/en/locations-and-media/platforms/short-portraits/pauli-wolfgang.html>)

- Postulado em 1930 por Pauli para “salvar” o princípio de conservação da energia e do momento em um experimento sobre desintegração beta e observado e em 1956 por Frederick Reines et Clyde Cowan

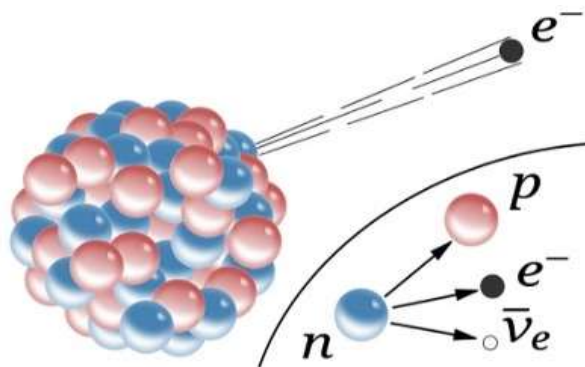
Figura 2- Os momenta do proton e do eletron apos o decaimento.



Fonte: Revista Brasileira de Ensino de Física, vol. 21, no. 3, Setembro, 1999

4

Figura 3- Emissão beta



Fonte: Revista Brasileira de Ensino de Física, vol. 21, no. 3, Setembro, 1999

5



Em 1956, os físicos americanos Cowan e Reines provaram que o Neutrino era uma partícula real, sua existência foi admitida, mas já foi considerada indetectável. Reines e Cowan começaram suas experiências de detecção de Neutrinos com um reator a Hanford no Estado de Washington. Em seguida, mudaram para um reator mais potente em Savannah na Carolina do Sul. Nessa fotografia de 1953 da equipe a Hanford, Cowan aparece na extrema esquerda e Reines na extrema direita. Essa experiência pioneira, chamada projeto Poltergeist, provou definitivamente a existência do Neutrino, dando início assim ao desenvolvimento da Física de Neutrinos.

Figura 4- 1956 : descoberta dos Neutrinos



Fonte: radioactivity.eu.com (https://www.radioactivity.eu.com/site/pages/Neutrino_Discovery.htm)

6

Figura 5- Léptons

LEPTONS	ELETRON	MUON	TAU
	0,511 MeV/c ²	105,7 MeV/c ²	1,777 GeV/c ²
	-1	-1	-1
	1/2	1/2	1/2
	NEUTRINO DO ELETRON	NEUTRINO DO MUON	NEUTRINO DO TAU
<2,2 eV/c ²	<0,17 MeV/c ²	<15,5 MeV/c ²	
0	0	0	
1/2	1/2	1/2	

Fonte: Fermilab (<https://www.fnal.gov/>)

O Neutrino pertence à mesma família do elétron (lépton); tem carga elétrica nula; massa extremamente pequena (10⁶ vezes menor que a massa do elétron); difícil de ser detectado (a matéria lhe é praticamente transparente). Até onde sabemos é elementar (não é formada por outros pedaços menores). São incrivelmente comuns: a mais abundante partícula massiva do Universo. Os Neutrinos poderiam se revelar idênticos aos antineutrinos, seus homólogos da antimatéria; estar ligados a partículas massivas que teriam influenciado sobremaneira a formação do Universo; informar-nos-ia sobre outros domínios da Física e as razões pelas quais as partículas parecem naturalmente se organizarem em três gerações; revelar-nos princípios sobre a natureza

7

Figura 6- O que é um Neutrino



Fonte: all things neutrino (<https://neutrinos.fnal.gov/whats-a-neutrino/>)

8

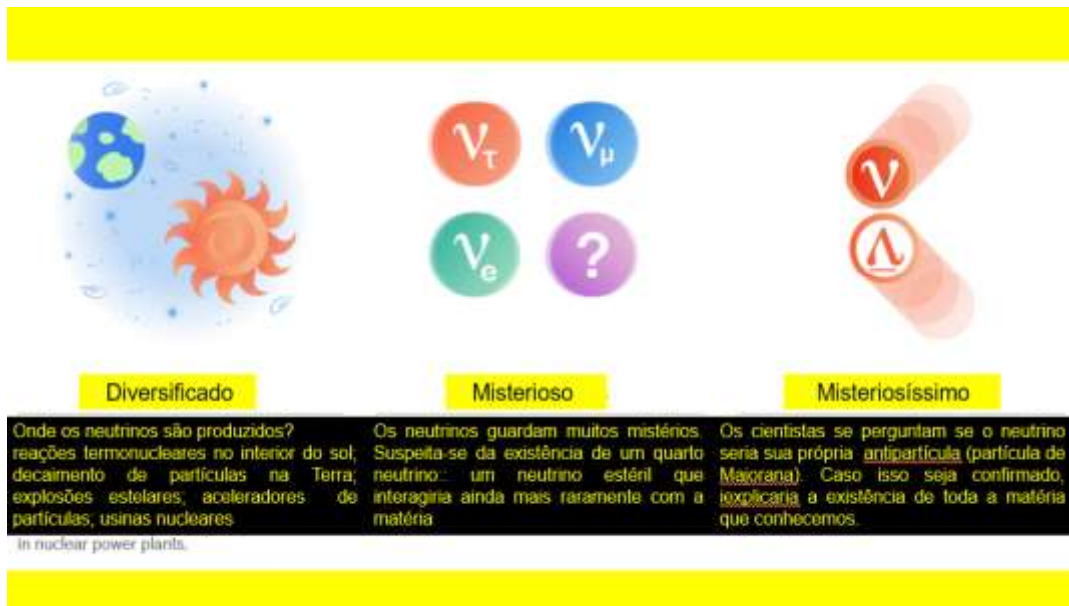
Figura 7- O que é um Neutrino



Fonte: all things neutrino (<https://neutrinos.fnal.gov/whats-a-neutrino/>)

9

Figura 8- O que é um Neutrino



Fonte: all things neutrino (<https://neutrinos.fnal.gov/whats-a-neutrino/>)

10

Figura 9- Fontes de Neutrinos

- Aceleradores de partículas
- reatores nucleares
- Desintegração beta
- Terra
- Big Bang
- Atmosfera
- Supernova
- Fontes extragalácticas



Fonte: all things neutrino/Sandbox Studio, Chicago (<https://neutrinos.fnal.gov/sources/>)

Figura 10- Qual é peso de um Neutrino?



Fonte: symmetry magazine | dimensions of particle physics/ Sandbox Studio, Chicago
(<https://www.symmetrymagazine.org/article/how-heavy-is-a-neutrino>)

12

Figura 12- Membros da colaboração T2K (estudo de oscilação de Neutrinos)



Fonte: T2K experiment (<https://t2k-experiment.org/>)

Figura 13- Capturando Neutrinos



Fonte: IceCube Neutrino Observatory: IceCube (<https://icecube.wisc.edu/>)

15

Figura 14- Telescópio Neutrinos



Fonte: KMENeT (<https://www.km3net.org/>)

16

E agora?

Dirac: todas as partículas têm sua antipartícula, que são diferentes entre si.

Majorana: O Neutrino é sua própria antipartícula, isto é, pode ser partícula e antipartícula

Então: O Neutrino é um férmion (partícula) de Dirac ou um férmion (partícula) de Majorana?

Figura 15- Neutrinos : Majorana ou Dirac ?

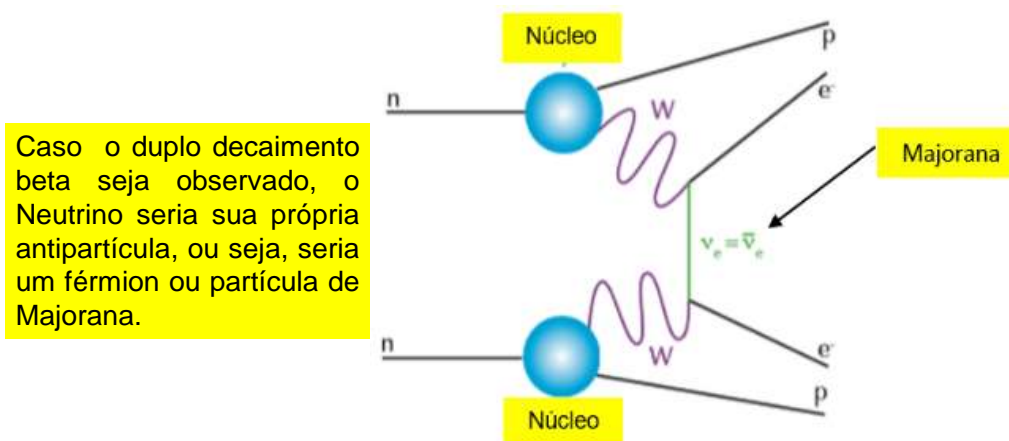


Fonte: Fermilab (<https://news.fnal.gov/2012/09/neutrinos-majorana-or-dirac/>)

17

Figura 16- Duplo decaimento beta

- Se o duplo decaimento beta seja observado, o Neutrino seria sua própria antipartícula, ou seja, um férmion ou partícula de Majorana.

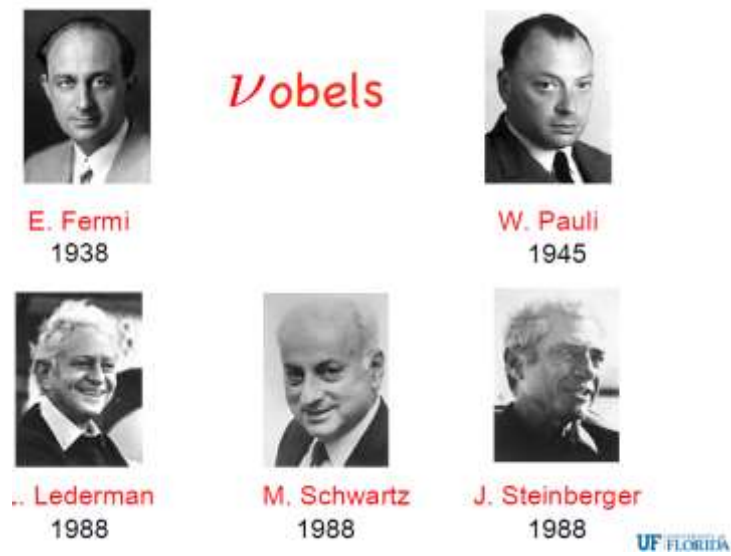


Caso o duplo decaimento beta seja observado, o Neutrino seria sua própria antipartícula, ou seja, seria um férmion ou partícula de Majorana.

Fonte: Revista Reflets de la Physique n°24
(<https://www.refletsdelaphysique.fr/articles/refdp/pdf/2011/02/refdp201124p11.pdf>)

18

Figura 17- Prêmios Nóbéis



Fonte: University of Florida (<https://www.ufl.edu/>)

19

Figura 18- Prêmios Nóbéis



Fonte: University of Florida (<https://www.ufl.edu/>)

20

Figura 19- Famosos devido aos Neutrinos



Fonte: University of Florida (<https://www.ufl.edu/>)



21

 **PPGEEnFis**
Programa de Pós-Graduação em Ensino de Física

Universidade Federal do Espírito Santo
Centro de Ciências Exatas
Programa de Pós-Graduação em Ensino de Física - Polo 12/MNPEF/SBF

MNPEF Mestrado Nacional
Profissional em
Ensino de Física

Aplicações científica e tecnológica

- ✓ Monitoramento de proliferação nuclear
- ✓ Computação quântica e tele comunicações com NU's
- ✓ Prospecção mineral e de petróleo
- ✓ Utilização dos geoneutrinos
- ✓ Grandes estruturas de telescópios a NU's como instrumentação oceanográfica, geofísica e biológica em águas profundas: monitoramento em tempo real
- ✓ TÉLESCOPE À NEUTRINOS KM3NET (abrindo uma nova janela sobre nosso universo)
- ✓ Utilização de neutrinos atmosféricos de alta energia ou feixes de neutrinos artificiais para realizar uma tomografia da Terra, ou seja, um mapa da densidade de matéria no interior da Terra

22



NU's e a Cosmologia

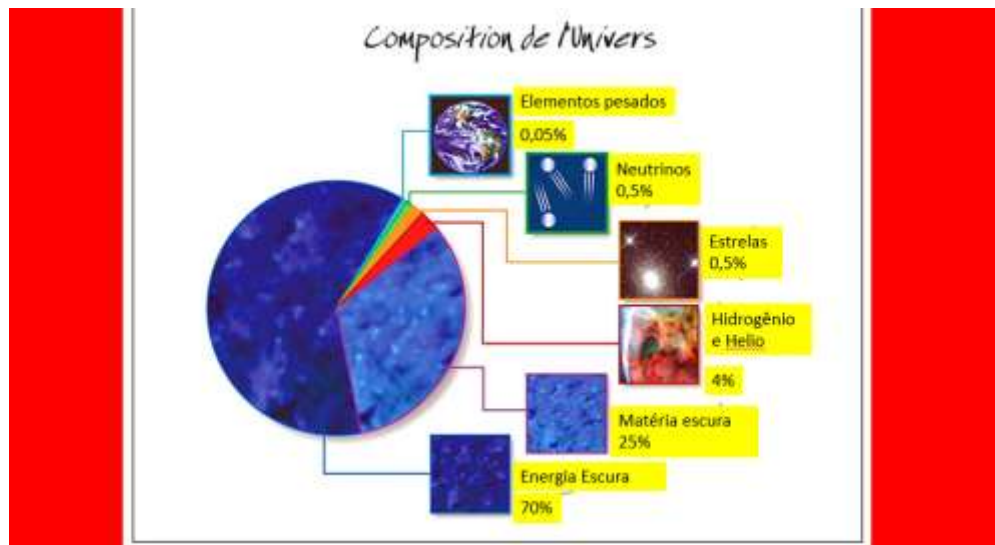
- Em 1s Após o Big-Bang: neutrinos leves se desacoplaram termicamente dos quarks e léptons quando temp. caiu para 10^{10} K (\sim MeV).
- Primeiras testemunhas ainda vivas (reliquia) do Big-Bang (retaguarda dos NU's cósmicos)
- Hoje: temperatura(1,95K: todos os tipos juntos)/densidade(330 neutrinos par cm^{-3})
Difícil de detectar: energia muito fraca (0,1meV)/seção eficaz de 10^{-60}cm^2
- 99% da energia emitida nas explosões de supernovas estão na forma de NU's
- *Alguns pesquisadores propuseram que os NU's seriam a principal componente da matéria escura. Mas seria necessário que a massa dos neutrinos fossem ao menos 10eV.*
- *Os últimos resultados dos parâmetros de oscilação dos NU's e dados cosmológicos do satélite Planck excluíram essa hipótese*
- *Cogita-se a existência de um quarto NU que seria massivo e estéril*

23



Após tanta informação e formação, perguntamo-nos: o que conhecemos sobre nossa Natureza, ou seja, sobre a natureza do Universo?

Figura 20- O conteúdo do Universo



Fonte: Profa. Maria de Fátima O. Saraiva (<http://www.if.ufrgs.br/~fatima/ead/universo-atual.htm>)

25

Qual a natureza do universo ou Do que o Universo é feito?

Até onde sabemos:

- Matéria bariônica normal (nós, planetas, estrelas, galáxia e etc) =5%
- Matéria escura =25%
- Energia escura=70%
- Não conhecemos nada sobre a natureza tanto da matéria escura como da energia escura=95%
- Conhecemos 10% da matéria bariônica (10% de 5%)=0,5%

Conclusão

Conhecemos apenas 0,5% daquilo do que o Universo é feito!

26



PPGEnFis
Programa de Pós-Graduação em Ensino de Física

Universidade Federal do Espírito Santo
Centro de Ciências Exatas
Programa de Pós-Graduação em Ensino de Física – Polo 12/MNPEF/SBF

MNPEF Mestrado Nacional
Profissional em
Ensino de Física

AGRADECIDO!

27



PPGEnFis
Programa de Pós-Graduação em Ensino de Física

Universidade Federal do Espírito Santo
Centro de Ciências Exatas
Programa de Pós-Graduação em Ensino de Física – Polo 12/MNPEF/SBF

MNPEF Mestrado Nacional
Profissional em
Ensino de Física

Quinta aula

LHC

Large Collider Hadrons/Grande Colisor de H ádrons/Grand Colisionneur d'Hádrons

Ciência não se faz em um dia....

1



- ✓ Maior laboratório de Física de partículas do mundo
- ✓ 2500 empregados
- ✓ 10000 cientistas visitantes por ano
- ✓ 1000 estagiários
- ✓ Criado em 24 de setembro de 1954
- ✓ 21 países membros mais países observadores
- ✓ Situado perto de Genebra (próximo à fronteira franco-suíça)

2

Figura 1: Vista aérea da localização do Cern (Conseil Européen pour la Recherche Nucléaire: organização europeia para a Pesquisa Nuclear)



Fonte: Cern (<https://home.cern/>)

3

Figura 2: Foto aérea indicando a circunferência do LHC no Cern (Conseil Européen pour la Recherche Nucléaire: organização europeia para a Pesquisa Nuclear)



Fonte: ESTUDARFORA.ORG (<https://www.estudarfora.org.br/estagio-no-cern/>)

4

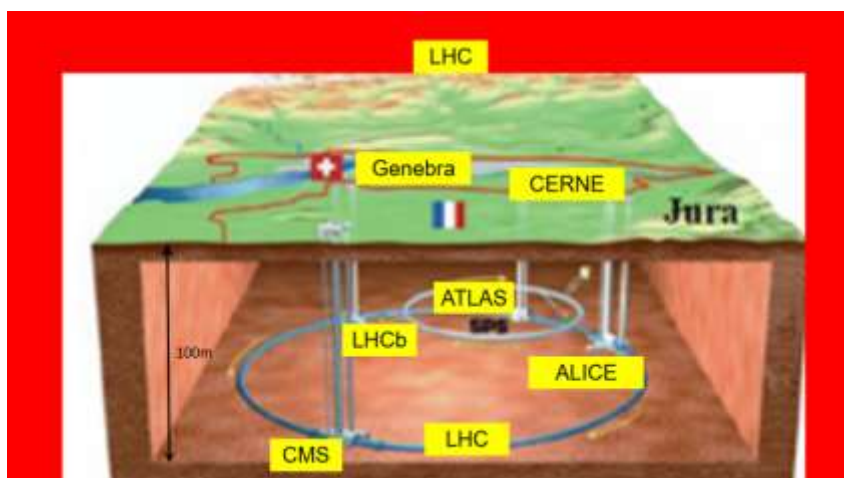
Figura 3: Técnico realizando manutenção em um dos trechos do LHC



Fonte: Mundo da Educação (<https://mundoeducacao.uol.com.br/quimica/lhc-maior-acelerador-particulas-mundo.htm>)

5

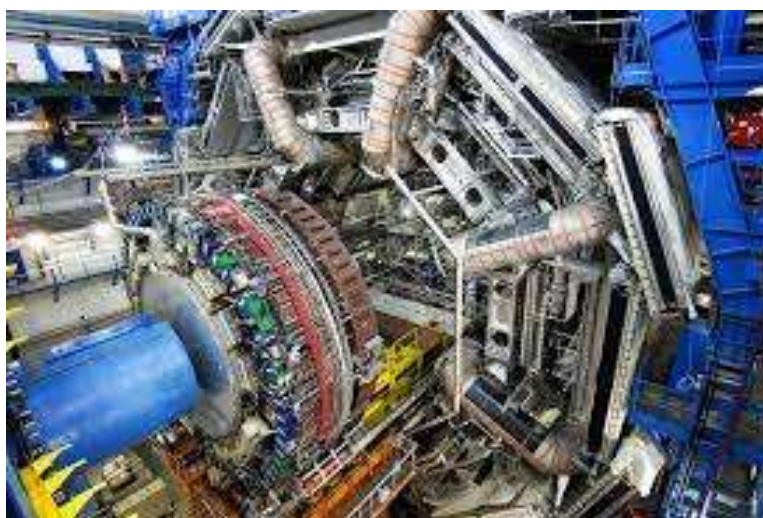
Figura 4: Esquema ilustrativo da posição do LHC com seus detectores no Cern(Conseil Européen pour la Recherche Nucléaire: organização europeia para a Pesquisa Nuclear)



Fonte: Cern (<https://home.cern/>)

6

Figura 5: Detector Atlas (A Toroidal LHC Apparatus Experiment, Aparato Experimental Toroidal do LHC, em tradução livre)



Fonte: ATLAS experiment/Cern (<https://atlas.cern/discover/detector>)

7

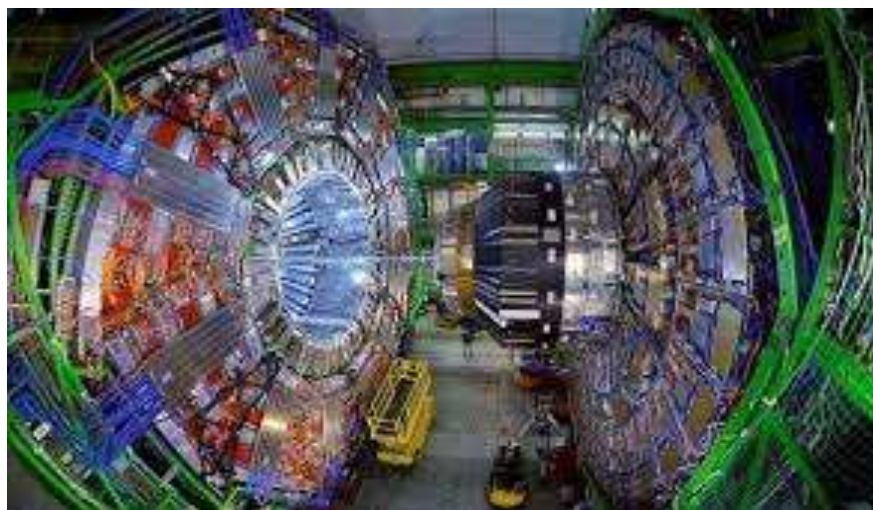
Figura 6: Detector Alice (A Large Íon Collider Experiment, Grande Colisor de Íons, em tradução livre)



Fonte: ALICE experiment/Cern (<https://home.cern/science/experiments/alice>)

8

Figura 7: Detector CMS (Compact Muon Detector, Detector Compacto de Múons, em tradução livre)



Fonte: CMS experiment (<https://cms.cern/>)

9

Alguns números do LHC

- Forma geométrica: anel de 27 km de comprimento no interior de um túnel a 100m de profundidade
- Energia total em seu centro de massa é de 14 Tev (sete vezes maior que o Tevatron do Fermilab)
- Luminosidade: $10^{34} \text{ cm}^{-2} \text{ s}^{-1}$ (100 vezes maior que o Tevatron)
- Frequência de revolução: 11,2 KHz 11.200 vezes por segundo
- Consumo de energia: ~ 120MW
- Cada feixe de prótons: 2800 pacotes de partículas: ~ $1,15 \times 10^{11}$ protons
- Comprimento total dos cabos supercondutores: 7000 km
- Cada cabo sendo constituído de filamentos, o comprimento total dos filamentos é 10 vezes a distância entre a Terra e o Sol
- Vácuo onde circulam os feixes de prótons é de 10^{-10} torr (~ 3millions moléculas/cm³) para evitar no máximo as colisões com as moléculas do gás:

isso equivale a uma pressão a uma altitude de 1000 km

- Os ímãs supercondutores são resfriados a 1,9 K com hélio superfluido
- Cada feixe de partículas armazena 360 MJ, o que pode ser comparado a:
 - a) ENERGIA CINÉTICA de um pequeno navio de cruzeiro de 10 toneladas a 30km/h ou 450 veículos de 02 toneladas a 100km/h
 - b) ENERGIA QUÍMICA da explosão de 80 Kg de TNT ou a metabolização de 70 kg de chocolate
 - c) ENERGIA TÉRMICA para derreter 500kg de cobre ou elevar a temperatura de um metro cúbico de água a 85 ° C ou preparar uma tonelada de chá

10



Agradecido!

11