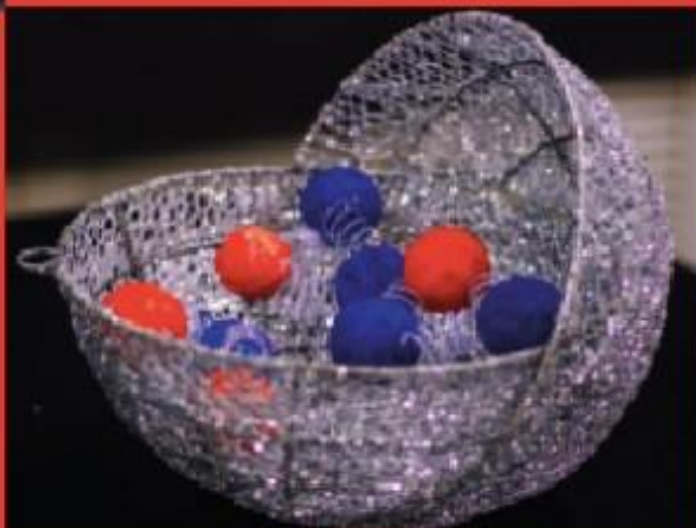




## Uma Intervenção Didática para a Inserção da Física de Partículas no Ensino Médio



**Produto Didático**

**Walter Lúcio de Paula Junior**

## APRESENTAÇÃO

*Caro Professor,*

*Este material, elaborado na forma de uma sequência didática, apresenta aspectos da Física de Partículas voltados para o Ensino Médio e foi preparado de acordo com a teoria de Ausubel (1980) no que diz respeito a aprendizagem significativa. Deste modo, todo o trabalho foi desenvolvido considerando o conhecimento prévio dos estudantes como principal fator que influencia o processo de aprendizagem.*

*A sequência didática aqui apresentada é dividida em dez etapas, sendo que cada etapa seja aplicada em duas aulas de cinquenta minutos. Este produto educacional é parte integrante do Mestrado Nacional Profissional em Ensino de Física da Sociedade Brasileira de Física, no polo do Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia Fluminense.*

*O objetivo principal desta sequência didática é apresentar uma proposta de inserir aspectos da Física de Partículas no Ensino Médio.*

*Bons Estudos!*

## SUMÁRIO

1. Conhecimentos Prévios .....	4
2. Situação-Problema Inicial .....	8
3. Concepções Prévias dos Modelos Atômicos .....	11
Atividades .....	22
4. Partículas Elementares .....	26
Atividades .....	33
5. Confeções dos Elementos Químicos através de Tabelas .....	36
6. Interações Fundamentais .....	38
Atividades .....	44
7. Teoria da Relatividade .....	51
8. Atividades .....	57
9. Raios Cósmicos .....	61
Atividades .....	65
10. Questionário Final .....	67

## Aula 1: Conhecimentos Prévios

O objetivo desta aula é identificar as concepções prévias dos alunos a partir de um questionário inicial.

Primeiramente o questionário será respondido individualmente, em seguida os alunos deverão formar grupos de quatro pessoas para a discussão das suas ideias.

### Questionário

- 1) Uma madeira quebrada é feita de madeira, se dividirmos milhares de vezes essa madeira, é possível chegar a menor parte da madeira, na qual não se pode dividir mais? De que é composto a madeira? Depois de dividir muitas vezes a madeira, o material continua sendo madeira? Se não continuar sendo madeira se transformou em que?

---

---

---

---

- 2) O que são moléculas? O que são elementos químicos? O que são átomos? O que são partículas? Isso interfere na resposta que você deu anteriormente, para o caso da madeira? Por fim já ouviu falar em quarks?

---

---

---

---

- 3) Por que os elementos químicos são diferentes, conforme se pode observar na tabela periódica abaixo?

# Tabela periódica

1																	18
H 1,00794																	He 4,002602
3	4											13	14	15	16	17	18
Li 6,941	Be 9,012182											B 10,811	C 12,0107	N 14,00644	O 15,999	F 18,998403	Ne 20,1797
11	12											31	32	33	34	35	36
Na 22,98976928	Mg 24,304											Al 26,9815386	Si 28,0855	P 30,973762	S 32,065	Cl 35,453	Ar 39,948
19	20	21	22	23	24	25	26	27	28	29	30	31	32	33	34	35	36
K 39,0983	Ca 40,078	Sc 44,955912	Ti 47,88	V 50,9415	Cr 51,9961	Mn 54,938044	Fe 55,845	Co 58,933195	Ni 58,6934	Cu 63,546	Zn 65,38	Ga 69,723	Ge 72,6305	As 74,9216	Se 78,9718	Br 79,904	Kr 83,801
37	38	39	40	41	42	43	44	45	46	47	48	49	50	51	52	53	54
Rb 85,4678	Sr 87,62	Y 88,905848	Zr 91,224	Nb 92,90638	Mo 95,94	Tc 98	Ru 101,07	Rh 101,07	Pd 106,3276	Ag 107,8682	Cd 112,411	In 114,818	Sn 118,710	Sb 121,757	Te 127,6	I 126,90547	Xe 131,29
55	56	57 e 58	72	73	74	75	76	77	78	79	80	81	82	83	84	85	86
Cs 132,90545196	Ba 137,327		Hf 178,49	Ta 180,94788	W 183,84	Re 186,207	Os 190,23	Ir 192,222	Pt 195,084	Au 196,966569	Hg 200,59	Tl 204,3833	Pb 207,2	Bi 208,98038	Po 209	At 210	Rn 222
87	88	89 e 90	104	105	106	107	108	109	110	111	112	113	114	115	116	117	118
Fr 223	Ra 226		Rf 261	Db 262	Sg 266	Bh 264	Hs 277	Mt 268	Ds 285	Rg 289	Cn 285	Nh 286	Fl 289	Mc 288	Lv 293	Ts 294	Og 294
89	90	91	92	93	94	95	96	97	98	99	100	101	102	103	104	105	106
La 138,90547	Ce 140,12	Pr 140,90766	Nd 144,242	Pm 145	Sm 150,36	Eu 151,964	Gd 157,25	Tb 158,92534	Dy 162,5001	Ho 164,93032	Er 167,259	Tm 168,93224	Yb 173,054	Lu 174,967			
93	94	95	96	97	98	99	100	101	102	103	104	105	106	107	108	109	110
Ac 227	Th 232,0377	Pa 231,036888	U 238,02891	Np 237	Pu 244	Am 243	Cm 247	Bk 247	Cf 251	Es 252	Fm 257	Md 258	No 259	Lr 260			

Disponível em: <www.ptable.com>

4) Qual a menor unidade que constitui a matéria?

---



---



---



---



---

- 5) Quais são mais antigos, os átomos no corpo de uma pessoa idosa ou aqueles que formam o corpo de um bebê?

---

---

---

---

- 6) A população da Terra cresce a cada ano, isso significa que a massa da terra cresce a cada ano?

---

---

---

---

---

- 7) Qual a diferença entre os átomos que estão no seu corpo e os que estão num porco? E os que estavam no Einstein?

---

---

---

---

---

- 8) De que são feitos os átomos?

---

---

---

---

- 9) Por que a matéria do qual é feito o seu corpo fica unida?

---

---

---

---

---

- 10) No primeiro ano vocês viram a força peso, a força de tração, a força normal, força de atrito e podemos juntar a essas que vocês verão no próximo ano, a força eletromagnética. No entanto os cientistas dizem que só existem quatro forças na natureza, explique.

---

---

---





**Atividade 2: Entendendo os elementos químicos**

Nesta atividade iremos estudar o esquema da tabela periódica com o objetivo de compreender cada detalhe de sua composição. Com base na tabela periódica abaixo,



Figura 1: Tabela periódica dos elementos químicos.

descreva:

a) O que significa número atômico.

---



---



---



---

b) O que é o peso atômico?

---



---



---

10

**Atividade 3: Identificando as propriedades dos elementos químicos.**

Com base na tabela periódica figura acima.

- a) Circule o elemento químico ouro e o mercúrio
  
- b) Determine o número atômico e o seu peso atômico.

---

---

---

- c) Explique qual a diferença entre os dois elementos químicos.



---

---

---

---

**Atividade 4: Identificação das forças na tabela periódica.**

Quais são as forças fundamentais da natureza que Carl Sagan fala no vídeo?  
Justifique cada uma delas.

---

---

---

---

---

---

---

---

---

---

---

---

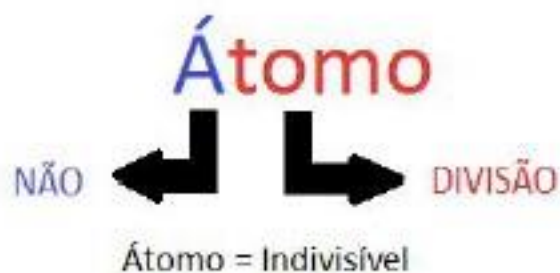
## Aula 3: Concepções Prévias dos Modelos Atômicos

Vamos começar a aula de hoje com a seguinte pergunta...



Esse questionamento nos remete à várias respostas ao longo de toda a história da humanidade, vamos ver algumas delas?

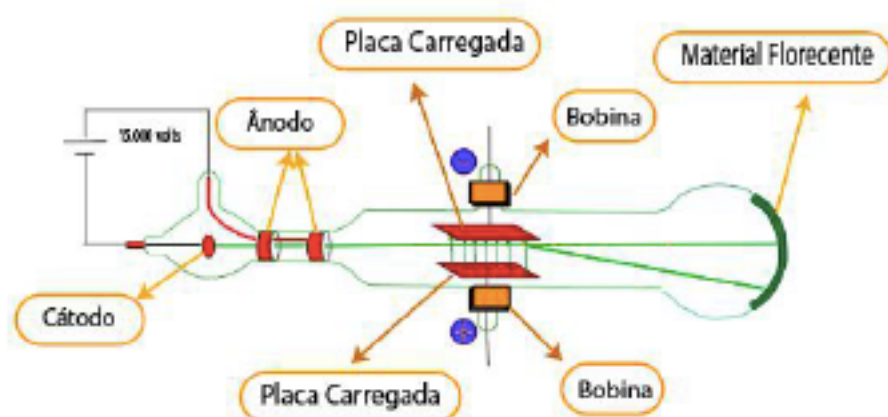
No séc. 4 a.C. o filósofo grego Demócrito propôs que toda a matéria do Universo era formada de um conjunto de partículas que não podiam se dividir. Ele as chamou de átomos, que significa indivisível.



O pensamento de Demócrito foi basicamente o mesmo, até que, no séc. XIX, em 1808, o inglês John Dalton afirmou que as diferentes substâncias seriam formadas de diferentes tipos de átomos, que eram partículas maciças e esféricas.

Em 1897, J.J. Thomson, usou um experimento onde acoplou duas placas metálicas, que funcionavam como eletrodos positivo e negativo, em um tubo de vidro cujas paredes eram cobertas com um material fluorescente. No interior do tubo, ele injetou um gás rarefeito.

Figura 2: Experimento de Thomson e a descoberta do elétron.



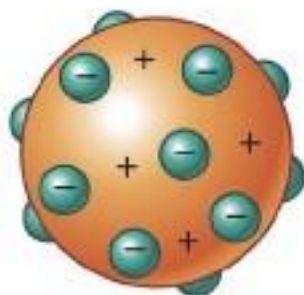
Esse gás, entre o cátodo e o ânodo, foi ionizado por uma tensão elevada cerca de 15.000 volts produzindo íons carregados positivamente que se acumulam no cátodo e os íons negativos são atraídos pelo ânodo. Os elétrons ganham velocidade, passando por uma pequena abertura no ânodo. No interior do tubo colocou-se também duas placas paralelas, onde se aplicou uma tensão, criando um campo elétrico e um par de bobinas que criam um campo magnético.

Thomson notou o aparecimento de um brilho que iluminava a parede oposta ao eletrodo negativo que incidiam no material fluorescente. Thomson em analogia com outros experimentos que trabalhava e deduziu que essas partículas eram o que chamou de elétrons com carga negativa. Esses elétrons eram emitidos pelo próprio átomo. Desta forma o átomo deixou de ser indivisível e sim composto por cargas negativas, e como se mantinha neutro, devia haver também cargas positivas, então ele conjecturou do primeiro modelo atômico.

Com esse experimento da Figura 3 Thomson determinou a razão carga massa do elétron pela primeira vez. Seu experimento virou um marco para o conhecimento da estrutura atômica, apesar de ter conjecturado o modelo de átomo de forma errônea. Thomson ganhou o prêmio Nobel de Física em 1906.

Sua ideia era que o átomo fosse uma massa carregada positivamente com elétrons encrustados com passas em um pudim.

Figura 3: Representação esquemática do modelo atômico de Thomson



*Átomo de  
Thomson,  
Conhecido como  
"pudim de passas".*

J. J. Thomson: "Há uma forte evidência de que os corpúsculos negativos fazem parte de todos os átomos. A questão agora é saber quais são os outros componentes do átomo. Estes devem ser carregados positivamente para neutralizar as cargas negativas dos corpúsculos"

OBS: Neste momento os alunos devem fazer a atividade 1, sobre o modelo de Thomson.

**Um Pouco mais de História da Ciência**

A propriedade de produzir fluorescência a partir de certos materiais tornou os tubos de raios catódicos a base técnica de televisores e outros aparelhos, como osciloscópios e telas de radar.



Raios catódicos são radiações compostas de elétrons que se originam no interior de tubos cheios de gás rarefeito (tubos de Crookes) e submetidos a uma diferença de potencial elétrico entre suas extremidades metálicas, ou pólos.

Por volta de 1878, William Crookes concluiu que os raios catódicos são formados de feixes de partículas com carga negativa, emitidas do cátodo com velocidade muito alta.

O fato foi comprovado em 1879 pelo físico Joseph John Thomson, que demonstrou serem as radiações desviadas pela ação de campos elétricos.

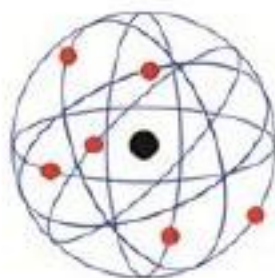
Os raios catódicos produzem ionização nos gases que através sim causam fluorescência nas paredes de vidro dos tubos de Crookes e em algumas substâncias como o sulfato de zinco. Além disso, têm baixo poder de penetração, aquecem as superfícies sobre as quais incidem e são independentes da natureza do gás existente no tubo.

O aperfeiçoamento das bombas de vácuo possibilitou a produção das baixas pressões necessárias para a operação dos tubos de raios catódicos.



Isso era o que se pensava na época, mas já haviam cientistas que não concordavam com esse modelo de átomo, foi então que em 1911, Ernest Rutherford propôs um modelo com algumas mudanças. Ele afirmou a existência de um núcleo formado de cargas positivas, enquanto os elétrons estão fora do núcleo, girando em torno dele.

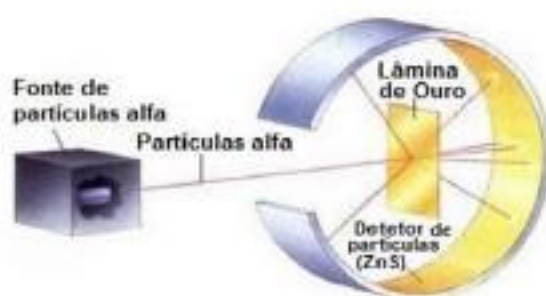
Figura 4: Representação esquemática do modelo atômico de Rutherford.



*Átomo de Rutherford: a massa do átomo está quase toda concentrada no núcleo!*

Rutherford resolveu esse problema como mostra na Figura 5, fazendo partículas de hélio duplamente ionizadas incidirem numa placa de ouro, os detectores foram colocados de forma a captar partículas em todos os ângulos, a ideia foi que o átomo fosse o que Thomson teorizou as partículas se repeliriam e acertariam o detector para trás.

Figura 5: Experimento de Rutherford para detectar a composição atômica



Fonte: Disponível em <alunosonline.uol.com.br >. Acessado em 25 de junho de 2017

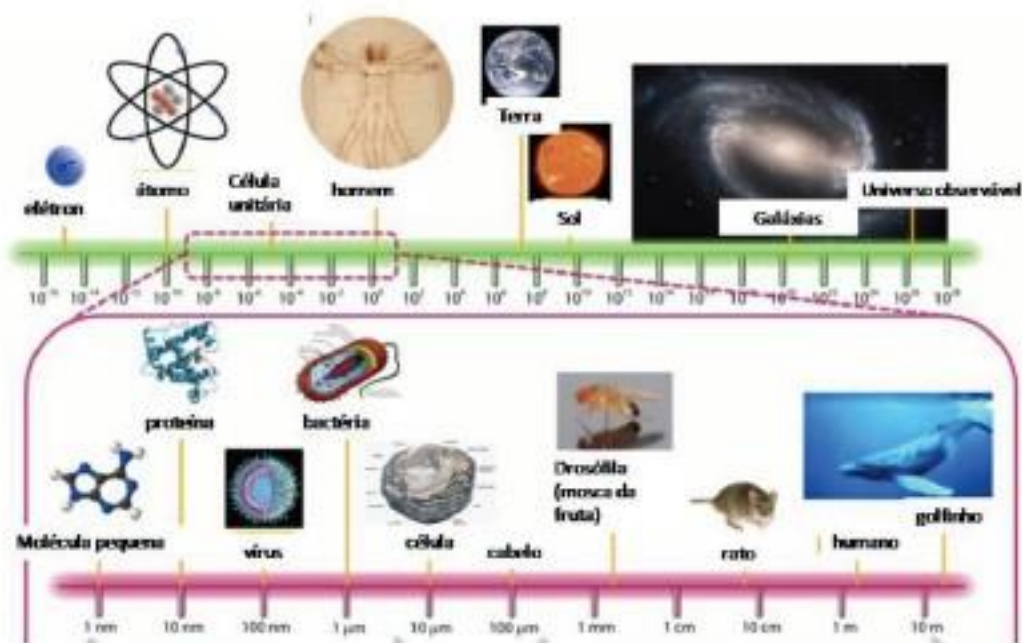
Mas ao invés desse comportamento o cientista verificou que quase todas as partículas passaram pela chapa de ouro. Desta forma Rutherford teorizou uma estrutura atômica como mostrado na Figura 4. O modelo de Rutherford até hoje é símbolo do átomo, chamamos esse modelo de modelo clássico da estrutura atômica. Com esse experimento, Rutherford concluiu que existia um vazio entre o núcleo positivo e os elétrons.



Então a pergunta que surge dessas indagações é relacionada com as escalas atômicas. O que vocês acham?

Hoje sabemos que a maior parte do átomo é composto de vazios. Na figura 6 podem ser vistas as escalas nucleares e atômicas até as galáxias.

Figura 6 : Escalas de alguns sistemas.



Fonte: <http://www.infis.ufu.br/pgecm/api/pdf/1799334115.pdf>.

Nos quadros em destaque foram relacionado alguns conceitos úteis:

### *O que é um Elemento Químico?*

*O elemento químico é um conjunto de átomos que têm o mesmo número de prótons em seu núcleo atômico, ou seja, o mesmo número atômico.*

#### *Exemplos:*

- *Oxigênio é o elemento químico constituído por todos os átomos que possuem número atômico 8, isto é, com oito prótons.*
- *Cálcio é o elemento químico constituído por todos os átomos que possuem número atômico 20, isto é, com vinte prótons.*



***O que é uma Molécula?***

Uma molécula é formada quando átomos do mesmo ou diferentes elementos se combinam. A molécula é a menor partícula de uma substância que pode normalmente existir de maneira independente.

Exemplos:

- Dois átomos de oxigênio se combinam para formar uma molécula de oxigênio [O<sub>2</sub>].
- Um átomo de carbono se combina com dois átomos de oxigênio para formar uma molécula de dióxido de carbono [CO<sub>2</sub>].

Então agora vocês devem usar a internet para fazer a pesquisa relacionada nas tabelas:

<b>Objeto</b>	<b>Dimensão</b>
<b>Dimensão do diâmetro da Terra</b>	
<b>Dimensão de uma bola de futebol</b>	
<b>Dimensão da cabeça do alfinete</b>	
<b>Dimensão de uma célula</b>	
<b>Dimensão do átomo</b>	

Para entender as unidades transforme:

Valor	Valor em metros
1 km (quilômetro)=	
1 cm (centímetro)=	
1 mm(milímetro)=	
1 (micrômetro)=	
1 (nanômetro)=	
1 (angstrom)=	
1 (picômetro)=	

Niels Bohr, em 1913, aperfeiçoou o modelo de Rutherford usando as ideias de Planck, e resolveu o problema de estabilidade do átomo de Rutherford.

Max Karl Ernst Ludwig Planck (1858-1947).

**Físico alemão, criou o conceito de quantização de energia em 1900. Por esse trabalho recebeu em 1918 o Prêmio Nobel de Física.**

**Em reconhecimento por sua contribuição à ciência no ano de 1958, sua imagem foi estampada na moeda alemã de 2 marcos.**



## A quantização de energia

No final do século XIX, muitos cientistas estudavam o fenômeno da emissão de radiação por um corpo aquecido, tentando entender a relação entre a temperatura, a intensidade e o comprimento de onda da radiação emitida por esse corpo. Como as leis da física clássica conhecida na época não proporcionavam explicações adequadas para tais observações, Planck, em 1900, tentando explicar essas emissões, formulou uma hipótese ousada para a época, admitindo que a transmissão de energia entre os corpos ocorre através da troca de pacotes ou quanta de energia entre eles e que as radiações se constituíam de quanta (plural de quantum) de energia. Portanto, a energia é transferida de maneira

De acordo com Planck, a energia  $E$  de um quantum é dada pelo produto de uma constante  $h$ , conhecida como constante de Planck, cujo valor é  $6,63 \times 10^{-34}$  Js, pela frequência da radiação,  $f$ .

$$E = h f$$

Como a energia é quantizada, só permitidos valores de energia que sejam múltiplos inteiros de  $h f$ . Por exemplo:

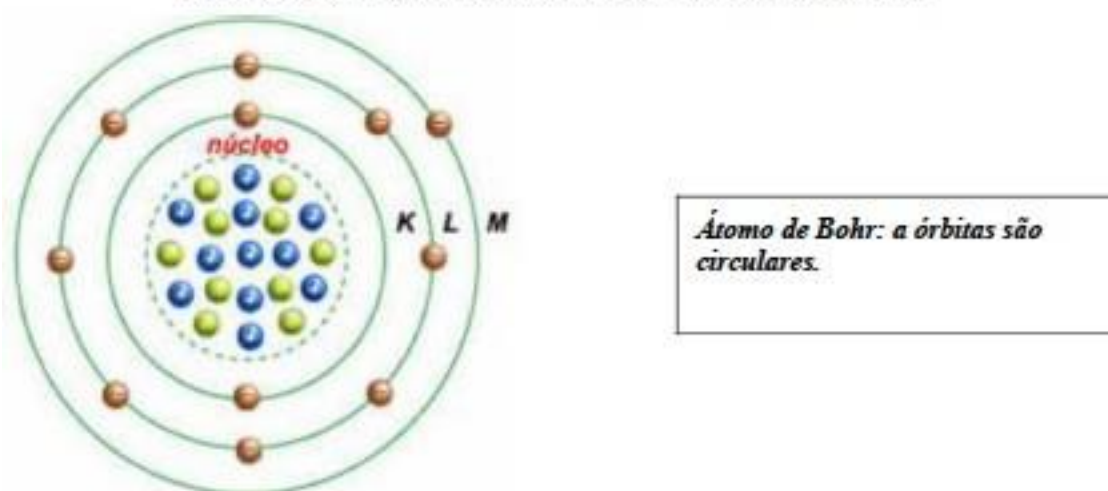
$$E = n h f \quad n = 1, 2, 3, 4, \dots$$

Segundo Bohr, os elétrons giram ao redor do núcleo em órbitas quantizadas. Essas órbitas quantizadas, seguem a teoria da quantização da energia de Planck como mostra na caixa de texto acima.

Assim, Bohr postulou:

- I) Os elétrons descrevem ao redor do núcleo órbitas circulares, chamadas de camadas eletrônicas, com energia constante e determinadas. Cada órbita permitida para os elétrons possui energia diferente (Figura 7);

Figura 7: Representação esquemática do modelo atômico de Bohr



- II) Ao invés da infinidade de órbitas que seriam possíveis em mecânica clássica, é possível para um elétron mover-se somente numa órbita para a qual o seu momento angular  $L$  seja um múltiplo inteiro da constante de Planck  $h$  dividida por  $2\pi$

$$L = nh/2\pi$$

- III) Os elétrons ao se movimentarem numa camada eletrônica (órbita estacionária) não absorvem nem emitem energia espontaneamente;

- IV) Ao receber energia, o elétron pode saltar para outra órbita, mais energética. Dessa forma, o átomo fica instável, pois o elétron tende a voltar à sua órbita original. Quando o átomo volta à sua órbita original, ele devolve a energia que foi recebida em forma de luz ou calor.

**Revisão de Movimento Circular**

Vamos considerar um elétron girando em torno do núcleo atômico. Como já foi visto no primeiro ano, a força que atua é chamada de centrípeta.

$$F_c = \frac{m_e v^2}{R} = F_e$$

o momento angular

$$L = m_e R v$$

Usando o postulado de Bohr

$$m_e R v = n h / 2\pi$$

Temos a quantização da órbita

$$R_n = \frac{n^2 h^2}{m_e z e^2}$$

Força elétrica

$$F_e = \frac{Z e^2}{R^2}$$

igualando as forças

$$R = \frac{Z e^2}{m_e v^2}$$

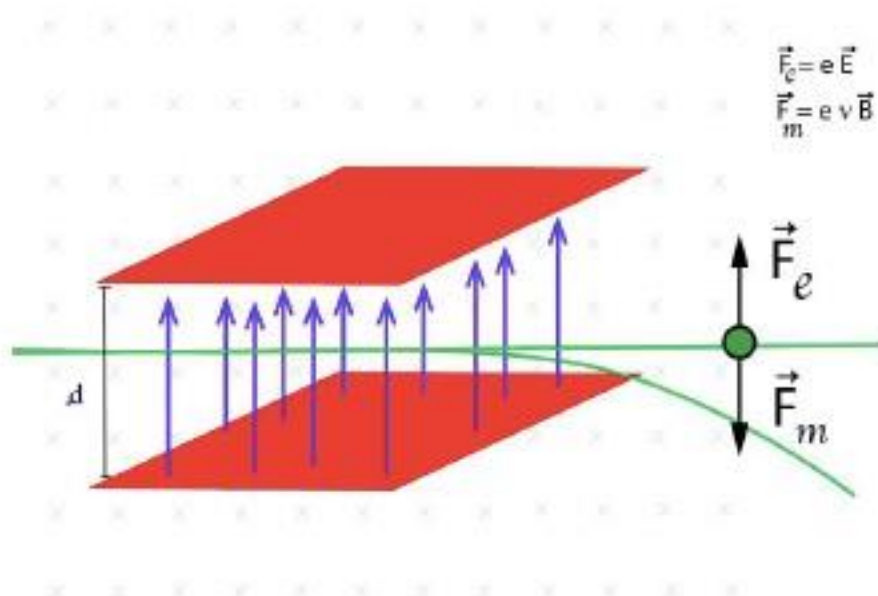
Mais à frente, em 1932, James Chadwick fez a suposição de uma nova partícula no núcleo do átomo, os nêutrons, que tivessem uma carga nula.



## Atividades

- 1) Vimos na aula que no experimento de Thomson foi possível determinar a relação carga massa do elétron. Isso foi feito calibrando a curvatura do feixe de elétrons que passa pelas placas paralelas carregadas, com o campo magnético aplicado. No momento que a força elétrica é igual a magnética o feixe de elétrons não curva mais e passa reto até colidir com o material fluorescente. Na Figura 8, é apresentado um detalhamento do experimento do Thomson, com os parâmetros que pode ser obtido do experimento.

Figura 8: Esquema de uma parte do experimento de Thomson.



Nesse experimento, considere que o campo elétrico entre as placas é  $6,0 \times 10^6$  N/C e o campo magnético aplicado é de  $0,83$  N.s/m.C.

Determine:

- a) Qual o sinal da carga  $q$ ? Justifique

---

---

---

---

---

- b) Depois de calibrar o experimento de forma que não haja nenhuma deflexão da partícula calcule qual a velocidade da partícula ao colidir com o écran.

---

---

---

---

---

- c) Usando a conservação da energia vista no primeiro ano ou seja que energia cinética é igual a potencial  $mv^2/2 = E_p$  e no caso elétrico a energia potencial é a carga vezes a ddp entre as placas  $E_p = q V$ . Calcule a razão carga massa  $q/m$ , sabendo que a ddp entre as placas 150 Volts.

---

---

---

---

---

- d) Sabendo que a carga do elétron é  $q = 1,6 \times 10^{-19} \text{ C}$ , determine a massa do elétron ?

---

---

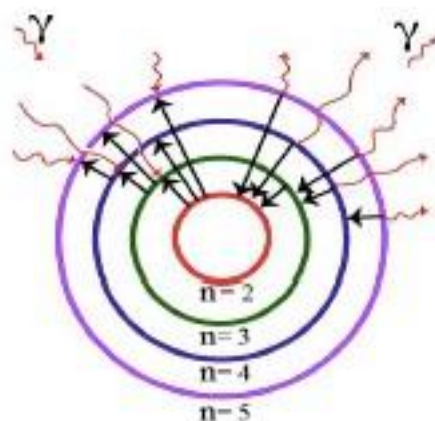
---

---

---

- 2) Na figura 8 estão esquematizadas algumas possibilidades para a absorção e emissão de energia de um átomo.

Figura 9: Dinâmica energética de um átomo de Bohr.



- a) Considerando a quantização do raio calcule a perda de energia quando um elétron na camada K passa de um estado excitado  $n=4$  para seu nível fundamental?

---



---



---



---



---



---

- b) Calcule a Força elétrica que o núcleo exerce no elétron na camada fundamental  $n=2$  e compare com a força exercida pelo núcleo quando esse mesmo elétron está na camada  $n=4$ .

---



---



---



---



---



c) Em termos de Energia do elétron no estado fundamental na camada L. Consulte a tabela periódica e escolha um elemento químico que possa ganhar energia até o mesmo pular para a camada M sem tornar esse elétron livre? Calcule quanta energia o mesmo deve perder para retomar a seu nível fundamental?

---



---



---

3) Para Casa: Pesquise mais detalhes sobre os modelos atômicos, complete as informações da tabela da figura colocando contribuições de outros cientistas.

Figura 10: Linha do tempo da evolução dos modelos atômicos.



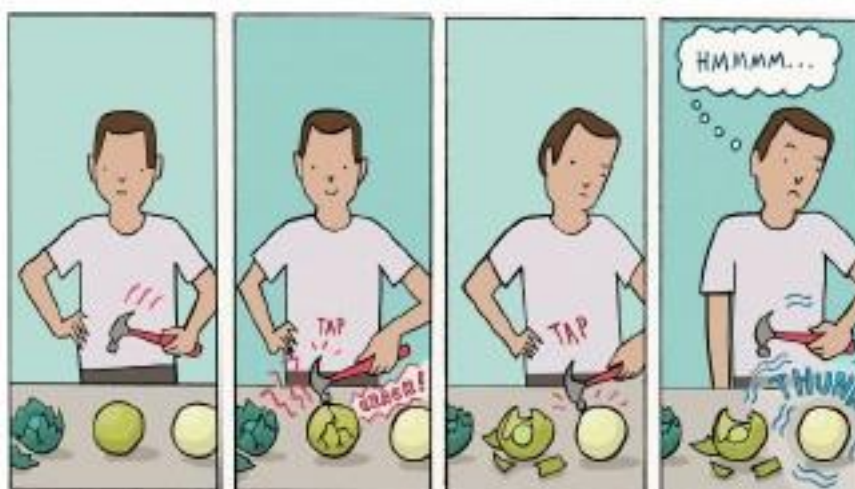


Olhando novamente a tabela periódica, Figura 1, pode ser visto, que o oxigênio tem 8 elétrons, sendo que seis deles estão na última camada. Da química sabe-se que para estabilizar o átomo de Oxigênio precisaria de dois elétrons para completar 8 que é o máximo de elétrons que pode ter na última camada. Já o hidrogênio tem 1 elétron na última camada e precisaria de mais um elétron para completar o máximo na última camada como é o caso do hélio. Por este motivo dois hidrogênios se juntam com um oxigênio, para formar a molécula de água, que é a molécula mais abundante no nosso planeta  $H_2O$ . Repare que a água, não é nem hidrogênio nem oxigênio é uma matéria completamente diferente, com propriedades completamente diferentes. Mas a água é composta de elementos fundamentais que são o oxigênio e hidrogênio.

Em analogia a esse caso vem o questionamento, será que o mesmo não acontece no núcleo atômico, ou seja, prótons e nêutrons seriam compostos de outros elementos independentes e com outras propriedades? e o que manteria esse átomo estável seria a ligação entre esses elementos.

Depois destas descobertas, os cientistas continuaram as pesquisas, desenvolvendo a mecânica quântica, inovando tecnologicamente trabalhando exclusivamente com a eletrosfera, sem se preocupar muito com o núcleo atômico. Somente em 1960, um pesquisador chamado Murray Gell-Mann propôs que prótons e nêutrons poderiam ser formados de outras partículas, que denominou de quarks, e que seriam partículas elementares, indivisíveis.

Figura 2: Figura ilustrativa para representar a divisibilidade do átomo.



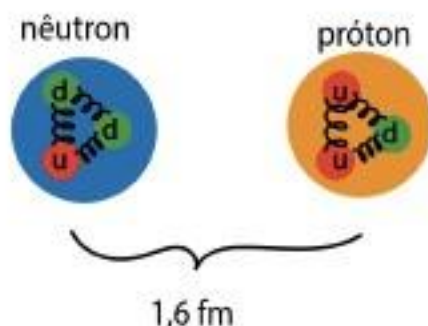
Essa conjectura nasce do seguinte questionamento:

*“Sabendo que as cargas positivas se repelem e no núcleo só existem cargas positivas e neutras, por que o núcleo é estável?”*

Então os quarks e os elétrons foram considerados como partículas elementares, ou seja, não são formadas por nada menor.

Desta forma, o próton e o nêutron são formados por dois tipos de quarks, o que eles chamaram de quark para cima (quark *up*) e quark para baixo (quark *down*), como mostra a Figura 3.

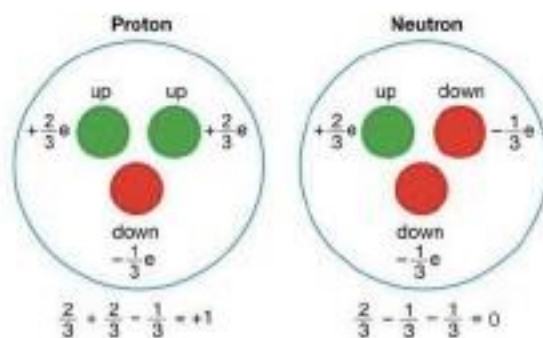
Figura 3: Representação fictícia do próton e nêutrons escritos em relação a seus constituintes que são quarks.



Desta forma, como no caso dos elementos químicos, temos o próton  $p \rightarrow u_2 d$  e o nêutron  $n \rightarrow d_2 u$ . Facilmente pode ser visto que:

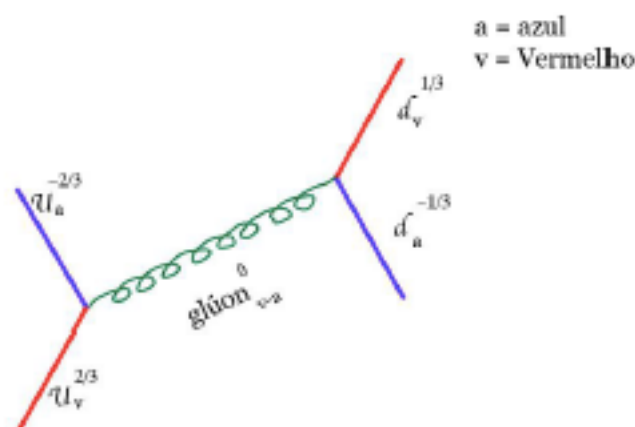
- Para que o próton tenha carga inteira e o nêutron seja sem carga, temos que ter quarks com cargas semi-inteiras, ou seja, fracionárias.

Figura 4: Conservação da carga para prótons e nêutrons



- A força que garante a estabilidade de núcleos atômicos é a força nuclear forte, como mostra a figura 3. As características desta força são: a sua grande intensidade, pequeno raio de ação  $\sim 10^{-15}$  m.
- Depois também tem os spins, que são semi-inteiros. Como os quarks são em número de 3 com dois iguais no caso de prótons e nêutrons, os quarks também têm spin semi-inteiro.
- Se tem spin semi-inteiro respeita o princípio da exclusão de Pauli. Para respeitar a esse princípio foi necessário outros ingredientes, como o que os pesquisadores chamaram de cor e sabor. Para carregar esses atributos foi necessário uma outra partícula, que os pesquisadores chamaram de glúon.

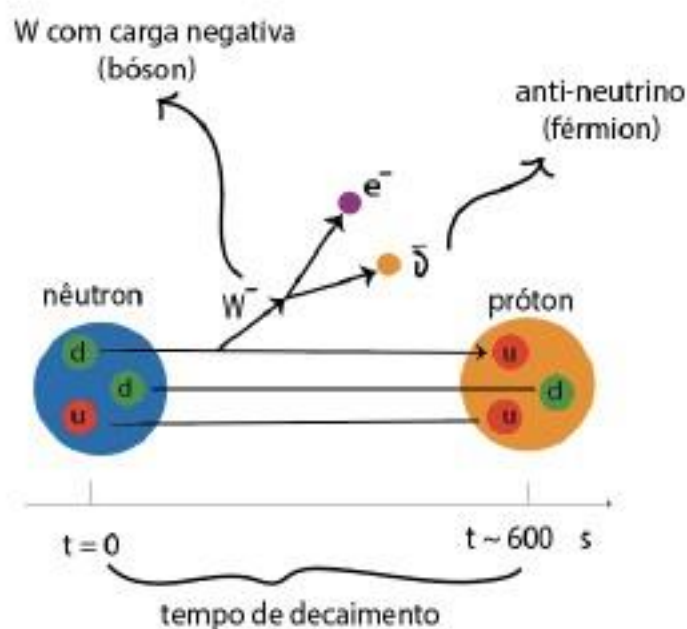
Figura 5: Interação entre mésons, que é composto por um quark e um anti-quark, dando uma carga zero para o glúon.



Desta forma, uma interação nuclear é bem mais complexa que uma reação química. É fácil de visualizar na Figura 5, que o glúon carrega o índice de carga e o índice de cor, fazendo uma composição de cores.

Então apesar da força forte ser necessária para manter os prótons e nêutrons juntos no núcleo como mostra a figura 3, a força fraca da figura 6, também é necessária para prever os decaimentos radioativos, figura 8.

Figura 6: Força Nuclear Fraca.



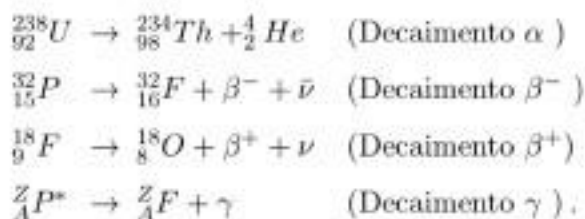
Recapitulando o conceito de decaimento radioativo, temos o exemplo da figura 8:

Figura 8: Tipos de radiação liberada em reações nucleares.

Tipo radiação	Composição	Símbolo	Massa relativa*	Carga relativa	Propriedades
$\alpha$ (alfa)	Núcleos de Hélio	${}^4_2\text{He}$	7350	2+	Fracamente penetrante
$\beta$ (beta)	Elétrons	${}^0_{-1}\text{e}$	1	1-	Moderadamente penetrante
$\gamma$ (gama)	Radiação eletromagnética de alta energia	$h\nu$	0	0	Fortemente penetrante

Fonte: [https://www.crq4.org.br/quimicaviva\\_energianuclear](https://www.crq4.org.br/quimicaviva_energianuclear). Acessado em 19 de maio de 2017.

Como exemplos de reações nucleares que leva em conta a força fraca dando origem as radiações alfa, beta e gama podem ser analisados nos seguintes decaimentos:



Além dos elétrons e dos quarks, existem outras partículas que também são elementares, figura 9. O ramo da física que estuda os constituintes elementares da matéria e da radiação, além da interação entre eles é a Física de Partículas.

As partículas elementares são descritas no Modelo Padrão das Partículas Elementares.

*O Modelo padrão foi desenvolvido durante a segunda metade do século XX como forma de classificar todas as partículas fundamentais.*

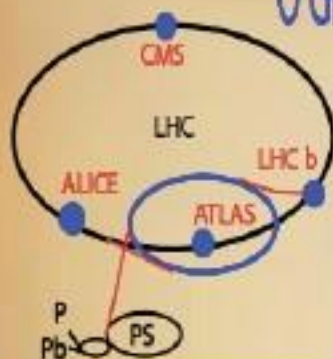
Figura 9: Tabela de partículas elementares.

	$m = 2.3 \text{ MeV}/c^2$ carga = $2/3$ spin = $1/2$ <b>u</b> up	$m = 1.275 \text{ GeV}/c^2$ $2/3$ $1/2$ <b>c</b> charm	$m = 1.73 \text{ GeV}/c^2$ $2/3$ $1/2$ <b>t</b> top	$0$ $2/3$ $1$ <b>g</b> glúon	$m = 125 \text{ GeV}/c^2$ $0$ <b>H</b> bóson de Higgs
<b>QUARKS</b>	$m = 4.8 \text{ MeV}/c^2$ $-1/3$ $1/2$ <b>d</b> down	$m = 95 \text{ MeV}/c^2$ $-1/3$ $1/2$ <b>s</b> strange	$m = 4.18 \text{ GeV}/c^2$ $-1/3$ $1/2$ <b>b</b> bottom	$0$ $0$ $1$ <b>γ</b> fóton	
	$m = 0.511 \text{ MeV}/c^2$ $-1$ $1/2$ <b>e</b> elétron	$m = 105.7 \text{ MeV}/c^2$ $-1$ $1/2$ <b>μ</b> múon	$m = 1.777 \text{ GeV}/c^2$ $-1$ $1/2$ <b>τ</b> tau	$0$ $0$ $1$ <b>Z</b> bóson Z	<b>BÓSONS DE CALIBRE</b>
<b>LÉPTONS</b>	$m = 2.2 \text{ eV}/c^2$ $0$ $1/2$ <b>ν<sub>e</sub></b> neutrino do elétron	$m = 0.17 \text{ MeV}/c^2$ $0$ $1/2$ <b>ν<sub>μ</sub></b> neutrino do muon	$m = 1.777 \text{ MeV}/c^2$ $0$ $1/2$ <b>ν<sub>τ</sub></b> neutrino do tau	$0$ $±1$ $1$ <b>W</b> bóson W	

Fonte: CERN.

As 17 partículas do Modelo Padrão se classificam em dois grupos diferentes, os bósons (na tabela, em verde e amarelo) e férmions (em vermelho e azul). Os férmions são as partículas que constituem toda a matéria. Eles são divididos entre quarks (em vermelho) e léptons (em azul).

## O Grande Acelerador de Hádrons



### Alguns Experimentos

- ALICE** Detecta Física de Altas energias.
- ATLAS** Modelo Padrão, Matéria Escura e Dimensões extras.
- CMS** Solenóide compacto de milhões Modelo Padrão, Matéria Escura e Dimensões extras de uma outra forma.
- LHCb** Matéria x Anti-Matéria e o Quark Beleza.
- LHCf** Simula os Raios Cósmicos em condições de Laboratório.
- TOTEM** Foi projetado para medir o próton suas características precisas.
- PS** É o acelerador Próton Síncrotron. Acelera tanto prótons quanto íons.

O Grande Colisor de Hádrons (em inglês: Large Hadron Collider) - LHC da Organização Europeia para a Pesquisa Nuclear (CERN), é o maior acelerador de partículas e o de maior energia existente do mundo.

Seu principal objetivo é obter dados sobre colisões de feixes de partículas, tanto de prótons a uma energia de 7 TeV (1,12 microjoules) por partícula, ou núcleos de chumbo a energia de 574 TeV (92,0 microjoules) por núcleo.

O laboratório localiza-se em um túnel de 27 km de circunferência, bem como a 175 metros abaixo do nível do solo na fronteira franco-suíça, próximo a Genebra, Suíça.[1]







## Atividades

**Atividade – Vamos treinar? Justifique todas as respostas!**

- 1) O que contribui mais para a massa de um átomo, os elétrons ou os prótons? E para o volume de um átomo (seu tamanho)?

---

---

---

---

- 2) Quantos núcleos atômicos existem em um único átomo de oxigênio? E em uma única molécula de oxigênio?

---

---

---

---

---

- 3) O hidrogênio é um átomo ou um elemento?

---

---

---

---

---

---

34

4) Por que se diz que os materiais no mundo ao nosso redor são formados principalmente por “espaço vazio”?

---

---

---

---

5) De que partículas fundamentais os prótons e os nêutrons são formados?

---

---

---

---

---

6) Como se distingue uma molécula de um átomo?

---

---

---

---

---

7) Como a massa e a carga de um próton se comparam com aquelas de um nêutron?

---

---

---

---

---

8) O que determina o tamanho de um átomo, o diâmetro do seu núcleo ou os elétrons em sua órbita?

---

---

---

---

---

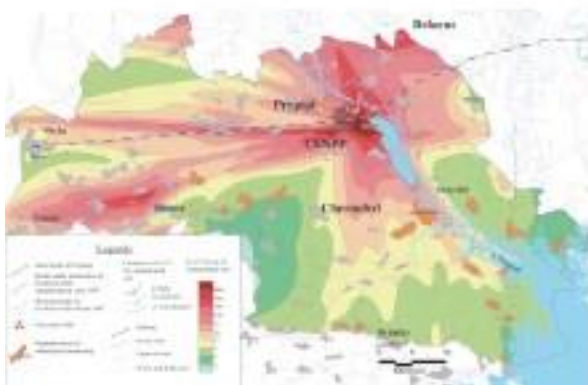


## Atividades para Casa

**Questão I:** Pesquise na internet sobre o acidente de Goiânia sobre o césio 137, as características deste elemento químico e o porque esse tipo de radiação, chamada ionizante, faz mal para a saúde.



**Questão II:** Pesquise sobre o acidente nuclear de Chernobyl, as características de uma usina nuclear, processos nucleares que ocorrem e compare com as usinas nucleares brasileiras.



## Aula 5: Confeção dos Elementos Químicos Através das Partículas Elementares

A aula de hoje se baseia em uma atividade relacionada com a anterior. Os alunos deverão se organizar em grupos de quatro para efetuar a atividade.

A atividade será desenvolvida a partir da confecção dos diferentes elementos químicos a partir das partículas elementares da tabela de partículas, figura 1, e com uso da tabela periódica já estudada na aula anterior

Figura 1: Tabela de Partículas elementares.

	$2/3$ MeV/c <sup>2</sup> $2/3$ $2/3$ <b>u</b> up	$1,275$ GeV/c <sup>2</sup> $2/3$ $2/3$ <b>c</b> charm	$173,1$ GeV/c <sup>2</sup> $2/3$ $2/3$ <b>t</b> top	$0$ $0$ $0$ <b>g</b> glúon	$125$ GeV/c <sup>2</sup> $0$ $0$ <b>H</b> bóson de Higgs
QUARKS	$1/6$ MeV/c <sup>2</sup> $1/3$ $1/3$ <b>d</b> down	$95$ MeV/c <sup>2</sup> $1/3$ $1/3$ <b>s</b> strange	$4,18$ GeV/c <sup>2</sup> $1/3$ $1/3$ <b>b</b> bottom	$0$ $0$ $0$ <b><math>\gamma</math></b> fóton	
	$0,511$ MeV/c <sup>2</sup> $-1$ $1/2$ <b>e</b> elétron	$105,7$ MeV/c <sup>2</sup> $-1$ $1/2$ <b><math>\mu</math></b> múon	$1,777$ GeV/c <sup>2</sup> $-1$ $1/2$ <b><math>\tau</math></b> tau	$91,2$ GeV/c <sup>2</sup> $0$ $0$ <b>Z</b> bóson Z	BÓSONS DE CALIBRE
LEPTONS	$0,22$ eV/c <sup>2</sup> $0$ $1/2$ <b><math>\nu_e</math></b> neutrino do elétron	$1,057$ MeV/c <sup>2</sup> $0$ $1/2$ <b><math>\nu_\mu</math></b> neutrino do múon	$1,777$ MeV/c <sup>2</sup> $0$ $1/2$ <b><math>\nu_\tau</math></b> neutrino do tau	$80,4$ GeV/c <sup>2</sup> $0$ $0$ <b>W</b> bóson W	

### Materiais:

Vocês deverão criar, em forma de maquetes, os elementos químicos presentes na tabela periódica. Para esta atividade será preciso o uso de alguns materiais específicos, como, por exemplo:

- Cartolinas;
- Papel crepom;
- Canetas de diferentes cores;
- Cola;
- Tesoura;
- Arame;

Figura 2: Material utilizado



- Camudos de plástico;
- Isopor;
- Alicates,

#### **Procedimento Experimental:**

Cada grupo deverá escolher um determinado elemento químico da tabela periódica, de forma que os elementos químicos escolhidos sejam distintos para cada grupo. Ao final da confecção, o grupo deverá apresentar aos demais alunos e ao professor justificando a presença das leis de conservação, ou seja, a carga, spin e massa dos quarks usados na confecção dos prótons e nêutrons tem que ser iguais na soma ao próton e nêutron resultante.

Como forma de revisão e também de facilitar a realização da atividade, o aluno poderá consultar o **Sumário de Termos** abaixo:

**Átomo:** A menor partícula de um elemento que possui todas as propriedades químicas do elemento.

**Núcleo atômico:** O “caroço” de um átomo, que consiste em duas partículas subatômicas básicas – prótons e nêutrons.

**Elétron:** A partícula negativamente elétrica de um átomo.

**Próton:** a partícula positivamente carregada e um núcleo atômico.

**Nêutron:** A partícula eletricamente neutra do núcleo do átomo.

**Número Atômico:** O número que designa a identidade de um elemento, igual ao número de prótons no núcleo atômico; em um átomo neutro, o número atômico é também igual ao número de elétrons que ele possui.

**Tabela periódica:** Uma tabela que lista os elementos segundo seu número atômico e o arranjo de seus elétrons, de modo que elementos com propriedades químicas semelhantes fiquem situados numa mesma coluna.

**Molécula:** A menor partícula de um composto que possui todas as propriedades químicas do composto. Os átomos se combinam para formar moléculas.

**Quark:** Partícula elementar que constitui a os prótons e nêutrons.

**OBS:** é importante ressaltar que o grupo, ao escolher o modelo atômico para a construção da maquete, deverá sempre usar em sua apresentação todos as partículas, partindo das mais específicas até as mais gerais!!!

## Aula 6: Aula Teórica Sobre Interações Fundamentais

Os alunos deverão chegar ao final desta etapa sabendo:

- Como as partículas da matéria interagem;
- Qual a relação entre essas interações.

Com a ideia de que tudo o que existe no Universo é formado das mesmas partículas elementares, também podemos dizer que elas interagem entre elas. E é através dos diferentes tipos de interações entre todas essas partículas que podemos explicar as formações de todas as concentrações de matéria que conhecemos.

Conhecemos na natureza quatro tipos de interações fundamentais: as gravitacionais, as eletromagnéticas e as nucleares forte e fraca. Nas aulas anteriores já foi estudado um pouco de algumas dessas interações. Nesta aula, vamos aprofundar um pouco mais essas interações utilizando o formalismo matemático.

### 1) A Interação Gravitacional

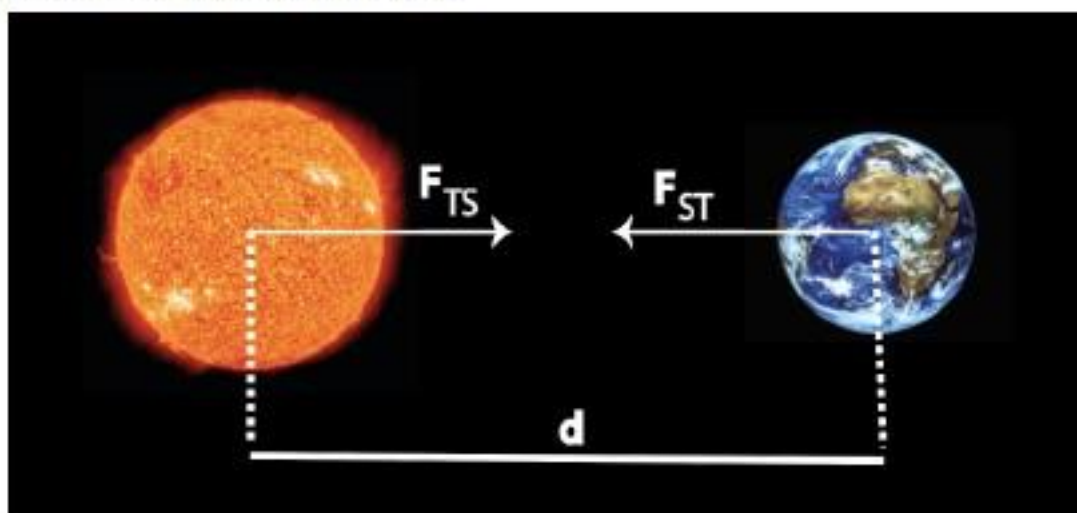
A interação gravitacional é aquela responsável pelos grandes aglomerados de matéria. Tem sempre natureza atrativa, desempenhando papel fundamental na formação de estrelas e dos planetas, por exemplo.

A lei que demonstra o comportamento desta interação gravitacional foi proposta por Isaac Newton, ocorrendo devido às massas dos objetos, conforme visto na figura 1. Se dois objetos de massas  $M_1$  e  $M_2$  estiverem à uma distância  $d$  então surge entre eles uma força de atração (a força gravitacional) tal que o seu módulo é dado pela expressão:

$$F_{Grav} = G \frac{M_1 M_2}{d^2},$$

onde  $M$  = massa dos corpos (quilogramas),  $d$  = distância entre os corpos (metros) e a força gravitacional  $F_{Grav}$  é dada em Newtons.

Figura 1: Representação de dois corpos  $M_1$  e  $M_2$ , separados por uma distância  $d$ , sujeitos a uma força atrativa gravitacional.



onde  $F_{TS}$  é a força que a Terra faz no Sol e  $F_{ST}$  é a força que o Sol faz na Terra, ou seja essas forças são iguais. É fácil ver isso na fórmula da força gravitacional pois leva em conta a massa dos dois corpos ou seja:

$$F_{TS} = F_{ST} = G \frac{M_S M_T}{d^2}$$

Então, o módulo da força gravitacional é diretamente proporcional ao produto das massas envolvidas e inversamente proporcional ao quadrado da distância. A constante  $G$  é conhecida como constante da gravitação universal e seu valor é  $G = 6,71 \cdot 10^{-11} \text{ Nm}^2/\text{kg}^2$ .

Preste atenção que o nome constante gravitacional  $G$ , tem esse nome por que ela valeria o mesmo valor em qualquer lugar do universo.

## 2) A interação eletromagnética

Este tipo de interação explica a ligação entre os elétrons e seus respectivos núcleos atômicos e também a união entre os átomos para formar moléculas.

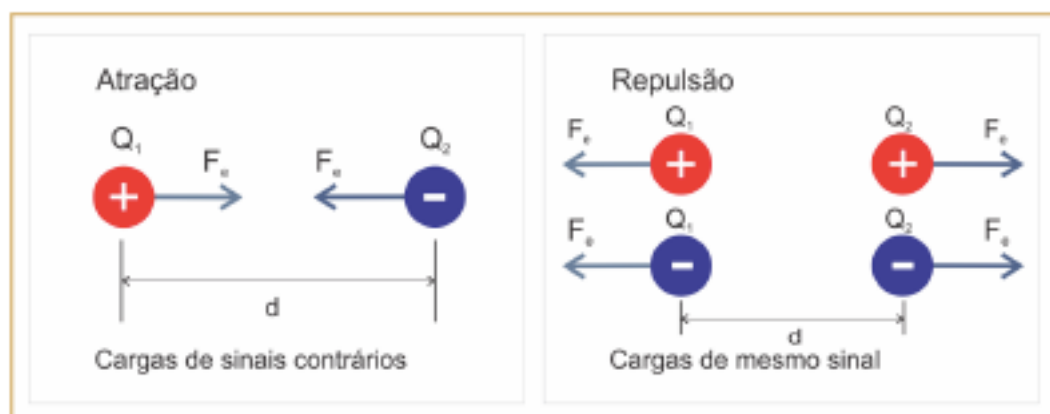
Se um corpo possui carga elétrica  $Q_1$  e outro possui carga  $Q_2$ , então surge uma força entre eles cujo módulo é dado pela lei de Coulomb:

$$F_{EI} = K \frac{Q_1 Q_2}{d^2}$$

onde  $Q$  = carga (Coulomb),  $d$  = distância (metro) e a força elétrica  $F_{EI}$  dada em Newtons.

A força elétrica é então diretamente proporcional às cargas e inversamente proporcional ao quadrado da distância, conforme visto na figura 2. A constante de proporcionalidade tem um valor de  $K=9 \times 10^9 \text{ Nm}^2/\text{C}^2$  no vácuo.

Figura 2: Representação de duas cargas  $Q_1$  e  $Q_2$ , separados por uma distância  $d$ , sujeitos a uma força elétrica.

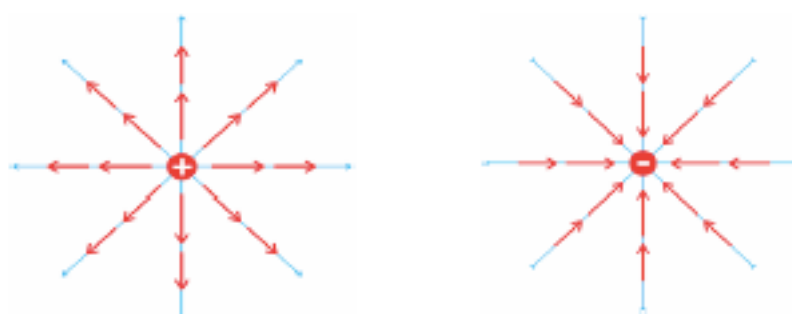


Fonte: [http://osfundamentosdafisica.blogspot.com/2011/03/cursos-do-blog-eletricidade\\_09.html](http://osfundamentosdafisica.blogspot.com/2011/03/cursos-do-blog-eletricidade_09.html)

A força elétrica tanto pode ser atrativa (se as cargas forem de sinais opostos) quanto repulsiva (cargas de mesmo sinal), conforme visto na figura 2. Representação das direções das forças elétricas em função do sinal das cargas.

Na figura 3 podem ser visto as linhas de campo elétrico para cargas positiva e negativas e o que acontece no caso do dipolo elétrico. A força elétrica está ligada ao campo elétrico como mostra a figura 3

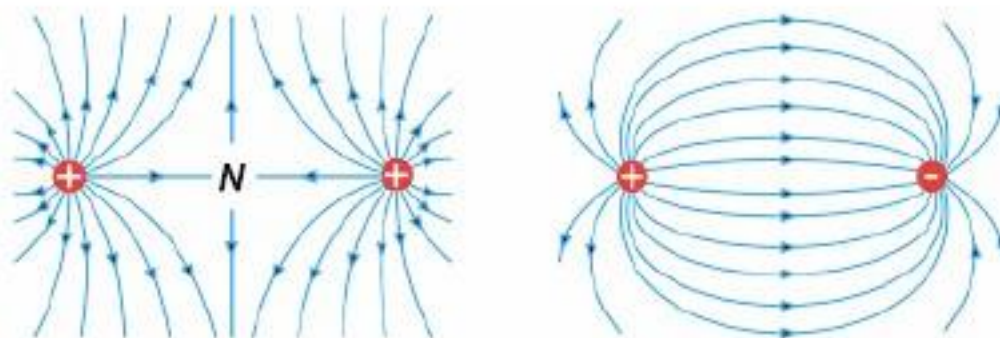
Figura 3: As linhas de campo elétrico conforme o sinal da carga



Fonte: [http://osfundamentosdafisica.blogspot.com/2016/03/cursos-do-blog-eletricidade\\_23.html](http://osfundamentosdafisica.blogspot.com/2016/03/cursos-do-blog-eletricidade_23.html)



Na figura 4, estão relacionadas as linhas de campo elétrico de um dipolo de cargas, para as diversas possibilidades de composição das cargas quanto ao sinal.



Fonte: [http://osfundamentosdafisica.blogspot.com/2016/03/cursos-do-blog-eletricidade\\_23.html](http://osfundamentosdafisica.blogspot.com/2016/03/cursos-do-blog-eletricidade_23.html)

Pode ser visto na figura 4 que quando as cargas tem intensidade diferentes as linhas de campo elétrico mudam

Figura 4: Linhas de campo elétrico de um sistema com cargas diferentes.



Fonte: [http://osfundamentosdafisica.blogspot.com/2016/03/cursos-do-blog-eletricidade\\_23.html](http://osfundamentosdafisica.blogspot.com/2016/03/cursos-do-blog-eletricidade_23.html)

Com o intuito de explicar o “O que mantém o átomo unido, pois os prótons, de mesma carga, não se repelem no interior do núcleo”, precisa-se de uma interação que se relaciona com as estruturas mais fundamentais do núcleo.

### 3) Interações Nucleares

Uma boa descrição da força entre as partículas no núcleo atômico, foi descoberta por Yukawa e dada por:

$$F(r) = -\frac{V_0 r_0}{r} \left[ \frac{1}{r} + \frac{1}{r_0} \right] e^{-\frac{r}{r_0}},$$

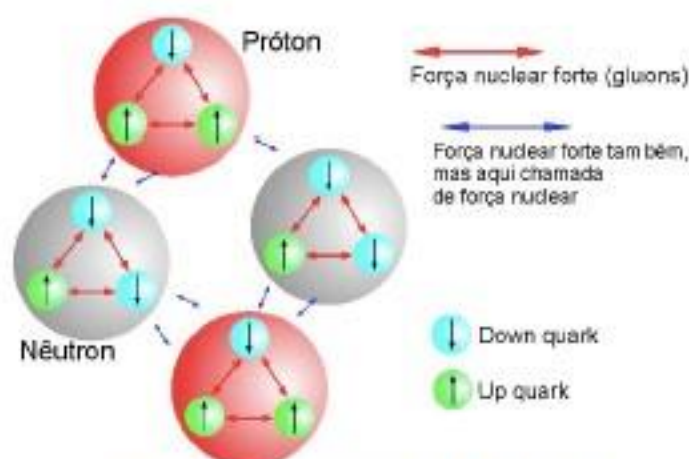
onde  $r_0$  é o alcance da interação e  $V_0$  é a energia inicial. Devido ao fato da energia de um elétron ser muito pequena, utiliza-se a unidade de elétron volt. A relação da energia e seus submúltiplos está dada na tabela 1.

Tabela 1: Relação entre o elétron volt em Jaules e seus múltiplos

Unidade	Múltiplo
1 eV ( elétron volt)	$1,60217733 \times 10^{-19}$ Joules
KeV (kilo elétron volt)	$10^3$ eV
MeV (mega elétron volt)	$10^6$ eV
GeV (giga elétron vol)	$10^9$ eV
TeV (tera elétron volt)	$10^{12}$ eV

A força nuclear forte é a interação responsável pela coesão do núcleo dos átomos, mesmo quando a repulsão elétrica entre os prótons atua no mesmo núcleo. É esta força que proporciona a atração entre prótons e nêutrons dentro do núcleo atômico, visto na Figura 4. Assim, a força forte é responsável pela estabilidade da matéria e a forma que a conhecemos. Naturalmente, ela se faz presente nas interações entre as partículas elementares. Isso é válido especialmente em relação aos quarks.

Figura 5: Representação da atração entre prótons e nêutrons dentro do núcleo atômico.



Disponível em: <<http://www.tabuada.net.br>>

Os físicos também admitiram uma outra interação, que recebeu o nome de interação fraca, responsável pela emissão de partículas beta. Hoje, eles consideram que esta interação está relacionada com a eletromagnética. A força atrativa entre núcleos não existe para distâncias entre núcleos abaixo de certa distância limite.

A relação entre as quatro interações da natureza é mostrada na Tabela 2.

Tabela 2: Relação entre as intensidades entre as forças.

Teoria	Força	Alcance	Magnitude Relativa	Mediador
Cromodinâmica	Forte	$10^{-15}$ m	1	Glúon
Eletrodinâmica	Eletromagnética	infinito	$10^{-2}$	Fóton
Flavodinâmica	Fraca	$10^{-18}$ m	$10^{-13}$	Bóson W e Z
Geometrodinâmica	Gravitacional	infinito	$10^{-38}$	Gráviton

## Confinamento dos quarks

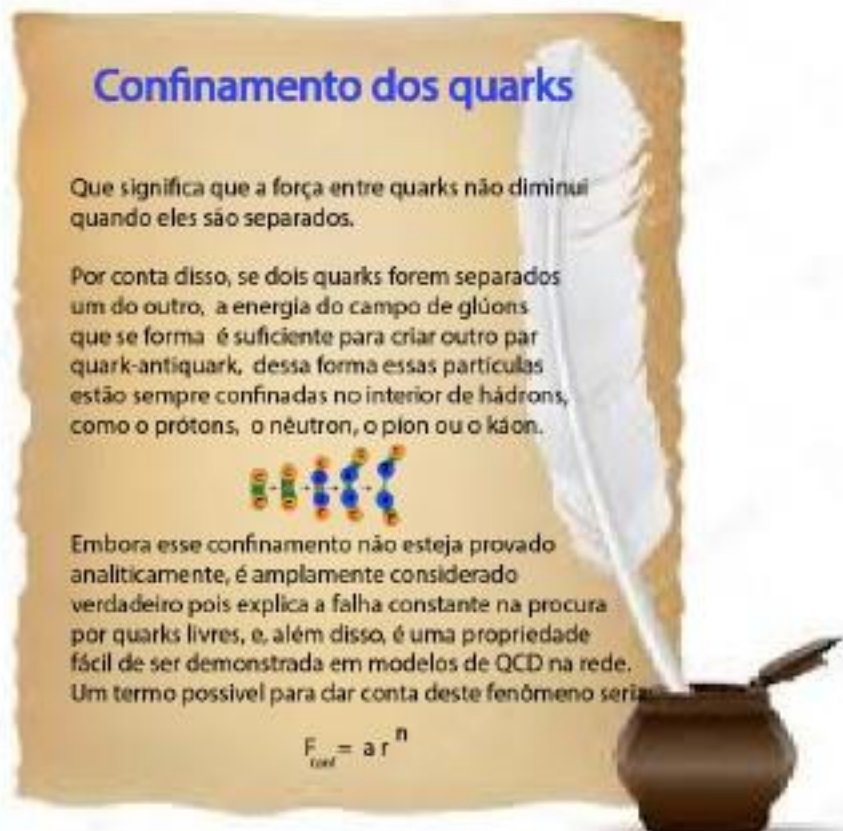
Que significa que a força entre quarks não diminui quando eles são separados.

Por conta disso, se dois quarks forem separados um do outro, a energia do campo de glúons que se forma é suficiente para criar outro par quark-antiquark, dessa forma essas partículas estão sempre confinadas no interior de hádrons, como o próton, o nêutron, o píon ou o káon.



Embora esse confinamento não esteja provado analiticamente, é amplamente considerado verdadeiro pois explica a falha constante na procura por quarks livres, e, além disso, é uma propriedade fácil de ser demonstrada em modelos de QCD na rede. Um termo possível para dar conta deste fenômeno seria

$$F_{conf} = a r^n$$





## Aula 7: Atividades Sobre Interações Fundamentais

1. A distância entre o elétron e o próton no átomo de Hidrogênio é da ordem de  $5,3 \times 10^{-11}$  metros.

Considere como dados:

Massa do próton:  $1,7 \times 10^{-27}$  kg.

Massa do elétron:  $9,1 \times 10^{-31}$  kg.

Constante da gravitação Universal:  $G = 6,67 \times 10^{-11}$  N.m<sup>2</sup>/kg<sup>2</sup>

Constante eletrostática do vácuo:  $k = 9 \times 10^9$  Nm<sup>2</sup>/C<sup>2</sup>

- a) Determine a intensidade da força gravitacional;

---

---

---

---

---

---

---

- b) Determine a intensidade da atração da força eletrostática entre as partículas;

---

---

---

---

---

---

---

c) Compare os valores obtidos.

---

---

---

---

---

---

---

---

---

---

2. Se sabe que o chamado potencial de Yukawa dá uma descrição suficientemente exata da interação entre prótons e nêutrons a curta distância. A constante  $r_0$  é o alcance da interação forte e vale  $r_0 = 1,5 \times 10^{-15} \text{ m}$  e a constante  $V_0$  tem um valor aproximado de 50 MeV. A força de atração entre os núcleos é dada por:

$$F(r) = -\frac{V_0 r_0}{r} \left[ \frac{1}{r} + \frac{1}{r_0} \right] e^{-\frac{r}{r_0}},$$

determine:

a) a força considerando  $r = r_0$  ?

---

---

---

---

---

---

---

---

b) a força considerando  $r = 2 r_0$  ?

---

---

---

---

---

---

---

---

46

c) a força considerando  $r = 4 r_0$  ?

---



---



---



---



---



---



---

3. Sabendo que o alcance da força nuclear fraca é de  $r_0 = 1,5 \times 10^{-18} \text{ m}$  e a constante  $V_0$  é  $V_0^{\text{fraco}} = 5 \times 10^{-6} \text{ eV}$  calcule os mesmos valores da questão anterior a), b) e c) considerando agora este alcance e energias ?

---



---



---



---



---



---



---

4. Compare a força fraca com a forte para completar a tabela ?

Força Fundamental	Intensidade	Alcance (m)
Forte	1	$10^{-15}$
Fraca		$10^{-18}$

---



---



---



---



---



---



---

OBS: Faça a aproximação  $(1 + 10^3) \sim 10^3$ ,  $(1 - 10^{-3}) \sim 1$  e,  $e^{0,001} \sim 1$ .

4) Com base nos resultados da questão 3 complete a tabela?

Teoria	Força	Alcance	Magnitude Relativa	Mediador
Cromodinâmica	Forte			Glúon
Eletrodinâmica	Eletromagnética	infinito		Fóton
Flavodinâmica	Fraca			Bóson W e Z
Geometrodinâmica	Gravitacional	infinito		Gráviton

5) A tabela que se segue indica as intensidades das quatro forças fundamentais da natureza e os respectivos alcances.

Teoria	Força	Alcance	Magnitude Relativa	Mediador
Cromodinâmica	Forte	$10^{-15}$ m	1	Glúon
Eletrodinâmica	Eletromagnética	infinito	$10^{-2}$	Fóton
Flavodinâmica	Fraca	$10^{-18}$ m	$10^{-13}$	Bóson W e Z
Geometrodinâmica	Gravitacional	infinito	$10^{-38}$	Gráviton

Sendo que os valores da intensidade das forças são relativos à força nuclear forte. Determine:

a) a força responsável pela coesão do núcleo dos átomos ?

---



---



---



---



---



---

b) a diferença fundamental entre a interação eletromagnética e a interação gravitacional ?

---

---

---

---

---

---

c) a ordem de grandeza da intensidade da força gravitacional em relação a força nuclear forte ?

---

---

---

---

---

---

d) a razão entre a ordem de grandeza do alcance da força nuclear forte e da força nuclear fraca?

---

---

---

---

---

---

e) a intensidade da força gravitacional comparada com a intensidade da força eletromagnética ?

---

---

---

---

---

---



49

6) Classifique em verdadeira (V) ou falsa (F) cada uma das afirmações que se seguem. Corrija as falsas.

- ( ) A interação gravitacional é sempre atrativa e é de intensidade média.
- ( ) A força nuclear fraca é mais forte do que a força gravitacional e tem maior alcance.
- ( ) A força eletromagnética pode ser repulsiva e tem um alcance infinito.
- ( ) A força nuclear forte explica o fato dos prótons estarem juntos no núcleo atômico sem se repelirem.

7) Através de uma seta, faça a correspondência entre as linhas das colunas a seguir:

- |                              |                            |
|------------------------------|----------------------------|
| a. interação forte           | 1. Atrativa ou repulsiva   |
| b. interação eletromagnética | 2. Explica o sistema solar |
| c. interação gravitacional   | 3. Curtíssimo raio de ação |

## Aula 8: Teoria da Relatividade Restrita

No século XVII, o cientista italiano Galileu Galilei notou que o mesmo movimento podia ser descrito de diferentes maneiras, dependendo do ponto de vista do observador.

Para entender isso vamos supor agora um “trailer” em uma estrada com um motorista e um passageiro sentado dentro do trailer. O motorista será chamado de observador 1, o passageiro dentro do trailer observador 2, e uma pessoa que está pedindo carona na pista será o observador 3.

Figura 1: Transformação de Referencial segundo Galileu.

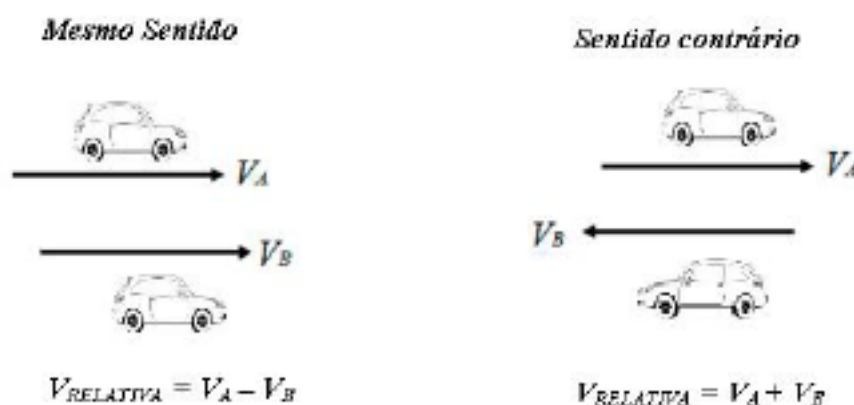


O motorista ao olhar para o passageiro vê que ele está em repouso, porém, o observador 3, ao olhar para o passageiro, percebe que ele está em movimento.

Ao descrever a posição do passageiro, o observador 1 e o observador 3 não concordarão entre si. Um dirá que ele está parado e outro afirmará que ele está em movimento. As duas afirmações estarão corretas se ambos descreverem o movimento em relação a algum referencial.

De acordo com os estudos de Galileu, velocidades podem ser somadas ou subtraídas, para descrever o movimento de objetos em relação a referenciais distintos, como pode ser visto na Figura 2.

Figura 2: Velocidades relativas em dois sentidos diferentes.



Na figura 2, percebe-se que a velocidade relativa entre corpos com mesma direção e mesmo sentido é a diferença das velocidades. Para o caso entre corpos com mesma direção e sentidos opostos a velocidade relativa é a soma entre as duas.

Agora vamos supor que o trailer esteja em movimento retilíneo e uniforme em uma ferrovia. Em um dos compartimentos, o observador 2 acende uma lanterna. Qual será a velocidade do feixe de luz produzido pela lanterna? Utilizando a teoria da relatividade proposta por Galileu:

$$V_{Relativa} = V_{trailer} + c.$$

Em que  $V_{RELATIVA}$  é a velocidade da luz em relação ao leito da estrada,  $c$  é a velocidade da luz em relação do compartimento do trailer, e  $V_{trailer}$  é a velocidade do vagão. Assim, podemos concluir que a velocidade da luz em relação ao leito da estrada é maior do que quando esta é medida pelo passageiro.

## IMPOSSÍVEL EXPERIMENTALMENTE !!!!!

De acordo com os experimentos realizados na eletrodinâmica e na óptica com corpos em movimento, a luz é uma onda eletromagnética cuja velocidade não depende do meio de propagação. Assim sendo, o valor de sua velocidade é constante e não varia com a velocidade do emissor.

O físico alemão Albert Einstein, no início do século XX, partiu, então, de três postulados para elaborar sua teoria da relatividade restrita.

1. Princípio da relatividade, por meio do qual afirmava não existir um referencial preferencial, ou seja, as leis da física são as mesmas em qualquer referencial inercial.
2. Invariância da velocidade da luz “c”, que é considerada constante em um determinado meio, independente da velocidade do emissor.
3. A velocidade da luz é o limite, ou seja, não existe nenhum referencial onde a velocidade possa ser maior do que a velocidade da luz para um determinado meio.

Partindo dos estudos dos conceitos físicos de tempo e espaço, Einstein concluiu que existia uma “falha” nas leis que descrevem os movimentos dos corpos segundo Galileu, e com o uso desses postulados foi possível corrigir esse resultado e compatibilizar com o terceiro postulado.

Sendo assim, a ideia de que tempo e espaço são grandezas absolutas, embora apoiada pelo senso comum, foi derrubada pela teoria de Einstein.

Apoiando-se em seus postulados e utilizando as equações do físico neerlandês Hendrik Antoon Lorentz, Einstein assumiu que o intervalo de duração de um evento depende da sua velocidade. Ele concluiu também que, quanto maior for a velocidade de um corpo, menor pode ser seu tamanho.

Então voltando a velocidade relativa, como se obtém a velocidade relativa entre dois corpos considerando os postulados de Einstein? Para entender isso vamos supor novamente a figura 1, só que agora a mulher esta andando dentro do trailer como mostra a Figura 3.

Figura 3: Transformação de Referencial segundo Einstein.



Na mecânica clássica, se um trem se movimentar com velocidade  $v$  em relação a uma plataforma, que é a mesma velocidade do observador 1, um passageiro se movimentando com velocidade  $u'$  em relação ao trem, observador 2, a velocidade do passageiro em relação à plataforma é  $u = v + u'$  isso é facilmente visualizado. Esta velocidade é a que as meninas paradas na estrada veem para a mulher dentro do trem. Desta forma, a velocidade relativa entre o observador 1 e 2 é dada pela transformação inversa, ou seja,  $u'_{\text{Galileu}} = u - v$ , que bate com o caso da figura 3, onde  $u$  e  $v$  são respectivamente as velocidades da mulher e do motorista relativo ao referencial em repouso. No caso da teoria de Einstein essa velocidade é corrigida por um fator, que leva em conta os efeitos relativísticos, esse fator chamaremos de,  $\gamma_{\text{rel}}$ , desta forma:

$$u' = \gamma_{\text{rel}}(u - v),$$

com,

$$\gamma_{\text{rel}} = \frac{1}{\sqrt{1 - \frac{v^2}{c^2}}}.$$

Na próxima aula iremos estudar os raios cósmicos, que são partículas altamente energéticas resultado de explosões de supernovas e que chegam a Terra.

No exemplo numérico mostrado no pergaminho fizemos uma aplicação para o cálculo da velocidade relativa considerando a teoria de Einstein e Galileu.

**Velocidade Relativa  
Galileana x Eintenia**

Ex1: Suponha que dois prótons se aproximam da Terra vindo de direções opostas. As velocidades dos prótons medidas no referencial da Terra são  $V_1=0,5c$  e  $V_2=-0,8c$ . Qual é a velocidade relativa entre os prótons?

**Classicamente:**

$$V_{rel} = V_2 - V_1 = -1,4$$

**Relativisticamente:**

$$V_{rel} = \gamma_{rel}(V_2 - V_1) = -0,95c$$

$$\gamma_{rel} = \frac{1}{\sqrt{1 - \frac{v_1 v_2}{c^2}}}$$

Para um melhor entendimento das duas afirmações, faz-se necessário, introduzir duas ideias

- Medidas próprias: medidas de espaço e tempo tomadas a partir de um referencial que esteja em repouso em relação ao evento, respectivamente ( $L_0$ ) e ( $T_0$ );
- Medidas relativa: medidas de espaço e tempo tomadas a partir de um referencial em movimento em relação ao evento ocorrido, respectivamente ( $L$ ) e ( $T$ ).

Voltando ao exemplo anterior, vamos supor que o trailer viaje com uma velocidade próxima a velocidade da luz. Neste caso teremos dois observadores, o observador 1, que viaja dentro do trem e um observador 2, que se encontra parado na estrada.

As medições feitas pelo observador que se encontra fora do trailer nos mostram que o comprimento do trailer é  $L$  e que o intervalo de duração do trajeto do trailer, ao se deslocar de um lugar para outro é  $T$ .

De certa forma, o observador que se encontra dentro do trem, também efetua suas medidas (com o trem em movimento) e anota os valores de  $L_0$  e  $T_0$ . O observador que está parado em relação ao trem, ou seja, o observador 1, tem suas medidas próprias.

Pode-se pensar que as medidas de espaço e tempo são as mesmas para os dois referenciais, porém, vemos a partir das equações de Lorentz que os valores não coincidem.

$$L = L_0 \sqrt{1 - \frac{v^2}{c^2}}; \quad T = \frac{T_0}{\sqrt{1 - \frac{v^2}{c^2}}}.$$

Em que:

- $L_0$  é o comprimento próprio e  $L$  é o comprimento relativo;
- $T_0$  é o intervalo de tempo próprio e  $T$  é o intervalo de tempo relativo;
- $v$  é a velocidade relativa entre o trailer e o leito da estrada, e  $c$  é a velocidade da luz.

Para concluir o estudo desta aula, é importante saber que o movimento influencia as medidas realizadas e que o tempo e o espaço não são grandezas absolutas, mas sim relativas, não como se pensava até o século XIX.



## Atividades Sobre Teoria da Relatividade Restrita

**Parte I: Primeira Situação Problema da Relatividade Restrita: A contração do espaço e velocidade relativa.**

Um belo dia de domingo um aposentado estava entediado quando se deparou com um anúncio no jornal local de uma palestra sobre a teoria da relatividade de Einstein. Ele já tinha ouvido falar esse nome antes, mas não sabia onde. Então ao invés de ir jogar damas na praça com os amigos, que só falavam de dores no corpo ele resolveu ir a Universidade assistir a palestra. Quando chega a universidade se deparou com o auditório já lotado. Desta forma, ele senta no cantinho da terceira fila, longe o bastante para vazar caso a palestra seja entediante e perto o bastante para escutar e ver o palestrante já que devido a idade já não escuta nem vê como antes. Ele escutou com animação a palestra do cientista, mas chegou uma hora que seus olhos começaram a “pesar” e dormiu. Sonhou com um mundo onde o limite da velocidade da luz, era muito menos que  $c = 3 \times 10^8 \text{ m/s}$  de nosso mundo. E ele viu um guarda de trânsito parado, bem gordinho, e viu um menino numa bicicleta pedalando muito fortemente na rua. Parecia tudo normal, mas ele se intrigou com o menino que pedalava. Ele viu que o menino se esforçava muito para ganhar mais velocidade, sem muito efeito. Então, ele pediu emprestado a bicicleta do guarda e saiu atrás do menino, para entender o que estava acontecendo. Ao começar a pedalar, ele viu que não era muito fácil pedalar aquela bicicleta, ou ele estava mesmo ficando velho, ou era muito difícil se aproximar do menino. Quanto mais ele colocava pressão no pedal, mais difícil era de aumentar a velocidade. Quando ele olhou para a calçada onde estava o policial, ele se apavorou, ele viu que o policial estava muito mais magro. A medida que ele imprimia mais força no pedal, mais magro na direção do movimento ele ficava. Foi quando ele



exclamou " O que está acontecendo? Que mundo Bizarro!!!! (Texto adaptado de (GAMOW, 1980)

**Questão 1:** Com base na situação anterior usando a relatividade de Galileu e supondo que a velocidade média do menino na bicicleta era de 180 km/h. Determine a velocidade relativa de perseguição do senhor na bicicleta quando o mesmo atinge uma velocidade de 140 km/h.

---

---

---

---

---

---

**Questão 2:** Com base na situação anterior usando a relatividade restrita, sabendo que a velocidade da luz no exemplo de Gamow era de 560 km/h. Determine a velocidade relativa de perseguição do senhor na Bicicleta quando o mesmo atinge uma velocidade de 140 km/h, justifique com o calculo do valor de  $\gamma$

---

---

---

---

---

---

**Questão 3:** Compare os resultados das questões 1 e 2, é analise a situação. Para isso a sugestão é calcular a razão entre as duas velocidades e discutir se uma é maior ou menor que a outra. Nesta análise determine também o que aconteceria se a velocidade da luz fosse a real, ou seja, de  $c= 3 \times 10^8$  m/s, discutindo a validade da teoria de Galileu.

---

---

---

---

---

**Questão 4:** Usando os dados das questões anteriores e supondo que o diâmetro do guarda, na direção do movimento, antes do aposentado pegar a bicicleta era de 1 m determine a redução do tamanho do guarda se o aposentado, partindo do zero chegar a uma velocidade de 140km/h?

---

---

---

---

---

**Questão 5:** Com relação a questão 4. O que o menino veria? justifique dizendo se a diferença entre o que o aposentado e o menino veria é muita pouca, ou permanece a mesma, compare também como no caso anterior o que acontece quando a velocidade da luz é a real de  $c= 3 \times 10^8$  m/s.

---

---

---

---

---

## Parte II: A Dilatação temporal.

Até agora podemos ver que o mundo relativístico é bizarro mesmo, no entanto o melhor ainda há de vir. Batalha perdida e o aposentado não conseguiu alcançar o menino mas viu que o mesmo ia para a estação de trem. O senhor encostou a bicicleta num lugar próprio, e decidiu entrar na estação. Devido ao grande esforço ficou um tempo sentado no banco de espera, descansando e vendo os trens chegarem e partirem da estação. Foi quando começou a reparar numa senhora com seus netinhos parada na estação. Quando o trem chegou, saiu do trem um jovem de 25 anos e a senhora se aproximou dele e o abraçou. Pensei logo, nada de mais a vó

59

esperando seu neto. Neste momento o aposentado observou por mais alguns momentos e escutou a senhora dizer. Papai, quanta saudade !!!

**Questão I:** Sabendo que o trem mantém uma velocidade de 500 km/h e que o pai da senhora que estava na plataforma demorou cerca de 2 horas para chegar ao seu encontro. Com base na velocidade limite das questões anteriores de 560 km/h determine o quanto a menina envelheceu?

---

---

---

---

---

---

**Questão II:** Compare com a teoria de Galileu para analisar a diferença entre essas duas teorias. Calcule o que aconteceria no caso real.

---

---

---

---

---

---

**Parte III:** Para casa pesquise as contribuições de Einstein para a física e as aplicações de sua pesquisa no mundo atual:

## Aula 9: Raios C3smicos e os M3ons

De acordo com o fisico japon3s Yukawa, os el3trons, os pr3tons e tamb3m at3 os n3cleos mais pesados podem ser “criados” de diversas maneiras. Essas part3culas, que viajam pelo universo com alto poder de penetra33o e energia, s3o chamadas de raios c3smicos e muitas delas chegam a superf3cie do nosso planeta. Portanto os raios c3smicos n3o s3o raios, mas sim part3culas extremamente penetrantes que se movimentam com velocidades pr3ximas a velocidade da luz, Figura 1.

Figura 1: Produ33o de part3culas em cascata a partir da atmosfera terrestre.



Fonte: Dispon3vel em: <<http://www.ifi.unicamp.br/>>

Quando essas part3culas chegam a superf3cie da Terra (raios c3smicos prim3rios), elas colidem com os n3cleos dos 3tomos de tudo que est3 na atmosfera, que se localiza a aproximadamente a 10 km acima da superf3cie do planeta. Neste momento, essas part3culas d3o origem a outras part3culas, formando uma cascata com part3culas menores e com menos energia (raios c3smicos secund3rios).

Em 1946, uma equipe de pesquisadores de Bristol (Inglaterra), sob a direção de Cecil F. Powell, estava estudando os traços produzidos por reações nucleares em certas chapas fotográficas especiais, mais grossas e mais sensíveis, chamadas “emulsões nucleares”. Pela análise dos rastros lá deixados por prótons e outras partículas carregadas, é possível determinar a sua energia e massa. Beppo Occhialini e César Lattes analisaram algumas emulsões de um novo tipo, que haviam sido colocadas no alto de uma montanha (o Pic du Midi).

Ao revelar e analisar as emulsões, observaram grande número de traços deixados por partículas, como mostra a Figura 2, que interpretaram inicialmente como sendo os mésons já conhecidos. No entanto, após alguns dias de estudo, foram encontrados dois traços especiais, de mésons que iam diminuindo de velocidade e parando; do final desses traços brotava um rastro de um novo méson.

Para obter maior número de dados, Lattes viajou para a Bolívia, e colocou no alto do Monte Chacaltaya, a uma altitude de 5.800 metros, várias emulsões nucleares.

Nelas, foi possível encontrar cerca de 30 rastros de mésons duplos. Estudando esses traços, foi possível determinar a massa dos mésons e perceber que havia dois tipos de partículas, com massas diferentes.

Figura 2:a) Esquema mostrando a interação entre um nêutron e um próton trocando glúons que carregam cor, gerando um meson que depois de absorvido gera novamente um próton e um nêutron e em b) Primeira emulsão obtida por Lattes, Powell e Occhialini onde se vê a geração de um pion em A e sua captura por um núcleo em B.



Fonte: Disponível em <<https://questcosmic.wordpress.com>>. Acessado em 14 de maio de 2017.

Desta forma, os Hádrons podem ser divididos em mésons e bárions, conforme mostra a Figura 3.

Figura 3: Os Hádrons compostos por Bárions e Mésons.

Hádrons				
	Nome	Símbolo	Carga	Massa (1 para o próton)
Bárions	Próton	P	+e	1
	Antipróton	$\bar{p}$	-e	1
	Nêutron	n	0	1
	Antinêutron	$\bar{n}$	0	1
Mésons	Pions	$\pi^+$	+e	1/7
		$\pi^0$	0	1/7
		$\pi^-$	-e	1/7

Bárions: $qqq$ and $\bar{q}\bar{q}\bar{q}$ (Baryons)					
Symbol	Name	Quark content	Charge	Mass (GeV)	Spin
p	proton	uud	1	0.938	1/2
$\bar{p}$	anti-proton	$\bar{u}\bar{u}\bar{d}$	-1	0.938	1/2
n	neutron	udd	0	0.940	1/2
$\Lambda$	lambda	uds	0	1.115	1/2
$\Omega^-$	omega	sbb	-1	1.672	1/2

Mésons: $q\bar{q}$ (Mesons)					
Symbol	Name	Quark content	Charge	Mass (GeV)	Spin
$\pi^+$	pion	$u\bar{d}$	+1	0.140	0
$K^-$	kaon	$s\bar{u}$	-1	0.494	0
$\rho^+$	rho	$u\bar{d}$	+1	0.770	1
$\rho^0$	rho	$d\bar{u}$	0	0.770	0
$\eta$	eta	$c\bar{c}$	0	0.548	0

Uma dessas novas partículas que foram criadas foram os píons, que podem ser píons neutros ( $\pi^0$ ) e carregados ( $\pi^+$  e  $\pi^-$ ). Os píons carregados interagem com os átomos da atmosfera ou decaem em múons, positivos ( $\mu^+$ ) ou negativos ( $\mu^-$ ), segundo o seguinte esquema

$$\pi^+ \rightarrow \mu^+ + \nu_\mu,$$

$$\pi^- \rightarrow \mu^- + \bar{\nu}_\mu.$$

O múon foi descoberto em 1937 por J.C. Street e E.C. Street e E.C. Stevenson e ao mesmo tempo por Carl D. Anderson e Seth Neddermeyer através da realização de experimentos ao se utilizar a radiação cósmica após uma previsão teórica onde existia uma partícula com massa intermediária entre o elétron e o próton.

O múon é uma partícula instável que decai em um elétron, um neutrino e um anti-neutrino, tendo sua vida média de  $2,19703 \pm 0,00004$  ms e ele se forma a cerca de 10 km de altitude. Além disso, sua velocidade de deslocamento é muito alta, próxima a velocidade da luz, com um valor de  $0,998c$ .

O fenômeno que ocorre quando um raio cósmico vindo do espaço sideral entra na atmosfera é chamado de Chuveiro Atmosférico Extenso, quando esse raio interage, geralmente,

com o nitrogênio e o oxigênio, inicia-se um processo de produção de partículas em cascata que dá origem a milhares de partículas secundárias, que inicialmente também possuem grandes energias e a partir de novas interações ou decaimentos produzem mais partículas para o Chuveiro Atmosférico Extenso, conforme a Figura 1.

Os múons são partículas elementares formadas nos raios cósmicos secundários. Eles são partícula que decaem em um elétron (ou pósitron), um neutrino e um anti-neutrino.

$$\mu^+ \rightarrow e^+ + \nu_e + \bar{\nu}_\mu,$$

$$\mu^- \rightarrow e^- + \bar{\nu}_e + \nu_\mu.$$

No momento em que elas são criadas, a velocidade de cada partícula se reduz por ocasião da colisão com outros átomos que se distribuem na atmosfera. Em consequência a essa perda de velocidade, quanto mais alto na atmosfera, maior será a radiação cósmica, ou seja, percebe-se uma maior radiação cósmica em altas altitudes do que em relação ao nível do mar.

Na aula anterior conhecemos a teoria da relatividade restrita, proposta por Einstein, e para esta aula faremos uma atividade relacionando o tempo de vida média do múon a partir de dois referenciais distintos, ou seja, faremos um exercício, em forma de comprovação, que a partir de cada referencial adotado, o intervalo de tempo será diferente.

Grande parte dos múons são criados a partir do decaimento dos píons carregados positiva e negativamente, e dos Kaons carregados  $K^+$  e  $K^-$ , aproximadamente 15 km de altitude, possuindo uma velocidade da ordem de  $0,9998c$  ( $c$ =velocidade da luz no vácuo). Com esta velocidade o seu tempo de vida no sistema de referência na Terra se dilata, fazendo com que a maioria dessas partículas alcancem a superfície da Terra.



## Atividades sobre os Raios C3smicos e M3ons

Quest3o I: Com o uso das equa33es relativ3sticas e do movimento uniforme, responda:

- a) Quanto tempo o m3on criado na atmosfera terrestre leva para chegar ao n3vel do mar a partir de um referencial na Terra e outro no m3on?

Fa3a o c3lculo da viagem cl3ssica e da viagem relativ3stica e em seguida compare os valores. Considere m3ons provenientes da radia33o c3smica sendo criados a uma altura de 10 km que viajam a  $0,9998c$  ( $c = 3 \times 10^8$  m/s).

Para o c3lculo da viagem cl3ssica use:  $t = h/v$  e para o c3lculo da viagem relativ3stica use:

$$t' = t \sqrt{1 - \frac{v^2}{c^2}}$$

---



---



---



---



---



---



---



b) Explique o fato de ser encontrado múons na superfície da Terra? .

---



---



---



---

Questão II: Com base na tabela que contém os possíveis decaimentos para os mésons, desenhe a cascata de partículas do raio cósmico, para cada partícula primária. Siga o diagrama de árvore modelo

partícula	anti-partícula	q̄-se	carga (part.) (e)	spin (h/2π)	Estranh.	energia de repouso (MeV)	meia vida (s)	produtos típicos de decaimento
$\pi^+$	$\pi^-$	pi + ou -	+1	0	0	140	$2,4 \times 10^{-8}$	$\mu^+ + \nu_\mu$
$\pi^0$	$\pi^0$	pi zero	0	0	0	135	$8,4 \times 10^{-17}$	$\gamma + \gamma$
$K^+$	$K^-$	kapa+	+1	0	+1	494	$1,2 \times 10^{-8}$	$\mu^+ + \nu_\mu$
$K^0$	$K^0$	kapa0	0	0	+1	498	$0,9 \times 10^{-10}$	$\pi^+ + \pi^-$
$\eta$	$\eta$	éta	0	0	0	549	$8,0 \times 10^{-16}$	$\gamma + \gamma$
$\rho^+$	$\rho^-$	ro	+1	1	0	769	$4,5 \times 10^{-24}$	$\pi^+ + \pi^0$
$\eta'$	$\eta'$	éta linha	0	0	0	958	$2,2 \times 10^{-21}$	$\eta + \pi^+ + \pi^-$
$D^+$	$D^-$	dê	+1	0	0	1869	$1,1 \times 10^{-12}$	$K^+ + \pi^+ + \pi^+$
$\Psi$	$\Psi$	psi	0	1	0	3097	$1,0 \times 10^{-20}$	$e^+ + e^-$
$B^+$	$B^-$	beta+	+1	0	0	5278	$1,2 \times 10^{-12}$	$D^+ + \pi^+ + \pi^+$
$\Upsilon$	$\Upsilon$	úpsilon	0	1	0	9460	$1,3 \times 10^{-20}$	$e^+ + e^-$

Modelo:



## Aula 10: Questionário Final

**Questão I:** O que vocês sabem sobre a constituição do átomo e qual as escalas de atuação das forças envolvidas?

---

---

---

---

---

**Questão II:** Quais os tipos de forças existentes na natureza e qual o alcance de cada uma delas? Exemplifique.

---

---

---

---

---

**Questão III:** Qual a necessidade das forças nucleares? Expliquem o porquê de se introduzir quarks e gluons?

---

---

---

---

---

67

Questão IV : O que vocês entendem sobre os raios cósmicos, o alcance, dessas partículas, detectores? Explique também a formação das cascatas atmosféricas dizendo quais partículas podem ser detectadas por equipamentos feitos pelo homem ?.

---

---

---

---

---

Questão V; Baseado em todo o conteúdo feito em sala de aula, Dê exemplos de cientistas que contribuíram para o progresso da física de partículas e por que?"

---

---

---

---

---

Questão VI: Marque verdadeiro ou falso.

As partículas elementares, que compõem os prótons e neutros não podem ser detectadas na Terra mas podem ser detectadas em balões atmosféricos.

Rutherford detectou o elétron corrigindo o modelo atômico de Thomson.

Uma das diferenças entre o modelo de Rutherford e o modelo de Bohr é que no modelo de Bohr, os elétrons estão em camadas fundamentais onde ficam orbitando sem perda de energia.

O bóson de Higgs é uma partículas elementar, que da massa para outras partículas no modelo padrão.

A interação forte mantém os quarks unidos no núcleo atômico.

O pion foi descoberto através das câmaras de emulsão nuclear ao captar os raios cósmicos atmosféricos.

Os muos não podem ser detectados a nível do mar por terem baixas energias.

Os neutrinos viajam a altas velocidades e não podem ser detectados a nível do mar, mas são detectados num laboratório chamado ICE CUBE abaixo do nível do mar.

68

- ( ) Não existe força eletromagnética no núcleo atômico, só força forte.
- ( ) A força fraca explica os decaimentos radioativos.

Questão 7: Explique em linhas gerais quais as principais características da teoria da relatividade restrita?

---

---

---

---

---

## REFERÊNCIAS

ABDALLA, M. C. B. “O Discreto Charme das Partículas Elementares”, ed. UNESP, São Paulo, (2006);

HEWITT, P. G. “Física Conceitual” ed. Bookman, Porto Alegre, 2002;

MÁXIMO, A.; ALVARENGA, B. Física (Ensino Médio). 1ª edição, Vol. 3. São Paulo, Scipione, 2003;

RAMALHO, F.; NICOLAU, G. F.; TOLEDO, P. A. Os Fundamentos da Física. 6ª edição, Vol. 3. São Paulo, Editora Moderna, 1997;