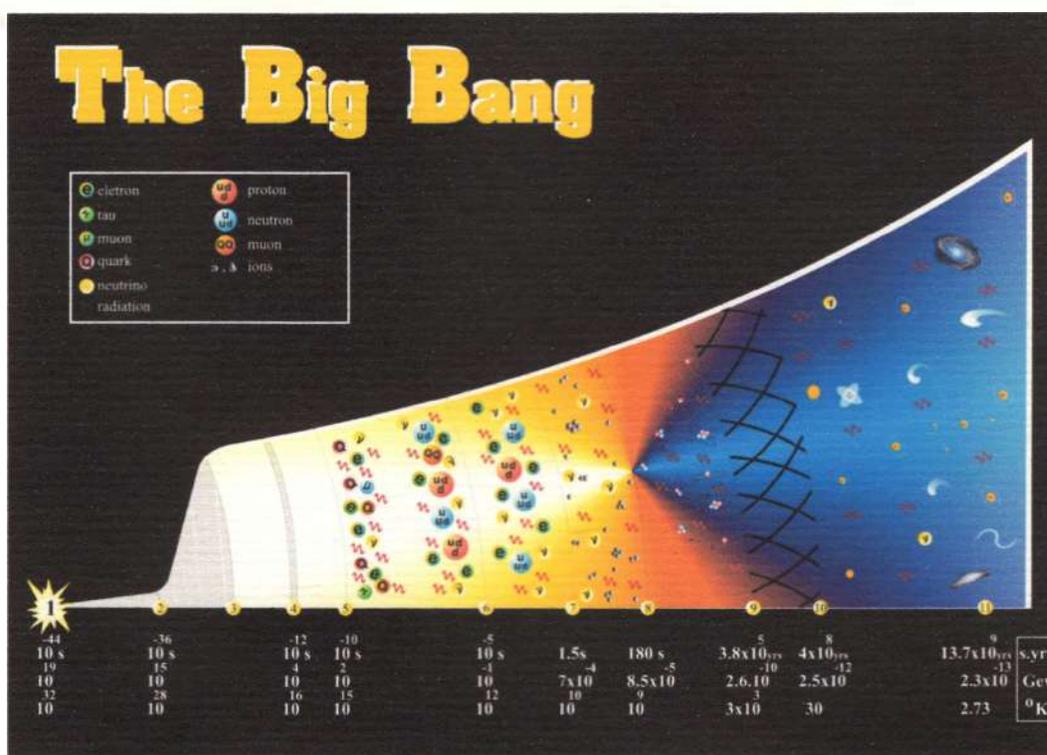


Cadernos de Iniciação Científica

Matéria e Energia



Edições do autor - Walmar Freitas Porto

Matéria e Energia

Átomo Quântico.....	104
Partícula ou Onda?.....	106
Salto Quântico.....	111
A Física Reencontra a Metafísica.....	112
Modelo Padrão.....	113
Aceleradores de Partículas.....	122
Hadrons.....	128
As Partículas.....	131
Supersimetria.....	134
Energia Nuclear.....	135
Cosmologia.....	140
Estágios do Universo.....	147
Tensor de Einstein.....	154
Referencias.....	155

A matéria é feita de átomos, que são feitos de partículas elementares e forças fundamentais da natureza. As partículas elementares da matéria e as forças fundamentais surgiram no Big Bang, o modelo cosmológico do Universo baseado na Teoria da Relatividade Geral de Albert Einstein.

Figura 4.1 Tabela Periódica, os átomos da matéria barionica.

Group-1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	
1	1 H																2 He	
2	3 Li	4 Be										5 B	6 C	7 N	8 O	9 F	10 Ne	
3	11 Na	12 Mg										13 Al	14 Si	15 P	16 S	17 Cl	18 Ar	
4	19 K	20 Ca	21 Sc	22 Ti	23 V	24 Cr	25 Mn	26 Fe	27 Co	28 Ni	29 Cu	30 Zn	31 Ga	32 Ge	33 As	34 Se	35 Br	36 Kr
5	37 Rb	38 Sr	39 Y	40 Zr	41 Nb	42 Mo	43 Tc	44 Ru	45 Rh	46 Pd	47 Ag	48 Cd	49 In	50 Sn	51 Sb	52 Te	53 I	54 Xe
6	55 Cs	56 Ba	*	72 Hf	73 Ta	74 W	75 Re	76 Os	77 Ir	78 Pt	79 Au	80 Hg	81 Tl	82 Pb	83 Bi	84 Po	85 At	86 Rn
7	87 Fr	88 Ra	**	104 Rf	105 Db	106 Sg	107 Bh	108 Hs	109 Mt	110 Ds	111 Rg	112 Cn	113 Nh	114 Fl	115 Uup	116 Lv	117 Uus	118 Uuo
	57 La	58 Ce	59 Pr	60 Nd	61 Pm	62 Sm	63 Eu	64 Gd	65 Tb	66 Dy	67 Ho	68 Er	69 Tm	70 Yb	71 Lu			
	89 Ac	90 Th	91 Pa	92 U	93 Np	94 Pu	95 Am	96 Cm	97 Bk	98 Cf	99 Es	100 Fm	101 Md	102 No	103 Lr			

Figura 4.1 Tabela Periódica, os átomos da matéria barionica.

Antes de Niels Bohr, o modelo do átomo era o de J. J. Thomson. No entanto, o modelo não conseguia explicar o significado do espectro de frequências chamado Série de Balmer – Figura 4.2 - que havia sido descoberto em 1885 em experimentos com o átomo de hidrogênio. Houve também o modelo de Ernest Rutherford, que afirmava que o átomo tinha um núcleo positivo, mas, separado dos elétrons - carga negativa - os quais giravam no entorno. É verdade que isso justificava o fato da carga atômica total ser nula. No entanto, o modelo não tinha uma explicação convincente para uma evidente contradição; Por que a nuvem de elétrons permaneceria afastada do núcleo, já que este tem carga positiva? {[8]; 103,109}

Postulado de Bohr

Em 1913 Niels Bohr propôs um modelo físico consistente para o átomo ao enunciar que os elétrons circulam em torno do núcleo através de orbitas quantizadas e separadas, as quais são caracterizadas por momentos angulares que são múltiplos inteiros de \hbar . Por outro lado, Bohr enunciou que o elétron emite radiação em cada pulso quântico, ou seja, o elétron radia energia toda vez que pula de uma determinada orbita para outra de menor energia. Assim, esse fenômeno explica os espectros de frequências de luz observados no átomo de hidrogênio.

Essa ideia incorporou o conceito de fóton de energia que havia sido proposto por Albert Einstein em 1905. Logo, segundo Bohr, quando um elétron salta de um estado de energia inicial (E_i) para o estado de energia final (E_f), um fóton de energia é emitido, e calculado pela expressão:

$$E_i - E_f = h \cdot f \quad (4.1)$$

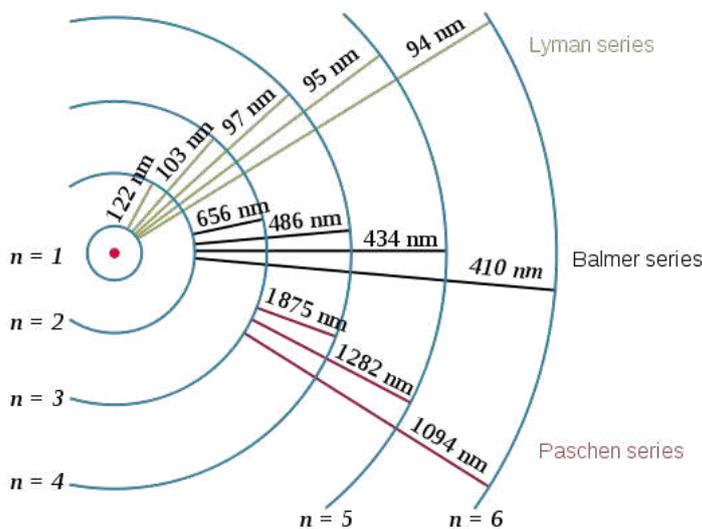
Portanto, nesse modelo a estabilidade do elétron é possível por que segundo Bohr, há uma orbita limite em relação ao núcleo, chamada orbita de energia mínima (ground state), abaixo da qual não é mais possível a emissão de energia, logo, isso evita a colisão de elétrons com o núcleo. {[96];5,6}

Energia quantizada

Sabe-se que no ultimo quarto do século XIX, portanto, muito antes do surgimento da mecânica quântica, já se tinha evidencias de que a luz emitida pelo hidrogênio só podia ocorrer através de determinados comprimentos de onda. Assim, constatou-se que esses comprimentos formavam sequencias – denominada linhas espectrais – relacionadas diretamente à luz emitida.

Radiação	Comprimento de onda
Radiação 1	656 nm
Radiação 2	486 nm
Radiação 3	434 nm
Radiação 4	410 nm

Tabela 4.1 – Espectro de frequências da Série de Balmer do átomo de hidrogênio.



Princípio da Exclusão de Pauli; Dois elétrons exatamente iguais não podem ocupar o mesmo estado quântico. Essa propriedade mantém a integridade do átomo.

Figura 4.2 – Espectros de frequências do hidrogênio; Série de Lyman, Série de Balmer e Série de Paschen. (n=1 representa o nível de menor energia)

A Figura 4.2 mostra os diversos comprimentos de onda das radiações – energia – emitidas quando o elétron do átomo de hidrogênio salta de um nível quântico para outro de menor energia. Quanto menor o comprimento de onda, maior é a energia do fóton. Em cada caso, a radiação é transportada através do fóton, que carrega a diferença de energia entre os dois níveis. {[21] 150, 151}

Átomo Quântico

Em 1885 já se conhecia a sequencia relativa ao espectro da luz visível – mostrada na Tabela 4.1 - graças ao trabalho de Johann Balmer. Então, o espectro foi batizado como Série de Balmer. {[1]; 267} Após a Série de Balmer outras series foram descobertas como a Série de Lyman, Série de Paschen, etc. Ver a Figura 4.2. Em cada caso a energia da radiação é obtida experimentalmente medindo-se o comprimento de onda da luz emitida. {[1]; 267}

É importante salientar que o átomo quântico é uma construção de muitos autores. Em seguida são apresentados os principais cientistas e seus trabalhos, que nos primeiros trinta anos do século passado criaram as bases da mecânica quântica relativística, a física da matéria;

1900 – Max Planck apresenta a teoria do Quantum.

1905 – Albert Einstein enuncia a dualidade; onda/partícula. Nesse mesmo ano propõe a famosa equação da equivalência matéria/energia; $E = mc^2$.

1913 - Niels Bohr propõe a quantização do momento angular, que permitiu o modelo quântico do átomo de hidrogênio.

1924 – Louis de Broglie propõe a teoria em que as partículas possuem um compri-

mento de onda (λ), que está associado ao momentum(p) através da relação: $\lambda = h/p$. O parâmetro h é chamado constante de Planck.

1924 – Wolfgang Pauli enuncia o princípio da exclusão.

1926 - Erwin Schrödinger publica a equação que representa a matéria como ondas.

1926 - Max Born define a solução da equação de ondas de Erwin Schrödinger como “ondas de probabilidade”. {[96]; 13}

1927 – Werner Heisenberg apresenta o princípio da incerteza. Em 1932 ele receberia o prêmio Nobel pela relevante contribuição à mecânica quântica, inclusive pela teoria da **simetria do Isospin**. Ver; Energia Atômica, no presente capítulo.

1928 – Niels Bohr enuncia o princípio da complementaridade, da medição do estado quântico.

1828 – Paul Dirac enuncia a equação de Dirac, sobre a existência da antimatéria, que deu inicio a Teoria Quântica Relativística.

O novo modelo

Segundo Max Planck, na emissão ou absorção da radiação eletromagnética pelo átomo, a energia – E – é permutada através de quanta. Essa energia é calculada através da seguinte formula:

$$E = h \cdot \omega \quad (4.2)$$

Na eq. (4.2) sabe-se que: $h = h/(2\pi)$. Enquanto o parâmetro – h – é chamado constante de Planck.

O postulado de Planck. A eq.(4.2) representa de fato a energia do fóton da radiação eletromagnética. A radiação é caracterizada por um vetor de onda \mathbf{k} , cuja direção é a mesma da propagação da onda eletromag-

nética. A intensidade do vetor de onda é calculada pela seguinte equação:

$$k = 2\pi/\lambda \quad (4.3)$$

Define-se então o momentum do fóton como:

$$\mathbf{p} = \hbar \cdot \mathbf{k} \quad (4.4)$$

A ideia de Bohr sobre o átomo quântico mostrou-se consistente com os experimentos realizados. Certamente, como explicava a estabilidade do átomo, seu modelo era superior ao de Rutherford. No entanto, sua teoria deixou em aberto duas outras questões importantes:

1. Como a energia do átomo é transmitida entre o núcleo e os elétrons?
2. Qual equação deve-se usar para calcular a posição do elétron do átomo em função do tempo?

{[118];55-59}

Equação de Louis de Broglie

A primeira questão foi resolvida por Louis de Broglie em 1924. Ocorre que a eq. (4.4) define o momentum do fóton e comprova a ideia de Einstein segundo a qual a luz pode se comportar também como partículas de matéria. Assim, Luiz de Broglie propôs a questão inversa; A matéria não poderia se comportar por sua vez como luz? Ou seja, como radiação?

Para Louis de Broglie os elétrons do átomo devem produzir padrões de ondas estacionárias, que são uma propriedade de ondas em confinamento. {[96];8,9} O fenômeno foi demonstrado experimentalmente por Clinton Davisson e Lester Germer em 1927. {[118];523}. Na oportunidade foi obtida então, a fotografia da passagem de um feixe de elétrons através de um cristal onde se constatou o padrão de difração. {[96]; 9,10}

Finalmente, em 1924, Louis de Broglie enunciou que os elétrons movem-se em torno do núcleo através de orbitas como ondas de energia, logo, segundo a eq.(4.4). Portanto, substituindo-se a eq.(4.3) na eq.(4.4), e usando-se a constante de Planck, obtém-se a seguinte equação batizada como equação de Louis de Broglie:

$$\lambda = h/p \quad (4.5)$$

Resumo; O átomo quântico possui dois conceitos básicos: {[50];825,826}

- O Postulado de Planck, que se resume na equação; $\mathbf{p} = \hbar \cdot \mathbf{k}$.

- A Teoria das Ondas de Matéria, de Louis de Broglie; “O comprimento de onda da partícula é inversamente proporcional ao seu momentum”. O que é resumido pela equação de Broglie: $\lambda = h/p$, a qual é válida para todas as partículas atômicas.

Erwin Schrödinger por sua vez, deu consistência à teoria enunciando a equação de ondas da matéria.

Equação de Schrödinger

Em 1926 Erwin Schrödinger publicou a equação que seria batizada com seu nome. Essa equação calcula a posição do elétron em função do tempo. Sua solução é denominada função de onda – $\psi(x,t)$ – para partículas de matéria. O fato é que ao associar partículas de matéria a ondas, a equação de Schrödinger deu consistência ao conceito da matéria comportando-se como onda. A equação de Schrödinger resultou também na comprovação da descoberta de Einstein, de 1905, sobre o caráter dual da luz. Por sua vez, o caráter dual da luz – ou dualidade onda/partícula – é provavelmente o conceito mais emblemático da física quântica.

Partícula ou Onda?

Em 1927 Heisenberg publicou o princípio da incerteza. Entretanto, foi de Max Born a ideia de que o quadrado da função de onda; $|\psi(x,t)|^2$ permite calcular a posição de uma partícula. Isso significa que o quadrado da função que é solução da equação de Schrödinger representa a probabilidade de se encontrar a partícula. Esse conceito e o princípio da incerteza são fundamentais para a medição de partículas subatômicas. Contudo, existe ainda outro conceito da física quântica que deve ser esclarecido tendo-se em vista a medição do estado quântico de uma partícula; A dualidade, partícula/onda.

Em 1905, Einstein demonstrou que a radiação luminosa pode se comportar como ondas de matéria. Portanto, nesse caso a energia luminosa age como uma sucessão de partículas discretas, tal como um fluxo contínuo de “pacotes” com massa e velocidade, que são os parâmetros típicos da grandeza momentum. Por outro lado, a equação de Louis de Broglie demonstra o fenômeno inverso; partículas de matéria, logo, pacotes com massa e velocidade, comportando-se como ondas de radiação. O experimento que ilustra o caráter dual da energia é o experimento das duas ranhuras. Figura 4.3

I - Ondas comportando-se como partículas

O experimento clássico que demonstra o comportamento de ondas como partículas discretas de matéria é mostrado nas partes I e II da Figura 4.3, e é explicado da seguinte maneira; Na parte I da figura, a radiação luminosa, com comprimento de onda λ ,

incide através de duas aberturas – 1 e 2 – sobre um anteparo coberto com filme fotográfico situado após o plano das duas aberturas. Considere-se que a largura de cada abertura é muito menor do que o valor de λ , o que reduz o efeito de difração da luz. Consequentemente, é razoável supor que as aberturas comportam-se como duas fontes pontuais em relação ao anteparo.

Padrão de onda

A parte II da Figura 4.3 deixa evidente como o bombardeio dos fótons através das frestas imprime no anteparo um padrão através do qual; A densidade dos pontos de impacto (A) dos fótons na parte superior da figura é possível associar os parâmetros de uma onda, a qual foi traçada posteriormente na parte inferior (B), do anteparo.

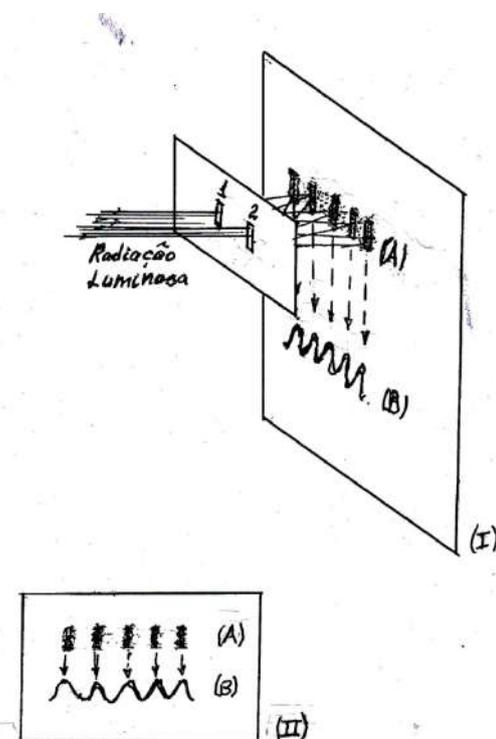


Figura 4.3 – Experimento das duas ranhuras; Ondas comportando-se como partículas.

A parte II da Figura 4.3 mostra uma curva senoidal traçada após o experimento, mas, inspirada na distribuição da densidade dos fótons (partículas) sobre o anteparo. Na curva é observada a repetição de picos de certa intensidade acompanhados de quedas para o valor zero, de maneira periódica. Os picos da curva correspondem às interferências construtivas máximas das duas fontes. Já os valores nulos correspondem às interferências destrutivas entre os dois feixes de fótons. Dessa maneira, a radiação luminosa enquanto feixes de fótons revela também sua natureza de onda, já que partículas não deveriam produzir o efeito do cancelamento de intensidades, mas, ondas sim. {[1];87}

De maneira geral, tendo-se em vista um entendimento mais amplo da relação partícula/onda do experimento deve-se atentar para as seguintes considerações:

1. O local exato em que um fóton de luz poderá atingir determinada região do anteparo não pode ser previsto. Mas, a probabilidade de detectá-lo será proporcional à densidade de pontos dessa região do anteparo. Assim, alta densidade de pontos significa alta probabilidade de detecção, enquanto baixa densidade de pontos significa baixa probabilidade de detecção. Portanto, o padrão de probabilidade segue a densidade dos pontos de impacto na superfície do anteparo.
2. A densidade de pontos em determinadas regiões do anteparo é diretamente proporcional ao quadrado da amplitude da onda. Fótons não são detectados onde acontece interferência destrutiva. Portanto, a ausência de fótons em intervalos regulares mostra que a natureza da luz como onda permanece.

O experimento pode ser resumido no seguinte; Existe uma relação direta de proporcionalidade entre a probabilidade de detecção das partículas e o quadrado de amplitude da onda. Isso significa que quando ondas comportam-se como partículas não é possível prever com exatidão a localização da próxima partícula. Contudo, é possível determinar a probabilidade de encontrá-la em dada região, porque esta é proporcional à distribuição da densidade.

II - Partículas comportando-se como ondas

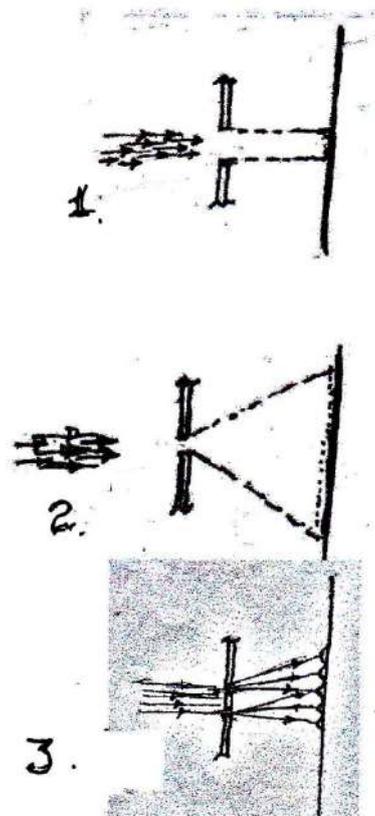


Figura 4.4 – Matéria comportando-se como ondas. Elétrons incidem sobre um anteparo através de três situações diferentes.

A Figura 4.4 representa o experimento em que um feixe de elétrons incide através da abertura de uma placa sobre um anteparo coberto com filme fotográfico. O experimento é realizado em três situações diferentes denominadas; 1, 2, 3. Na situação 1, o feixe de elétrons incide sobre o anteparo através de uma abertura com a mesma largura do feixe. Nesse caso, constata-se que o feixe de elétrons produz um registro uniforme no filme do anteparo. Por outro lado, no caso em que o mesmo feixe de elétrons incide sobre o anteparo através de uma abertura de largura muito menor do que a do próprio feixe, verifica-se um espalhamento uniforme na incidência de elétrons sobre a superfície do anteparo, como é mostrado na situação 2.

Finalmente, realiza-se o terceiro experimento – situação 3 – onde uma nova ranhura de mesma largura é acrescentada ao lado da anterior. Nesse caso, após o bombardeio das partículas, constata-se através da incidência de elétrons em determinados pontos espaçados segundo um padrão, que a densidade das partículas terá intensidade associada a picos de onda. Ver a Figura 4.5. Ao mesmo tempo são identificadas regiões alternadas onde a densidade é praticamente nula. Então, observa-se a dificuldade de explicar esse padrão supondo-se que os elétrons que anteriormente atingiam determinada região do anteparo, mudaram de comportamento porque uma segunda fresta foi acrescentada vizinha a primeira.

Ondas de matéria. Na situação 3, o comportamento das partículas é semelhante às interferências construtivas e destrutivas de forma alternada, o que é interpretado como interferências de ondas. Portanto, isso significa elétrons comportando-se como ondas que após passarem através das duas frestas, ora têm os módulos de suas intensi-

dades somados, ora, cancelados. {[1];97} Essa conclusão encontra-se representada no padrão da Figura 4.5, que não por acaso, é semelhante a parte II da Figura 4.3.

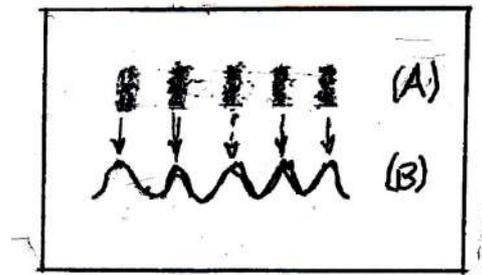


Figura 4.5 – Curva (B) foi traçada em função da densidade de partículas em (A). Padrão de partículas comportando-se como ondas.

Da mesma forma que as ondas luminosas comportaram-se como partículas discretas de matéria, conclui-se que a densidade de elétrons sobre o anteparo segue um padrão de probabilidades. Logo, alta densidade significa alta probabilidade de um novo impacto. E baixa densidade significa baixa probabilidade de outro impacto.

Resumo: Na incidência de partículas como elétrons sobre um anteparo não é possível prever com certeza onde as partículas atingirão o anteparo. Nesse caso é possível apenas determinar a probabilidade de se encontrar partículas em determinada posição. Entretanto, pode-se afirmar que a densidade da probabilidade é proporcional ao quadrado da amplitude da função de onda; $|\psi(x, t)|^2$, do fenômeno. {[1];98}

Por outro lado, há mais um ponto a se considerar na comparação entre ondas de radiação eletromagnética e ondas de partículas. As ondas eletromagnéticas podem ser detectadas de forma direta através da medição dos campos elétrico (**E**) e magnético (**B**). No entanto, as ondas de matéria não são detectadas de forma direta. Nesse caso,

calcula-se apenas a probabilidade de ocorrência em pontos de interesse. Portanto, essa comparação entre os dois tipos de onda permite a seguinte conclusão:

*Enquanto no caso da radiação eletromagnética a propagação da energia é produzida pela oscilação dos campos **E** e **B**, no caso das partículas de matéria o que produz a oscilação das ondas é a probabilidade da densidade.* {[1];99}

Medição

A solução da equação de Schrödinger – $\psi(x, t)$ – não representa um fenômeno do espaço real, mas, do espaço complexo. Ela é uma função complexa com uma parte real e outra imaginária. Contudo, o quadrado de um complexo é sempre um número real e positivo. Assim, $|\psi(x)|^2$ representa a probabilidade de se encontrar uma partícula. A distribuição de probabilidades de encontrar a partícula é mostrada na Figura 4.6.

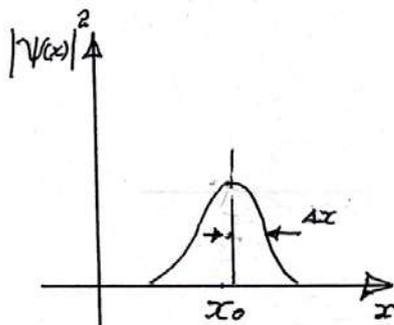


Figura 4.6 – Distribuição de probabilidades da posição (x). Δx representa a incerteza de (x).

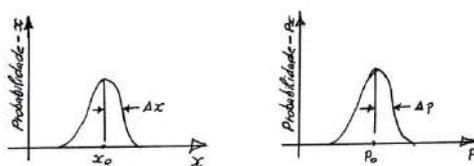


Figura 4.7 – Gráficos do par canônico: x, p_x .

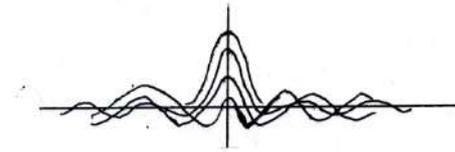


Figura 4.8 – Pacote de ondas. A solução da equação de Schrödinger é uma soma de ondas.

O gráfico da Figura 4.6 denomina-se histograma da distribuição estatística de um evento. Nesse caso o evento significa encontrar uma partícula em determinada posição (x). Segundo o gráfico (curva do sino), a probabilidade de se encontrar a partícula é alta em torno da posição x_0 , que corresponde à posição central do histograma. No entanto, a probabilidade – indicada no eixo vertical – diminui na medida em que a procura afasta-se da posição central. {[96];14}

Princípio da incerteza

Segundo o princípio da incerteza é impossível determinar de maneira precisa e simultânea ambos os valores das variáveis canônicas de um sistema quântico. Ver a equação (4.6). {[119];7} O produto das incertezas de um par de variáveis canônicas é diretamente associada às grandezas conjugadas, logo, grandezas interdependentes entre si.

$$\Delta x \cdot \Delta p_x \geq \hbar/2 \quad (4.6)$$

A equação (4.6) estabelece que a incerteza; Δx , da posição de uma partícula multiplicada pela incerteza; Δp_x , do seu momentum (massa e velocidade) não deve ser menor do que a constante de Planck; $\hbar/2$. Isso significa que quando a incerteza da posição (x) diminui a incerteza do momentum (p) – massa e velocidade – aumenta. Portanto, a medição de qualquer uma das grandezas, é feita à custa da outra. Observe-se na Figura 4.7 como Δx ou Δp_x aumenta na medida em que x ou p_x afasta-se de x_0 ou de p_0 .

Interpretação de Copenhague

A física quântica, além de estabelecer o corpo de conhecimentos do comportamento da matéria subatômica, a partir da interpretação estatística de Max Born, teve que criar um novo paradigma para a medição das partículas do chamado estado quântico. Os critérios de medição do estado quântico das partículas recebeu a denominação; Interpretação de Copenhague.

Os fenômenos quânticos possuem uma diferença fundamental em comparação com aqueles da mecânica clássica: Eles ocorrem em espaços extremamente reduzidos, e em intervalos de tempo, idem. Logo, a mensuração dos fenômenos denomina-se medição do estado quântico do sistema. Isso significa o seguinte: devido à alta velocidade das partículas subatômicas e aos espaços reduzidos, no sistema quântico, uma determinada configuração é modificada antes mesmo do resultado da medição ser conhecido.

Tomando-se como exemplo o elétron do Experimento das Duas Ranhuras, na interpretação da medição não importa onde o elétron encontra-se antes de acontecer o impacto no anteparo. Caso 3 da Figura 4.4. Ou seja, não importa como a partícula atravessou as duas ranhuras. {[142];192}

Alem da singularidade da ideia, sabe-se que a Interpretação de Copenhague não possui um único autor, mas, vários. Por outro lado, sabe-se que entre muitos físicos da época o conceito era visto como algo etéreo. Logo, a interpretação deve ser entendida como um consenso mínimo.

Resumindo; Nem Niels Bohr, nem Werner Heisenberg, chegaram à Interpretação de Copenhague de forma isolada. Portanto, o conceito de medição provavelmente mais controverso da física foi estabelecido no final dos anos 20, século XX, a partir da sucessão dos seguintes eventos:

1. Entre 1925 e 1926, Werner Heisenberg, Max Born e Pascual Jordan apresentaram a equação matricial da mecânica quântica.
2. Em 1926, Erwin Schrödinger propôs a equação da matéria como ondas. Ainda em 1926, Max Born enunciou a interpretação probabilística da equação de Schrödinger.
3. Em 1927, Werner Heisenberg propôs o Princípio da Incerteza.
4. Em 1928, Niels Bohr propôs o princípio da complementaridade da medição das variáveis canônicas.

Significado da Interpretação de Copenhague

A Interpretação de Copenhague representa a medição dos pares de variáveis canônicas da mecânica quântica, que pode ser exemplificada pela equação (4.6). {[119]; 8,9} Portanto, a medição de variáveis canônicas como x ou p_x tem como referencia a constante de Planck; $\hbar/2$. Então, fica implícito que a medição de uma variável obedece às seguintes condições:

- I. O Princípio da Incerteza, de Heisenberg.
- II. Segundo Max Born, a medição de cada variável é interpretada estatisticamente tomando-se como base a probabilidade de sua função de onda.
- III. As variáveis obedecem ao Princípio da Complementaridade, de Niels Bohr.

Princípio da Complementaridade. Nos experimentos da física quântica observa-se que ao se fazer a medição com bom grau de precisão de uma variável de um par canônico, a outra é alterada por um montante que

é impossível de ser calculado sem que isso interfira na primeira medição. Então, desse fato percebe-se a singularidade da medição na mecânica quântica em comparação com aquela da mecânica clássica, onde a medição também causa distúrbios, mas, no caso, correções são aceitáveis.

É importante observar que a dualidade partícula/onda do elétron, significa que a partícula possui ambas as qualidades, embora isso não seja aceitável do ponto de vista da mecânica clássica. Contudo, segundo a Interpretação de Copenhague, são qualidades complementares. Assim, a medição dos pares de variáveis canônicas deixa evidente uma diferença fundamental entre a mecânica clássica e a mecânica quântica. Na mecânica clássica, por exemplo, a maneira como é feita a medição de duas grandezas de uma partícula não afeta o resultado das medições.

Na desigualdade de variáveis como na equação (4.6) encontram-se implícitas relações de complementaridade. Isso acontece na medida em que, segundo o princípio da incerteza, o aumento de precisão da medição de uma variável é obtido à custa da precisão da outra. Por exemplo, no par de variáveis - eq.(4.6) - a posição (x) e o momentum (p_x) são variáveis complementares. Segundo o Princípio da Incerteza, em cada medição pode-se conhecer apenas uma delas com precisão. Isso significa que na medição de x , a obtenção de p_x foi arruinada. E vice-versa.

Observe-se ainda que na Interpretação de Copenhague, a partícula a ser medida é desconhecida – não tem propriedades – até ela ser detectada. {[118]; 450} Por outro lado, o fato das medições das variáveis serem excludentes significa que o conceito de causalidade entre elas é de pouca valia na mecânica quântica. {[119]; 9}

Salto Quântico

O salto quântico significa que uma partícula só existe no instante da medição. Esse conceito foi estabelecido, entre outros, por Max Born. O conceito é uma forma de descrever a Interpretação de Copenhague. Existem outras interpretações da medição, no entanto, embora seja contestado por alguns, o salto quântico é a interpretação mais aceita da medição. {[116];3}

Na física de Newton a causalidade entre posição e velocidade é bem determinada. No entanto, na física quântica, x e p_x são excludentes logo, não existe causalidade entre essas variáveis. O salto quântico ocorre a cada momento em que a medição é feita. Isso corresponde ao instante onde a largura do pacote - incerteza - torna-se a mais estreita possível. Ver as posições correspondentes a $1t_0$ e $2t_0$ da Figura 4.9.

Segundo o salto quântico, o pacote de ondas entra em colapso imediatamente após a probabilidade de localizar a partícula ser alta. Na Interpretação de Copenhague – estabelecida de acordo com Heisenberg, Born e Bohr; Os objetos quânticos são calculados probabilisticamente, seus atributos são determinados com algum grau de incerteza, e a medição é feita de forma complementar. Como exemplo, tome-se posição e velocidade (ou momentum). {[96]; 46,47}

- medição da posição.

Segundo Heisenberg, o rastro do elétron só existe quando a partícula está sendo medida. Considera-se que o elétron é parte de uma nuvem de probabilidade (pacote), mas, o ato de medição da sua posição com uma boa precisão potencializa um atributo da partícula, ou seja, a posição. Logo, isso faz com que a nuvem entre em colapso com relação ao atributo, velocidade.

Sabe-se que quando Schrödinger estabeleceu a equação que receberia seu nome, imaginou-se que a ideia do salto quântico poderia ser abandonada já que o movimento de uma onda é contínuo. No entanto, chegou-se a conclusão de que a natureza pontual da partícula tinha de ser conciliada com sua natureza de onda e assim, o conceito do pacote de ondas como uma nuvem foi estabelecido.

cesso se repete tantas vezes quantas forem as medições realizadas. {[96]: 42,43}

A Física Reencontra a Metafísica

Os anos 30 do século passado, que antecederam a 2ª Guerra Mundial, foram de grande significado histórico. A ciência, a política e a filosofia revelaram tanto a grandeza quanto a miséria existencial do Ser.

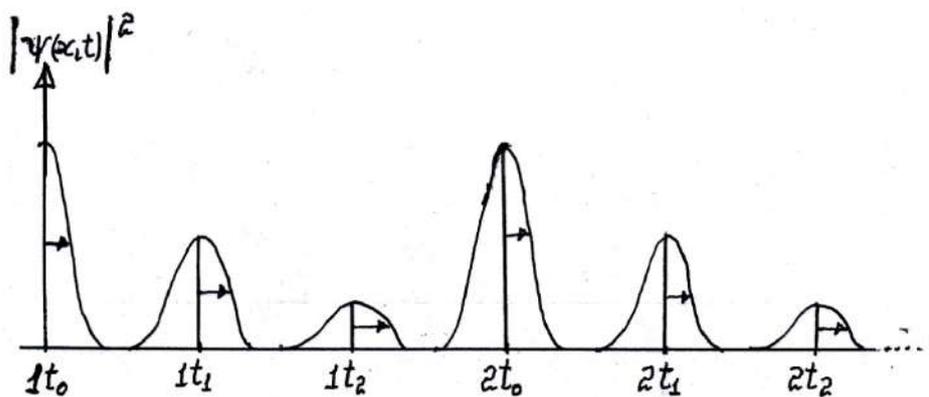


Figura 4.9

O colapso da nuvem. No momento da medição da localização do elétron, a largura do pacote de ondas – Figura 4.8 – associado a sua distribuição de probabilidades é estreita. Ver o instante $1t_0$ no gráfico da Figura 4.9. Contudo, o fato é que imediatamente após a medição, sua largura irá aumentar com o tempo. Isso significa que o grau de incerteza irá aumentar até que uma nova medição seja feita em sequência.

No instante da nova medição, a largura do pacote de ondas volta a se estreitar – observe-se o trecho de curva correspondente a $2t_0$ – pois o fenômeno é inerente a cada medição. No entanto, após esse momento a onda entra em colapso novamente e o pro-

Figura 4.9 - Após cada medição ($1t_0$, $2t_0$, etc.) o pacote de ondas sofre um colapso.

Nessa época, com a mecânica quântica foram questionados os conceitos de causalidade, e matéria. E do ponto de vista da metafísica, foi como se após 22 séculos, o ser humano no poder tivesse retomado a questão fundamental de Aristóteles; O que é ser? No entanto, isto resgatou o fantasma germânico; panteísmo, que alimentou a crise, que levou a à 2ª Guerra Mundial.

A questão de Aristóteles foi retomada por Martin Heidegger no livro: Ser e Tempo, de 1927. Ver; Capítulo 9. Enquanto isso, a física quântica propôs um novo mo-

delo atômico. Na sequência iria surgir uma nova disciplina; A Física das Partículas. No final dos anos 30 haveria uma nova fenomenologia para discutir o conceito de matéria. Um exemplo típico foi o salto quântico.

Foram necessárias algumas décadas para a construção da teoria da matéria. Contudo, essa teoria não teria sido elaborada sem um modelo da evolução do Universo. Daí sua interdependência com o modelo cosmológico denominado Big Bang quente. Finalmente, nos anos 70 foi estabelecido o quadro geral das partículas na forma de um Modelo Padrão. Nesse modelo existem dois elementos básicos: Os férmions, e os bósons das forças fundamentais.

A matéria de que somos feitos

Os primeiros férmions descobertos são mais leves em comparação com aqueles da segunda e terceira geração, que foram descobertos depois. Ver a Tabela 4.2. Os férmions da primeira geração são estáveis, já os outros, além de serem bem mais pesados são também partículas transitórias. Ou seja, são partículas de curta duração. O tempo de vida do muon, por exemplo, é da ordem de um microssegundo.

	Quarks	Léptons	Spin
1ª Geração	up; down	elétron; neutrino do elétron.	1/2
2ª Geração	charm; strange	muon; neutrino do muon.	1/2
3ª Geração	top; bottom	tau; neutrino do tau.	1/2

Tabela 4.2 – As gerações dos férmions do Modelo Padrão das partículas elementares.

O próton é formado pelos quarks: up, up, down. Já o neutrão, pelos quarks: up, down, down. A matéria que se conhece, chamada matéria bariônica, é constituída apenas pelos quarks up e down, além do elétron e o neutrino do elétron.

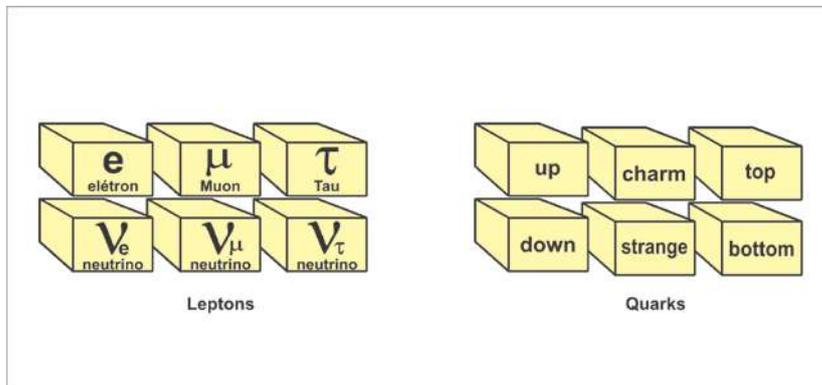
Modelo Padrão

O Modelo Padrão das partículas surgiu de duas vertentes complementares; As descobertas de partículas em que eram identificadas relações de simetrias entre si; os férmions, e as forças às quais eles são submetidos; os bósons. O modelo é um guia que detalha como as forças fundamentais estruturam a matéria. O guia é chamado também de Física da Simetria de Calibre.

Simetrias. Um sistema possui simetria quando nele, as leis da física são conservadas. Ou seja, para um sistema quântico em evolução, as leis continuam sendo válidas a cada novo estágio do sistema.

Princípio da invariância CPT; O paradigma básico de simetria das partículas é a transformação invariante CPT, que deve ser obedecida nas seguintes operações de um sistema:

1. C; (Simetria da carga) – Significa que a troca de uma partícula pela antipartícula correspondente não altera as propriedades da carga.
2. P; (Simetria da paridade) – Significa que a imagem da partícula em um espelho não viola as leis da física. Contudo, sabe-se que a força nuclear fraca viola essa simetria.
3. T; (Simetria do tempo) – Significa que se o tempo for invertido, a matéria é substituída pela antimatéria, mas, as leis e propriedades da física continuam válidas no tempo com o sentido invertido.



Os férmions, ou seja, os quarks e léptons, são partículas de spin fracionário – 1/2 – logo, obedecem ao princípio da exclusão de Pauli.

Figura 4.10

O que é matéria?

Matéria é o aglomerado de partículas – férmions – unidas pela “cola” dos bósons das forças fundamentais da natureza. Ver a Figura 4.10 e a Tabela 4.3. O quadro geral dos férmions e bósons, assim como as leis e propriedades intrínsecas à matéria, que descrevem a estrutura atômica são os elementos principais do Modelo Padrão das partículas elementares.

Os bósons – Tabela 4.3 - funcionam como transportadores das forças fundamentais, que unem os férmions, e assim formam os prótons e neutros dos átomos.

Propriedades das partículas

Os tipos de carga. As partículas férmions além das propriedades massa e spin possuem carga elétrica – exceto os neutrinos. Contudo, no caso dos quarks, possuem também carga de cor. Os quarks possuem ainda propriedades como; Isospin, e estranheza, ou hipercarga. Por outro lado, cada partícula possui uma antipartícula correspondente. O Modelo Padrão da simetria de calibre é constituído de 61 elementos, que inclui as partículas e antipartículas contabilizadas na secção; As Partículas. Na secção; Hadrons encontra-se um resumo das partículas pesadas do átomo, ou seja, os barions e mesons especificados pelo modelo.

Bosom	Força fundamental	Massa (GeV)	Spin
γ	Eletromagnética	0	1
W^+, W^-	Nuclear Fraca	80,2	1
Z^0	Nuclear Fraca	91,2	1
Gluon	Nuclear Forte	0	1
Gráviton	Gravitacional	0	2

As quatro forças fundamentais da natureza. A força nuclear fraca possui três tipos de bósons.

Tabela 4.3

Construção do Modelo Padrão

O presente trabalho não pretende detalhar a física da simetria de calibre, mas, chamar atenção sobre as questões principais que resultaram na criação do modelo. A compreensão do significado dos eventos não exige necessariamente o conhecimento especializado do assunto. Por outro lado, o aprofundamento de questões como: invariância de calibre, grupo de calibre, quebra espontânea de simetria, etc., certamente será necessário para uma compreensão maior da física das partículas. Para isso, uma sugestão de leitura introdutória é o livro; “Deep Down Things”, de Bruce A. Schumm. De qualquer maneira, espera-se que a breve apresentação aqui dos eventos principais da teoria das partículas sirva de motivação inicial sobre o Modelo Padrão das partículas elementares.

Eventos principais

A equação de Dirac. A física da simetria de calibre, ou, física dos campos quânticos teve o impulso inicial com a publicação da equação de Dirac em 1928, e com a previsão de Dirac da existência da antimatéria. O conceito de antimatéria, mesmo entre os físicos, foi visto inicialmente como mera curiosidade. Contudo, a equação de Dirac - que incluí o conceito da antimatéria - em conjunto com o eletromagnetismo de James Clark Maxwell foram fundamentais para a consolidação em 1970 da teoria quântica relativística, conhecida também como Eletrodinâmica Quântica, ou QED (Quantum Electrodynamics).

- diagramas de Feynman.

A física das partículas descreve eventos onde se calcula, por exemplo, a secção de impacto (cross section) de partículas que

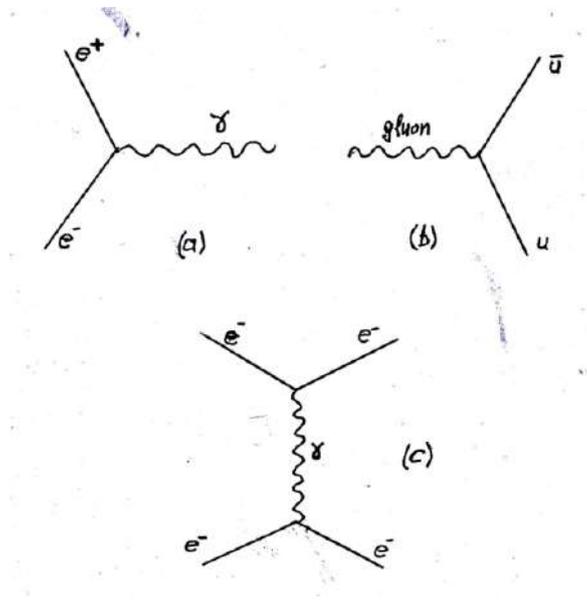
entram em choque nos aceleradores. Na teoria quântica calcula-se o impacto através de uma matriz M . Entretanto, para tornar mais funcional a física do processo, em 1950 Richard Feynman propôs sua representação através de retas e linhas sinuosas. Ver a Figura 4.11. As figuras simbolizam fenômenos como, o surgimento de novas partículas, ou a criação de energia a partir da interação entre matéria e antimatéria.

A aplicação dos diagramas de Feynman é feita em conjunto com a ferramenta matemática denominada teoria da perturbação. A técnica permite resultados precisos no cálculo da interação entre partículas. O nível de complexidade é função do grau de precisão desejado. Observe-se que o aniquilamento e criação da matéria devem obedecer ao princípio de conservação dos números quânticos. {[99];224},{[68];84}

- aniquilamento e criação da matéria.

Segundo a teoria quântica, o elétron não existe de forma isolada no vácuo. A teoria deixa implícito que matéria e antimatéria surgem em conjunto e ambas possuem o mesmo grau de importância. Um exemplo típico do aniquilamento e criação de partículas na eletrodinâmica quântica ocorre na colisão do elétron (e^-) com o pósitron (e^+). Conseqüentemente, são criados: um muon e um antimuon. Ver as figuras 4.12 e 4.13.

Matéria e antimatéria. – Os diagramas de Feynman da Figura 4.11 representam a criação e aniquilamento de partículas no vácuo. Na parte superior da figura, em (a) um elétron e um pósitron dão origem a um fóton. Em (b), a partir de um gluon tem-se um quark e um anti-quark. Nas tabelas 4.5 e 4.6 encontram-se as relações das partículas de matéria e antimatéria do Modelo Padrão.



Através de seus diagramas, Richard Feynman conseguiu de forma simples, mas objetiva, a representação da interação entre as forças fundamentais e os férmions. Na parte superior da figura à esquerda tem-se a representação de interações da força eletromagnética (fóton) e da força nuclear forte (gluon).

Figura 4.11

Interações das forças fundamentais com os férmions e os antiférmions. As partículas elementares em suas interações com as forças fundamentais da natureza são observadas de maneira criteriosa nos aceleradores de partículas. As partículas surgem da matéria do átomo por decaimento ou através de colisões. Poucas partículas são estáveis. No decaimento em outras partículas a força fundamental envolvida pode ser: nuclear fraca (atuando através dos bósons: W^+ , W^- , Z^0), nuclear forte (atuando através do gluon), força eletromagnética (atuando através do fóton - γ). Entretanto, as interações entre forças e partículas elementares devem ser controladas nos experimentos, observando-se leis de conservação para que as medições tenham credibilidade.

Isso é conseguido aplicando-se as leis de conservação observando-se determinados números quânticos. Esses parâmetros são: momentum, energia, momentum angular, carga, número leptônico e número bariônico. Existem ainda outros parâmetros

importantes tais como: estranheza, isospin, paridade conjugada da carga, tempo reverso, etc. No entanto, dependendo da força envolvida esses parâmetros podem ser conservados, ou não. {[1];530}

Os diagramas de Feynman têm como função representar interações onde participam: férmions, antiférmions, ou bósons de força. Os diagramas básicos são vértices relativos ao tempo e espaço onde o movimento do férmion (antiférmion), e bóson é representado por linhas retas e linhas sinuosas respectivamente. Contudo, existem regras bem definidas nessa representação.

Por exemplo, os dois vértices da parte superior da figura 4.11 representam respectivamente: aniquilamento e criação da matéria. Assim, no vértice à direita, um bóson do gluon produz um quark e um antiquark do tipo up. Enquanto no vértice à esquerda, um elétron e um pósitron se aniquilam produzindo como consequência um fóton (γ). Por outro lado, a figura 4.11 (c) representa a interação elástica de dois elétrons, que após trocarem um fóton afastam-se entre si.

{[1];532}

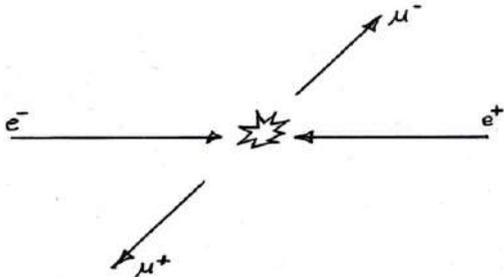


Figura 4.12 – Representação do aniquilamento e criação de matéria usando o referencial do centro de massa da colisão.

- terminologia de Dirac.

Entretanto, além do mais, a criação de duas partículas a partir do aniquilamento de duas outras, usando-se a terminologia de Dirac é enunciada da seguinte maneira: *Dado o estado inicial, o sistema de partículas e^+ e e^- evolui para o estado final das partículas μ^+ e μ^- através do estágio intermediário da energia do fóton γ , que está representado pela linha sinuosa da Figura 4.13.* ([67]; 6,8) A energia do sistema é calculado através do operador Hamiltoniano.

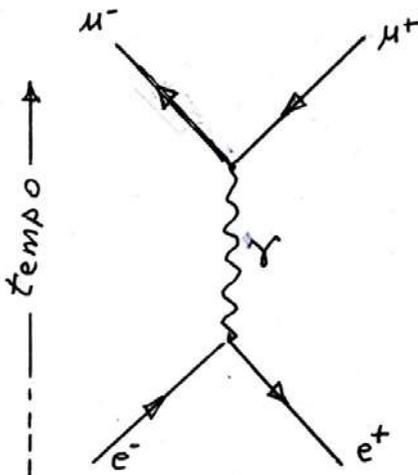


Figura 4.13

Números quânticos. Os eventos associados a colisão ou decaimento de partículas nos aceleradores são ocorrências extremamente rápidas, mas, que obedecem às leis da conservação. Contudo, ainda mais importante é observar os eventos de acordo com as regras de transformação de um estado quântico em outro. Nesse caso, as leis de conservação são expressas através de números quânticos desses estados, os quais estão associados a diversas simetrias.

Os números representam categorias discretas de parâmetros quânticos. Quando o número quântico é aditivo, o número quântico total do sistema é a soma dos números quânticos de seus componentes. Por exemplo, as cargas das interações fundamentais; Carga elétrica, as cargas de cor e a carga da interação nuclear fraca pertencem à essa categoria. Ao mesmo tempo sabe-se que no cálculo das interações, a conservação é garantida através de expressões denominadas lagrangianos. Assim, a conservação de cada interação significa a invariância do seu lagrangiano. O que se denomina invariância da transformação de grupo unitário, ou, invariância de grupo de calibre.

Invariância de calibre local. Em 1954, Yang e Mills estabeleceram a teoria da invariância de calibre local. Segundo a teoria, o grupo de calibre da interação eletromagnética é; $U(1)$. O grupo de calibre da interação nuclear fraca é; $SU(2)$. E o grupo de calibre da interação nuclear forte é; $SU(3)$. Os grupos por sua vez possuem propriedades espaciais da geometria de Lie, ou, dos grupos de Lie. ([99]:23, [[68]:85]

Flutuações quânticas. O elétron do diagrama de Feynman é considerado um elétron “nu”, ou seja, é o elétron no seu estado natural logo, tendo carga e massa com valores plenos. Enquanto isso, o elé-

tron possível de ser medido encontra-se “vestido” pelos fenômenos virtuais denominados flutuações quânticas. As flutuações são processos autônomos que em termos práticos acabam atenuando a carga da partícula mensurada. {[156];42} Figura 4.14.

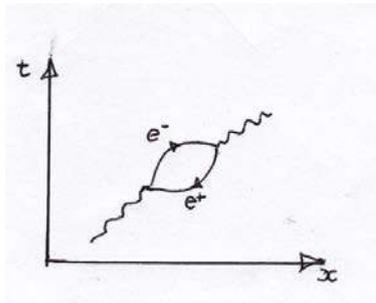


Figura 4.14 - Elétron e pósitron virtuais representando uma flutuação quântica.

As flutuações quânticas ocorrem no vácuo quando uma partícula e sua antipartícula surgem da radiação eletromagnética, e em seguida se auto-aniquilam no intervalo de tempo segundo a constante de Planck. O diagrama da Figura 4.15 é obtido inserindo-se a flutuação quântica da Figura 4.14 no diagrama da Figura 4.11c. A Figura 4.15 significa o seguinte; O elétron proveniente da esquerda emite um fóton, o qual antes de ser absorvido pelo que vem da direita flutua entre matéria (e⁻) e anti-matéria (e⁺), em um intervalo de tempo que obedece ao princípio da incerteza de Heisenberg.

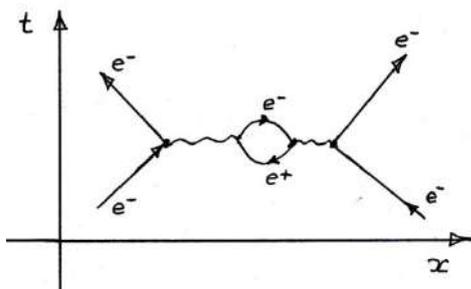


Figura 4.15

Segundo a física quântica pode-se “tomar emprestado” do vácuo um quantum de energia desde que o mesmo seja devolvido em um intervalo de tempo, de maneira que seja obedecido o princípio da incerteza de Heisenberg.

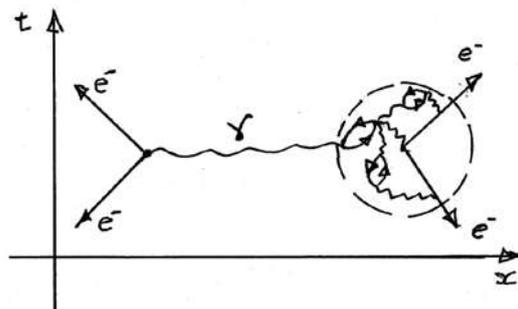


Figura 4.16 – A área circular à direita representa possíveis flutuações em torno da carga elétrica.

Renormalização. O acoplamento da força eletromagnética à carga elétrica é dado pelo parâmetro α_e , a constante de acoplamento. Nos diagramas de Feynman α_e representa a captura do fóton pela carga elétrica. O seu valor é calculado pela seguinte equação:

$$\alpha_e = q^2 / (4\pi\epsilon_0 h) \quad (4.7)$$

$$= 1/137$$

Na equação (4.7), q é a carga do elétron.

Nos diagramas de Feynman, carga, energia e momentum devem ser conservados, e a intensidade da interação é representada pela constante de acoplamento (α_e), que é conhecida como estrutura fina. Por outro lado, as linhas entrando e saindo de um vértice representam partículas reais, enquanto aquelas que unem os vértices como na Figura 4.15 representam partículas virtuais. As partículas virtuais possuem energia e momentum, mas, de maneira que a massa de repouso não corresponde àquela de uma partícula real. {[156];38,39}

Teoria do Calibre. Assim como a mecânica clássica, quando a mecânica quântica

trata de sistemas dinâmicos, poucos problemas de interesse da física tem soluções exatas. Consequentemente, métodos com soluções aproximadas são fundamentais na aplicação da teoria. Uma forma clássica de solução aproximada é dada pela teoria da perturbação, onde a resposta do problema a ser resolvido é de fato um somatório de termos de uma série. Assim, o total resultante do cálculo permite uma correção de maneira que o valor previsto pela teoria esteja o mais próximo possível do obtido experimentalmente. {[119];244}

A teoria dos campos quânticos, que inclui a Eletrodinâmica Quântica (QED) e a Cromodinâmica Quântica (QCD), é chamada teoria de calibre. Sua relevância deve-se a introdução da simetria nos cálculos. Isso significa que os resultados através da teoria são renormalizáveis, logo, são mensuráveis. Sua aplicação nos problemas de campos quânticos exige o cálculo de séries da perturbação de maneira que sejam incluídas constantes de acoplamento de ordens elevadas. Como consequência, isso implica na inclusão de todos os possíveis diagramas de Feynman associados a troca dos vários bósons, e não apenas àquele associado a um único bóson. {[15]; 76}

Colisão entre partículas. Segundo a teoria da perturbação, diagramas como a Figura 4.11c são considerados de ordem baixa ou, *tree level* em inglês. Já os diagramas contendo *loops* - Figura 4.15 - são de ordem alta. No cálculo da amplitude da colisão entre partículas, a necessidade de se incluir diagramas de ordem alta exige estratégias de cálculo para que as infinitudes introduzidas pelos *loops* sejam eliminadas. Isso é obtido com técnicas matemáticas que resultam no cancelamento de valores tendendo ao infinito. Assim, a integral do cálculo terá

um valor finito, logo, possível de ser mensurado. {[21]; 209, 210, 246, 250}

Efeito Tela. A medição da carga elétrica (q) em um meio dielétrico é feita por um corpo de prova situado a uma distância (d) em relação à carga. Figura 4.17. Acontece que a ação da carga no entorno polariza o dielétrico do meio. Quanto maior for a distância d , maior será a polarização. Esse fenômeno, que é chamado *efeito tela* (ou, *screening effect*, em língua inglesa) impede que se obtenha o valor real da carga.

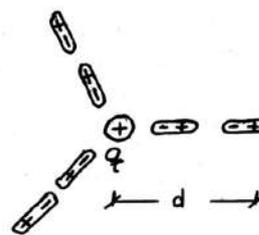


Figura 4.17

Polarização em torno da carga elétrica, q .

No caso do vácuo quântico, as partículas virtuais da flutuação quântica em torno de uma carga real provocam efeito semelhante. Ver a Figura 4.16. Isso impede que se conheça a carga franca do elétron. O valor encontrado em livros e manuais técnicos - $1,6022 \times 10^{-19}$ C - é um valor aproximado obtido em laboratório.

Mecanismo de Higgs. Em 1964 vários pesquisadores tais como: Higgs, Brout, Englert, propuseram a teoria de campo com quebra espontânea da simetria de calibre, produzindo bósons vetoriais massivos através do mecanismo que viria a ser chamado mecanismo de Higgs. Na teoria quântica relativística o vácuo é o estado de energia mínima. O mecanismo de Higgs introduz um campo Φ . No entanto, o equilíbrio existente nesse campo é instável. Ver a Figura 4.18. Afirma-se que a simetria é quebrada

espontaneamente quando o campo de Higgs assume qualquer um dos valores possíveis; Φ_1 , ou Φ_2 . Segundo o Modelo Padrão, através desse mecanismo os férmions e os bósons vetoriais adquirem massa, mas, não os neutrinos. {[68]; 348}

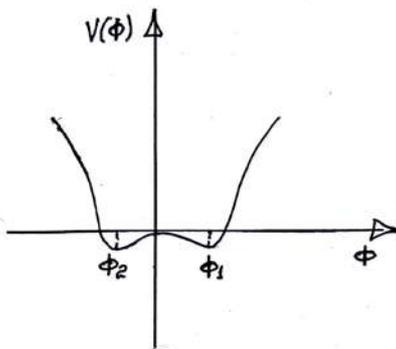


Figura 4.18

Figura 4.18 – $V(\Phi)$ é denominado potencial de Higgs. O campo de Higgs – Φ – é considerado uma grandeza escalar.

Teoria eletrofraca. Salam e Ward já haviam anunciado em 1961 a imposição da invariância de calibre local como condição fundamental para obter-se uma teoria de campos interagindo entre si. Ainda no mesmo ano, baseado na teoria dos grupos de Lie, Glashow propôs a aplicação do grupo $SU(2) \times U(1)$ para o cálculo da interação entre leptons, o que por sua vez subentende a existência de um bóson de calibre fraco, ou neutro, além de bósons de calibre fraco com carga, e o fóton. Assim, em 1967 Weinberg e Salam apresentaram de forma independente a teoria de campo baseada no grupo de calibre $SU(2) \times U(1)$, onde são unificadas as interações nuclear fraca e eletromagnética. A teoria usa o mecanismo da quebra espontânea da simetria de calibre para gerar as massas dos três bósons de calibre da interação fraca. Os valores obti-

dos no cálculo foram: 80 GeV de energia equivalente a massa para os bósons com carga, e 90 GeV de energia equivalente a massa para o bóson neutro. O fóton não possui massa. {[99]; 29}

Eletrodinâmica e a Cromodinâmica. Em 1970 foi enunciada a Eletrodinâmica Quântica (QED), a interação entre partículas com carga e o campo eletromagnético. A teoria é denominada abeliana. Seus autores principais são: Feynman, Schwinger, e Tomonaga. É baseada na invariância de calibre local. A Eletrodinâmica Quântica pertence ao grupo $U(1)$. {[21]; 350, 357} Em 1973 foi enunciada a Cromodinâmica Quântica (QCD), da interação nuclear forte. A teoria é também baseada na invariância de calibre local, mas, é uma teoria não-abeliana. Ela pertence ao grupo $SU(3)$. Os autores principais são: Fritsch, Gell-Mann e Leutwyler; Gross e Wilczek; e Politzer.

O consenso

Finalmente, em 1973, Glashow, Weinberg e Salam testaram com sucesso a teoria eletrofraca no CERN. {[21]; 67} O êxito da teoria eletrofraca nos experimentos demonstrou ser possível a unificação de forças fundamentais. Portanto, a física experimental possibilitou a criação de um modelo padrão. A partir de então, novos aceleradores tem colocado a física das partículas em novo patamar. E graças a aceleradores como o LHC é possível que a simetria do modelo seja superada pela supersimetria ainda nesse primeiro quarto de século.

A teoria não incluiu a força gravitacional, no entanto, como o modelo trata de interações no espaço subatômico, a ausência da força gravitacional, que é desprezível nessa dimensão, não constitui um impedi-

mento para sua aplicação. Observe-se também que algumas partículas que eram previstas até então, como o tau e o quark-top, foram descobertas apenas algum tempo depois. O que aumentou ainda mais a credibilidade do Modelo Padrão das partículas elementares.

O Paradigma

Unificação das forças fundamentais. A meta mais ambiciosa da física é a unificação das quatro forças fundamentais da natureza. Entretanto, tendo em vista o êxito obtido com a força eletrofraca, o próximo passo é sua unificação com a força nuclear forte. E, embora a força gravitacional não esteja incluída, a unificação dessas três forças é denominada Época GUT. (Great Unification Theory). Segundo o Modelo Padrão, a unificação dessas forças é regida pelo princípio da simetria da invariância de calibre. Sua representação é dada pela expressão; $SU(3) \times SU(2) \times U(1)$ segundo a teoria dos grupos de calibre. {[28]; 22} Assim, é possível construir o grande paradigma da física. Ver a Figura 4.19.

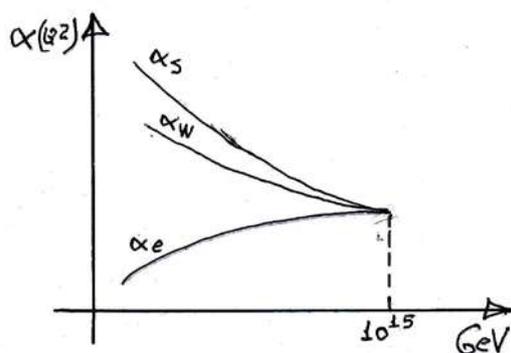


Figura 4.19

De acordo com a Figura 4.19, as três forças fundamentais; Nuclear fraca, eletromagnética e nuclear forte devem ser unificadas sob a energia equivalente a 10^{15} GeV.

A primeira unificação de forças da física foi feita em 1865 por James Clerk Maxwell, que uniu a eletricidade ao magnetismo, através das “Equações de Maxwell”, que são as equações básicas representantes do eletromagnetismo clássico. Entretanto, observe-se que as relações de causa e efeito dessa teoria, ao contrário da mecânica quântica relativística, acontecem na escala da geometria euclidiana.

As forças fundamentais da natureza: eletromagnética, nuclear forte e nuclear fraca são representadas respectivamente pelos parâmetros; α_e , α_s , α_w , os quais são chamados constantes de acoplamento das forças fundamentais. Contudo, sabe-se que esses parâmetros só são constantes em baixas energias. Isso significa que as três forças fundamentais, as quais são representadas pelos três parâmetros, só diferem entre si nessas circunstâncias. De fato, é possível demonstrar que os três parâmetros variam de maneira diferente entre si, ou seja, variam de acordo com o fator de escala da energia do experimento; (Q^2) . Portanto, os experimentos de laboratório permitem concluir que: α_e , α_s , α_w são funções de (Q^2) , logo, variam de acordo com as altas energias dos aceleradores de partículas.

O gráfico da Figura 4.19 mostra como os três parâmetros de acoplamento – $\alpha(Q^2)$ – variam em função da energia GeV, mas, mostra também que existe um ponto em que os três parâmetros assumem o mesmo valor. Como se sabe, apenas a força eletromagnética e a força nuclear fraca foram unificadas. De fato existe um empecilho para a unificação das três forças: a elevada energia - 10^{15} GeV - exigida do acelerador, que é praticamente impossível com os recursos tecnológicos atuais. Na supersimetria, a energia para a unificação é da ordem de 10^{16} GeV.

Aceleradores de Partículas

A primeira partícula. Em 1877, J. J. Thomson, após analisar a deflexão de raios catódicos em campos elétricos e magnéticos estabeleceu a relação do quociente; carga/massa de partículas positivas e negativas. Então, percebendo uma nítida diferença de comportamento entre elas, ele concluiu que partículas com carga negativa tinham pequena massa em comparação com a massa atômica. Contudo, as partículas positivas – chamadas íons – tinham massa equivalente a massa atômica. Thomson denominou a partícula negativa, elétron, palavra que vem do latim *electrum*. O termo *electrum*, por sua vez, tem origem grega – século V a.C. – é a palavra usada para designar a propriedade adquirida pelo âmbar, de atrair pequenos objetos, após ser esfregado com pele. {[92]; 2}.

A existência do fóton foi comprovada por Albert Einstein em 1905, através dos quanta de luz do efeito fotoelétrico. Em 1919 Ernest Rutherford produziu o núcleo do hidrogênio através de bombardeio com partículas α . Ele chamou o núcleo de próton. Em 1931, James Chadwick descobriu a partícula, neutro. Em 1932, Carl D. Anderson, através de experimentos com raios cósmicos no topo de montanhas, e usando a

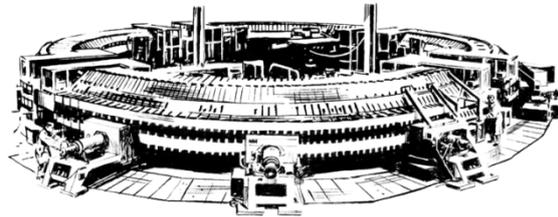


Figura 4.20 – Acelerador cosmotron

câmara de nuvens fotografou eventos comprovando a existência do pósitron. Assim, ele demonstrou a existência da partícula prevista por Paul Dirac. {[99]; 11}

Nos anos 40 do século passado outras partículas foram detectadas através de experimentos com raios cósmicos. Entretanto, tornou-se evidente que certas propriedades como massa, tempo de vida, spin, etc. só poderiam ser mensuradas nas condições controladas de laboratórios apropriados. O fato é que alguns aceleradores de partículas já existiam nessa época como o Berkeley 184 Synchrocyclotron. No entanto, constatou-se que equipamentos com capacidade de acelerar energias bem mais altas eram necessários para a pesquisa das partículas pesadas. Assim, uma sucessão de aceleradores mais potentes começou a surgir a partir dos anos 50.

Figura 4.21 - Vista aérea do Stanford Linear Accelerator Center - SLAC. Palo Alto, CA.



O primeiro desses aceleradores, que chama atenção, é o Cosmotron, um acelerador de prótons que começou a operar em 1953 no Brookhaven National Laboratory, USA, com energia de 2,2 GeV. Figura 4.20. O equipamento funcionou até o final dos anos 60. Em 1955 o primeiro acelerador linear de elétrons – capaz de acelerar na época a energia 1 GeV – operava na Universidade de Stanford. Figura 4.21. O equipamento foi construído no Stanford Linear Accelerator Center, e após vários “upgrades”, a instalação permanece produzindo ciência, e graças a vários trabalhos de relevância já fez jus ao premio Nobel algumas vezes, como no caso da descoberta da partícula tau (τ) e do quark-c (charm). {[99]; 21}

Em 1962, da família dos léptons já haviam sido contabilizadas oito partículas: *elétron, pósitron, neutrino do elétron, anti-neutrino do elétron, muon, neutrino do muon, antimuon e antineutrino do muon*. Nessa época, Murray-Gell Man do Caltech, CA, USA, estava aprofundando a pesquisa das partículas denominadas hadrons, particularmente os barions e mesons. No entanto, embora o quark strange tivesse sido identificado em eventos dos raios cósmicos nos anos 50, os primeiros quarks só começaram a ser descobertos nos aceleradores de partículas no final dos anos 60. {[63]; 7}

Circulares ou lineares

A descoberta de novas partículas é feita acelerando-se prótons ou elétrons até altas energias, para em seguida provocar colisões contra um alvo que pode ser fixo, ou outro feixe de partículas em sentido contrario. Os aceleradores onde as colisões acontecem entre feixes de partículas são também chamados colidores. Os aceleradores destacados pela Tabela 4.4 provocam colisões do tipo: e^- / e^+ (elétron - pósitron); p / p (próton - próton); p / p^- (próton - antipróton); e^- / p (elétron - próton). Colisões do tipo próton/próton como no LHC são extremamente dispendiosas devido a energia necessária nas colisões (7 TeV). Mas, sabe-se que há um preço a pagar quando se trabalha na fronteira do conhecimento.

Para atingir altas energias os aceleradores podem ser circulares – usando uma combinação de campo elétrico com campo magnético em radio frequência – como no caso dos cíclotrons, sincrocíclotrons e sincrotrons. Ou podem ser lineares – usando campos elétricos de alta frequência – os quais são chamados de LINACS. Existem ainda outros tipos de aceleradores como Betatrons ou mesmo sincrotrons, que aceleram as partículas através do campo elétrico induzido por um fluxo magnético variável. Ver Tabela 4.4. {[99]; 51,52}

Tabela 4.4

Nome do acelerador	Localidade	Partículas	Energia por feixe
Tevatron	Fermi National Accelerator Laboratory, Batavia, Illinois, USA	$p - p^-$	1 TeV
HERA	Deutsches Electronen Synchrotron – DESY, Hamburg, Germany	$e^- - p$	e^- : 26 GeV p : 820 GeV
SLC	Stanford Linear Accelerator. (SLAC). Palo Alto, CA, USA	$e^+ - e^-$	50 GeV
LHC	CERN – Fronteira Franco-Suíça	$p - p$	7 eV

Na colisão entre partículas é importante que o choque ocorra com a energia mais alta possível em relação ao denominado centro de massa (CM) do sistema de referência. O fato é que essa é a energia disponível para a criação de novas partículas.

{[63]; 5} Os aceleradores de alvo fixo trabalham sob custo mais elevado do que os colisores, para produzir a mesma quantidade de energia que é necessária para criar novas partículas.

Isso acontece porque ao atingir o alvo, parte da energia ganha na aceleração é perdida no choque. Por outro lado, nos colisores, o chamado centro de massa está em repouso em relação ao acelerador, logo, toda a energia ganha na aceleração torna-se disponível para gerar uma nova partícula. {[7]; 1262} Assim, tornou-se uma tendência após os anos 60, a predominância dos aceleradores do tipo colisor em relação aos aceleradores de alvo fixo.

Detectores

O desenvolvimento do Modelo Padrão das partículas deve muito à física experimental dos aceleradores de partículas. Contudo, a pesquisa nos aceleradores depende da capacidade de se identificar as partículas geradas nas colisões. E essa é a função dos detectores de partículas.

Detector de partículas é o equipamento acoplado ao acelerador para registrar os tipos de partículas geradas nas colisões. A identificação é obtida pelo traço da energia deixada pela partícula na tela do detector. Ver a Figura 4.23. Ou, pelos traços de energia das partículas resultantes do seu decaimento em partículas menores. Os primeiros detectores capturavam os traços da energia depositada na emulsão fotográfica suspensa em uma placa, papel ou filme. Essa técnica foi bastante usada até os anos 50.

Antes do estágio atual, a identificação de uma partícula recorria à propriedade dos líquidos – próximos ao ponto de ebulição – formarem bolhas nos íons criados ao longo da trajetória da partícula com carga que o atravessava. Essa técnica, usada até os anos 80, usava hidrogênio líquido e era denominada câmara de bolhas.

Já outra técnica anterior – chamada câmara de nuvem de vapor – recorria a um fenômeno similar. Nesse caso, uma câmara preenchida com vapor saturado, ao ser percorrida por uma partícula carregada formava gotas condensadas no percurso da partícula. Quando a câmara era iluminada, o traçado das gotas podia ser fotografado, revelando assim a trajetória da partícula. O pósitron e o muon foram descobertos nesse tipo de câmara. {[99]; 75}

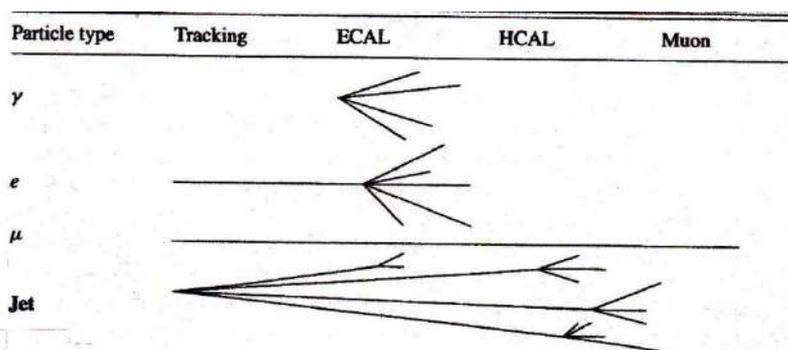


Figura 4.22

Detalhes do “Tracking” (rastreamento) da colisão entre partículas de um acelerador, e seus subprodutos.

Entretanto, a captura da energia pelos detectores atuais é feita por aparelhos chamados calorímetros. Portanto, a energia é capturada em um processo destrutivo que absorve a energia cinética das partículas. A energia dos elétrons e fótons é absorvida pelo Calorímetro Eletromagnético (ECAL). Já a energia de partículas pesadas como quarks e glúons é absorvida pelo Calorímetro Hadrônico (HCAL). O mais comum é o uso de detectores multipartículas, formados por camadas cilíndricas superpostas concêntricas encaixadas em torno do ponto de colisão. Cada componente registra os dados específicos de determinado tipo de partícula. {[99]; 32}

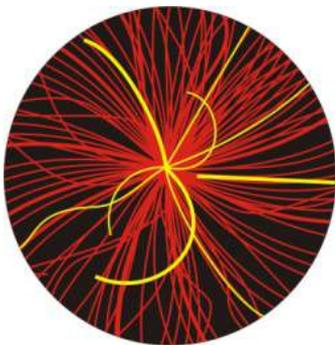


Figura 4.23

Em um detector, o registro da trajetória das partículas é chamado “tracking”. Ver Figura 4.23. Observe-se que a trajetória das partículas geradas nas colisões é armazenada no sistema de dados do experimento monitorado pelo detector. A recuperação posterior permite confirmar o resultado das colisões. Através do “tracking” de uma partícula sabe-se que: partícula curvada em um sentido possui carga positiva; partícula curvada em sentido oposto possui carga negativa; partículas pesadas como o muon têm momentum elevado, logo, a trajetória aproxima-se de uma reta; partículas com baixo momentum formam espirais. ; etc.

Por sua vez, partículas pesadas formam “jets” ou (jatos), os feixes de linhas retas que terminam em ramificações múltiplas, típicas dos quarks. Ver a Figura 4.22.

LHC

LHC é o acelerador de partículas onde estão sendo feitas pesquisas fundamentais para o Modelo Padrão das partículas. O LHC visa colisões frontais de prótons em dutos à vácuo, separados, mas que se cruzam em quatro pontos (interconexões). Em um dos dutos as partículas movem-se no sentido horário, e no outro, em sentido anti-horário. As colisões nas interconexões acontecem em pontos de dimensão menor do que 10 pico-metro, de alta densidade de energia. Quando o LHC estiver funcionando a plena carga a energia da colisão será equivalente a 14TeV. Ver as figuras: 4.24 e 4.26.

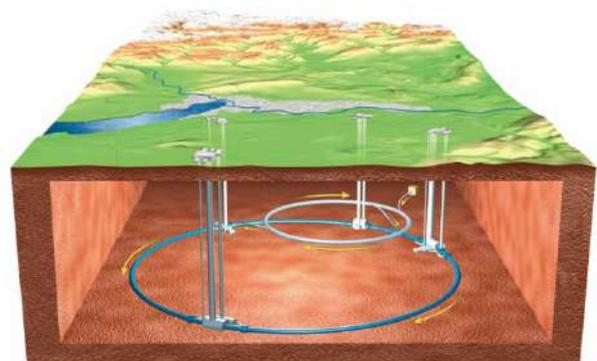


Figura 4.24 – Vista panorâmica do LHC. Em Julho de 2012 foi anunciado ainda de forma não oficial a descoberta do **bóson de Higgs** pelos físicos do CERN.

Ao colidirem, os prótons são “quebrados” em partículas menores e assim revelam seus elementos constituintes. O desafio é recriar as condições dos eventos ocorridos antes do Universo ter um pico - segundo de idade. É tal como se os físicos tentassem espiar o interior da matéria em busca de

segredos escondidos em espaços muitas vezes menores do que prótons e neutros. Os quatro principais detectores de partículas do LHC são:

1. ALICE – Analisa o plasma Quark-Gluon formado na colisão entre prótons.
2. LHCb – Procura evidências da diferença entre matéria e antimatéria.
3. ATLAS – Busca evidências do bóson de Higgs e da energia escura do Universo.
4. CMS -- Deve confirmar os resultados do detector ATLAS, mas, usando tecnologia diferente.



Figura 4.25 - LHC - CMS, parte central.

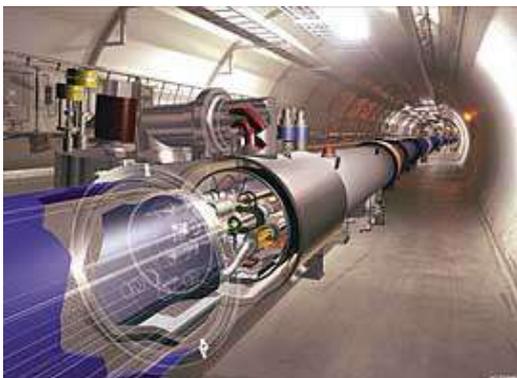


Figura 4.26 - LHC - Interior do túnel principal

Os experimentos do LHC procuram respostas para questões como: Porque os quarks têm massas tão diferentes entre si? Qual a massa do bóson de Higgs? Do que é feita a

matéria escura fria que permeia o Universo? A Supersimetria (SUSY) substituirá o Modelo Padrão atual? Porque a matéria prevaleceu sobre a antimatéria no início do Universo? Sobre essas questões ver também no presente capítulo; Estágios do Universo, e, Um pico-segundo.

Telescópios de neutrinos

São detectores formados por gigantescos reservatórios de água ou gelo localizados a centenas de metros abaixo da superfície da Terra, para evitar que partículas locais mascarem o resultado das medições.

A descoberta dos neutrinos começou em 1930 através da radioatividade do decaimento beta. Nessa oportunidade verificou-se que além do elétron emitido havia um “excesso” de energia que não se podia identificar. Esse excesso de energia foi batizado por Fermi em 1933 como neutrinos. Mais tarde, o excesso de energia foi denominado antineutrino. {[21]; 23,24} O experimento decisivo sobre a existência da partícula aconteceu em meados dos anos 50 no reator nuclear da usina Savannah River na Carolina do Sul, EUA. {[21]; 26}

Uma conhecida fonte de neutrinos é o Sol. No entanto, as pesquisas sobre os neutrinos vêm crescendo graças às observações sobre partículas de alta energia e fótons com origem além do sistema solar. Desde o início do século XX sabe-se que ao atingir a Terra, os raios cósmicos produzem chuvas de partículas secundárias na atmosfera. Calcula-se que esses raios são produzidos por aceleradores naturais situados no cosmos com uma energia que seria impossível de ser obtida em aceleradores terrestres. Por exemplo, sabe-se de casos de radiações com energia acima de 10^8 TeV.

A investigação de neutrinos de alta energia serve também para a pesquisa de outras questões da astrofísica. Há o caso, por exemplo, da procura da matéria escura do cosmos. Ou, a busca da localização das relíquias cósmicas chamadas monopolos magnéticos. Existem também pesquisas sobre a oscilação da natureza (mudança de sabor) do próprio neutrino. As mais prováveis fontes dos raios cósmicos que levam aos neutrinos de alta energia são: Remanescentes de supernovas; Buracos Negros no centro de galáxias ativas (AGN), onde partículas de alta frequência são aceleradas a partir da região central à medida que o Buraco Negro devora a matéria do seu entorno; Microquasares; Explosões de raios gama (GRBs), etc.

A captura de neutrinos é dificultada pela fraca interação da partícula com a matéria. Os neutrinos são detectados indiretamente pelo processo denominado radiação Cherenkov. Nos telescópios de neutrinos, os sensores são inseridos nas paredes de gigantes reservatórios de água ou gelo, subterrâneos ou no fundo do mar (Telescópio Antares). Exemplos de experimentos para captura de neutrinos solares são: Gallex/GNO; SAGE; Homestake; Kamiokande; Superkamiokande; SNO.

Neutrinos atmosféricos. Os raios cósmicos primários são aqueles compostos principalmente de prótons, e em menor proporção, de núcleos pesados. Os neutrinos atmosféricos surgem da interação dos raios cósmicos com esses núcleos. Sabe-se que os neutrinos ν_μ das radiações cósmicas incidentes na atmosfera são reduzidos a metade após milhares de quilômetros através da Terra. Os neutrinos “desaparecidos” são transformados provavelmente em neutrinos ν_τ . {[68]; 98} Portanto, a ideia de que neutrinos atravessam a matéria sem interagir com

ela é uma verdade parcial. Ao atravessar a matéria os neutrinos podem mudar de velocidade como acontece com raios luminosos. {[68]; 370}

Pesquisas mostraram que os neutrinos desaparecidos são de fato partículas que mudam de sabor após interagir com a matéria. Isso foi demonstrado em 2002 no observatório – SNO – situado em uma mina a 2Km do solo no Canadá. Confirmou-se então que parte dos neutrinos do elétron muda de sabor e se transforma em neutrinos do muon enquanto outra parte é transformada em neutrinos do tauon. Entretanto, é intrigante saber que a mudança de sabor dos neutrinos viola o parâmetro quântico chamado; número leptônico de sabor, que deveria ser conservado sob quaisquer circunstâncias.

O telescópio Superkamiokande é uma versão amplificada do telescópio Kamiokande. O Superkamiokande é formado por 50 K ton de água ultra purificada em um cilindro de aço inox separado em duas partes; uma interna e outra externa, com altura total de 41,4 m e diâmetro de 39,3 m. A instalação está situada nas profundezas da mina

Kamioka no Japão, e começou a operar em Abril de 1996. {[111]; 230}



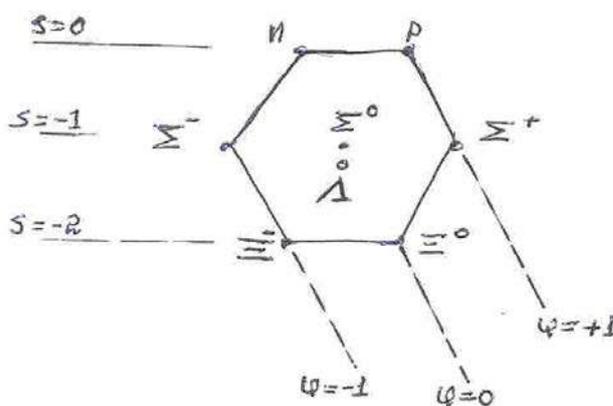
Figura 4.27 - Maquete do Kamiokande, com capacidade de 2140 ton de água.

Hadrons

O trabalho de Murray Gell-Mann do CALTECH, EUA, no início dos anos 60, aprofundou o conhecimento que havia sobre as partículas atômicas pesadas, que viriam a ser conhecidas pelo nome genérico de hadrons. Os hadrons são divididos em bárions e mesons. Portanto, quando nessa época se passou a catalogar partículas aparentemente sem conexão entre si como; η , ρ , Σ^+ , Σ^- , Σ^0 , Λ , Ξ^- , Ξ^0 , que surgiram de experimentos dos novos aceleradores, os prótons e neutros ainda eram considerados as menores partículas do núcleo do átomo.

No entanto, quando as partículas descobertas passaram a ser classificadas por propriedades batizadas como: carga (Q), estranheza (S) e Isospin (I_p), surpreendentemente foi constatado que essas propriedades associavam as novas partículas a figuras geométricas simétricas como octaedros, decágonos, triângulos, etc. Percebeu-se então que esse fato era uma forte evidencia de que não se estava diante apenas de propriedades aleatórias das partículas, mas, que haviam sido descoberto novas qualidades da matéria.

Figura 4.28



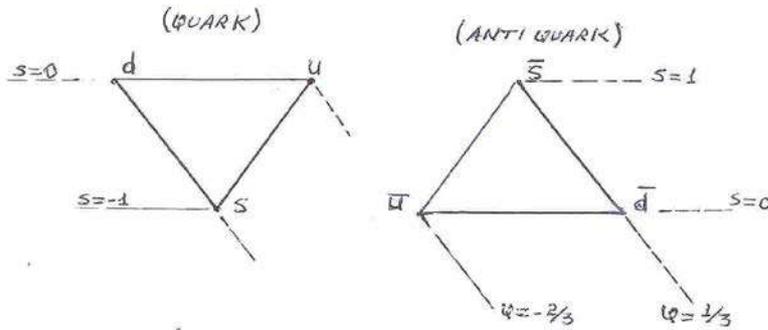
OCTETO DE BARIONS

PARTICULA	S	Q
n	0	0
p	0	1
Σ^-	-1	-1
Σ^+	-1	1
Σ^0	-1	0
Λ	-1	0
Ξ^-	-2	-1
Ξ^0	-2	0

Considerando-se as propriedades comuns a todas, as oito partículas citadas aqui inicialmente formam um octaedro. Figura 4.28. Assim, concluiu-se que havia sido descoberta outra grande simetria da natureza. Ao mesmo tempo, o octaedro das partículas foi batizado como “The Eightfoldway”. Observe-se, entretanto, que a figura em si mesma não representa a interação das partículas entre si. Ela apenas evidencia as qualidades que são comuns, logo, o octaedro deixa subentendido que existem varias simetrias na interação entre essas partículas.

Ao se conjecturar sobre essas descobertas, concluiu-se que a repetição de padrões era uma forte evidencia de que o conjunto das novas partículas devia ter um comportamento comum em relação às forças da natureza. Observe que nessa época não havia ainda o recurso aos grupos de Lie no estudo das partículas, ou seja, a álgebra que dá suporte matemático no calculo da interação através da ferramenta chamada teoria dos grupos. {[51]; 95}

No início dos anos 60 as pesquisas nos aceleradores de partículas não dispunham ainda de equipamentos para investigar experimentalmente a constituição dos bárions.



Cada partícula da física quântica possui uma antipartícula correspondente. Logo, a cada quark corresponde um antiquark com carga e estranheza opostos. A figura à esquerda mostra essa simetria dos quarks: u, d, s.

QUARK	CARGA (Q/e)	ESTRANHEZA (S)
u (up)	2/3	0
d (down)	-1/3	0
s (estranho)	-1/3	-1

Figura 4.29

Barions e mesons

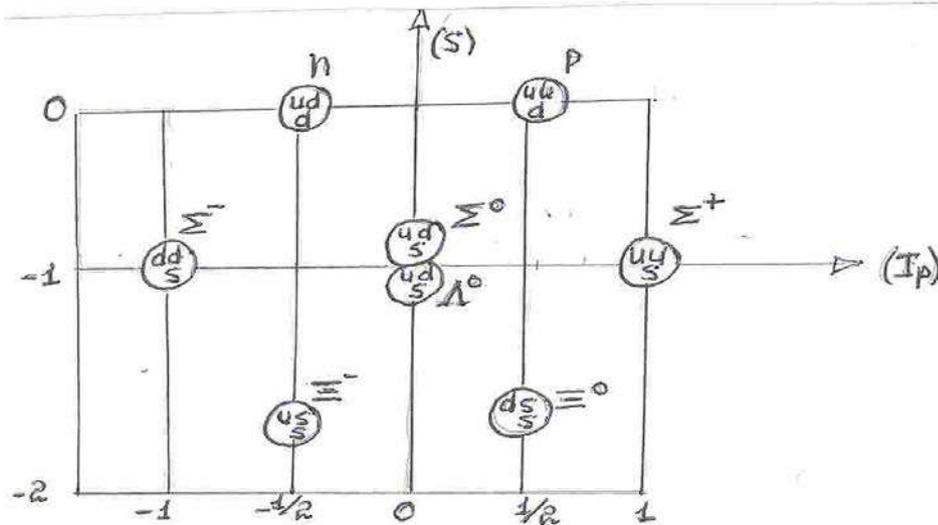
Octetos de barions e mesons. O Eightfoldway, ou, o octeto descoberto por Gell-Mann, propõe a classificação de partículas através de simetrias. Isso significa que o octeto especifica propriedades que devem ser conservadas na interação da matéria com as forças da natureza. Essas propriedades são carga, estranheza e Isospin. Ver as figuras; 4.28 e 4.30.

A simetria entre as novas partículas tornou sua física ainda mais desafiadora, após ser descoberto em 1964, que prótons e neutros, que são chamados de barions, deviam ser compostos de três partículas ainda menores, as quais foram batizadas como quarks. Os primeiros quarks foram denominados: u (up) e d (down). Os valores da carga e estranheza dos quarks são especificados considerando-se que as partículas devem obedecer às leis de conservação. Ver a tabela da Figura 4.29.

Descobriu-se ainda que os mesons eram formadas por um quark e um anti-quark. Os primeiros anti-quarks descobertos foram: u (barra), d(barra) e s(barra). Por outro lado, a partir de outras descobertas e recorrendo-se às simetrias comuns entre as partículas, foi construído o Decuplete de Barions, que é um triângulo elaborado também em função das propriedades: estranheza e carga, de dez partículas. {[21]; 34}

Um núcleon, como é chamado o próton, ou o neutro, é constituído de três quarks, que pode ser do tipo d ou u. Por outro lado, a configuração como próton ou neutro deve ser definida no espaço do Isospin.

Observe-se que no início dos anos 60, os aceleradores de partículas disponíveis não dispunham da energia para investigar a constituição dos barions. Logo, não havia como comprovar experimentalmente que eles eram formados por subpartículas.



Octeto de bárions. O eixo horizontal da figura à esquerda representa o isospin (I_p) das partículas, e o eixo vertical, a estranheza.

Figura 4.30

Em 1964 Gell-Mann e George Zeig propuseram separadamente o enunciado teórico onde afirmaram que todos os hadrons são formados por partículas ainda mais elementares denominadas quarks. {[21]; 37}

Segundo esse conceito, cada quark possui uma antipartícula, que também tem as propriedades: carga e estranheza como são mostrados na Figura 4.29. Portanto, para se construir o Eightfold Way (octeto) de Gell-Mann e George Zeig – em um sistema de coordenadas cartesianas – indica-se o isospin (I_p) no eixo horizontal, enquanto a propriedade batizada de hipercarga (Y) deve ser marcada no eixo vertical. Esses elementos encontram-se na Figura 4.30.

Atualmente, a propriedade hipercarga é definida pelo número de quarks do tipo s que a partícula possui. Por esse motivo, a propriedade hipercarga passou a se chamar estranheza da partícula. {[51]; 198}

Mesons escalares

A Figura 4.30 exibe detalhes dos seguintes bárions: $n, p, \Sigma^-, \Sigma^0, \Sigma^+, \Lambda^0, \Xi^-, \Xi^0$. Por outro lado, assim como aconteceu com esses bárions, também foi estabelecido um octeto das partículas denominadas mesons, o qual é chamado “pseudoocteto de mesons escalares”. O octeto foi construído a partir da combinação de quarks e anti-quarks como mostra a Figura 4.31. {[50]; 896}

A comprovação de que bárions e mesons eram compostos de quarks e antiquarks só foi possível após alguns anos da descoberta dos octetos. O que levou ao desenvolvimento da Cromodinâmica Quântica, que é uma teoria de calibre. Contudo, sabe-se que antes disso, a ideia de associar as simetrias das partículas elementares à teoria dos grupos de Lie já havia levado ao desenvolvimento da Eletrodinâmica Quântica. Ambas as teorias integram o modelo padrão das partículas elementares da matéria.

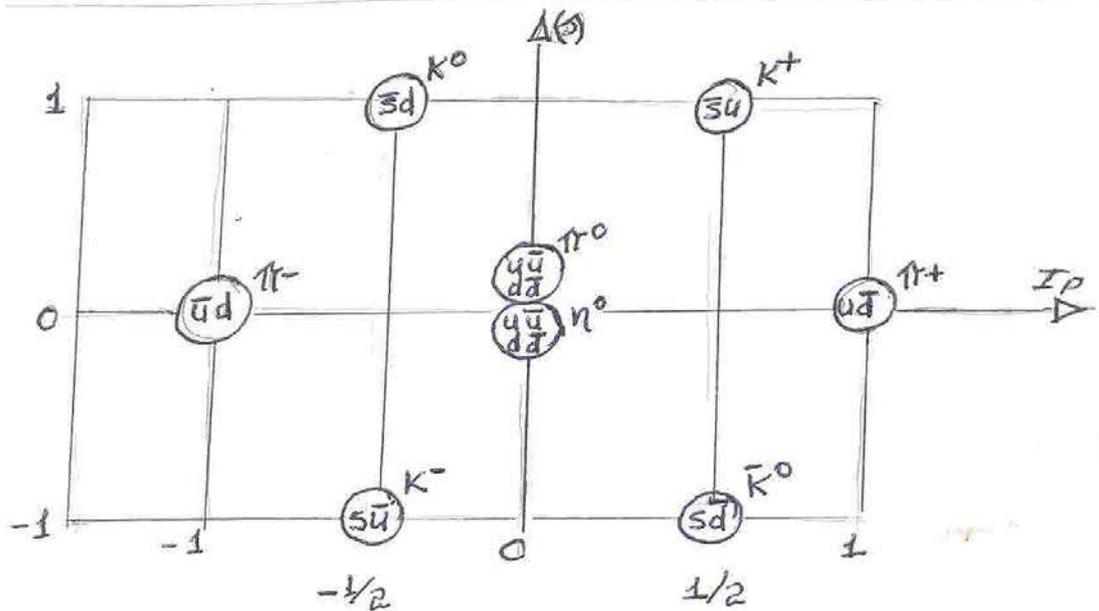


Figura 4.31

A Figura 4.31 é denominada “Pseudo-octeto de mesons escalares”. As partículas do centro da figura são constituídas por dois quarks e dois antiquarks. As demais são constituídas cada uma por um quark e um antiquark.

O ano em que Gell-Mann propôs que bárions e mesons são formados por quarks e antiquarks coincidiu com a descoberta em laboratório do bárion Ω^- . Essa partícula já era parte de um decuplete que havia sido previsto anteriormente. A partícula Ω^- é composta por três quarks do tipo s, porém com cargas de cores diferentes entre si. Outros conjuntos de bárions formando figuras geométricas diferentes das primeiras também foram descobertos a partir dos experimentos em laboratórios.

No final dos anos 60, pesquisadores do SLAC, o acelerador de partículas da Universidade de Stanford, EUA, descobriram finalmente, em conjunto com pesquisadores do MIT, EUA, os quarks u (upper) e d (down). Já os quarks c (charm) e b (bottom) foram descobertos nos anos 70. O quark t (top) foi descoberto em 1995.

As Partículas

Resumo. Um parâmetro que distingue os férmions – leptons e quarks – entre si é a carga. A carga do férmion determina o tipo de força a qual ele é susceptível. Entretanto, o férmion é susceptível a mais de um tipo de força. Logo, isso significa que ele possui mais de um tipo de carga. Os quarks têm carga de cor, que é sensível à força nuclear forte. Entretanto, eles também possuem carga de sabor, carga elétrica e massa, portanto, são sensíveis também às forças: nuclear fraca, eletromagnética e gravitacional.

Elétron, tauon e muon têm carga elétrica, carga de sabor e massa, logo, são sensíveis à força eletromagnética, à força nuclear fraca, e à força gravitacional, respectivamente. Neutrinos têm massa - embora essas sejam muitas vezes consideradas desprezíveis - além de carga de sabor, mas não têm carga elétrica, portanto, são sensíveis à força nuclear fraca e à força gravitacional.

Partículas transitórias

O conjunto das partículas do modelo padrão possui partículas estáveis, mas, possui também elementos volateis, ou seja, partículas transitórias com duração incrivelmente reduzidas como é o caso dos quarks da segunda e da terceira geração.

As gerações de léptons e quarks. Os quarks da Tabela 4.5 encontram-se na ordem cronológica de suas descobertas. Logo, os dois primeiros, up e down, foram os que deram início à serie das descobertas. Em seguida vieram o charm e o strange. Depois foi descoberto o top, e por ultimo, o bottom. Os leptons mostrados na tabela também se encontram na ordem cronológica de suas descobertas.

Portanto, tornou-se lugar comum afirmar que os férmions são formados por três gerações de partículas.

De qualquer forma, sabendo-se que a matéria comum é formada praticamente pelos quarks; u, d, além do elétron (e^-) – a massa do neutrino ν_e é quase nula – uma questão recorrente da Física das partículas é indagar a razão de existirem três gerações de férmions. Observe-se que os outros férmions são constatados apenas nos experimentos de laboratório. Assim, a questão continua sem resposta, pois não há ainda uma explicação plausível, que justifique a necessidade de existirem três gerações de férmions.

- FERMIONS - QUARKS - SPIN = 1/2				
SABOR	SÍMBOLO	CARGA DE COR	MASSA(GeV)	CARGA ELÉTRICA (Q/e)
UP	u	vermelho Azul Amarelo	0,003	2/3
down	d	" " "	0,01	-1/3
charm	c	" " "	1,5	2/3
strange	s	" " "	0,15	-1/3
top	t	" " "	178	2/3
bottom	b	" " "	5	-1/3

LEPTONS SPIN = 1/2			
SABOR	SÍMBOLO	MASSA	CARGA (Q/e)
elétron	e^-	0,005 GeV	-1
Neutrino do elétron	ν_e	0	0
tauon	τ	1,5 GeV	-1
Neutrino do tauon	ν_τ	0	0
muon	μ	0,1 GeV	-1
Neutrino do muon	ν_μ	0	0

Tabela 4.5 – Quarks e Leptons, as partículas da matéria elementar do Modelo Padrão.

A matéria. À esquerda; O conjunto de férmions do modelo padrão atual das partículas é composto de dezoito quarks e seis léptons.

Total das partículas

O quadro geral das unidades elementares do modelo padrão das partículas é composto do seguinte: Em primeiro lugar existem 12 férmions, ou seja, seis tipos de quarks e seis tipos de leptons. Todavia, sabe-se que cada

quark existe em três cores: vermelho, azul, amarelo, logo, o total de férmions é 24. Ver a Tabela 4.5. Por outro lado, como cada férmion possui um antiférmion correspondente com massa e spin iguais, mas, com carga elétrica, sabor e carga de cor com sinais opostos, a soma de antiférmions é igual a 24 partículas. Conclui-se então que o total do conjunto completo de férmions e antiférmions é 48. {[48]; 7,10}

Sabe-se também que as forças fundamentais da natureza são quatro; Eletromagnética, Gravitacional, Nuclear Forte e Nuclear Fraca. E os correspondentes bósons de força são: fóton, gráviton, glúon, e os bósons vetoriais: W^+ , W^- , Z^0 . Isso significa que; O fóton transporta a força eletromagnética; O gráviton transporta a força gravitacional; O glúon transporta a força nuclear forte; E os bósons denominados vetoriais transportam a força nuclear fraca.

Férmions, antiférmions e bósons. O atual Modelo Padrão das partículas não leva em conta a interação gravitacional. Ver a Tabela 4.7. O efeito dessa força é considerado desprezível em dimensões subatômicas. Ao mesmo tempo, sabe-se que a força gravitacional não é renormalizável, isso significa que no cálculo da interação não se obtém valores finitos. Por outro lado, sabe-se que as outras três forças são renormalizáveis. {[63]; 7}

Portanto, excetuando-se a força gravitacional, restam os seguintes bósons de força: Fóton (γ), W^+ , W^- , Z^0 . Existem ainda os oito glúons da força nuclear forte. Logo, tudo isso acrescenta doze partículas à lista, como bósons de força. Finalmente, sabendo-se que existe ainda a partícula de Higgs, chega-se à conclusão de que a soma total de partículas do Modelo Padrão é igual a 61.

Antimatéria – A antimatéria do Modelo Padrão é composta de dezoito antiquarks e seis antileptons, como mostra a Tabela 4.6.

— ANTI-FERMIONS (ANTI-QUARKS) — SPIN = 1/2				
SABOR	SÍMBOLO	CARGA DE COR	MASSA (GeV)	CARGA ELÉTRICA (e/e)
anti-up	\bar{u}	Vermelho Azul Amarelo	0,005	-2/3
anti-down	\bar{d}	" " "	0,01	+1/3
anti-charm	\bar{c}	" " "	1,5	-2/3
anti-strange	\bar{s}	" " "	0,15	+1/3
anti-top	\bar{t}	" " "	178	-2/3
anti-bottom	\bar{b}	" " "	5	+1/3

Tabela 4.6

— ANTI-LEPTONS SPIN = 1/2 —			
SABOR	SÍMBOLO	MASSA	CARGA (e/e)
POSITRÓN	e^+		+1
ANTI-NEUTRINO DO ELÉTRON	$\bar{\nu}_e$		0
ANTI-TAÚON	$\bar{\tau}$		+1
ANTI-NEUTRINO DO TAÚON	$\bar{\nu}_\tau$		0
ANTI-MUÓN	$\bar{\mu}$		+1
ANTI-NEUTRINO DO MUÓN	$\bar{\nu}_\mu$		0

Tabela 4.7 (abaixo) - A tabela relaciona as três interações da Época GUT. Ver também; Estágios do Universo.

BOSONS DE FORÇA			
INTERAÇÃO	QUANTUM DE CAMPO	CARGA ASSOCIADA	SPIN
ELETROMAGNÉTICA	FÓTON (γ)	CARGA ELÉTRICA	1
NUCLEAR FRACA	W^+ , W^- , Z^0	SABOR	1
NUCLEAR FORTE	GLUON (g)	COR	1

Tabela 4.7

Supersimetria

O Modelo Padrão da física da matéria é composto de 61 partículas elementares. Até recentemente todas as partículas haviam sido comprovadas em laboratório exceto o bóson de Higgs. Contudo, físicos do CERN anunciaram sua descoberta, embora de forma não oficial, no início de Julho de 2012. O LHC, que foi desligado em 2012, deverá voltar a operar em 2015. Todavia, as pesquisas realizadas no LHC deverão ser ainda mais abrangentes. Portanto, é muito provável que graças às descobertas do LHC, no futuro não muito distante, a física das partículas deverá reformar seu modelo atual.

Através das pesquisas fomentadas pelo satélite WMAP – Wilkinson, da NASA, constatou-se que apenas 4% da matéria do Universo, a chamada matéria barionica, é considerada no Modelo Padrão das partículas elementares. Portanto, deduz-se que 96% daquilo que constitui o Universo, que corresponde à matéria e energia escura, não estão incluído no Modelo Padrão atual. Isso significa que, embora o modelo seja capaz de explicar a matéria barionica com a qual se lida na Terra, a maior parte da matéria do Universo ainda não faz parte da teoria.

Por tudo isso, a conclusão final é que o Modelo Padrão atual deverá ser modificado para incluir a teoria da matéria e energia escura do Universo. De qualquer maneira, sabe-se que isso já está sendo feito no chamado Modelo Mínimo da Supersimetria.

- um novo Modelo Padrão.

Matéria escura é a hipotética substância que se calcula existir no halo da Via Láctea, a qual permite que a rotação da Galáxia seja uniforme. Estima-se que a energia escura é a energia do vácuo que está acelerando a expansão do Universo. O Modelo Padrão

das partículas de matéria atual não dispõe ainda de uma teoria completa para investigar a matéria escura, nem a energia escura do Universo. Assim, a nova teoria, supersimetria, está sendo desenvolvida pela física para a inclusão da matéria escura e da energia escura. O modelo da supersimetria é também chamado SUSY. Ver a Tabela 4.8.

Uma possível partícula de matéria escura é o neutralino, que é a denominação genérica do fotino e do higsino. Essas protopartículas são candidatas à matéria escura do modelo provisório; MSSM, ou, Modelo Mínimo da Supersimetria. O MSSM é um embrião do modelo padrão das partículas elementares da física do futuro não muito distante. Por isso, hipóteses sobre o fotino e o higsino serão testadas no LHC. {[63]:209}

Partículas como os neutralinos recebem ainda a denominação; LSP (Light SUSY Particles). Outra denominação genérica é WIMP: Weakly Interacting Massive Particle, as quais possuem massa equivalente a dezenas de GeV. Contudo, esse valor elevado de energia dificulta suas descobertas através dos aceleradores tradicionais. Logo, aguarda-se sua comprovação nos experimentos do LHC. O fato é que a elevada quantidade de energia disponível em experimentos no LHC poderá comprovar várias partículas que hoje são apenas hipóteses.

No modelo SUSY, cada férmion ou bóson tem um superparceiro, logo, o total de partículas em comparação com modelo padrão atual é duplicado. Existe a previsão de que varias partículas do início do Universo e que não fazem parte do modelo padrão atual – baseado na simetria de calibre – poderão ser descobertas pelo LHC logo, poderão ser incluídas na supersimetria. Estima-se também que a unificação das forças fundamentais na supersimetria deve acontecer sob a energia; 10^{16} GeV.

<i>Partícula</i>	<i>Spin</i>	<i>Superpartícula</i>	<i>Spin</i>
<i>Lepton</i>	1/2	slepton	0
<i>Quark</i>	1/2	squark	0
<i>Gráviton</i>	2	gravitino	3/2
<i>Photon</i>	1	photino	1/2
<i>Gluon</i>	1	gluino	1/2
<i>Higgs</i>	0	higgsino	1/2

Tabela 4.8 – A tabela à esquerda relaciona algumas superpartículas do Modelo SUSY. O modelo deve ser testado no LHC.

Energia Nuclear

Basicamente, a energia atômica é aquela confinada no núcleo do átomo, logo, é a energia latente que mantém prótons e neutros unidos no núcleo dos elementos da Tabela Periódica. O princípio para extrair a energia do átomo é semelhante à engenharia reversa. Ou seja, significa recuperar a energia inicial do Big Bang usada para criar a matéria do início do Universo. A energia atômica é estudada pela física nuclear, por isso é também chamada energia nuclear.

Segundo Werner Heisenberg, na sua teoria do núcleo atômico, entre as partículas do núcleo do átomo existem forças que tem propriedades de permuta. Essas forças dependem de spins relativos, posições relativas, e posições e spins relativos. Assim, a interação específica entre dois prótons, entre um próton e um neutro, ou entre dois neutros é a mesma, independente da partícula ter carga ou não. Essa propriedade significa a independência da força nuclear em relação à carga das partículas.

A independência das forças fundamentais em relação à carga das partículas foi descoberta por Heisenberg em 1932. Foi denominada simetria do spin isotópico. Isso, em conjunto com o conhecimento de que prótons e neutros têm praticamente a mesma massa, criou a **simetria do Isospin**.

Segundo a ideia; O próton e o neutro são os componentes up e down da mesma partícula chamada nucleon. {[99];13,327.}{[154];93}

Portanto, para a física quântica do átomo, próton e neutro são considerados indistintamente como nucleons. Nessa teoria, um elemento atômico qualquer, suponha-se Y, deve ser representado na Tabela Periódica como: ${}^A_Z Y$, onde Y representa o nome do elemento, enquanto Z e A representam respectivamente o numero de prótons e a soma de prótons e neutros, os quais são chamados genericamente de nucleons. Logo, A é a massa atômica do elemento. {[154];33}. Em um núcleo atômico define-se energia interna como a soma da energia equivalente das massas (relativísticas) dos nucleons, mais a energia de ligação que os mantém unidos no núcleo.

No Modelo Padrão os nucleons são denominados genericamente de hadrons; Os estados confinados das partículas quark. Os quarks estão unidos nos hadrons pela força nuclear forte. Por outro lado, segundo a física nuclear, os núcleos são estados confinados de nucleons unidos por uma força de curto alcance independente da carga da partícula, associada à força nuclear forte. No entanto, essa força não é exatamente a mesma que une os quarks nos hadrons, embora seja consequência dela. {[154];3}

Energia de ligação

A Figura 4.32 mostra o gráfico da energia de ligação por nucleon, dos núcleos de elementos estáveis ou de longa duração em função da massa atômica (eixo horizontal), que é chamada curva SEMF. Observe-se que a primeira parte do gráfico é uma linha quase vertical cuja ordenada aumenta abruptamente a partir dos núcleos mais leves como o deutério (${}^2\text{H}$), onde a energia de ligação total por nucleon é igual a 1,1 MeV, em seguida alcança o hélio (${}^4\text{He}$) com energia de ligação igual a 7,1 MeV, e atinge o valor máximo com a energia de 8,7 MeV para o ferro. Contudo, a partir desse ponto a energia de ligação diminui lentamente para os núcleos dos elementos mais pesados como urânio e plutônio.

Fusão nuclear

O exemplo clássico da produção de energia por fusão nuclear ocorre no núcleo do Sol. Como foi mostrado na subseção Equilíbrio Hidrostático, do Capítulo 2, a reação de fusão denominada Ciclo-pp produz um excesso de energia igual a 26,2 MeV na fusão de átomos de hidrogênio para produzir o hélio. Entretanto, observe-se que o chamado Ciclo-pp começa de fato com a fusão de dois prótons do hidrogênio (${}^1_1\text{H}$) para formar um núcleo de deutério (${}^2_1\text{H}$). {[1];501} Logo, de fato, a equação mostrada é o resumo de um processo de várias etapas.

De qualquer maneira, o Ciclo-pp é citado aqui apenas como paradigma da produção de energia atômica por fusão nuclear. Portanto, é necessário recorrer a parte inicial do gráfico da Figura 4.32 para um melhor entendimento sobre a geração de energia nuclear pela fusão dos núcleos de dois elementos leves. Até a obtenção do ferro, a fusão nuclear é uma reação exotérmica, ou

seja, libera energia. Assim, em primeiro lugar deve-se levar em conta que na fusão haverá sobra da energia de ligação, que corresponde a energia interna dos núcleos iniciais. Observe-se que o total da energia de ligação por nucleon dos elementos leves, que é denominada energia interna, é maior do que a energia de ligação por nucleon necessária para a formação dos núcleos dos elementos mais pesados.

É verdade que individualmente, os núcleos mais leves têm energia de ligação por nucleon menor do que os núcleos mais pesados. Ver a Figura 4.32. Contudo, o aumento da energia de ligação dos elementos ascendentes da parte inicial da figura não acompanha o aumento da massa atômica de maneira proporcional. Em termos percentuais, a energia de ligação dos núcleos leves é até um pouco maior do que a dos núcleos mais pesados como o hélio. Esse fato faz com que seja viável a obtenção de energia atômica através da fusão de núcleos leves em núcleos mais pesados. Ver, Figura 4.35.

SEMF – Figura 4.32 – É a curva conhecida pelo acrônimo; *Formula Semi Empírica da Massa atômica.*

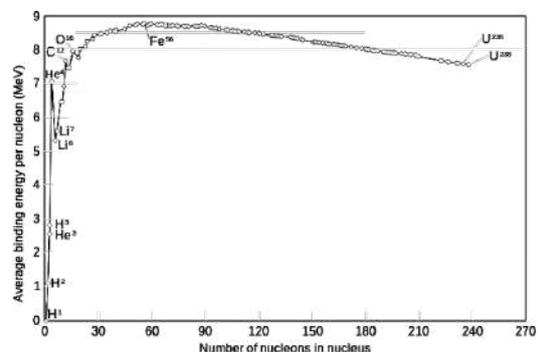
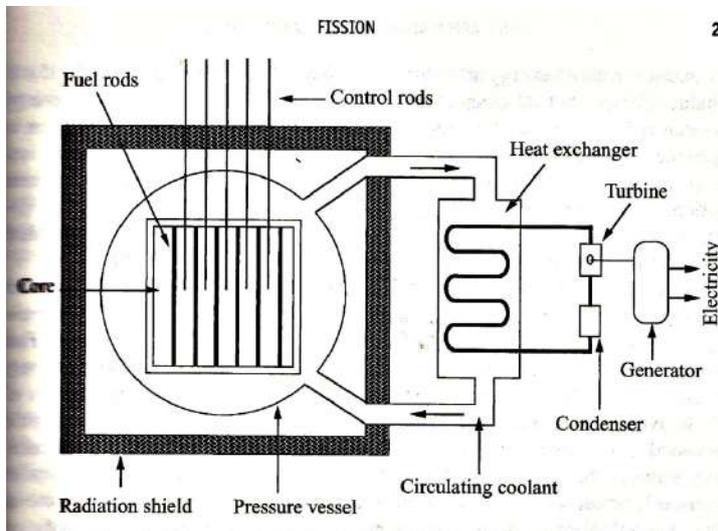


Figura 4.32 – Eixo vertical: Energia de ligação dos núcleos atômicos. Eixo horizontal: massa atômica do elemento.



A parte principal do reator a fissão nuclear é o núcleo. Os componentes mais importantes são: As varetas de combustível; As varetas de controle do processo; O moderador.

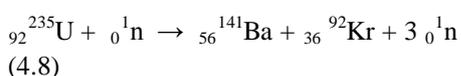
Desenho esquemático do reator à fissão nuclear

Figura 4.33

Fissão nuclear

Núcleos pesados como é o caso do urânio ^{235}U tem menor energia de ligação por nucleon do que os núcleos de peso atômico intermediário, ou seja, aqueles elementos com grau de ligação próximo do núcleo do ferro. Logo, se um núcleo pesado é “quebrado” pela fissão nuclear, dois núcleos de massa atômica menor são produzidos. Entretanto, isso significa também elementos com energia interna menor do que a do núcleo mãe. Assim, a sobra de energia servirá até para aumentar a energia cinética dos núcleos produzidos. {[1];498}, {[154];61}

A fissão nuclear espontânea é rara. Geralmente, a fissão para gerar energia atômica é um processo em cadeia inicialmente induzido, ou seja, ele é provocado por um elemento externo, que pode ser a partícula neutro. Na fissão induzida, a captura de neutros por um elemento pesado, torna-o um elemento excitado, logo, instável. No caso do elemento ^{235}U , uma reação induzida por neutro é representada pela eq. (4.8):



Reator à fissão

A energia liberada pela reação da eq.(4.8) é cerca de MeV apenas. Mas, a energia produzida pela fissão acontece em um processo autossustentado de reações em cadeia. Isso leva a produção de energia, além de produzir outros elementos físeis, e neutros. Os três neutros produzidos inicialmente provocam novas reações, como a que foi mostrada pela eq.(4.8), o que garante a multiplicação incessante do processo. No entanto, ao contrario da energia produzida por uma bomba atômica, a energia de um reator deve ser gerada de forma controlada. O primeiro reator à fissão nuclear foi inaugurado pela Universidade de Chicago, EUA, em 1942. Por isso a data é considerada o inicio da Era Nuclear. {[99];328}

O moderador. É formado por material específico que envolve o combustível físsil do reator. Portanto, seu volume deve conter as varetas de combustível. Sua finalidade é reduzir a velocidade dos neutros produzidos pela fissão nuclear. Neutros rápidos escapam das varetas de combustível, contudo, os choques elásticos com a matéria do mo-

derador desaceleram as partículas. Os moderadores mais usados são grafite, água pesada, e água comum no caso de reatores com urânio enriquecido.

Varetas de controle. São hastes de cádmio, que possuem alta capacidade de absorção (seção de choque) para os neutros. Sua manipulação – inserção ou retração – permite regular o número de neutros disponíveis para induzir a fissão. É um mecanismo vital para manter o nível de potência do reator. {[154];260-262}

Condições para a fissão

Para elementos pesados com número atômico em torno de 240, a barreira de Coulomb que inibe a fissão encontra-se entre 5 e 6 MeV. Se um neutrão com energia cinética nula penetra o núcleo do elemento, esse núcleo terá a energia de excitação elevada para a energia correspondente do neutrão no novo estado. Por exemplo, se um neutrão com energia cinética mínima entra no núcleo do ^{235}U e forma o estado do ^{236}U com energia de excitação de 6,5 MeV, essa energia está acima da barreira de fissão, logo, o núcleo composto será “quebrado”, e os produtos de decaimento serão similares aos do decaimento espontâneo do ^{236}U . Os núcleos com número atômico ímpar são altamente físséis em comparação com aqueles de número atômico par. Isso significa que os primeiros são alvos mais fáceis de serem atingidos através de neutros com baixa energia cinética.

O combustível mais usado na fissão é o urânio. Em muitos casos usa-se urânio natural, que contém apenas 0,7% de ^{235}U contra 99,3% de ^{238}U . Logo, o mais provável é que nesse caso, em uma reação de fissão induzida, o neutrão deva interagir com núcleos de ^{238}U . Entretanto, supondo-se que o neutrão da fissão primária tenha energia de 2

MeV, a possibilidade de provocar a fissão induzida é baixa devido a dificuldade de atingir o alvo. O mais provável é que após algumas colisões a energia do neutrão fique abaixo do patamar de 1,2 MeV, que é necessário para induzir a fissão do ^{238}U .

Por outro lado, com essa energia o neutrão precisa alcançar um núcleo de ^{235}U para haver a fissão induzida, mas, a chance também será pequena, a não ser que sua energia fique abaixo de 0,1 eV, uma situação na qual a possibilidade do choque é elevada. Logo, nessas circunstâncias, o mais provável é que o neutrão seja capturado pela ressonância do ^{238}U , com a emissão de fótons. Portanto, para evitar desdobramentos desse tipo o combustível nuclear deve ser enriquecido com uma fração entre 2 e 3% de ^{235}U para garantir uma cadeia de reações nucleares ininterrupta.

Reator à fusão nuclear

Geralmente, o processo de fusão nuclear libera menos energia em comparação com a fissão nuclear. Contudo, a fusão nuclear é mais atraente em parte pelo fato de alguns elementos serem abundantes na natureza, e em parte, pelos núcleos serem mais estáveis em comparação com os núcleos pesados usados na fissão nuclear. {[154];266} O fato é que, após a fissão nuclear, seus subprodutos continuam a se desintegrar emitindo radiações ionizantes, o indesejável lixo atômico. Por outro lado, para se tornar economicamente viável a energia da fusão nuclear precisa superar alguns desafios tecnológicos.

Algumas questões da fusão nuclear. A primeira questão a resolver para realizar a fusão nuclear é superar a repulsão da chamada barreira de Coulomb, o que significa superar a força de repulsão quando se tenta

unir dois núcleos de carga positiva. Outra questão a ser superada é: ao se tentar a fusão pela colisão entre os núcleos, a tendência é haver o choque elástico, ou seja, o espalhamento em vez da aderência entre os núcleos. Assim, uma maneira encontrada para fundir os núcleos é o confinamento, seguido da exposição à energia térmica para que, finalmente, a barreira de Coulomb seja superada. {[154];267}

Outra questão a resolver é a escolha dos núcleos mais convenientes para a fusão. Sabe-se que a fusão dos núcleos do chamado Ciclo-pp é um processo lento. Portanto, na definição do processo de geração de energia atômica – em reatores do tipo Tokamak – como no caso do projeto chamado ITER, os elementos escolhidos foram o deutério e o trítio. Essa escolha por sua vez, levou a outro desafio tecnológico que não é fácil de ser superado; Lidar com a temperatura extremamente elevada que é exigida na fusão desses elementos: 150 milhões de graus Celsius. O que pode vaporizar o próprio invólucro de confinamento do plasma do reator. No Tokamak usa-se o confinamento magnético do plasma, que por sua vez deve ser aquecido por um campo eletromagnético. {[154];275}

Projeto ITER

Atualmente, esse é o projeto mais arrojado para a produção de energia atômica por fusão nuclear para aplicação em escala comercial. O empreendimento, orçado atualmente em 13 bilhões de libras, é um consórcio reunindo 34 nações: Índia, China, Japão, Rússia, Estados Unidos, Coreia do Sul, e União Europeia. O reator – edifício já está em construção – será montado em Cadarache, na floresta de Provence, Sul da França. O equipamento tem como objetivo servir de protótipo para a construção mais

adiante de reatores para a produção de energia elétrica em escala comercial.

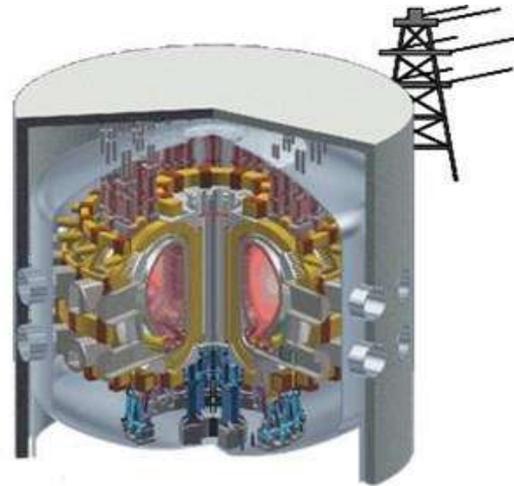


Figura 4.34 – Protótipo ITER. A parte central da figura mostra a câmara de plasma toroidal.

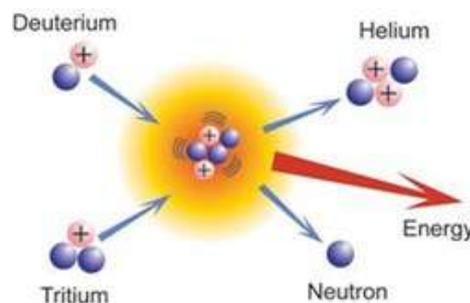


Figura 4.35 - Reação da fusão nuclear do trítio com o deutério.

O reator - do tipo Tokamak do ITER - tem 30 metros de altura. A câmara de plasma é alimentada por 30 toróides magnéticos pesando algumas centenas de toneladas. Estima-se que a primeira demonstração de geração de potência elétrica aconteça até 2030. A construção de reatores à fusão nuclear para a geração de energia elétrica, para o sistema elétrico europeu, só deve acontecer a partir da segunda metade do século XXI.

Cosmologia

Causalidade é a relação de causa e efeito em que o acontecimento de um evento tem relação direta com a ocorrência de outro precedente. Logo, causalidade é o conceito relacionado a temporalidade, movimento, cronologia. A ideia de causalidade traz em si a noção de que o tempo possui uma direção e conduz uma história própria. Mas, aqui a história não obedece a dialética da práxis, logo, não é a história que move civilizações embora existam relações indiretas importantes entre o ambiente físico e as civilizações da Terra.

A cosmologia estuda a sequência de fenômenos físicos da evolução do cosmos ao longo do tempo. Portanto, a cosmologia é a história das relações de causalidade dos eventos governados pelas leis da física. Como conceito básico, a física identifica o início do Universo com a escala de Planck, onde o Universo foi apenas energia, logo, quando ocorreu o Big Bang. Por sua vez, a história do tempo do Universo é a história dos fenômenos autônomos da natureza, como a formação de estrelas e sistemas planetários. Logo, trata-se da história de fenômenos que não se pode controlar.

Por outro lado, a causalidade está intimamente vinculada ao aumento da entropia do sistema observado. Na física da teoria da relatividade essa história é delimitada por cones de luz temporais. Ver a Figura 4.36. E, em que pese o Big Crunch, nos sistemas observáveis a história associada à direção do tempo mostra que a dinâmica do cosmos tem sentido único. Assim, à medida que o Universo se expande e sua entropia aumenta, a temperatura diminui e a energia se dilui. Sobre esse fato, observe-se na Figura 4.38, que no início do Universo a temperatura era 10^{32} K, e atualmente é $2,73$ K.

A percepção do tempo

A noção de tempo é um conceito específico do planeta. Os seres da Terra possuem uma noção de tempo que é indissociável das variáveis astronômicas do próprio planeta. Essas variáveis acompanham a evolução das espécies, e através da interação entre o ser e a natureza, a percepção mesmo aparente da sua física acaba sendo parte intrínseca do biorritmo e comportamento das espécies. A percepção de tempo na Terra é função: da distância entre o planeta e sua estrela, do diâmetro do planeta e da sua velocidade de rotação. Portanto, em um planeta com variáveis diferentes, não só as espécies devem ser diferentes, como a própria percepção do tempo deve ser diferente.

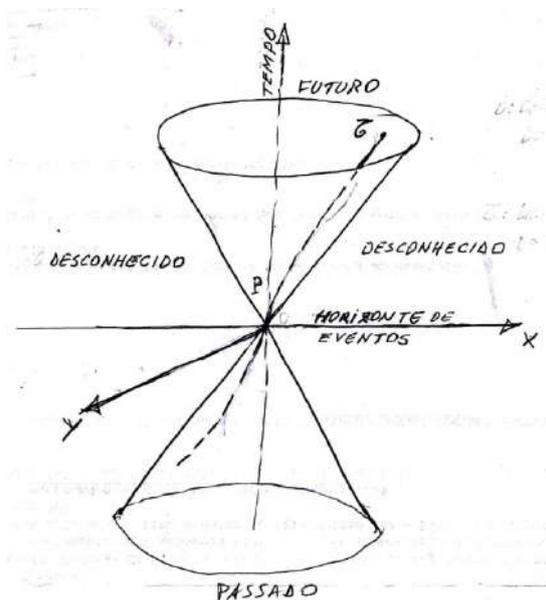


Figura 4.36

Cones de luz

No cone de luz da Figura 4.36 supõe-se existir um observador no ponto P, ou seja, na origem do sistema de coordenadas. Logo, o ponto P representa o evento ocorrido

para um observador aqui e agora. Portanto, esse observador é a referência da causalidade observada aqui e agora. As informações do seu relato sobre um acontecimento são registros armazenados no cone inferior, que simbolicamente representa o passado. Por outro lado, o cone superior irá registrar os eventos do futuro. Esse fato acontece porque a velocidade da informação que atinge o observador não é infinita, e não ultrapassa a velocidade da luz. Ou seja, existe um intervalo de tempo entre a ocorrência de um fenômeno e sua percepção.

Um observador recebe informações apenas do seu cone inferior (o passado), eventos externos ao mesmo (desconhecido) não são acessíveis ao observador em P. Para esse observador, o tempo medido (Δt_0) - que é chamado Tempo Próprio - é representado pelo eixo (τ) mostrado na Figura 4.36.

Espaçotempo

A causalidade da física está associada à velocidade da luz, a constante c de valor igual a 300.000 Km/s. Essa é a velocidade que direciona sua história. Assim, c é o parâmetro chave no transporte da informação no tempo. Então, tudo aquilo que é experimentado e relatado por um observador de um referencial localmente inercial é condicionado por essa restrição do tempo. Por isso a velocidade da luz é representada pelos cones de luz. ^{[1];50} Um cone de luz é a representação limítrofe de um observador no espaçotempo. Isso significa que sua narrativa é sempre condicionada pelo tempo que a luz gasta para se deslocar no espaço. De qualquer forma, os cones de luz podem ser representados apenas por um par de eixos como na Figura 4.37.

Na medição do tempo, a distância de um planeta à estrela a qual pertence é prepon-

derante para a percepção de fenômenos no interior do sistema. No entanto, o mesmo não ocorre em escala astronômica como é o caso de fenômenos medidos em parsec (1 parsec é igual a 3,26 anos-luz). A distância entre a Terra e o Sol é igual a uma Unidade Astronômica (1 AU), o que equivale a 8 minutos aproximadamente. Isso significa que para qualquer evento ocorrido no Sol, a Terra entra no cone de tempo do Sol após 8 minutos aproximadamente. Ver a Figura 4.37.

Pode-se afirmar que a causalidade está associada à passagem do tempo. Contudo, essa afirmação é um tanto vaga. O mais preciso seria afirmar que a causalidade está associada ao espaçotempo. Por outro lado, tendo-se em vista o significado de causalidade, não se deve esquecer que a velocidade da luz não é infinita. Então, considerando-se que para percorrer a distância do Sol à Terra, a luz gasta 8 minutos, é o caso de se indagar: Quanto tempo decorrerá para que um fenômeno ocorrido no centro da Via Láctea seja percebido na Terra?

Considerando-se que a distância até o centro da galáxia é cerca de 8,5K parsec, e; 1 parsec \approx 3,26 anos-luz, estima-se em 28 mil anos-luz o tempo para que o fenômeno seja percebido na Terra. Embora esse valor seja uma estimativa, sua ordem de grandeza é bastante significativa. Portanto, em relação ao Sol, ou a qualquer outro objeto cósmico ainda mais distante, como as estrelas, o que se percebe na Terra são ocorrências do passado. ^{{[9];38}, {[91];11}}

Sabe-se que tanto em relação ao Sol quanto em relação ao centro da galáxia, existe a associação direta entre espaço e tempo. Em ambos os casos o tempo pode ser convertido diretamente em distância e vice-versa. Na Astrofísica ou na Astrono-

mia esse é um procedimento comum para se calcular distâncias no espaço cósmico. Portanto, essa dualidade entre espaço e tempo é o que levou a criação da expressão espaçotempo para designar distâncias astronômicas.

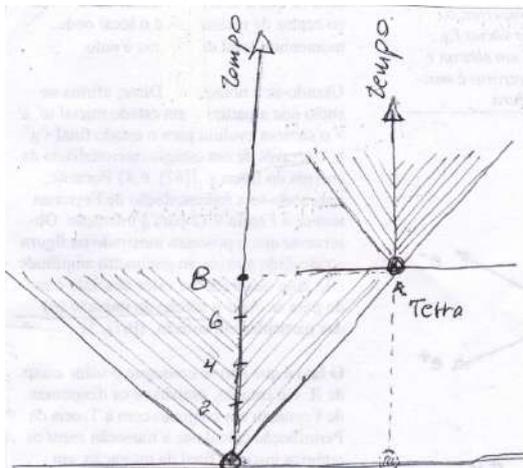


Figura 4.37

Figura 4.37 - Para eventos ocorridos no Sol o fato será percebido na Terra apenas quando o cone de luz do observado terrestre penetrar no cone de luz do Sol.

Geometria relativística

A Geometria Diferencial. A Física relativística expandiu de maneira extraordinária o espectro dos fenômenos que podem ser discutidos através do conhecimento científico. Mas, para isso as representações do espaço recorrem a geometria diferencial criada por Johann Friederich Carl Gauss (1777 – 1855) e seu teorema egrégio, que por sua vez foi aperfeiçoado por Georg Friedrich Bernhard Riemann (1826 – 1866). Essa geometria foi fundamental para a Teoria da Relatividade Geral desenvolvida por

Albert Einstein na primeira década do século XX. Por outro lado, observe-se que a disciplina da matemática – inventado por Newton – para o tratamento dos fenômenos do espaço euclidiano, foi o cálculo integral diferencial. Mas, na física de Newton a velocidade da luz é infinita, e o Universo é estático. Enquanto a geometria diferencial do espaçotempo usa o cálculo diferencial dos tensores. Essa matemática tornou possível a formulação tanto da cosmologia relativística quanto da mecânica quântica.

Big Bang

A energia que iniciou o Universo, e sua transformação em matéria e a expansão são estudadas pela física do Big Bang. Figura 4.38. Nesse modelo, a energia primordial surgiu em uma temperatura elevada ao extremo no momento chamado escala de Planck. Em seguida a temperatura arrefeceu na medida em que o Universo continuou a se expandir. Consequentemente, considera-se que no instante inicial, devido a temperatura extrema, não existiam ainda as quatro forças fundamentais da natureza, as quais são: força gravitacional, força eletromagnética, força nuclear forte e força nuclear fraca.

Entretanto, na medida em que o Universo se expandiu, a temperatura caiu, as partículas elementares da matéria foram sendo formadas e as forças fundamentais começaram a surgir. Ao se estudar os estágios iniciais do cosmos em experimentos nos aceleradores de partículas, os processos interativos entre as partículas fundamentais são abordados no sentido inverso de suas ocorrências. Esse procedimento pode ser observado quando se procura, por exemplo, estudar a unificação das forças fundamentais da natureza. Para isso, ver; Époça GUT, na seção, Estágios do Universo.

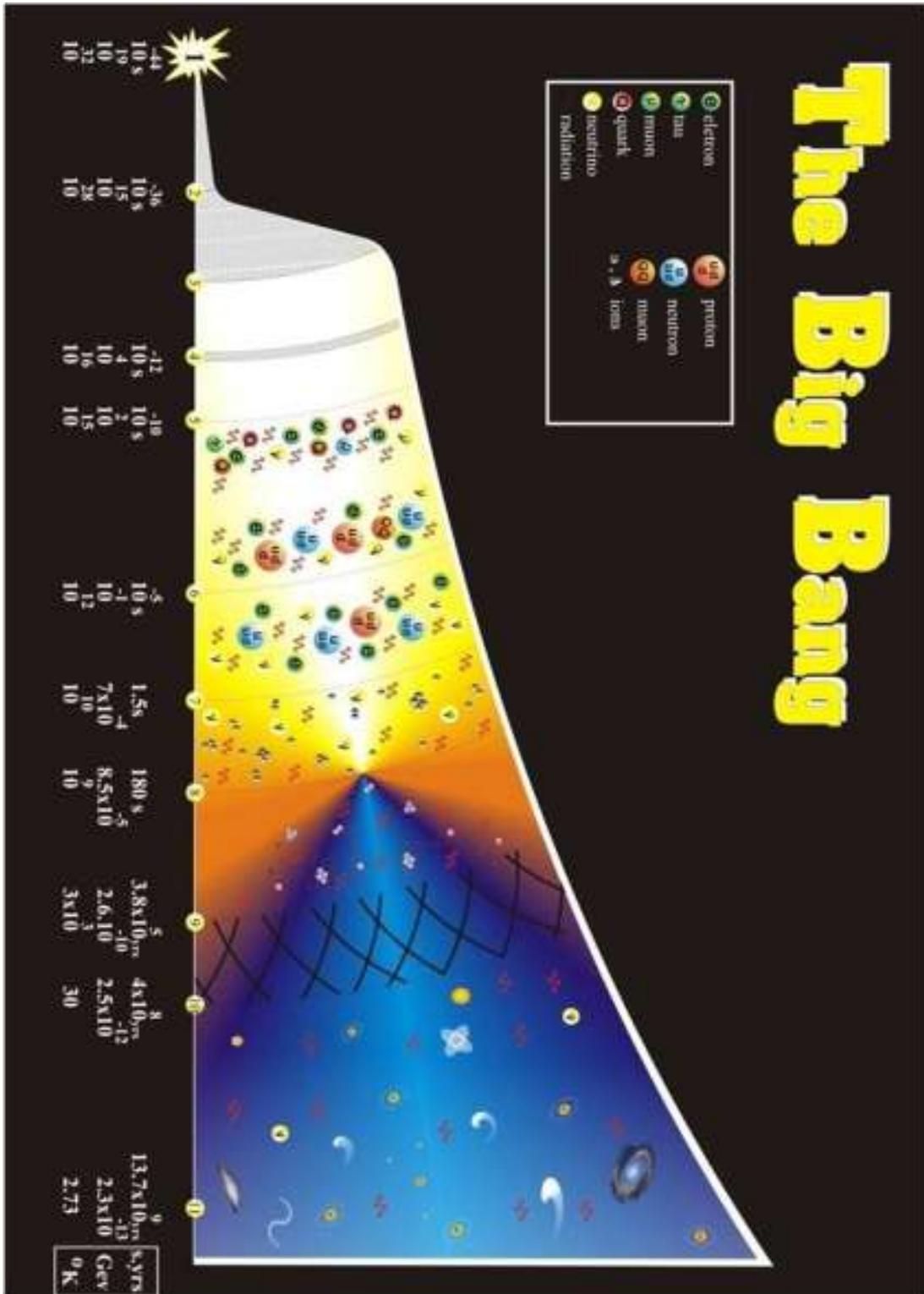


Figura 4.38

Entretanto, para se conseguir a unificação das forças fundamentais é necessário em primeiro lugar estabelecer a teoria que una a mecânica quântica relativística com a Teoria da Relatividade Geral de Albert Einstein, na escala de Planck, o que ainda não foi possível. Conseqüentemente, a cosmologia relativística ainda não incorporou a força gravitacional. De qualquer maneira, tornou-se lugar comum na teoria das partículas elementares, denominar a unificação de apenas três forças; Nuclear forte, Nuclear fraca e eletromagnética, Teoria da Grande Unificação. A teoria é representada pela sigla GUT, um acrônimo da expressão; Great Unification Theory.

Expansão do Universo

A expansão do Universo significa a transformação da energia inicial em partículas elementares, que pela ação dos quanta das forças fundamentais foram transformados inicialmente em hadrons, e em um segundo momento em átomos dos primeiros gases – principalmente hidrogênio e hélio. Após serem condensados pela ação do colapso gravitacional no interior de nebulosas esses gases produziram as primeiras estrelas. Varias centenas de milhões de anos depois as supernovas dessas estrelas ejetaram no cosmos os metais encontrados em sistemas planetários como o sistema solar. Na formação do sistema, apenas uma pequena fração da matéria foi destinada a formação dos planetas. São os elementos atômicos dessa matéria que preenchem a Tabela Periódica dos elementos químicos.

No presente trabalho, a expansão do Universo encontra-se representada através dos seguintes estágios (Ver; Estágios do Universo): Era Planck, Época GUT, Inflação, Um pico-segundo, Massa, Nucleons, Interlúdio, Nucleossíntese, CMB, Muito

alem da época escura e, O Universo, hoje. Observe-se que cada estágio é caracterizado pelos seguintes parâmetros: instante da ocorrência do fenômeno (em segundos ou anos-luz), energia envolvida (GeV), e temperatura (°K). Ver a Figura 4.38.

Universo dinâmico

Em 1922 o matemático e meteorologista russo Alexander Alexandrovitch Friedmann publicou o modelo do cosmos em que fica evidente que o Universo é dinâmico, e não, estático, como pensava Newton e mesmo o próprio Albert Einstein. Sabe-se que ao publicar a Teoria da Relatividade Geral em 1916, Einstein descartou a possibilidade de qualquer solução da sua equação – Tensor de Einstein – em que o Universo não fosse estático. Por esse motivo ele introduziu uma constante, Λ , na equação da sua teoria.

O fato é que Friedmann propôs a solução da evolução dinâmica do cosmos - chamada modelo fechado - em que o Universo se expandiria durante determinado tempo, mas, se a densidade da matéria e energia nele contidos, ρ , fosse maior do que o valor da densidade crítica ρ_c , o processo seria interrompido e seguido pelo *autoencolhimento*, chamado big-crunch. Contudo, a reação inicial de Einstein sobre essa possibilidade foi de veemente repúdio. No entanto, algum tempo depois ele reconheceu publicamente que na essência a proposição de Friedmann estava correta.

O modelo de Friedmann caiu no esquecimento durante algum tempo. No entanto, após a divulgação por Edwin Hubble em 1929 do trabalho em que demonstrava o afastamento das galáxias entre si, a ideia do Universo dinâmico foi retomada com entusiasmo por alguns físicos. De qualquer maneira, também em 1929, Friedmann apresentou mais duas alternativas para o destino

do Universo; Em uma delas, chamada modelo aberto, o Universo se expande, mas, se o parâmetro ρ for menor do que a densidade crítica ρ_c , a expansão será para sempre e com velocidade constante. Na outra solução, chamada modelo plano, a expansão também é para sempre, mas, como nesse caso a densidade da matéria e energia, ρ , é igual a densidade crítica ρ_c , a expansão ocorre a uma taxa cada vez menor, mas, sem jamais ser interrompida.

Física do Big Bang

Modelo Cosmológico de Friedmann. O

Universo do modelo de Friedmann é homogêneo e isotrópico. A dimensão do cosmos encontra-se na escala de centenas de Megaparsec. Logo, o modelo é relativístico, e do ponto de vista da Teoria da Relatividade Geral, o Universo é considerado um fluido perfeito onde as partículas constituintes são as galáxias. Logo, visto dessa maneira o movimento do fluido é interpretado como o movimento das galáxias descrevendo trajetórias em queda livre. Resumindo, a cosmologia relativística trata o Universo segundo as seguintes condições:

I - O Universo é composto de matéria e energia que em dimensões cósmicas formam um fluido perfeito.

II - O Universo é sempre o mesmo quando observado em qualquer direção – *Isotropia* – e mostra-se igual em todos os pontos – *homogeneidade*. Isso é denominado Princípio Cosmológico.

III - O Universo obedece a Teoria da Relatividade Geral de Albert Einstein.

A geometria. O modelo Big Bang não explica a origem da energia do Universo, ou seja, o que produziu a energia do começo. Portanto, o início de tudo é denominado singularidade. Figura 4.39. Dentre as possí-

veis geometrias do Universo o fator determinante é Ω , que é o quociente entre a densidade da matéria e energia do Universo (ρ), e a densidade crítica (ρ_c). Logo: $\Omega = \rho / \rho_c$

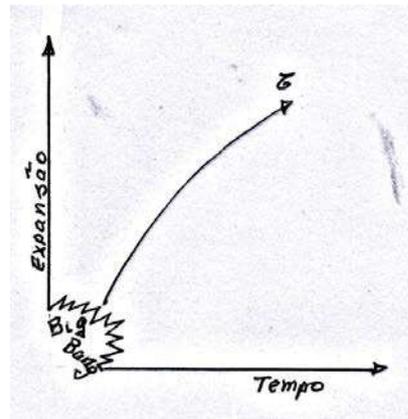


Figura 4.39 – A singularidade do Big Bang

O modelo de Friedman é dado pela equação do Universo dinâmico, que resulta do Tensor de Einstein aplicando-se a métrica FRW (Friedmann – Robertson – Walker). Nesse modelo, o destino do Universo tem as seguintes alternativas: Figura 4.40.

Se $\Omega = 1$; A geometria é plana.

Se $\Omega < 1$; A geometria é aberta.

Se $\Omega > 1$; A geometria é fechada.

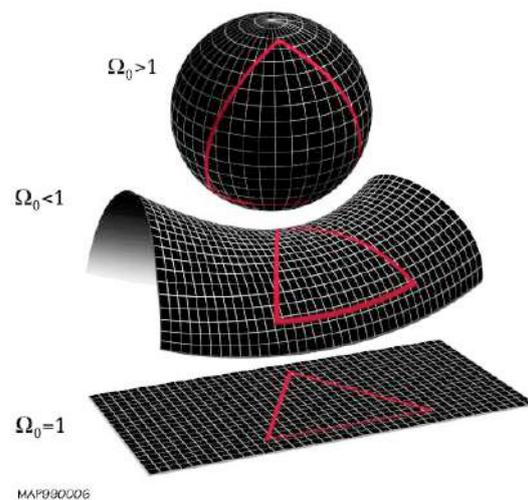


Figura 4.40

Geometrias possíveis

As três figuras seguintes correspondem às três alternativas mostradas na Figura 4.40. *Geometria plana*; Isso significa uma superfície onde a soma dos ângulos internos de um triângulo é igual a 180° . Nesse caso, a densidade da matéria e energia ρ é igual a densidade crítica ρ_c . Ver a Figura 4.41A.

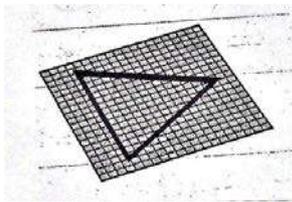


Figura 4.41A
Geometria plana

Geometria aberta; Significa a superfície do universo sob a forma de sela. Logo, a soma dos ângulos internos do triângulo mostrado é menor do que 180° . A densidade da matéria e energia ρ é menor do que a densidade crítica ρ_c . Figura 4.41B.

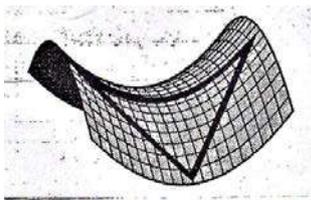


Figura 4.41B
Geometria aberta

Geometria fechada; Significa que a soma dos ângulos internos do triângulo da superfície é maior do que 180° . A densidade ρ é maior do que a densidade crítica ρ_c . Ver a Figura 4.41C.

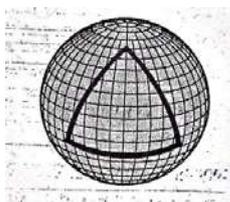


Figura 4.41C
Geometria fechada

Na sua essência, as alternativas representadas pelo parâmetro Ω significam que o comportamento dinâmico do Universo deve ser governado pela matéria e energia nele existentes. No gráfico da Figura 4.42 estão representadas as três hipóteses de Friedmann. O eixo vertical da figura representa a separação das galáxias, enquanto o eixo horizontal representa a evolução no tempo.

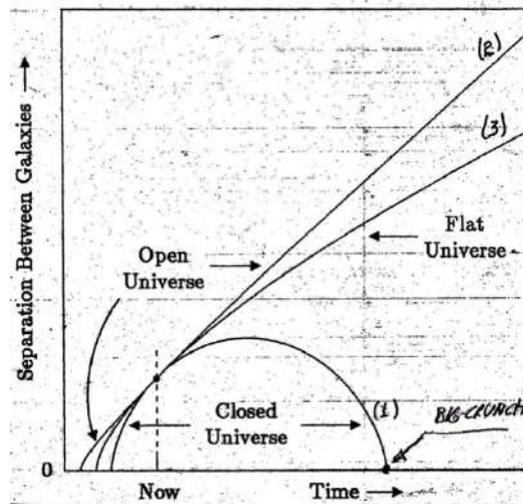


Figura 4.42 - As três hipóteses de Friedmann para o destino do Universo.

Curva 1 – Representa o modelo fechado. Nesse caso, após certo tempo a expansão é interrompida e ocorre o Big Crunch.

Curva 2 – Modelo aberto; A expansão é para sempre, a uma taxa constante.

Curva 3 – Modelo do Universo plano. A expansão é para sempre, mas, com uma velocidade cada vez menor, sem, no entanto, jamais ser interrompida.

Big Rip

A partir dos dados coletados pela sonda WMAP da NASA em 2003, {[47];23,346}, concluiu-se que o Universo encontra-se em expansão acelerada. Entretanto, o fenômeno é visto como consequência da energia escura, que estaria exercendo pressão negativa –

sucção – sobre a expansão. Os dados do satélite permitem concluir que o valor de Ω é igual a um. Isso significa que a geometria do Universo é plana. Portanto, os dados da sonda WMAP indicam que o destino do Universo pode ser diferente de qualquer uma das hipóteses de Friedmann. E nesse caso, como a energia escura tem efeito semelhante ao da constante cosmológica de Einstein (Λ), incluiu-se uma quarta hipótese como destino do Universo – curva (4) da Figura 4.43 – onde a aceleração exponencial da expansão provoca o Big Rip no final.

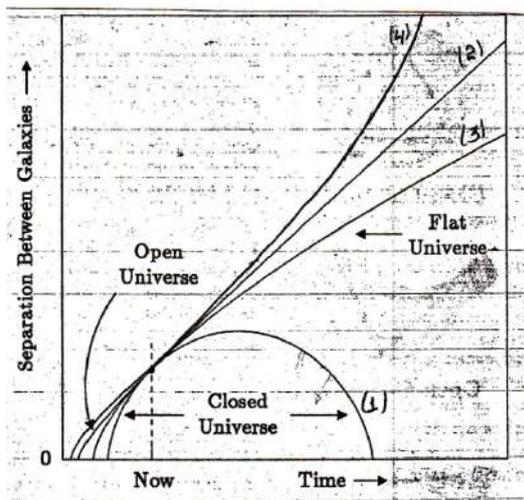


Figura 4.43 – Atualização do modelo de Friedmann usando-se a sonda WMAP. Acrescenta-se então a **curva 4** como alternativa para o destino do Universo.

Estágios do Universo

Nesta secção são apresentados onze estágios do modelo Big Bang Quente, que mostram a evolução do Universo desde o instante inicial - chamado Era Planck, ou, Escala Planck - quando a temperatura era 10^{32} K, até a época atual cuja temperatura é

$2,73$ K. Todos os estágios são apresentados na sequência cronológica descrevendo os eventos mais significativos da transformação da energia em matéria. A referência principal é a figura 4.38. Observe-se que cada estágio encontra-se associado a três parâmetros da evolução termodinâmica, ou, a queda da temperatura do Universo: Tempo (em segundos ou anos-luz), Energia (Giga eletro Volt – GeV), Temperatura (K). Portanto, os estágios da evolução do Universo são os seguintes:

1. Era Planck

Calcula-se que o Universo teve início há 13,7 bilhões de anos a partir da escala de Planck. Isso corresponde à energia; $\approx 1,2 \times 10^{19}$ GeV, associada ao comprimento de Planck; $l_{PL} \approx 1,66 \times 10^{-33}$ e ao tempo de Planck; $t_{PL} \approx 5,4 \times 10^{-44}$ s. {[12]; 97}

2. Época GUT

Ao atingir a temperatura equivalente a 10^{15} GeV, ou seja, quando $t = 10^{-36}$ s, as forças fundamentais; Eletromagnética, nuclear forte e nuclear fraca eram ainda uma só. Portanto, isso corresponde a Great Unification Theory. E segundo a Teoria do Universo Inflacionário, de Alan Guth, nesse instante o tamanho do Universo era tão ínfimo que a temperatura era a mesma em qualquer lugar.

As Forças Fundamentais. Sob a densidade de energia elevada, temperatura idem, não havia diferença entre as forças fundamentais, assim elas eram uma só. Logo, havia a simetria. Ou seja, logo após o Big Bang, a densidade de energia era tanta que o Universo ficou submetido a uma única força. Seu escopo teórico, denominado Supergravidade (SUGRA), é parte da teoria M ou, teoria das Supercordas, de 11 dimensões. Ver a Figura 4.45.

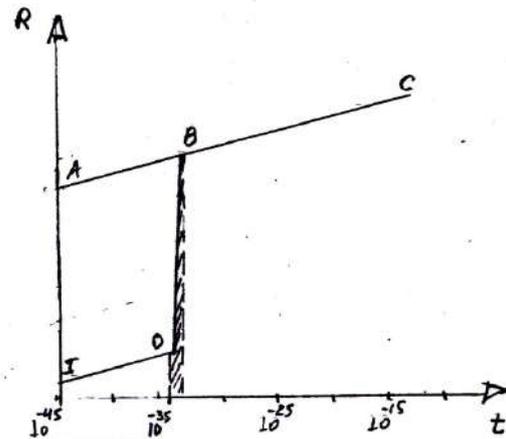
3. Inflação

Esta etapa do Big Bang é representada pelo paradigma da expansão exponencial do cosmos, graças ao fenômeno denominado Inflaton, que significa o estado de energia do falso vácuo. Estima-se que no final desse período, o Universo recebeu um incremento de energia – de origem desconhecida – o qual justifica a quantidade de matéria atualmente observada no cosmos. O paradigma da inflação resolve ainda duas outras questões do Big Bang; A *questão do horizonte*, e a *questão da planura*.

Paradigma da Expansão Exponencial.

No instante, $t \approx 10^{-34}$ seg. o Universo foi submetido a um processo de expansão extraordinário representado pelo gráfico exponencial da Figura 4.44. Essa hipótese, chamada paradigma da expansão exponencial, foi proposta por Alan Guth para justificar a homogeneidade do início do Universo e a quantidade de matéria nele existente. Observe-se que o crescimento exponencial representado pelo segmento OB da figura adapta-se perfeitamente ao trecho AC do modelo do Big Bang sem inflação, do mesmo gráfico. {[11]}

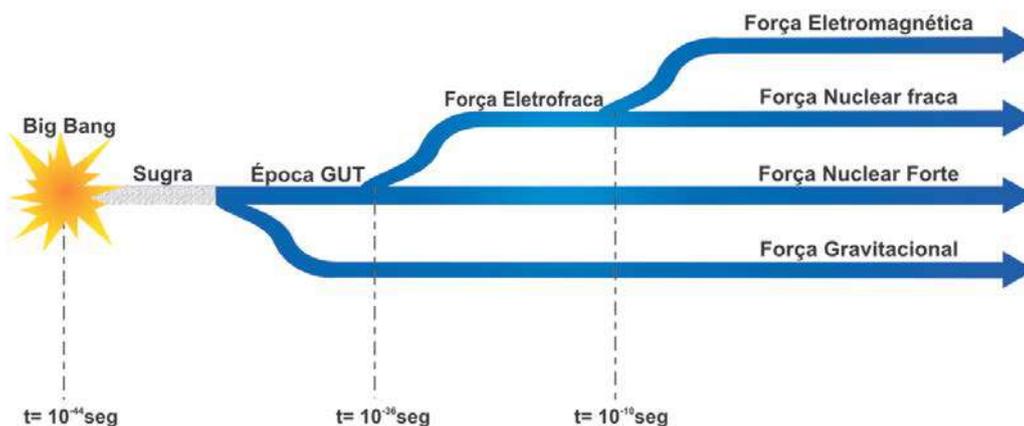
Figura 4.44 – Paradigma denominado Inflaton.



Nomenclatura referente à Figura 4.44:

1. R – Raio do Universo.
2. Segmento ABC – representa o Modelo Padrão, sem considerar a inflação, do Big Bang.
3. Segmento IOBC – representa o modelo do Big Bang com a Inflação.

Figura 4.45 – Figura abaixo. As forças fundamentais da natureza surgiram da quebra espontânea da simetria existente na Época GUT.



4. Um pico-segundo

Este é o estágio do universo, que está sendo investigado pelo LHC. Nos experimentos espera-se dentre outros, os seguintes êxitos: A descoberta de partículas do modelo da supersimetria tais como o gluino; A partícula de Higgs que unifica a força eletromagnética com a força nuclear fraca; A partícula de Higgs que dá massa aos férmions. Procura-se também comprovar a existência do plasma quark-gluon que antecedeu a formação dos hadrons.

À medida que o cosmos se esfriou, a densidade de energia caiu e surgiram diversas simetrias. Assim, a força inicial adquiriu naturezas distintas. Portanto, ao atingir 10^{10} seg de idade, passaram a existir as quatro forças fundamentais mostradas na Figura 4.45 e na Tabela 4.9.

5. Massa

Nesse estágio ocorreu o fenômeno denominado quebra espontânea de simetria. Ou, Spontaneous Symmetry Breaking – SSB – em língua inglesa, que corresponde ao surgimento da matéria barionica. Nesse estágio, segundo o Modelo Padrão das partículas elementares, os férmions, ou seja, quarks e léptons adquiriram suas massas através do bóson de Higgs. Consequentemente, calcu-

la-se que nesse momento os quarks e gluons foram então confinados formando os hadrons. Isso aconteceu quando a temperatura foi equivalente à energia; 0,3 GeV.

6. Nucleons

Nesse estágio, quarks e gluons iniciaram a formação de prótons e neutros. Entretanto, como nessa etapa existiam também as antipartículas, não se tem ainda uma explicação convincente sobre o motivo pelo qual as partículas e as antipartículas não se autoaniquilaram mutuamente nessa ocasião. E se isso tivesse acontecido, o Universo seria hoje completamente diferente daquilo que se apresenta como tal.

7. Interlúdio

Calcula-se que nessa fase a interação entre matéria e neutrinos chegou ao fim. O mesmo aconteceu com a transformação de neutros em prótons. Ver a Figura 4.46. Isso significa que a proporção entre prótons e neutros da matéria do Universo foi estabelecida nesse estágio. Consequentemente, a quantidade de hadrons disponíveis para o nucleossíntese, que ocorreria em seguida, ficou definida.

Tabela 4.9 – Intensidades relativas das forças fundamentais e seus raios de alcance.

FORÇA	NUCLEAR FORTE	NUCLEAR FRACA	ELETROMAGNÉTICA	GRAVITACIONAL
Exemplo	Coesão do núcleo.	Decaimento beta.	Coesão do átomo.	Planetas em torno do sol.
Alcance	1 fm	10^{-3} fm	∞	∞
Intensidade relativa.	1	10^{-5}	10^{-2}	10^{-40}

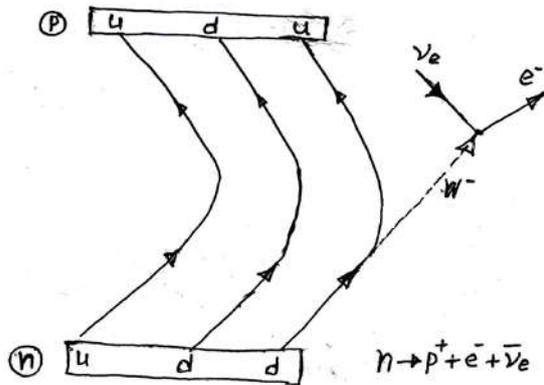


Figura 4.46 – O decaimento Beta

Figura 4.46 - Representação do decaimento do nêutron em próton usando-se diagramas de Feynmann.

A transformação do nêutron em próton é um evento clássico da física nuclear, que é também chamada decaimento beta. Nesse fenômeno, um nêutron, que é composto pelos quarks: u,d,d, transforma-se em um próton, que por sua vez é formado pelos quarks: u,d,u. Na ocasião um quark-d transforma-se em um quark-u mais o bóson W^- , que por sua vez decai em um elétron (e^-) mais o antineutrino do elétron ($\bar{\nu}_e$).

8. Nucleossíntese

Esse foi o estágio do processo de criação dos núcleos dos primeiros átomos do Universo. Ele começou com a formação do núcleo do deutério; ^2D . São formados então o núcleo do hélio; ^3He , e em seguida aconteceu a formação do núcleo do hélio; ^4He , tudo em 10^3 segundos. A formação do hidrogênio – H – acontecerá em seguida, no

entanto, o elemento só será estável na temperatura: $3500\text{ }^0\text{K}$ durante o processo chamado Recombinação. A abundância de hidrogênio (H) e hélio (^3He) do cosmos atual é considerado uma comprovação do modelo Big Bang.

9. Micro-ondas cósmicas de fundo - CMB

Enquanto o Universo foi um plasma extremamente quente, ou seja, antes da Recombinação, os fótons encontravam-se presos pelos elétrons. No entanto, após a formação do hélio e hidrogênio, a quantidade de partículas livres diminuiu, consequentemente, os fótons puderam escapar e a radiação separou-se da matéria. Isso aconteceu à $3.000\text{ }^0\text{K}$, a denominada temperatura de desacoplamento. O Universo tinha então 380.000 anos de existência.

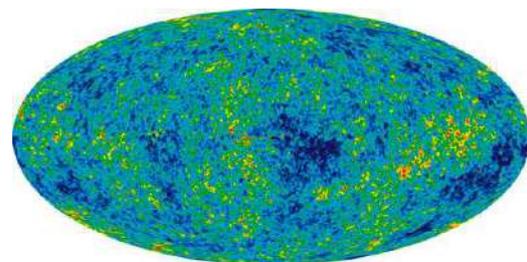


Figura 4.47 – CMB – Espectro das radiações do início do Universo chamadas micro-ondas cósmicas de fundo capturado pela sonda WMAP. NASA Science Team.

As Micro-ondas Cósmicas de Fundo correspondem ao Universo com a idade de 380.000 anos, imediatamente após a separação entre a radiação eletromagnética e a matéria. Os fótons que foram separados da matéria no desacoplamento foram denominados Micro-ondas Cósmicas de Fundo, ou, **Cosmic Microwaves Background**, das iniciais CMB. Após a formação, essa radiação

continuou se propagando pelo Universo, e hoje, têm a temperatura 2,73 °K.

A existência de CMB foi uma proposição de George Gamow e Ralph Alpher em 1948, e sua comprovação aconteceu de maneira inesperada em 1965 graças a Arno Penzias e Robert Wilson. CMB são relíquias que comprovam o Big Bang. A diferença de cores percebida em diversos pontos da Figura 4.47 representam pequenas flutuações de temperatura nesses pontos, quando então o Universo encontrava-se sob a temperatura de 3.000 °K. Portanto, correspondem aos fenômenos: deslocamento para o vermelho (redshift), e ao deslocamento para o azul (blueshift) da radiação eletromagnética. {[4]:301, 405}

10. Muito além da época escura

A fase denominada Nucleossíntese foi caracterizada pela condensação da primeira matéria barionica do Universo. Esse fenômeno compreende principalmente a formação dos elementos deutério, hélio e hidrogênio. Entretanto, na medida em que o Universo continuou a se expandir e a temperatura, a cair, foi do adensamento dessa matéria que foram formadas as estrelas. Portanto, essa nova fase significou o fim da época escura, ou seja, o estágio a partir do qual as primeiras estrelas começaram a brilhar no cosmos. Calcula-se que essas estrelas surgiram 400 milhões de anos após o Big Bang. A Via Láctea, Figura 4.48, a qual pertence o sistema solar, tem a idade estimada em dez bilhões de anos. {[91]:2}

Via Láctea

O disco da Via Láctea tem um diâmetro calculado em 30 Kparsec. {[16]:116} Seu estoque de estrelas é calculado em 10^{11} unidades. A maior parte está situada na região

do disco delimitada por um raio de 10 Kparsec. A Via Láctea gira no sentido horário em relação ao seu polo norte. A matéria do disco é composta também de partículas de poeira interestelar – IDP – além dos gases hidrogênio e hélio. O gás e a matéria – IDP – da galáxia são denominados genericamente; Meio Interestelar, ou, ISM. Sabe-se que a massa total do Meio Interestelar corresponde apenas a 10% da massa das estrelas.

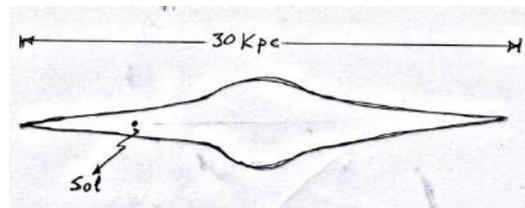
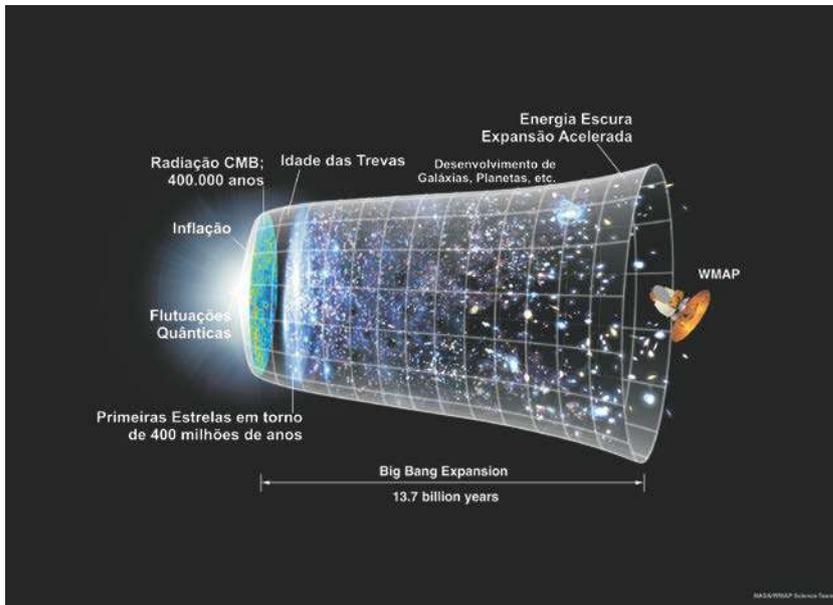


Figura 4.48 – Perfil da Via Láctea

A figura mostra uma seção transversal da galáxia com a posição relativa do Sol.

Buraco Negro da Via Láctea. O Meio interestelar é a fonte da matéria de onde surgem novas estrelas. No centro do disco espiralado da Via Láctea encontra-se o Buraco Negro chamado Sagittarius A*, com massa equivalente a $4 \times 10^6 M_{\odot}$, onde M_{\odot} representa a massa do Sol. Calcula-se que a Via Láctea está inserida em um meio constituído de matéria escura cuja maior concentração encontra-se no seu halo, abrangendo um raio de aproximadamente 200 Kparsec, e com massa equivalente a $10^{12} M_{\odot}$. Estima-se que essa matéria interage com a matéria da Via Láctea, ou seja, a matéria bariônica, através da força gravitacional. {[91]:2} A Via Láctea é apenas uma entre 10^9 galáxias de uma região com vários milhares de parsec de extensão. {[91]:19}

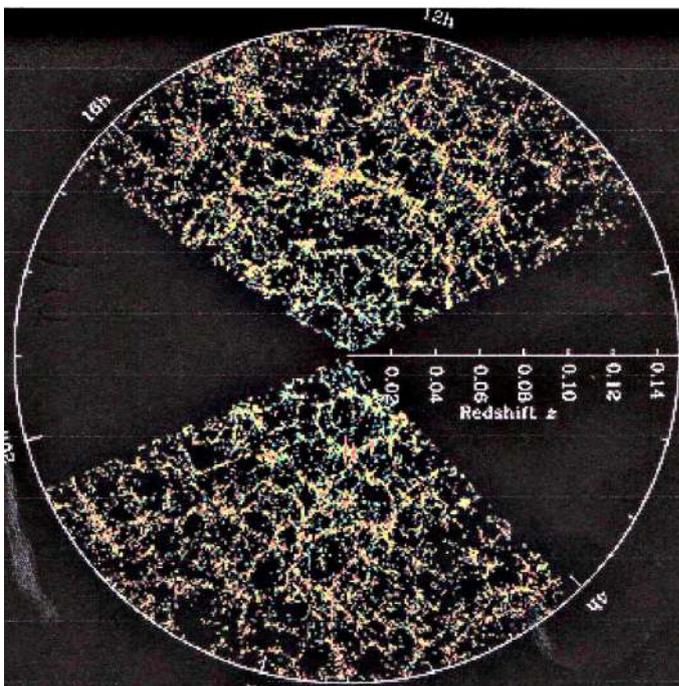


Sonda WMAP – NASA Science Team. A sonda mede as diferenças de temperatura do espectro remanescente do Big Bang chamado CMB, ilustradas na extremidade esquerda da figura ao lado.

Figura 4.49

11. O Universo, hoje.

Esse estágio representa o cosmos atual observado pela sonda WMAP – Figura 4.49 – com a idade de 13,7 bilhões de anos e temperatura; 2,73 °K. Sabe-se ainda que o Universo é composto de 4% de matéria convencional (matéria barionica), 26% de matéria escura, e 70 % de energia escura.



Distribuição de matéria das galáxias. A galáxia mais próxima da Via Láctea é Sagittarius Anã. A segunda mais próxima é a Grande Nuvem de Magalhães, que está situada entre 45 e 50 Kpc. A Via Láctea é parte do grupo de 30 galáxias chamado Grupo Local em uma área de 1 Mpc. Grupos de galáxias constituem clusters, que por sua vez agrupam-se em superclusters, em uma escala crescente abrangendo também os espaços vazios chamados voids. Essa trama preenche o Universo criado pelo Big Bang. A figura ao lado representa o fluido de galáxias que preenche o Universo. A linha horizontal no centro é a escala de distâncias, ou, as idades em **redshifts (Z)**. {[116]; 117}

Figura 4.50

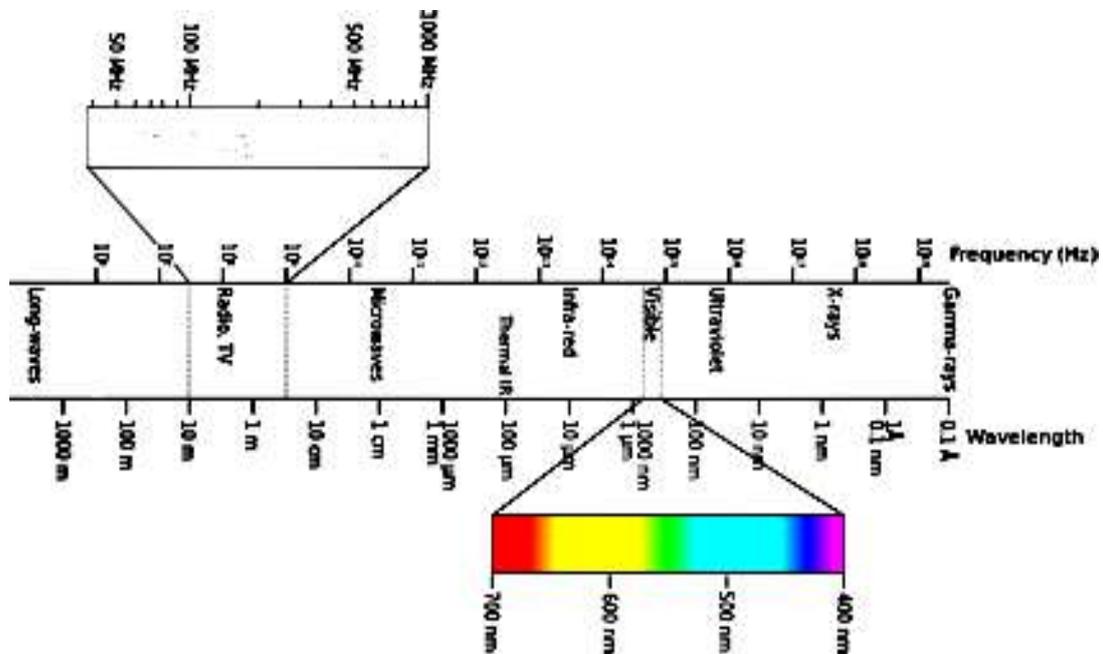


Figura 4.51 – Deslocamento para o vermelho

Redshift cosmológico Z – Na Teoria da Relatividade Geral, tempo e distância são equivalentes. Como o Universo encontra-se em expansão, uma fonte de luz que se afasta de um observador faz com que o comprimento de onda da luz recebida por ele seja deslocado para o vermelho no espectro de frequências da Figura 4.51. Isso significa que, para o observador, o comprimento de onda dessa luz aumenta com o tempo, idem o valor de Z . Assim, o parâmetro Z (redshift) representa a medida – do tempo ou distância – do passado do cosmos.

Um pouco mais sobre a nebulosa de Orion. Como foi discutido no Capítulo 1, o sistema solar encontra-se na nebulosa de Orion, aqui mostrada na figura rebatizada como 4.52. A nebulosa, (catalogada como objeto M42) ocupa uma vasta região da Via Láctea, com dimensão estimada em 30 anos-luz. A constelação de Orion, Figura 4.53, é parte da nebulosa de Orion. O nome é uma reverência dos povos antigos ao lendário caçador da mitologia greco-romana. A Terra encontra-se há 1.600 anos luz da constelação de Orion.



Figura 4.52 – Nebulosa de Orion

Constelação de Orion. Está localizada na região central iluminada da Figura 4.52. A observação a olho nu de suas estrelas é praticamente impossível. Portanto, a riqueza de detalhes mostrada na figura foi possível graças ao poder de resolução de imagem do telescópio espacial Hubble. Ao mesmo tempo, sabe-se que a luz intensa que permeia a nebulosa da figura é produzida em parte por um pequeno número de estrelas formadas apenas há alguns milhões de anos,

além de outras recém-nascidas. As quatro estrelas mais brilhantes da constelação de Orion formam um trapézio, que pode ser identificado na Figura 4.53. Essas estrelas são: Betelgeuse, Bellatrix, Saiph e Rigel. {[39];50-53}, {[42];148}

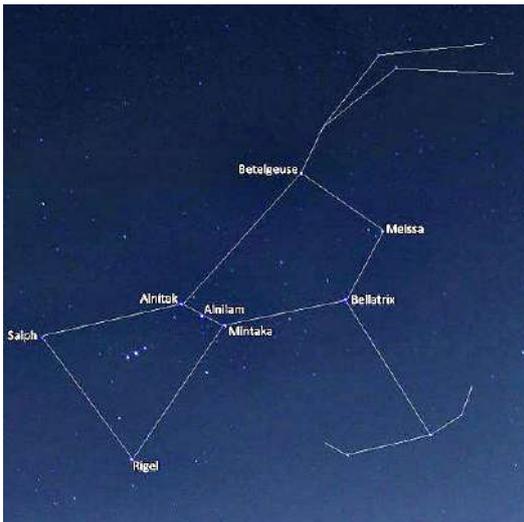


Figura 4.53 – Constelação de Orion

As oito estrelas – Figura 4.53 – que inspiraram na mitologia greco-romana a figura de Orion, o caçador, são: Betelgeuse, Meissa, Bellatrix, seguidas por Alnitak, Alnilam e Mintaka, que formam o cinturão do caçador. Além delas, são observadas também Saiph e Rigel.

A matéria das nebulosas. A matéria das nebulosas é constituída de gases congelados e partículas de matéria, idem, chamadas IDP (Interstellar Dust Particles). Essas partículas são constituídas de moléculas orgânicas e elementos metálicos, que resultaram em resíduos sólidos que foram sendo condensados ao longo do tempo. As nuvens são chamadas também de nuvens moleculares. Do ponto de vista da astrobiologia, essa matéria é determinante para a possibilidade de vida em um sistema planetário. Para mais detalhes sobre o assunto, ver no Capítulo 1; Nebulosa Solar.

Tensor de Einstein

A teoria das grandes estruturas cósmicas é a Teoria da Relatividade Geral (TRG). Ela é resolvida pelo Tensor de Einstein. O tensor encerra em si um maquinário matemático suficiente para cálculo do campo gravitacional em dimensões astronômicas. Ele incorpora essencialmente três propriedades fundamentais do espaço cósmico: energia, matéria, e geometria, através da seguinte equação matricial do tipo 4x4: {[4];483}

$$G_{\alpha\beta} = 8\pi G T_{\alpha\beta} \quad (4.9)$$

No entanto, a expressão; Tensor de Einstein é uma redundância. Na realidade, o cálculo do campo significa o cálculo da curvatura de Riemann, que é feito através do tensor de Riemann, o qual está contido no lado esquerdo da equação (4.9). Nela, G representa a constante gravitacional de Newton. Por outro lado, o termo; $T_{\alpha\beta}$, que é chamado tensor energia-momentum, é função da matéria e energia contida no espaço do campo gravitacional do cálculo. Resumindo; Na equação (4.9), o lado direito – que incorpora toda a matéria e energia do espaço – determina a geometria do campo gravitacional, que é representado pelo lado esquerdo da equação.

Cálculo do Tensor. Em que pese sua simplicidade, a solução da equação (4.9) é tarefa árdua e extensa, que exige a especialização em cosmologia relativística. Uma sugestão de dez disciplinas para seu estudo básico é a seguinte: Invariante de Lorentz; Referencial inercial; Massa inercial versus massa gravitacional; Princípio da equivalência forte; Teorema Egrégio de Gauss e Geometria Diferencial; Métrica e curvatura do espaço; Métrica de Minkowsky; Intervalo invariante ds^2 ; Princípio da covariância geral; Equação da geodésica. As seguintes referências podem ser de grande utilidade nesse estudo básico: [3], [16],[18],[22].

Referências Bibliográficas

- [1] - Harris, R. **Non classical Physics – Beyond Newton's View** 1.ed. Addison Wesley Longman, Inc. 2725 Sand Hill Road, Menlo Park, CA 94025, USA 1998.
- [3] - D'Inverno, R. **Introducing Einstein's Relativity** 1.ed. Oxford University Press Inc. New York, USA, 1992.
- [4] - Hartle, J. B. **Gravity: An Introduction to Einstein's General Relativity** 1.ed. Addison Wesley, 1301 Sansome Street, San Francisco, CA 94111, USA, 2003.
- [7] - Fishbane, P.M; Gasiorowicz, S ;Thornton, S.T. **Physics for Scientists and Engineers** 1.ed. Prentice Hall, Inc. Upper Saddle River, New Jersey 07458, USA, 1996.
- [8] – Tipler. P.A; Llewellyn, R.A. **Física Moderna** 3.ed. Tradução; Ronaldo Sergio de Biasi. LTC Editora S.A. Travessa do Ouvidor, 11, Rio de Janeiro, 20040-040, RJ, Brasil, 2001.
- [9] – Hawking, S. **The Illustrated A Brief History of Time** 1. ed. Bantam Books, New York, USA, 1996.
- [11] – Guth, A.H. **The Inflationary Universe** 1. ed. Perseus Book, USA, 1997.
- [12] – Klapdor-Kleingrothaus, H.V. Zuber, K. **Particle Physics** 2.ed. Institute of Physics Publishing, Dirac House, Temple Back, Bristol BS1 6BE, UK, 2000.
- [16] – Cheng, Ta-Pei. **Relativity, Gravitation and Cosmology: A basic Introduction** 1.ed. Oxford University Press, New York, USA, 2005.
- [18] – Padmanabhan, T. **Cosmology and Astrophysics Through Problems** 1.ed. Press Syndicate of the University of Cambridge, The Pitt Building, Trumpington Street, Cambridge CB2, 1RP, UK, 1996.
- [21] – Griffiths, D.J. **Introduction to Elementary Particles** 1.ed. John Wiley & Sons, Inc. Canada, 1987.
- [22] – Gelfand, I.M; Fomin, S.V. **Calculus of Variations** 2.ed. Dover Publications, Inc., 31, East 2nd Street, Mineola, N.Y. 11501, USA, 2000.
- [28] – Lederman, L.M; Hill, C.T. **Symmetry and the Beautiful Universe** 1.ed. Prometheus Books, 59 John Glenn Drive, Amherst, New York 14228-2197, USA, 2004.
- [47] – Schneider, P. **Extragalactic Astronomy and Cosmology** 1.ed. Springer-Verlag, Berlin Heidelberg New York; 2006.
- [48] – Kane, G. **Modern Elementary Particle Physics** Updated Edition, Perseus Publishing, Cambridge, Massachusetts, USA, 1993.
- [50] – Benenson, W; Harris, J.W; Stocker, H; Lutz, H. **Handbook of Physics** 4.ed. Springer +Business Media, Inc., 233 Spring Street, New York, NY 10013, USA, 2000.
- [51] – Schumm, B. A. **Deep down Things** 1.ed. The Johns Hopkins University Press, 2715 North Charles Street, Baltimore, Maryland, USA, 2004.
- [63] – Green, D. **High Pt Physics at Hadron Colliders** 1.ed. Cambridge University Press, The Edinburgh Building, Cambridge CB2 2RU, UK, 2005.
- [67] – Peskin, M.E; Schroeder, D.V. **An Introduction to Quantum Field Theory** 1 ed. Westview Press, 5500 Central Avenue, Boulder, Colorado, USA, 1995.
- [68] – Bettini, A. **Introduction to Elementary Particle Physics** 1.ed. Cambridge University Press, The Edinburgh Building, Cambridge CB2 8RU, UK, 2008.
- [91] – Binney, J; Tremaine, S. **Galactic Dynamics** 2.ed. Princeton University Press, 41 William Street, Princeton, New Jersey 08540, USA, 2008.
- [92] – Armitage, P.J. **Astrophysics of Planet Formation** 1.ed. Cambridge University Press. The Edinburgh Building, Cambridge CB2 8RU, UK, 2010.
- [96] – Goswami, A. **Quantum Mechanics** 2.ed. Wm. C. Brown Publishers, 1997.
- [99] – Sundaresan, M.K. **Handbook of Particle Physics** 1.ed. CRC Press LLC, 2000. W. Corporate Blvd., Boca Raton, Florida 33431, USA, 2001.
- [111] – Zuber, K. **Neutrinos Physics** 1.ed. IOP Publishing Ltd, Dirac House, Temple Back, Bristol, Bristol BS1 6BE, UK, 2004.
- [116] – Griffiths, D.J. **Mecânica Quântica** 1.ed. Tradução de Lara Freitas. Pearson Education do Brasil, Rua Nelson Francisco, 26, Limão. 02712-100, São Paulo, SP, Brasil, 2011.
- [118] – Miller, D.A.B. **Quantum Mechanics for Scientists and Engineers** 1.ed. Cambridge University Press. 32 Avenue of the Americas, New York, NY 10013-2473, USA, 2008.
- [119] – Schiff, L.I. **Quantum Mechanics** 1.ed. McGraw-Hill Book Company, USA, 1968.
- [142] – Thornton, S.T; Rex, A. **A Modern Physics for Scientists and Engineers** 3.ed. Thomson Brooks/Cole, 10 Davis Street, Belmont, CA 94002, USA, 2006.
- [154] – Martin, B.R. **Nuclear and Particle Physics** 1.ed. John Wiley & Sons Ltd. The Atrium, Southern Gate, Chichester, West Sussex, PO19 8SQ, England, 2006.
- [156] – Perkins, D.H. **Introduction to High Energy Physics**. 4. ed. 9th printing. Cambridge University Press. The Edinburgh Building, Cambridge CB2 8RU, UK, 2012.