

Ensino a Distância

COSMOLOGIA

Da origem ao fim do universo

2015

Módulo 7

A história térmica do Universo

Presidente da República
Dilma Vana Rousseff

Ministro de Estado da Ciência, Tecnologia e Inovação
José Aldo Rebelo Figueiredo

Secretário-Executivo do Ministério da Ciência, Tecnologia e Inovação
Álvaro Doubes Prata

Subsecretário de Coordenação de Unidades de Pesquisas
Adalberto Fazzio

Diretor do Observatório Nacional
João Carlos Costa dos Anjos

Observatório Nacional/MCTI (Site: www.on.br)
Rua General José Cristino, 77
São Cristóvão, Rio de Janeiro - RJ
CEP: 20921-400

Criação, Produção e Desenvolvimento (Email: daed@on.br)



Carlos Henrique Veiga
Cosme Ferreira da Ponte Neto
Rodrigo Cassaro Resende
Sílvia da Cunha Lima
Vanessa Araújo Santos
Giselle Veríssimo
Caio Siqueira da Silva
Luiz Felipe Gonçalves de Souza

Equipe de realização

Conteúdo científico e texto
Carlos Henrique Veiga

Projeto gráfico, editoração e capa
Vanessa Araújo Santos

Web Design
Giselle Veríssimo
Caio Siqueira da Silva

Colaboradores
Alexandra Pardo Policastro Natalense
Ney Avelino B. Seixas
Alex Sandro de Souza de Oliveira

Esta publicação é uma homenagem a Antares Cleber Crijó (1948 - 2009) que dedicou boa parte da sua carreira científica à divulgação e popularização da ciência astronômica.

© 2015 Todos os direitos reservados ao Observatório Nacional.



Imagem obtida pelo telescópio refletor VISTA (*Visible and Infrared Survey Telescope for Astronomy*) de 4.1 metros de abertura do espelho primário. Este telescópio está localizado no Observatório Paranal, no Chile, cuja linha de pesquisa é obter imagens na faixa de luz infravermelha.

Esta imagem revela uma região do céu profundo conhecida como campo COSMOS, localizada na direção da constelação do Sextante. Foi obtida com um tempo de exposição de 55 horas e é composta pela combinação de 6000 imagens. Esta imagem contém mais de 200.000 galáxias identificadas.

Créditos:
ESO

Ensino a Distância

COSMOLOGIA

Da origem ao fim do universo

2015

Módulo 7

A história térmica do Universo

46

A História Térmica do Universo

A HISTÓRIA TÉRMICA DO UNIVERSO

A observação sistemática das galáxias nos revelou uma surpreendente sucessão de fenômenos. É fato bem determinado que as galáxias possuem uma hierarquia em sua distribuição pelo cosmos. Elas se reúnem em grupos e em aglomerados que podem possuir de centenas a milhares de membros. Vários aglomerados se agrupam em estruturas ainda maiores, os superaglomerados de galáxias, que lançam um poderoso desafio aos pesquisadores: as galáxias sempre existiram ou foram criadas em algum momento? Se foram criadas, como isso ocorreu? Nuvens imensas de matéria se fragmentaram em galáxias ou as galáxias já formadas é que se reuniram em aglomerados? Outras observações revelaram que as linhas espectrais das galáxias se apresentam desviadas para a região vermelha do espectro eletromagnético, fenômeno esse conhecido pelo nome inglês de “*redshift*”. Essa descoberta realizada por Edwin P. Hubble em 1929 é interpretada pela grande maioria dos astrônomos como significando que as galáxias estão se afastando umas das outras. Mas as galáxias se afastam do que e porque? Na verdade não são as galáxias que se afastam umas das outras por meio de algum processo dinâmico inerente a elas mas o espaço-tempo é que está se expandindo. Se pensarmos em sentido contrário, nos deslocando para trás no tempo, vamos concluir que toda essa matéria, em algum momento, esteve concentrada em uma região de dimensões muito pequenas o que nos leva a concluir que a densidade existente quando t tende para zero era surpreendentemente alta. Além disso, também foi constatada a existência de uma radiação de fundo de microondas que permeia todo o universo e que hoje possui uma temperatura de aproximadamente 3 Kelvin. Como o universo está se expandindo e a temperatura é sensível a esse fenômeno, diminuindo com a expansão do sistema, somos levados a acreditar que, nos seus instantes iniciais, o universo deve ter tido uma temperatura extremamente alta. Esses são os dados observacionais que nos levam a acreditar que o universo teve uma origem.

Qual é então a nossa descrição sobre o início do universo? Em um determinado instante de tempo (oops! esta é uma afirmação perigosa pois podemos perguntar se o tempo foi criado junto com o universo ou se ele já existia antes da criação do universo) o universo se formou a partir de uma singularidade do espaço-tempo onde deveria haver densidade e temperatura infinita. O que se forma a partir desse instante é o próprio espaço-tempo (não as estruturas de matéria que conhecemos como as estrelas e as galáxias, pois essas só irão se formar muitíssimo mais tarde), que se expande continuamente dando origem ao nosso universo. Essa seria a representação de como teria se originado o universo, tudo que conhecemos e que, por ser tudo, não permite a existência de um observador exterior a esse espetacular evento. A isso foi dado, pejorativamente pelo físico inglês Fred Hoyle, o nome de Big Bang, nome que quer dizer a “grande explosão”, algo que nunca aconteceu.

Insistimos aqui que não poderia haver um observador para esse evento, uma vez que ele necessariamente seria parte do universo que está sendo criado. Um observador somente poderia presenciar a geração do universo se ele fosse algo externo ao universo mas isso é impossível, pois não pode haver nada fora do universo. Assim, quando um filme de TV nos mostra o Big Bang como uma linda explosão colorida há nisso dois erros fundamentais:

- não houve explosão nenhuma, pelo menos no sentido usual que damos a esse termo.
- ninguém poderia assistir à criação do universo por ser parte integrante dele, estar sendo formado ao mesmo tempo que ele. Em linguagem

mais clara, ninguém até hoje conseguiu assistir ao seu próprio parto em tempo real.

Após ser criado, o universo se expandiu e, conseqüentemente, começou a esfriar. Temos então uma história térmica para o universo. Essa história procura descrever os inúmeros processos físicos que ocorreram nessa odisséia e que estão intimamente associados à temperatura do universo. Esses processos englobam criação, destruição e transformação. Alguns são mais suaves, outros são extremamente violentos com a liberação de quantidades de energia jamais imaginadas anteriormente.

Mostramos abaixo algumas tabelas que esquematicamente descrevem a história térmica do universo. Os nomes dados às diversas eras, com algumas poucas exceções, variam com os autores, porém a física subjacente a elas é sempre a mesma.

Alguns tamanhos úteis em ordem de grandeza

PROPRIEDADE	VALOR
comprimento de Planck	10^{-35} metro
limite observacional atual no interior da matéria	10^{-19} metro
diâmetro do próton	10^{-15} metro
diâmetro do núcleo atômico	10^{-14} metro
diâmetro do átomo	10^{-10} metro
altura do ser humano	$1,0 - 2,0 \times 10^0$ metros
diâmetro da Terra	10^7 metros
diâmetro de uma estrela	10^9 metros
distância Terra-Sol (= 1 unidade astronômica)	$1,5 \times 10^{11}$ metros
diâmetro da nossa Galáxia ($\sim 10^{11}$ estrelas)	$\sim 10^{21}$ metros
diâmetro dos aglomerados de galáxias	$\sim 10^{23}$ metros
diâmetro dos superaglomerados de galáxias	$\sim 10^{24}$ metros
diâmetro da parte visível do universo (raio de Hubble $\sim 10^{11}$ galáxias)	$\sim 5 \times 10^{26}$ metros
1 megaparsec = 10^6 parsecs = $3,3 \times 10^6$ anos-luz	$3,1 \times 10^{22}$ metros

COMO OS DIVERSOS PROCESSOS FÍSICOS DOMINAM A HISTÓRIA DO UNIVERSO

Na tabela abaixo mostramos os vários processos físicos que dominam épocas determinadas da evolução térmica do universo. Esses processos físicos estão intimamente associados a fatores tais como a energia existente na época considerada.

IDADE (SEGUNDOS)	TEMPERATURA (KELVIN)	ENERGIA	PRINCIPAL PROCESSO FÍSICO
10^{-44}	10^{32}	10^{19} GeV	gravitação quântica
10^{-30}	10^{28}	10^{15} GeV	processos de partículas
10^{-12}	10^{16}	10^3 GeV	
10^{-4}	10^{12}	10^2 GeV	

1	10^{10}	1 MeV	processos nucleares
10^2	10^9	0,1 MeV	
10^{12}	4×10^3	0,4 MeV	processos atômicos
10^{12-16}	-	-	processos gravitacionais
8×10^{17}	2,7	3×10^{-4} eV	

A primeira coluna da tabela mostra a idade do Universo. A segunda coluna mostra a temperatura T correspondente a essa idade, ou seja, a temperatura da radiação T_r . A terceira coluna nos dá a energia $E = kT$ que corresponde a essa temperatura. A última coluna nos informa o principal processo físico que ocorre em cada uma dessas épocas e é determinado pela escala de energia naquele instante.

ERA DE RADIAÇÃO E ERA DE MATÉRIA

Durante os primeiros estágios da expansão do universo a energia de radiação era maior do que a energia da matéria. Hoje a densidade de radiação é menor do que 1/1000 da densidade de matéria do universo.

Quando, entretanto, a temperatura do universo era aproximadamente igual a 4000 K e a idade do universo era 500000 anos, a densidade de radiação tornou-se igual à densidade de matéria. Antes daquela época a radiação dominava a matéria. Este estágio inicial do universo é chamado de “era de radiação” enquanto que o estágio subsequente é a “era de matéria”.

Logo depois do começo da era de matéria, quando a idade do universo era de 700000 anos, um outro evento significativo ocorreu: a criação de átomos a partir de núcleos e elétrons. A temperatura do universo, neste estágio, era de 3000 K. A temperaturas maiores os átomos estavam ionizados por causa das contínuas colisões entre partículas e fótons. À medida que a temperatura caiu abaixo de 3000 K os fótons não tiveram mais energia suficiente para ionizar a matéria inteiramente de modo que átomos neutros podiam ser formados. A maioria dos elétrons tomaram parte na formação de átomos neutros de forma que somente alguns poucos elétrons livres foram deixados para trás e a interação entre fótons e elétrons cessou.

Ao mesmo tempo o caminho livre médio dos fótons, devido ao espalhamento por átomos neutros, se tornou tão grande quanto o tamanho do horizonte. Por conseguinte, os fótons se tornaram desacoplados da matéria e ficaram livres para se mover através de todo o espaço. Hoje esses fótons constituem a chamada “radiação de fundo de microonda”.

Mostramos abaixo as diversas subdivisões que caracterizam tanto a era de domínio de radiação como a era de domínio de matéria.

DOMÍNIO DA RADIAÇÃO	TEMPO (SEGUNDOS)	DENSIDADE (KG/M ³)	TEMPERATURA (KELVIN)
ERA PLANCK	de $t = (?)$ a $t = 10^{-43}$ segundos	de infinito a 10^{95}	de infinito a 10^{32}
ERA GUT	de $t = 10^{-43}$ segundos a $t = 10^{-35}$ segundos	de 10^{95} a 10^{75}	de 10^{32} a 10^{27}
ERA HÁDRON	de $t = 10^{-35}$ segundos a $t = 10^{-4}$ segundos	de 10^{75} a 10^{16}	de 10^{27} a 10^{12}
ERA LÉPTON	de $t = 10^{-4}$ segundos a $t = 10^2$ segundos	de 10^{16} a 10^4	de 10^{12} a 10^9
ERA NUCLEAR	de $t = 10^2$ segundos a $t = 3 \times 10^{10}$ segundos (1000 anos)	de 10^4 a 10^{-13}	de 10^9 a 6×10^4

DOMÍNIO DA MATÉRIA	TEMPO (SEGUNDOS)	DENSIDADE (KG/M ³)	TEMPERATURA (KELVIN)
ERA ATÔMICA	de $t = 3 \times 10^{10}$ segundos a $t = 3 \times 10^{13}$ segundos	de 10^{-13} a 10^{-19}	de 6×10^4 a 10^3
“FASE” GALÁCTICA	de $t = 3 \times 10^{13}$ segundos a $t = 3 \times 10^{16}$ segundos	de 10^{-19} a 3×10^{-25}	de 10^3 a 10
“FASE” ESTELAR	de $t = 3 \times 10^{16}$ segundos até hoje ($> 10^{10}$ anos aproximadamente 3×10^{17} segundos)	de 3×10^{-25} a 10^{-26}	de 10 a 3

FASES	TEMPO (SEGUNDOS)	TEMPERATURA (KELVIN)	ENERGIA (eV)
ERA PLANCK Gravitação Quântica (Supergravidade? Dimensões extras? Supersimetria? Superstrings?)	do Big Bang até 10^{-43} segundos	$10^?$	$10^?$ GeV
início da ERA GUT	10^{-43} segundos	10^{32}	10^{19} GeV
Transição de fase da GUT: inflação, defeitos topológicos; Início da ERA QUARK	10^{-35} segundos	10^{27}	10^{14-16} GeV
Transição Eletrofraca Início da ERA HÁDRON	10^{-10} segundos	10^{15}	300 GeV
Transição Quark-Hádron: quebra de simetria chiral e confinamento de cor (formação de bárions e mésons)	10^{-5} segundos	--	100-300 MeV
Início da ERA LÉPTON	--	10^{13}	10
Desacoplamento do neutrino Início da ERA FÓTON-PLASMA	1 segundo	10^{10}	10^{-3}
Aniquilação elétron-pósitron	4 segundos	--	5×10^{-4}
NUCLEOSSÍNTESE do Big Bang: origem do He ⁴ , He ³ , Deutério e Lítio (física nuclear)	10^{-2} segundos a 10^2 segundos	--	10 a 0,1 MeV
Igualdade matéria-radiação Início da ERA DE MATÉRIA	5×10^{11} segundos	10^5	10^{-9}
Recombinação do Hidrogênio (íons e elétrons se combinam para formar átomos: física atômica) Desacoplamento entre matéria e radiação (fóton)	10^{13} segundos	3000	3×10^{-10}
Formação de estruturas não lineares	10^{17} segundos	3	6×10^{-13}

“IDADE DO UNIVERSO”	TEMPERATURA	MATÉRIA NO UNIVERSO	COMENTÁRIOS		
~ 2 x 10 ¹⁰ anos (~ 6 x 10 ¹⁷ segundos)	3 K (~ 2,6 x 10 ⁻⁴ eV)	<ul style="list-style-type: none"> • 0,4 fótons por mm³ • 0,1 - 1 nucleon por m³ • razão n/p ~ 1/8 (em média) • razão e/p ~ 1 (em média) • alguns poucos neutrinos por mm³ 	+ matéria escura?		
		fótons desacoplam das outras formas de matéria; os átomos existem			
10 ⁹ fótons/mm					
~ 6 x 10 ⁵ anos	~ 3000 K	<ul style="list-style-type: none"> • fótons em equilíbrio com plasma de núcleos e elétrons • nêutrons ligados em núcleos 	formação de energia	a matéria “conhecida” é principalmente leptônica mas há evidência da existência de matéria “escura”	os “três primeiros minutos”
~ 3 minutos (= 180 segundos)	~ 0,1 MeV	<ul style="list-style-type: none"> • prótons e nêutrons formam gás • não existem pares elétron-pósitron 			
~ 15 segundos	~ 0,3 MeV	<ul style="list-style-type: none"> • pares elétron-pósitron em equilíbrio com fótons e prótons • os neutrinos desacoplam de outras formas de matéria 			
~ 1 segundo	~ 1 MeV	<ul style="list-style-type: none"> • neutrinos em equilíbrio com a matéria • não existem hádrons exceto prótons e nêutrons 			
~ 10 ⁻³ segundo	~ 30 MeV	<ul style="list-style-type: none"> • hádrons instáveis 			
LIMITE DA FÍSICA “CONVENCIONAL”					
~ 5 x 10 ⁻⁵ segundo	~ 150 MeV	os hádrons formam gás			
transição de fase hadrônica (grande diminuição de energia e densidade de entropia)					

~ 2 x 10 ⁻⁵ segundo	~ 250 MeV	matéria hadrônica coalesceu em plasma de quark-gluon	10 ³⁶ partículas por mm ³ = 1 partícula por fm ³ proporcional a T ³	matéria "conhecida" principalmente hadrônica	natureza da matéria escura?
		as interações eletromagnética, fraca e forte são independentes; fótons			
~ 10 ⁻⁸ segundo	~ 10 GeV (= 10 ⁴ MeV)	transição de fase eletrofraca			
~ 10 ⁻¹² segundo	~ 10 ³ GeV	as interações eletromagnética e fraca se misturam			
		os fótons estão misturados com Z ⁰ sem massa e W [±] sem massa			
		???????????			
~ 10 ⁻³² segundo	~ 10 ¹³ GeV	interações eletrofraca e nuclear separadas; gluons			outro tipo de expansão? criação de matéria e entropia a partir de energia de campo coerente?
transição de fase eletronuclear (origem da assimetria de bárions?, monopolos? strings?)					
~ 10 ⁻³⁶ segundo	~ 10 ¹⁵ GeV	interações eletrofraca e nuclear se misturam			
		gluons misturados com outras partículas			
		???????????????????			
~ 10 ⁻⁴² segundo	~ 10 ¹⁸ GeV	???????????????????			
GRAVITAÇÃO QUÂNTICA ???					
~ 0 (por definição)	~ 10 ¹⁹ GeV (energia de Planck)				

OS TRÊS PRIMEIROS MINUTOS

A temperatura de 10¹¹ K

A essa temperatura corresponde uma idade do universo t= 0,01 segundo.

Existe equilíbrio térmico entre fótons e partículas. Elétrons, neutrinos e suas antipartículas (pósitrons e antineutrinos) estão sendo criados em abundância. A criação de hádrons cessou, uma vez que estes exigem temperaturas muito mais altas.

Os prótons e nêutrons estão sendo continuamente convertidos uns nos outros. Deste modo, eles se apresentam em proporções mais ou menos iguais, 50% de prótons e 50% de nêutrons.

Nenhum elemento químico complexo pode ser formado, pois quaisquer concentrações de prótons e nêutrons são imediatamente dispersadas.

A temperatura de 10^{10} K

A essa temperatura corresponde uma idade do universo de $t = 1,1$ segundos.

As interações fracas saem do equilíbrio térmico. Consequentemente, neutrinos e antineutrinos não estão mais em equilíbrio térmico com as outras partículas. Ao invés disso, eles se movem livremente no espaço. A energia deles se reduz continuamente devido à expansão cósmica.

De acordo com as previsões teóricas, se pudéssemos observar estes neutrinos cosmológicos que preenchem o espaço uniformemente, eles deveriam ter hoje uma temperatura de 2 K. Atualmente não existe uma maneira conhecida de observar esta radiação, porque o neutrino interage muito fracamente com a matéria. Para parar um neutrino precisamos, em média, de uma parede de chumbo com vários anos-luz de espessura.

Entretanto, como o número desses neutrinos é enorme (estima-se que a energia total deles é de pelo menos 45% da energia total dos fótons) não está fora de questão que um dia essa radiação de neutrino será detectada. Tal descoberta será um dos mais importantes avanços da cosmologia.

A uma temperatura de 10^{10} K existem mais prótons do que nêutrons, cerca de 76% de prótons e 24% de nêutrons. Isso é devido ao fato de que a massa do nêutron é ligeiramente maior do que a massa do próton e as duas espécies são mantidas em equilíbrio pelas interações fracas. As reações que produzem os prótons são assim favorecidas em relação às reações reversas que produzem os nêutrons.

Quando as interações fracas saem do equilíbrio, a razão de prótons para nêutrons “congela” no valor alcançado naquela temperatura.

A temperatura de 10^9 K

A essa temperatura corresponde uma idade do universo $t = 3$ minutos.

Esta temperatura está bem abaixo do valor mínimo exigido para a criação de pares elétron-pósitron. Os fótons, consequentemente, cessaram de formar estes pares e a maior parte dos elétrons e pósitrons já formados se aniquilam mutuamente. Somente alguns elétrons foram deixados para trás, aproximadamente igual em número de prótons, de modo que a carga total do universo é zero ou quase zero.

Neste estágio os elementos leves são formados em grandes quantidades, principalmente deutério D (ou hidrogênio pesado ${}^2\text{H}$) e hélio (${}^4\text{He}$). As colisões entre prótons e nêutrons, que são agora na proporção 86% prótons para 14% nêutrons, formam núcleos de deutério. Posteriormente o deutério colide com prótons e nêutrons e forma o hélio.

Todo o deutério e o hélio é formado em um intervalo de tempo muito curto. No final desse estágio a temperatura é $T = 0,9 \times 10^9$ K e a idade do universo é $t = 3$ minutos e 45 segundos. Um pouco mais tarde, praticamente todos os nêutrons foram incorporados em hélio ${}^4\text{He}$ e outros elementos, de modo que não são deixados mais nêutrons para que a nucleossíntese continue. Somente muito mais tarde os elementos mais pesados são formados nos interiores estelares.

A nucleossíntese cosmológica dura aproximadamente 4 minutos, de $t = 10$ segundos a $t = 3$ minutos e 45 segundos. Este estágio, muito importante da evolução cósmica, foi primeiramente descrito por George Gamow e seus colaboradores no ano de 1948.

Entre o final da nucleossíntese, $t = 4$ minutos, até a época da formação dos átomos, $t_{\text{rec}} = 700000$ anos, nada importante aconteceu. Depois da época de recombinação, o evento mais importante no universo foi a formação de galáxias e estrelas, como veremos mais tarde.

O intervalo de formação de energia de 10 segundos <math>t < 24\text{ horas} \sim 0,9 \times 10^5\text{ segundos}</math>

- de $t \sim 10$ segundos em diante, prótons e nêutrons estavam em equilíbrio cinético com os fótons, mas não em equilíbrio “nuclear-químico” porque a formação de núcleos é lenta demais.
- se o equilíbrio completo prevalece, a maior parte de p e n estaria primeiro em ${}^4\text{He}$ ($0,3\text{ MeV} > T > 0,2\text{ MeV}$) e então em ${}^{56}\text{Fe}$ ($T < 0,2\text{ MeV}$).
- então a energia é criada até $7,7\text{ MeV/nucleon}$.

energia = quantidade máxima de trabalho mecânico que pode ser extraída de um sistema físico até que o equilíbrio seja alcançado

- isso ocorreu até $t \sim 24\text{ horas} \sim 0,9 \times 10^5\text{ segundos}$, quando $T \sim 3\text{ keV}$
- em $t \sim 2 \times 10^{13}\text{ segundos}$ uma energia de 10 eV/nucleon foi perdida devido à formação de átomos.
- a energia restante é a base da produção de energia nuclear por estrelas (e também da vida?)
- outra fonte de energia: estrelas colapsantes

A RADIAÇÃO DE FUNDO

A primeira conclusão que podemos tirar da radiação de fundo cósmica é que o universo primordial deve ter sido muito quente. O universo se expande e isso nos diz que a temperatura da radiação no universo está sempre caindo. Portanto, quanto mais primitivo for o instante cósmico considerado, mais alta deve ter sido sua temperatura.

A temperatura da radiação é inversamente proporcional ao fator de escala do universo ou seja

$$T_r \text{ proporcional } 1/R$$

Veja que quando R é muito pequeno, isto é, no universo primordial, T_r pode ser muito alta.

Deve ser enfatizado que T_r é somente a temperatura da componente de radiação. Então, um T_r alto não é equivalente à alta temperatura do universo inteiro.

Cálculos nos mostram que quando a temperatura da radiação era mais alta do que 300 K , o universo estava preenchido principalmente com radiação, com partículas salpicadas aqui e ali. Este período é chamado de **era radiativa do universo**.

Durante essa fase radiativa não existiam estrelas. Essas foram formadas quando as partículas se agruparam por meio de atração gravitacional mútua. A ação da radiação é “soprar” estas aglomerações de matéria, impedindo que elas se formem. Durante a era de radiação o seu vento era muito mais forte do que a gravitação entre as partículas e, dessa maneira, ela conseguia impedir qualquer acumulação de matéria.

Desse modo, na época quando $T_r > 300\text{ K}$, as várias partículas materiais do universo estavam quase que uniformemente distribuídas no espaço, sem acumulações, ou aglomerações e sem formar de modo algum estruturas complicadas.

47

O início do universo: as Eras

Também em um meio ambiente mais quente do que 3000 K a maioria dos átomos estaria ionizada. Deste modo, o período de radiação não era feito de um estado de fótons mais átomos. Ela era um tipo de plasma uniformemente distribuído e esse plasma era composto de uma mistura de elétrons, prótons, núcleos atômicos e fótons.

Alguns períodos selecionados na história térmica do universo

- Era Planck
- Era de Grande Unificação
- Era Inflacionária
- Era Hadrônica
- Era Leptônica
- Era de Nucleossíntese
- Era de Recombinação
- A formação de estrelas e galáxias

O INÍCIO DO UNIVERSO: AS ERAS

ERA PLANCK

Como a física consegue explicar o começo do universo? Na verdade, a física que conhecemos hoje não consegue. Quando voltamos no tempo, na direção daquilo que teria sido o chamado Big Bang, deparamos com uma barreira ao nosso conhecimento, até agora intransponível, e que chamamos de era Planck. O mais importante é que essa barreira não será superada apenas aprofundando o que já sabemos de física. Na verdade, precisamos de uma nova teoria física para descrever o que deve ter acontecido nesses primeiros momentos do universo.

Ocorre que, à medida que vamos para dimensões muito pequenas, o domínio da física quântica fica estabelecido. Os conceitos de tempo e de espaço não têm mais os significados normais que nos são dados pela física clássica. Nessas condições, a Teoria Relativística da Gravitação não pode ser usada: ela pertence ao domínio da física clássica, ou seja, ela não descreve os processos quânticos. Precisamos de uma teoria que descreva os fenômenos gravitacionais que ocorrem dentro do domínio quântico. Precisamos de uma Teoria Quântica da Gravitação e esta ainda não é conhecida. Várias tentativas têm sido feitas para desenvolver uma teoria desse tipo, mas os princípios envolvidos são bastante complexos.

Há ainda um outro problema: para descrever esses momentos iniciais do universo é necessário que as interações fundamentais que conhecemos sejam unificadas em uma única teoria. Por interações fundamentais queremos dizer as forças que atuam na natureza, no nosso dia-a-dia, e são as responsáveis pelos diversos fenômenos que ocorrem ao nosso redor. Para descrever os fenômenos eletromagnéticos temos a eletrodinâmica quântica. Os processos que ocorrem no interior da matéria, no núcleo dos átomos, são descritos pela cromodinâmica quântica, enquanto que os processos de emissão radioativa, responsáveis pela transmutação de alguns elementos químicos, são produzidos pela chamada interação fraca. A unificação das teorias eletromagnética e fraca deu origem à chamada teoria eletrofraca ou teoria de Glashow - Weinberg - Salam. Procura-se hoje, e até agora não foi achada, uma teoria

que englobe os processos descritos pela teoria eletrofraca e pela cromodinâmica quântica, a chamada teoria de grande unificação ou, simplesmente GUT, abreviação do termo inglês **Grand Unified Theory**. Essa teoria deverá ser unificada com a teoria da gravitação, dando origem a uma única teoria capaz de descrever todos os processos que ocorrem no universo. A essa teoria, que unifica todas as interações fundamentais da natureza, damos o nome de **supergravidade**.

A menos de alguma surpresa, e a história da física está cheia de exemplos deste tipo, somente uma teoria de supergravidade é que teria condições de explicar os primeiros momentos do universo. Vemos, portanto, que para descrevermos o que aconteceu nos instantes iniciais do nosso universo possivelmente ainda precisamos “inventar” duas novas teorias!

Teorias da Gravitação com mais de 4 dimensões

Um dos grandes nomes da física no início do século XX foi Oskar Klein, nascido em Mörby, Suécia. Em 1924, Klein desenvolveu um importante trabalho de física teórica enquanto tentava estabelecer a unificação da teoria eletromagnética e a gravitação. Ele tentou resolver esse problema aumentando as dimensões do espaço-tempo que agora teria cinco dimensões. Ao que parece, ele não tinha conhecimento do trabalho feito em 1919 pelo físico Theodor Kaluza usando o mesmo artifício. Kaluza havia enviado esse trabalho, no qual propunha uma unificação da gravitação com a teoria eletromagnética, para a apreciação de Albert Einstein, que não se interessou por ele. Mais tarde, Einstein reviu sua posição e, ao ver a originalidade das idéias ali contidas, incentivou Kaluza a publicá-lo. O próprio Einstein apresentou o artigo de Kaluza no dia 8 de dezembro de 1921.

Tendo agora conhecimento das ideias de Kaluza, Klein adaptou-as fazendo algumas importantes modificações. Klein sugeriu que a dimensão extra, a quinta, estava “enrolada” como uma bola que era da ordem do comprimento de Planck ou seja, 10^{-33} . É importante notar que essa dimensão extra, embora estivesse “enrolada”, ainda tinha natureza euclidiana. Basicamente, a quinta coordenada não era observável mas era uma quantidade física que estava conjugada à carga elétrica. A esse “enrolamento” de uma (ou várias) dimensões espaciais damos o nome de “compactificação”.

Klein supôs que a quinta dimensão era periódica. A dimensão era da ordem do comprimento de onda de Planck. Esse resultado de Klein despertou grande interesse nos físicos. A teoria passou a ser chamada de “teoria Kaluza-Klein”.

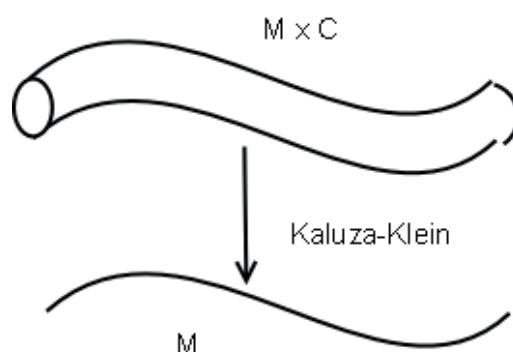
Klein ainda faria outra grande descoberta para a física. A ele e ao físico Walter Gordon devemos a descoberta da primeira equação de onda relativística, a chamada “equação de Klein-Gordon”.

Descrevendo a formação do Universo em mais de 4 dimensões

Tentativas alternativas também têm sido feitas para descrever os instantes iniciais do universo usando um número maior de dimensões. Embora a Teoria Relativística da Gravitação nos forneça uma descrição do espaço-tempo em quatro dimensões, outras teorias propõem que na era Planck o espaço poderia possuir um número bem maior de dimensões espaciais. Por exemplo, as teorias de supergravidade propõem 11 dimensões para o espaço-tempo. E onde estariam estas dimensões suplementares? Segundo essas teorias elas teriam sido “compactificadas”, suprimidas de tal modo que a partir da era Planck somente quatro dimensões do nosso universo é que sofreriam expansão. Esta seria a razão pela qual somente percebemos 4 dimensões em nosso universo.



Oskar Klein (1894 - 1977) e Theodor Kaluza (1885 - 1954).



Em resumo:

A **era Planck** cobre o intervalo de tempo que vai de 10^{-43} a 10^{-35} segundos depois do Big Bang.

É estimado que a temperatura durante esta época diminui de 10^{32} K a 10^{27} K.

- **10^{-43} segundos**

Neste instante a força da gravidade se separou das outras três forças, coletivamente conhecidas como a **força eletro nuclear**.

Uma teoria completa de gravitação quântica tal como a **teoria dos superstrings** é necessária para compreendermos estes eventos muito primordiais. Entretanto, a atual compreensão da cosmologia na teoria de cordas é muito limitada.

O diâmetro do universo atualmente observável é teorizado como 10^{-35} metros, o que é conhecido como **comprimento de Planck**. Um intervalo de 10^{-43} segundos é conhecido como **tempo de Planck**.

- **10^{-36} segundos**

Neste instante a força forte se separa da força eletro nuclear deixando duas forças: forças eletromagnética e eletro fraca.

Os limites da Gravitação Quântica

Em princípio, à medida que R tende para zero a temperatura T tende para infinito. Chegamos então a um ponto no qual continuar raciocinando em termos de física clássica se torna impossível. É incorreto estender a solução clássica para $R=0$ e concluir que o universo começou em uma singularidade de densidade infinita. Uma questão comum sobre o Big Bang é “o que aconteceu em t menor que 0?” Na verdade não é mesmo possível chegar ao instante zero sem adicionar novas leis da física. A singularidade inicial não indica algum defeito fatal na idéia completa de Big Bang. Ao invés disso, devemos nos tranquilizar de que o modelo do Big Bang nos dá bons resultados em todos os lugares exceto em um deles onde sabemos por antecedência que ele será inválido.

O comprimento de onda Compton de uma partícula é dado por:

$$\lambda = \frac{h}{mc} = 2\pi \frac{\hbar}{mc},$$

Onde: h é a constante de Planck,

m é a massa da partícula,

c é a velocidade da luz.

Igualando a definição $M = \frac{Gm}{c^2}$ (Raio de Schwarzschild) com o seu respectivo comprimento de onda, obtemos uma massa característica para a gravidade quântica, conhecida como **massa de Planck**.

$$m_p \equiv \sqrt{\frac{\hbar c}{G}} \simeq 10^{19} \text{ GeV}$$

Temos também que o comprimento de planck é

$$l_p \equiv \sqrt{\frac{\hbar G}{c^3}} \simeq 10^{-35} \text{ m}$$

e também que o tempo de planck pode ser escrito

$$t_p \equiv \sqrt{\frac{\hbar G}{c^5}} \simeq 10^{-43} \text{ seg.}$$

A massa característica para a gravitação quântica, m_p , e o correspondente comprimento de onda do proton $\frac{\hbar}{m_p c}$ e tempo de planck $\frac{l_p}{c}$ formam o

chamado **sistema de unidades de Planck** que, como vimos acima, pode ser construído a partir de G , \hbar e c .

A pequenez dessas escalas faz com que as observações em laboratórios sejam impossíveis serem realizadas no momento e isso é uma das características fundamentais de qualquer análise da gravitação quântica.

O tempo de Planck, por conseguinte, estabelece a origem do tempo para a fase clássica do chamado Big Bang.

ERA DE GRANDE UNIFICAÇÃO

No período que vai de 10^{-43} segundos até 10^{-33} segundos temos o domínio da chamada Teoria de Grande Unificação ou simplesmente GUT (do inglês *Grand Unified Theory*). Nessa fase, impressionantes fenômenos irão ocorrer. É nela que se dá a origem da assimetria entre matéria e antimatéria, ao mesmo tempo em que surgem os chamados monopólos. Também é nessa fase que ocorre o importante fenômeno da inflação cósmica, um processo que, pela sua extraordinária dinâmica, fez com que o universo sofresse uma inacreditável expansão em um pequeníssimo intervalo de tempo.

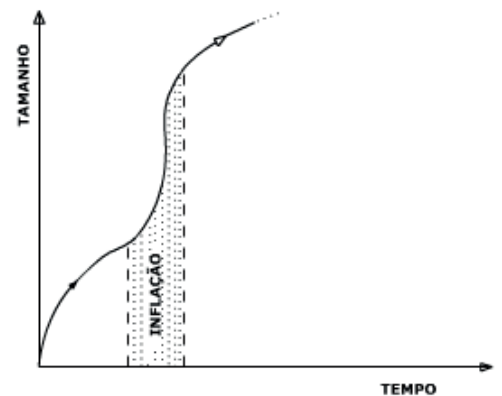
O modelo inflacionário foi primeiramente proposto por Guth em 1981. Segundo ele, aproximadamente na época de quebra de simetria da grande unificação, cerca de 10^{-35} após o Big Bang, o universo teria passado por uma rápida e enorme expansão.

Durante esse processo, o raio de curvatura do universo aumentou por um fator de 10^{43} , o que fez com que sua geometria, inicialmente curva, se tornasse quase que exatamente plana. Essa enorme expansão provocou um extraordinário decréscimo na temperatura do universo, que agora se aproxima de zero.

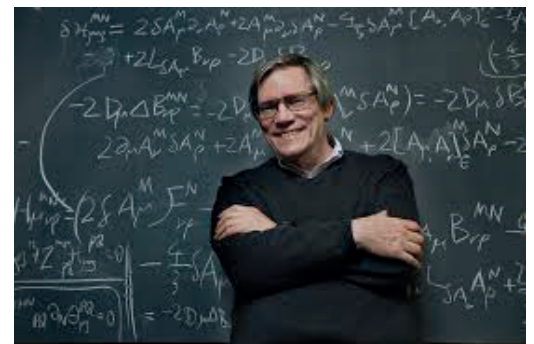
No entanto, a energia liberada nessa transição, que chamamos de transição do vácuo, foi transformada em energia térmica. Essa energia térmica, transferida para as partículas que estão no universo, irá reaquecê-las até que elas estejam aproximadamente à mesma temperatura que teriam se não tivesse acontecido a inflação.

O que provoca esta inflação? Novas ideias, tais como vácuo e quebra de simetria, serão necessárias para esclarecer o que está ocorrendo. Para a física o vácuo não é vazio. Ele está completamente preenchido de energia e, segundo a física de partículas elementares, pares partícula-antipartícula são continuamente criados e aniquilados nele. Nas altíssimas temperaturas que caracterizam a fase GUT do universo o vácuo é o estado de energia mais baixa e, portanto, estável.

À medida que o universo se expande ele esfria e quando a temperatura atinge o valor crítico de 10^{14} GeV o vácuo simétrico se torna instável. Para este valor de temperatura a energia do vácuo simétrico é mais alta do que aquela do vácuo de quebra de simetria. Isso obriga o universo a fazer uma transição



Modelo inflacionário do Universo proposto por Guth (1981).



Alan Guth (1947 - 1981).

de fase indo do estado de maior energia para o estado de energia mais baixa. Esta seria a origem da inflação que faz com que o universo se expanda de uma maneira exponencial.

A inflação também poderia ajudar as teorias de dimensões mais altas sobre as quais falamos anteriormente. Pode ser que o nosso universo seja realmente descrito por uma teoria com um número maior de dimensões do que as quatro a que estamos acostumados. Neste caso teríamos a ilusão de viver em um universo com 3 dimensões simplesmente porque três das dimensões espaciais teriam sido “inflacionadas”, enquanto que as dimensões restantes seriam, até hoje, pequenas demais para serem observadas.

No final dessa era, quando o universo esfriou para 10^{26} K, houve uma quebra espontânea de simetria e as interações fundamentais, antes unificadas em uma única teoria que chamamos de GUT, foram separadas em dois tipos de interações: a interação forte e a interação eletrofraca. Iniciou-se uma nova fase para o universo. Essa quebra de simetria que ocorreu durante a GUT, por não ser a mesma em todas as regiões do universo, deu origem aos chamados **defeitos topológicos**, entre eles os chamados monopólos magnéticos, as cordas e as paredes cósmicas.

ERA INFLACIONÁRIA

A Inflação do Vácuo: o conceito moderno de vácuo

O que é o vácuo? Os cientistas em épocas diferentes têm mudado bastante a sua compreensão sobre o vácuo.

Na época do predomínio da mecânica clássica o vácuo era simplesmente o “espaço vazio”. Com o avanço do eletromagnetismo clássico, apresentado pelo físico escocês James Clerk Maxwell, o vácuo passou a ser encarado como um “éter”, um meio rarefeito que preenchia todo o espaço.

Na física moderna o vácuo é um estado fundamental, o ponto de partida de várias excitações ou perturbações.

Embora essas compreensões sobre o vácuo fossem diferentes, elas implicitamente concordavam que o vácuo era único e que existia somente um bem determinado estado de vácuo.

Para os cientistas da época, parecia que o estado de vácuo era o ponto de partida e a base que fornecia medições para todos os movimentos. Ao mesmo tempo ele mesmo era livre de qualquer efeito dos movimentos da matéria. A relação entre esses dois conceitos seria unilateral ou seja



Essa relação unidirecional não se ajusta bem na estrutura atual da física, onde o efeito entre sistemas tem sempre um caráter mútuo.

Na teoria moderna da física de partículas estamos começando a reconhecer que há de fato o tipo de relação mútua que esperamos entre o vácuo e o movimento da matéria, ou seja,



A principal conclusão tirada disto é que, acima de tudo, o estado de vácuo não é certamente único e que existem muitos possíveis estados de vácuo.

O que queremos dizer por “vários diferentes estados de vácuo”? Vamos tomar o exemplo mais simples. Suponha que existe um campo na Natureza e

sua intensidade será representada por σ . Em geral, “espaço vazio” deve corresponder a $\sigma=0$, pois no estado de vácuo a intensidade de campo deve ser zero. Do ponto de vista da teoria de partículas elementares, o vácuo que corresponde a $\sigma=0$ é devido apenas a $\sigma=0$ ser o estado de energia mais baixo. Todos os estados $\sigma \neq 0$ têm energias mais altas.

A figura ao lado mostra a variação da energia do campo com a intensidade do campo. Note que o ponto $\sigma=0$ é o valor mínimo que a curva pode assumir e, portanto, corresponde ao estado fundamental ou “estado de vácuo”.

No entanto, um fato curioso pode acontecer. De acordo com a interpretação acima, o vácuo não necessariamente corresponde a nenhum campo- σ ou ao campo em $\sigma=0$. Se a energia do campo- σ é da forma mostrada na figura ao lado, então haverá **dois estados de vácuo**

$$\sigma = +\sigma_0$$

$$\sigma = -\sigma_0$$

Para esta curva de energia, embora $\sigma=0$ seja um valor extremo, ele é um máximo de modo que o estado $\sigma=0$ é instável.

A chamada Teoria de Grande Unificação acredita que existe na Natureza os chamados “campos de Higgs” para os quais a curva de energia tem de fato a forma mostrada na figura ao lado (Figura 2). No estado de vácuo o campo de Higgs σ não é zero.

Olhando de novo para a curva de energia da figura ao lado (Figura 2), vemos que o estado $\sigma=0$ é comparativamente simétrico, enquanto que para os estados $\sigma = +\sigma_0$ e $\sigma = -\sigma_0$ a simetria é quebrada. Um ponto de vista básico da Teoria de Grande Unificação é este: o motivo pelo qual a Natureza não pode ser mantida em um estado de simetria perfeita é o fato de que o estado de vácuo completamente simétrico é instável

As transições de fase do vácuo

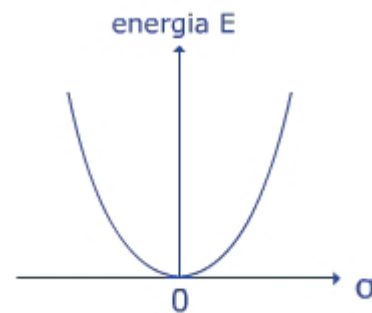
O conceito de transição de fase não é estranho para nós. Por exemplo, quando a água é resfriada a 0° ocorrerá uma mudança de fase que a fará passar da fase líquida para a fase sólida. Antes e depois dessa mudança de fase, a água terá a mesma composição química. O que muda nela é a simetria do seu estado. Fenômenos desse tipo podem ocorrer com diversos materiais, alguns deles tendo suas propriedades alteradas após uma transição de fase.

O aspecto característico da mudança de fase que ocorre no vácuo é também uma mudança em suas propriedades de simetria. Olhemos de novo para o campo- σ mostrado ao lado. Estritamente falando, a curva mostrada na figura refere-se à matéria mantida a uma temperatura $T=0$. Quando T é diferente de zero a curva passa a ser aquela mostrada na figura abaixo, que nos diz que as curvas na energia do campo σ são dependentes da temperatura. Nesse novo caso, as características das curvas são as seguintes:

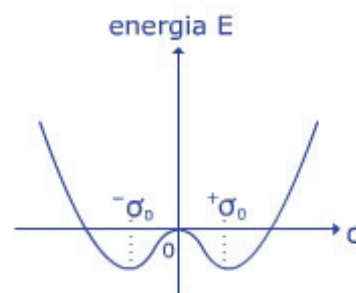
- Quando $T < T_c$, ocorre um mínimo em σ diferente de 0
- Quando $T > T_c$, ocorre um mínimo em $\sigma=0$

Neste caso, T_c representa a temperatura crítica. Quando a temperatura da matéria é mais alta do que a temperatura crítica, o vácuo está seguramente localizado no estado simétrico $\sigma=0$. Quando a temperatura cai abaixo dessa temperatura crítica, a simetria do vácuo é perdida.

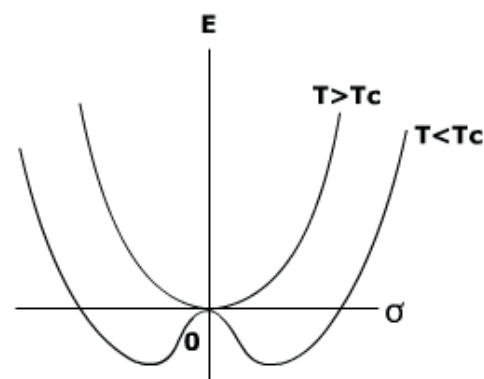
A história térmica do universo segue o decréscimo de temperatura. Dai, durante a evolução cósmica, certamente ocorreu uma série de mudanças de



Variação da energia do campo com a intensidade do campo. (FIGURA 1)



Curva de energia que mostra o comportamento dos campos de Higgs. (FIGURA 2)



Curva de energia que mostra o comportamento dos campos de Higgs para T diferente de zero. (FIGURA 3)

fase no vácuo. Mais ainda, essas mudanças sempre ocorreram de estados simétricos para menos simétricos. Muitas assimetrias que vemos no universo atual evoluíram de mudanças de fase no vácuo.

A mais notável assimetria que vemos no universo de hoje é a existência de quatro interações fundamentais de intensidades amplamente diferentes: as interações forte, eletromagnética, fraca e gravitacional. Isso concorda com o ponto de vista de que todas as coisas foram formadas durante a evolução do universo.

Durante os estágios mais primordiais do universo, quando existia o mais alto grau de simetria, essas quatro interações eram indistinguíveis. Só havia uma única “variedade” e ela podia ser descrita usando-se a chamada **teoria da superunificação**.

À medida que o universo esfriou, ocorreram sucessivas mudanças de fase no vácuo, que corresponderam à supergravidade, à Grande Unificação e à unificação eletrofraca. Cada mudança de fase causou um abaixamento da simetria existente e a diferenciação de uma interação fundamental particular. Veja que as quatro interações fundamentais que conhecemos hoje na natureza não existiram desse modo desde o início do universo, tendo sido geradas em estágios de acordo com as mudanças de fase que o universo sofreu.

A época na qual ocorre uma mudança de fase é determinada pela temperatura crítica do universo. A teoria eletrofraca unificada é bem conhecida. Sua temperatura crítica é de $kT_c \sim 100$ GeV. A Teoria da Grande Unificação também tem tido algum sucesso e sua temperatura crítica é de $kT_c \sim 10^{15}$ GeV. Ainda precisamos de uma teoria de superunificação que possa ser confirmada pelas observações. Um valor que podemos usar, como uma medida temporária, é $kT_c \sim 10^{19}$ GeV. Assim, de acordo com a tabela cronológica dada anteriormente, a mudança de fase eletrofraca ocorreu na idade cósmica $t \sim 10^{-12}$ segundos, a mudança de fase da Grande Unificação ocorreu a $t \sim 10^{-36}$ segundos, e a superunificação se deu possivelmente a $t \sim 10^{-44}$ segundos.

ERA HADRÔNICA

O período antes de 7×10^{-5} segundos é chamado de **era hadrônica**.

Já vimos que os hádrons são partículas pesadas e além das interações fraca e eletromagnética eles interagem por meio da interação forte.

Os hádrons mais familiares são os núcleons, como chamamos coletivamente os prótons e nêutrons. No entanto, existe também nos núcleos dos átomos partículas chamadas pions que são hádrons com massas 270 vezes superiores à massa do elétron. Os pions saltam de um lado para outro entre os núcleons e mantêm o núcleo atômico junto apesar da repulsão elétrica existente entre os prótons.

Na era dos hádrons o universo estava inundado deles, porque a temperatura era suficientemente alta para a criação de pions, núcleons e antinúcleons, e outros hadrons, assim como de suas antipartículas. Os léptons também existem, mas o universo é agora dominado pela presença de um mar denso de hádrons.

À medida que olhamos para estágios ainda mais primordiais do universo, vemos que a temperatura aumenta muito. Com temperaturas tão altas no universo, temos um novo estado da matéria, o “plasma quark-gluon” também chamado de “matéria de quark”.

A matéria hadrônica tem sua constituição determinada pela “cromodinâmica quântica”, uma importante parte da teoria quântica dos campos.

Todos os sistemas hadrônicos possuem a propriedade de “confinamento”: os sistemas hadrônicos no vácuo não revelam a propriedade que chamamos

de “cor”. Eles se apresentam “sem cor”. Embora os três quarks que formam os bárions ou os pares quark-antiquark que formam os mésons não apresentem a propriedade de “cor” como um todo, seus quarks estão o tempo todo envolvidos por um “mar” de pares quark-antiquark e gluons.

Em baixas densidades a matéria hadrônica forma o que chamamos de “gás hadrônico”. Matéria hadrônica muito densa deve existir quando a matéria nuclear é altamente comprimida, como ocorre nos objetos estelares densos, e também em altas temperaturas. Neste último caso a alta densidade dos hádrons é criada pela chamada agitação térmica e é isso que ocorre no universo primordial.

Os hádrons devem ser agregados em um fluido contínuo e denso formado de quarks, antiquarks e gluons chamado de “plasma quark-gluon”.

Podemos obter plasma quark-gluon de duas maneiras:

- Comprimindo a matéria nuclear por um fator 20, teremos uma densidade de quark de $\sim 20 \times 3 \times 0,17 \text{ fm}^{-3} \sim 10 \text{ fm}^{-3}$
- Aquecendo matéria a $T \sim 500 \text{ MeV} \sim 6 \times 10^{12} \text{ K}$

Um gás de pion ideal teria $\sim 6 \text{ pions/fm}^3$ ou seja, uma densidade quark-antiquark de $\sim 12 \text{ fm}^{-3}$.

Sob tais condições a existência do plasma quark-gluon seria inevitável.

fm:
É uma unidade de comprimento equivalente a 10^{-15} metros.
É uma homenagem ao físico italiano Enrico Fermi.

ERA LEPTÔNICA

Imediatamente precedendo a era de radiação, existe o que é frequentemente chamado de **era leptônica**. Este é o período situado entre 7×10^{-5} segundos, quando a temperatura era de cerca de $1,6 \times 10^{12} \text{ K}$, e 5 segundos, quando a temperatura era de $6 \times 10^9 \text{ K}$.

Podemos então dizer que a era leptônica começa quando o universo tem 1/10.000 de segundo de idade, quando a temperatura é de 1 trilhão de graus e possui uma densidade de 1.000 toneladas para um volume semelhante a um dedal. Este período dura até o começo da era de radiação, quando o universo tem 1 segundo de idade e uma temperatura de 10 bilhões de graus.

Na era leptônica a temperatura é bastante alta para permitir a produção de pares elétron - pósitron. Esses pares são continuamente criados e aniquilados e há uma crescente troca de energia entre fótons, pares de elétrons e neutrinos. Tudo está em equilíbrio térmico e existem aproximadamente números iguais de fótons, elétrons, pósitrons e neutrinos.

Enterrados nesse denso meio formado por fótons e léptons ferventes estão os núcleons - nome coletivo que damos aos prótons e nêutrons - e para cada núcleon existe aproximadamente um bilhão de fótons, um bilhão de elétrons e um bilhão de neutrinos.

Cada núcleon colide continuamente com os léptons. Quando o núcleon é um nêutron ele captura um pósitron e se torna um próton. Quando o núcleon é um próton ele captura um elétron e se torna um nêutron. Em qualquer momento, aproximadamente metade dos núcleons são nêutrons e a outra metade são prótons.

Um nêutron é aproximadamente 0,14% mais pesado do que um próton. Deste modo ele é capaz, quando em estado livre, de decair em um próton e um elétron. Por conseguinte, um pouco mais de energia é necessária para criar um nêutron do que é necessária para criar um próton, e por causa desta pequena diferença de energia cada núcleon na era leptônica tende a ser um

próton ligeiramente mais duradouro do que um nêutron. Por esse motivo, existem ligeiramente mais prótons do que nêutrons.

Através da maior parte da era leptônica o número de prótons supera o de nêutrons mas apenas muito ligeiramente. No final da era leptônica, entretanto, a temperatura caiu suficientemente para a diferença nas massas do nêutron e do próton se tornarem importantes. Muitos elétrons agora não têm energia suficiente para converter prótons em nêutrons, enquanto que a conversão de nêutrons em prótons por bombardeamento de pósitrons é muito mais fácil. Como resultado disso, no começo da era de radiação existem somente 2 nêutrons para cada 10 prótons.

ERA DE NUCLEOSSÍNTESE

A nucleossíntese primordial

O problema da abundância do elemento químico hélio no universo só é solucionado na cosmologia.

De acordo com a tabela cronológica da história térmica do universo que vimos anteriormente, o intervalo entre as idades cósmicas de 1 segundo e 100 segundos é aquele no qual a escala de energia coincide com aquela do processo nuclear. Este é outro meio ambiente adequado para a nucleossíntese. A nucleossíntese que ocorre durante estes dois ou três minutos é chamada de **nucleossíntese primordial**.

De acordo com os três critérios dados anteriormente, quando a idade cósmica $t \sim 1$ segundo, a temperatura cósmica $T \sim 10^{10}$ K, a energia $kT \sim 1$ MeV, o universo tem grandes quantidades de elétrons e pósitrons, porque a massa de repouso deles é $m_e c^2 \sim 0,5$ MeV. Nesse instante não pode haver muitos nêutrons (n) ou prótons (p) porque a massa de repouso deles é $m_p c^2$ aproximadamente igual 1 GeV. Em um meio ambiente desse tipo, nenhum núcleo atômico poderia também existir porque a temperatura é tão alta que todos os núcleos seriam separados em nêutrons e prótons, do mesmo modo como uma alta temperatura ionizará todos os átomos em elétrons e núcleos.

Embora nêutrons e prótons sejam poucos em número e colisões diretas entre eles não ocorram facilmente, os seguintes processos acontecem frequentemente por causa do grande número de elétrons e pósitrons. O efeito desses processos faz o número de nêutrons e prótons alcançarem equilíbrio térmico.

Depois que o universo se expandir ainda mais e a temperatura cair abaixo de 10^{10} K, os elétrons e os pósitrons não existirão mais em grandes quantidades. Os pósitrons serão aniquilados. Então, os processos acima não mais ocorrerão com facilidade e os nêutrons e prótons cessarão de estar em equilíbrio. A razão entre as densidades de números deles não variará mais com a temperatura e, ao invés disso, se manterá congelada no valor alcançado para o estado $\sim 10^{10}$ K.

Quando a temperatura cai ainda mais, de modo que T é aproximadamente igual a 10^9 K, os nêutrons e os prótons começam a se fundir em outros núcleos. O primeiro processo de fusão é a formação de deutério (^2H ou D).

Como a energia de ligação do deutério é somente 0,26 MeV, ele somente pode existir depois que a temperatura caiu para 10^9 K. Quando $T > 10^9$ K e $kT > 0,26$ MeV, qualquer deutério será separado em um nêutron e um próton sob a ação de fótons. Esta é a razão pela qual a nucleossíntese somente pode começar quando T for menor ou igual 10^9 K.

Uma vez que o deutério existe, nêutrons e prótons rapidamente se sintetizarão em hélio, ^4He , pois a cadeia de processos que seguirão são muito rápidos.

Estes processos não cessam até que todos os nêutrons tenham sido incorporados em um núcleo de hélio. Os prótons remanescentes não encontrarão

mais quaisquer nêutrons para se fundirem e desse modo se tornarão hidrogênio, encontrado na natureza.

Teoricamente, a abundância de hélio produzida na nucleossíntese do universo primordial é $Y \sim 0,33$ (Calculada), um resultado muito próximo ao resultado $Y \sim 0,25$ (Observado)(*).

Melhorando esse resultado

No cálculo acima desprezamos o importante fato de que os nêutrons livres são instáveis. O tempo de vida desse decaimento é de cerca de 10 minutos.

Quando nêutrons e prótons cessam de estar em equilíbrio térmico, isto é, quando $T < 10^{10}$ K, os prótons não podem mais mudar para nêutrons. Assim, o processo acima se torna irreversível. O decaimento de nêutrons em prótons se torna cada vez menor à medida que $T < 10^{10}$ K.

Entre o cessamento do equilíbrio térmico em $T \sim 10^{10}$ e o começo da nucleossíntese em $T \sim 10^9$ K, se passaram 100 segundos de tempo cósmico. Este intervalo de tempo de cerca de 2 minutos não é inteiramente desprezível comparado com o tempo de vida de 10 minutos. Isto é, uma pequena porção de nêutrons terá se tornado prótons fazendo com que a abundância do hélio seja dada por $Y \sim 0,25$, um notável acordo com o resultado de abundância observado.

Note algo muito importante no resultado acima. Nesse cálculo houve uma combinação um tanto feliz de duas circunstâncias. Uma é o tempo de vida de 10 minutos para o nêutron e a outra é o intervalo de tempo de 2 minutos entre $T = 10^{10}$ K e $T = 10^9$ K. Se esses valores fossem um pouco diferentes então o resultado seria irreconhecível. Os “10 minutos” é determinado pelo decaimento nuclear.

Os “2 minutos” está fortemente conectado com a temperatura da radiação de fundo. Por exemplo, se a temperatura atual não fosse 3 K, mas ligeiramente maior, então $T \sim 10^{10}$ K não corresponderia à idade cósmica de 1 segundo mas a um instante mais tarde. Uma vez que a expansão cósmica está desacelerando, o intervalo de tempo levado por T para cair de 10^{10} K para 10^9 K seria maior do que 2 minutos e isso faria Y cair.

Pode, por conseguinte, ser visto que a temperatura de radiação de fundo de 3 K e a abundância de hélio de $Y \sim 0,25$ são mutuamente dependentes: se uma muda a outra também deve mudar.

George Gamow notou esta interdependência já no final dos anos de 1940, bem antes da descoberta da radiação de fundo cósmica. Ele e outros cientistas usaram o valor $Y \sim 0,25$ para fazer a previsão de que deveria existir uma radiação de fundo cósmica de cerca de 10 K.

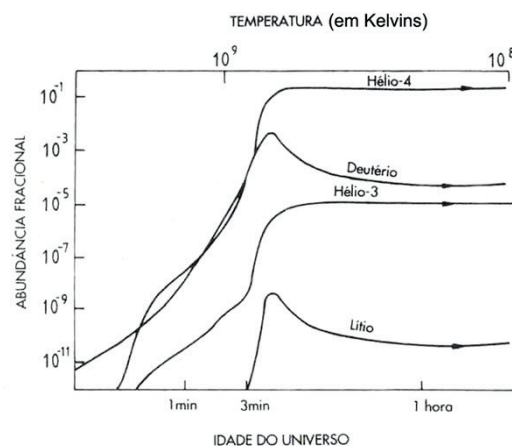
O Deutério

A abundância natural do deutério na natureza é muito pequena embora ela tenha importante significado cosmológico.

O deutério é vigoroso por natureza. Ele participa facilmente em reações nucleares. Como resultado, nenhum deutério poderia ter permanecido nas estrelas. Qualquer deutério que existisse no interior das estrelas teria sido “queimado”. Por conseguinte, é impossível para a teoria da nucleossíntese estelar explicar porque há algum deutério na natureza, uma vez que sua abundância é sempre muito pequena.

Felizmente, a nucleossíntese primordial pode explicar a existência do deutério. A figura ao lado mostra a variação da abundância do hélio e do deutério na nucleossíntese primordial. Ela mostra que uma pequena quantidade de deutério pode de fato ser deixada para trás nesse processo.

***NOTA:**
Medir a abundância de Hélio é muito importante, uma vez que ele constitui 25% do Universo.



Na água do mar a razão numérica entre o hidrogênio e o deutério é de 6600 para 1, que é muito diferente da razão na crosta da Terra. Nenhum desses valores pode ser olhado como a abundância média do deutério.

Para o Sistema Solar as descobertas feitas durante a série de vôos tripulados Apollo são importantes. O pouso lunar da Apollo trouxe uma folha de alumínio com íons do vento solar capturados na Lua. A partir do hélio-3 (^3He) coletado, podemos estimar a abundância do deutério. De acordo com a nossa crença, a maior parte do deutério na nebulosa solar primitiva se tornou ^3He . A razão hidrogênio/deutério da formação do Sistema Solar obtida desse modo é 40000/1. Também o resultado desta observação de Júpiter é 48000/1.

O deutério no gás intergaláctico pode ser medido por métodos de radioastronomia, pois ele tem uma linha espectral característica com um comprimento de onda de 92 centímetros. Essa linha foi de fato observada em 1972 na direção do centro da nossa galáxia e a razão estimada está entre 3000/1 e 50000/1.

A medição mais precisa foi feita pelo satélite Copernicus. Este satélite pode observar linhas espectrais na parte ultravioleta do espectro. Em particular usando linhas ultravioleta, podemos distinguir entre cianeto de hidrogênio e cianeto de deutério, os dois diferem somente na substituição de um átomo de hidrogênio por um átomo de deutério. A razão medida deste modo está entre 5000/1 e 500000/1.

Fazendo uma média dos diferentes valores mostrados acima, o valor aceitável hoje para a abundância do deutério é de 50000/1. A densidade de massa de bárion deduzida a partir desse valor é $\rho_G \sim 6 \times 10^{-31} \text{ g/cm}^3$, um resultado em acordo com vários outros obtidos de medições diretas.

Isso mostra que a teoria da nucleossíntese primordial, que nos fala sobre a origem dos elementos leves, é muito bem sucedida.

Matéria e antimatéria

Quando discutimos a nucleossíntese admitimos como certo que os fótons superavam muitíssimo, em termos numéricos, os bárions existentes no universo.

Uma vez que os bárions e antibárions se aniquilam em baixas temperaturas, essa suposição parece razoável. Mas fica a pergunta: porque então ainda existem tantos bárions?

Um tema que sempre intrigou os astrofísicos diz respeito ao que aconteceu com as partículas de antimatéria que existiam no universo. Poderíamos imaginar que muitos objetos que vemos no universo, tais como estrelas e galáxias, fossem formados de antimatéria mas as observações mostram que isso é falso. A densidade diferente de zero que medimos para o gás intergaláctico que conecta todos esses objetos nos mostra que essa ideia não é verdadeira.

A conclusão inevitável é que o universo começou com uma pequena assimetria entre matéria e antimatéria. Em altas temperaturas deveria haver um pouquinho mais de prótons para cada antipróton. Como as leis da física exigem que o número bariônico seja conservado, esse desequilíbrio não pode ser alterado, uma vez que tenha sido estabelecido pelas condições iniciais do universo.

Vemos também que o universo é assimétrico na quantidade de léptons observada. Se não tivesse havido uma assimetria e^-e^+ primordial, o universo teria uma carga residual devido ao seu conteúdo de prótons.

ERA DE RECOMBINAÇÃO

À medida que o universo se expandiu, o comprimento de onda dos fótons também se expandiu à mesma taxa que a distância entre as galáxias. A frequência dos fótons, por conseguinte, se reduziu, assim como a sua energia. A tem-

peratura que correspondia a esta energia do fóton também se reduziu à mesma taxa e a temperatura hoje é aproximadamente 3Kelvin, correspondendo a um comprimento de onda de fóton de alguns poucos centímetros ou milímetros. Podemos dizer, em razão disso, que a radiação de micro ondas se evidenciou na época da formação dos átomos. Este tempo é chamado de “tempo de recombinação”, $t_{rec} = 700.000$ anos.

A FORMAÇÃO DE GALÁXIAS E DOS AGLOMERADOS DE GALÁXIAS

Ao olharmos para o espaço sideral vemos hoje enormes estruturas de matéria que nos surpreendem pela variedade de tamanhos e conteúdo. Essas são as galáxias que, como já vimos, participam de estruturas gravitacionalmente ligadas, ainda maiores, e que chamamos de grupos e aglomerados de galáxias.

Como a astrofísica entende o surgimento dessas imponentes estruturas cósmicas?

O mais importante evento depois da formação dos átomos no universo primordial foi o da formação das galáxias, de seus aglomerados e superaglomerados, assim como a formação das primeiras estrelas.

Para os astrofísicos a formação das galáxias e dos aglomerados de galáxias consiste de dois estágios:

- A partir de pequenas flutuações de densidade de matéria nos estágios iniciais da expansão do universo houve a formação de muitas concentrações iniciais de densidade de matéria, a que chamamos de protogaláxias e protoaglomerados.
- Estas protogaláxias colapsaram formando as galáxias que observamos hoje.

Os cientistas acham que a primeira fase, citada acima, começou muito antes da época na qual os átomos se formaram, $t_{rec} = 700.000$ anos, e talvez até mesmo durante a época Planck, $t_p = 10^{-43}$ segundos,

A formação de galáxias foi essencialmente completada quando a idade do universo era de $t = 10^9$ anos ou ainda mais cedo. Não há certeza sobre isso e valores como esse dependem da teoria de formação de galáxias que consideramos correta.

Por outro lado, o colapso que levou às formas atuais das galáxias foi relativamente rápido levando cerca de 3×10^8 anos. Durante este colapso as galáxias foram fragmentadas em estrelas. De fato, as estrelas mais velhas das galáxias, que chamamos de estrelas de população II, foram formadas durante o colapso das galáxias. Subsequentemente, quando uma densa camada de meio interestelar foi acumulada no plano de simetria das galáxias espirais, e particularmente quando os braços espirais foram formados, concentrações locais de matéria formaram as chamadas estrelas de população I tais como o nosso Sol. Estrelas desse último tipo estão sendo continuamente criadas nas galáxias espirais e em muitas galáxias irregulares.

Os astrofísicos também acreditam que existe um outro tipo de população de estrelas, chamada de população III, que foi formado antes das galáxias, isto é durante o estágio de protogaláxias. Acredita-se que esta população possa ser a responsável pela explicação da presença de uma pequena percentagem de “metais” mesmo nas estrelas mais velhas de população II.

Vários mecanismos foram sugeridos para a formação inicial de galáxias e aglomerados de galáxias. Vejamos alguns.

INSTABILIDADE GRAVITACIONAL

Considere que o universo inteiro está preenchido uniformemente com gás. Uma pequena perturbação local, seja ela qual for, na densidade desse gás tanto pode ser ampliada ou amortecida. De fato, um excesso de densidade local provoca um campo gravitacional mais forte, o qual tende a atrair ainda mais matéria e, deste modo, aumentar seu tamanho.

Por outro lado, a pressão do gás tenderá a dispersar qualquer aumento de densidade e tentará restaurar a homogeneidade inicial.

Este problema foi estudado pelo astrônomo inglês James Jeans em 1902, chegando à conclusão que perturbações de pequena escala são rapidamente dispersadas, enquanto que perturbações de grande escala tendem a ser cada vez maiores. Neste segundo caso, a densidade na perturbação aumenta continuamente com o tempo e isso ficou sendo conhecido como “instabilidade de Jeans” ou “instabilidade gravitacional”.

Esta instabilidade finalmente cria uma concentração de matéria que pode evoluir para formar uma estrela, uma galáxia, ou até mesmo um aglomerado de galáxias. A quantidade de matéria condensada deste modo vai depender da densidade inicial do gás e da velocidade do som no local, que é a velocidade na qual as perturbações de densidade se propagam.

A massa mínima exigida para ter início a instabilidade gravitacional é chamada de “massa de Jeans”, M_J , e seu raio é conhecido como “raio de Jeans”, λ_J (não confundir com a constante cosmológica Λ).

Em uma esfera de raio maior do que λ_J , a gravidade supera a pressão do gás e causa uma concentração de matéria. O contrário ocorre para uma esfera com raio menor do que λ_J . Neste último caso a pressão do gás supera a gravidade e a perturbação é amortecida.

Antes da era de recombinação, $t < t_{rec}$, o raio de Jeans era muito grande porque a velocidade do som naquela época se aproximava da velocidade da luz, uma vez que naquela época matéria e radiação estavam fortemente acopladas. A massa de Jeans aumentou um pouco antes da recombinação, quando ela era aproximadamente $10^{17} M_{sol}$, isto é, muito maior do que a massa de um aglomerado de galáxias.

Depois da recombinação, $t_{rec} = 700.000$ anos, matéria e radiação foram desacopladas e a radiação cessou de contribuir para a pressão. Por esse motivo, a velocidade do som subitamente caiu a alguns poucos quilômetros por segundo. A correspondente massa de Jeans também caiu para $10^5 M_{sol}$, o que é comparável à massa de um aglomerado globular.

TEORIAS DE FORMAÇÃO DE GALÁXIAS A PARTIR DO COLAPSO DE PROTOGALÁXIAS

A formação de protogaláxias que discutimos acima foi somente o primeiro estágio na formação de galáxias. Na verdade, as protogaláxias eram bolhas amorfas de matéria muito maiores do que as galáxias atuais e o problema agora é explicar como as galáxias, tais como as vemos hoje, se formaram a partir dessas bolhas de gás e matéria. Isso é particularmente importante para explicar os vários tipos morfológicos de galáxias que mencionamos nos módulos anteriores, explicando porque algumas galáxias são elípticas, outras espirais, e outras irregulares.

A explicação mais simples para a formação de galáxias a partir de protogaláxias está baseada no colapso das protogaláxias. Isto é, a matéria nas protogaláxias, seja ela estrelas ou gás, se move rapidamente na direção do centro sem quaisquer forças de oposição. O chamado “tempo de colapso” é igual ao cha-



James Hopwood Jeans (1877 - 1946).

mado “tempo de queda livre” para a matéria nas galáxias. Estima-se que esse tempo é de aproximadamente 300.000.000 anos para uma galáxia ordinária. Esta escala de tempo poderia ser maior se as protogaláxias fossem significativamente maiores em tamanho.

Existem dois cenários que descrevem o colapso de protogaláxias para a formação de galáxias. No primeiro as protogaláxias são basicamente feitas de gás enquanto que no segundo elas consistem principalmente de estrelas. Veremos o primeiro caso.

Colapso de protogaláxias gasosas

Nesta teoria o físico Larson considerou uma protogaláxia formada por gás que colapsa. O gás consiste de nuvens que colidem inelasticamente ou seja, que perdem energia durante cada colisão. Durante essas colisões de nuvens foram formadas concentrações particularmente densas de matéria que subsequentemente evoluíram para estrelas. Temos assim uma formação estelar contínua durante o colapso. A taxa de formação de estrelas depende da densidade inicial e dos movimentos aleatórios que existem dentro da protogaláxia. Quanto mais alta é a densidade e os movimentos aleatórios, mais estrelas são formadas. As galáxias que formam estrelas rapidamente se transformam em elípticas na classificação de Hubble. Depois do colapso destas galáxias muito pouco gás é deixado para trás, o que é visto nas observações.

Protogaláxias que não eram muito densas colapsaram mais lentamente. Parte do gás não teve tempo suficiente para formar estrelas durante o estágio de colapso e se acumulou no plano perpendicular ao eixo de rotação da galáxia, o plano de simetria. Deste modo foi formada uma camada relativamente fina de gás, o chamado “disco” da galáxia. As estrelas no disco foram formadas muito mais tarde e a uma taxa mais lenta. Essas seriam as estrelas de população I que são relativamente jovens. Por outro lado as estrelas que se formaram durante o colapso são as mais velhas da galáxia e são chamadas de estrelas de população II. Este seria o processo de formação das galáxias espirais.

