

O *Big Bang* e a evolução do Universo

Curso de Iniciação à Astronomia e Observações Astronómicas

Laurindo Sobrinho

Grupo de Astronomia da Universidade da Madeira

astro@uma.pt

Resumo

Neste módulo são descritas as diferentes etapas da evolução do nosso Universo, de acordo com o modelo do *Big Bang*, desde o tempo de Planck até ao presente. Antes porém, é feita uma introdução sobre os principais ingredientes que regem o Universo: partículas elementares e interações entre elas.

1- Partículas e Forças

O nosso Universo é governado por **quatro forças fundamentais**: *força gravítica*, *força eletromagnética*, *força forte* e *força fraca*. Estas forças revelam-se quando duas ou mais partículas interagem entre si. Essa interação faz-se por meio da troca de partículas chamadas **bosões** (Fig 1).

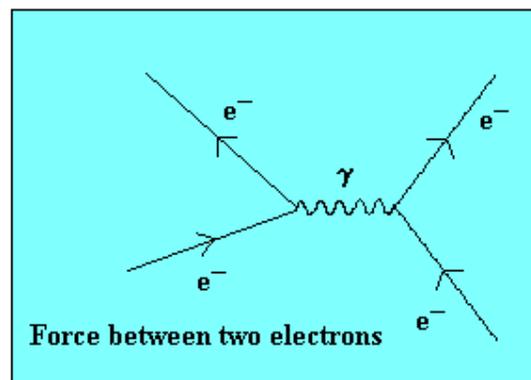


Figura 1 – Diagrama de Feynman mostrando a interação entre dois elétrões. Do ponto de vista clássico sabemos que os dois elétrões repelem-se pois tratam-se de cargas do mesmo sinal. Na escala quântica os dois elétrões aproximam-se (sem se tocarem), trocam um fóton entre si e, depois, afastam-se (<http://www.egglescliffe.org.uk/physics/particles/parts/parts1.html>).

Força gravítica: interatua entre todos os corpos que têm massa. O bosão responsável pela interação é o **gravitão** (uma partícula que nunca foi observada).

Força eletromagnética: interatua entre todos os corpos com carga elétrica. O bosão responsável neste caso é o **fóton** (partícula de luz). Assim, quando dois elétrões (partículas com carga elétrica negativa) se aproximam demasiado, repelem-se. No mecanismo ocorre a troca de um ou mais fótons entre os dois elétrões (Fig 1).

Força Fraca: responsável pelo decaimento radioativo a nível subatômico. Existem 3 bosões responsáveis por este tipo de força: bosões **Z^0** , **W^+** e **W^-** (estes dois últimos têm carga elétrica).

Força Forte: responsável por manter os neutrões e protões juntos no núcleo dos átomos e também pela própria coesão interna de neutrões, protões e outras partículas. O bosão responsável por esta força é o **gluão**.

A força gravítica e a força eletromagnética são de longo alcance. Embora a força eletromagnética seja da ordem de 10^{38} vezes superior à força gravítica, acaba por ser esta última a dominar o Universo na larga escala. Como existem cargas elétricas de dois sinais a soma total de todas as forças do tipo eletromagnético aproxima-se de zero. Por seu turno a força gravítica é sempre do mesmo sinal, ou seja, a soma total de todas contribuições acaba por superar a da força eletromagnética. Finalmente a força Forte e força Fraca têm ambas raios de alcance curtos dominando o Universo apenas a nível subatômico (escalas da ordem dos 10^{-15} m).

No Universo actual as quatro forças existem como entidades separadas (com características diferentes). Nos instantes iniciais do Universo não era assim. De acordo com o modelo do Big Bang até aos 10^{-10} s a força eletromagnética e a Força Fraca estavam unificadas numa única força chamada de **força ElectroFraca**. Recuando ainda mais para o passado a Força Forte deve unificar-se com a força EletroFraca e recuando ainda mais a força gravítica também se deve juntar (embora ainda não tenhamos conseguido desenvolver o modelo matemático para tal unificação) – ver Fig. 2.

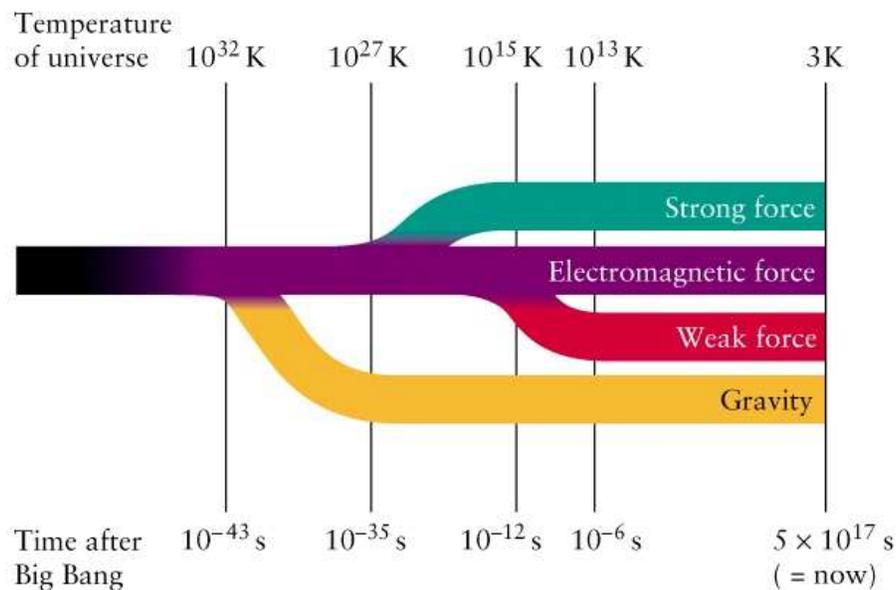


Figura 2 – A separação das quatro forças fundamentais à medida que a idade do Universo avança (<http://web.williams.edu/astronomy/Course-Pages/330/images/forces.jpg>).

Um caso interessante, que nos ajuda a entender este mecanismo de unificação de forças, é bem conhecido. Trata-se da força eletromagnética que é a unificação da **força elétrica** com a **força magnética**. A experiência revela que ambas são, por assim dizer, faces da mesma moeda. Uma carga elétrica em movimento gera um campo magnético e quando colocamos uma carga elétrica na presença de um campo magnético (imã) esta entra em movimento. No Universo atual a força elétrica e a força magnética continuam unificadas numa única força.

Sabemos que a matéria é constituída por átomos e que estes por sua vez são formados por um pequeno núcleo onde existem prótons e neutrões. Em torno desse núcleo distribuem-se os eletrões. Os prótons e neutrões, por seu turno, são compostos por **quarks** do tipo **up** e **down** (Fig 3). Ao eletrão não se conhece qualquer estrutura interna. Associado ao eletrão existe uma partícula chamada **neutrino (do eletrão)** que participa em processos a nível nuclear.

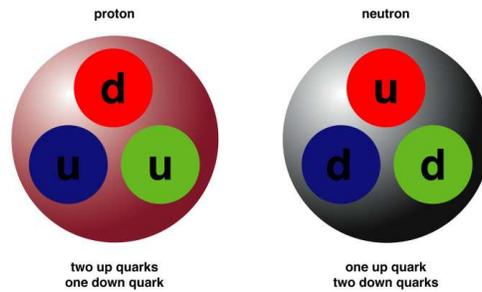


Figura 3 – Estrutura interna do próton e do neutrão
(<http://cse.ssl.berkeley.edu/bmendez/ay10/2002/notes/lec11.html>).

Embora a matéria que encontramos à nossa volta seja constituída por esta família de partículas (eletrão, quark up, quark down e neutrino do eletrão) por uma razão ainda desconhecida o Universo teve nos seus instantes iniciais outras duas famílias de partículas mais energéticas (ver Fig. 4). Estas partículas surgem naturalmente quando, nos aceleradores de partículas, se provocam colisões de alta energia recriando, assim, por breves instantes um cenário semelhante ao do Universo primitivo.

O chamado **Modelo Standard de Física de Partículas** (SMPP), testado com grande sucesso e precisão, descreve a teoria das interações Forte, Fraca e Eletromagnética. A interação gravítica fica de parte pois ainda não temos uma Teoria da Gravidade Quântica (Fig. 4).

Existem partículas que não reagem à força Forte. Estas designam-se por **leptões**. O eletrão é um leptão (Fig. 4).

Uma das propriedades utilizadas para classificar as partículas elementares é o chamado **spin** (que podemos interpretar como uma espécie de rotação). Partículas com spin inteiro designam-se por **bosões** e partículas com spin fracionário designam-se por **fermiões**. Existem 12 fermiões no SMPP (6 quarks + 6 leptões).

Um bosão especial é o chamado **bosão de Higgs** que é o responsável pelo facto das partículas terem massa. Atualmente (abril de 2012) desenvolvem-se grandes esforços no sentido de observar esta partícula prevista matematicamente.

Os quarks podem juntar-se para formar partículas compostas chamadas **hadrões**. Se os hadrões tiverem spin inteiro então chamam-se **mesões**, caso contrário chamam-se **bariões** (o próton e o neutrão são bariões).

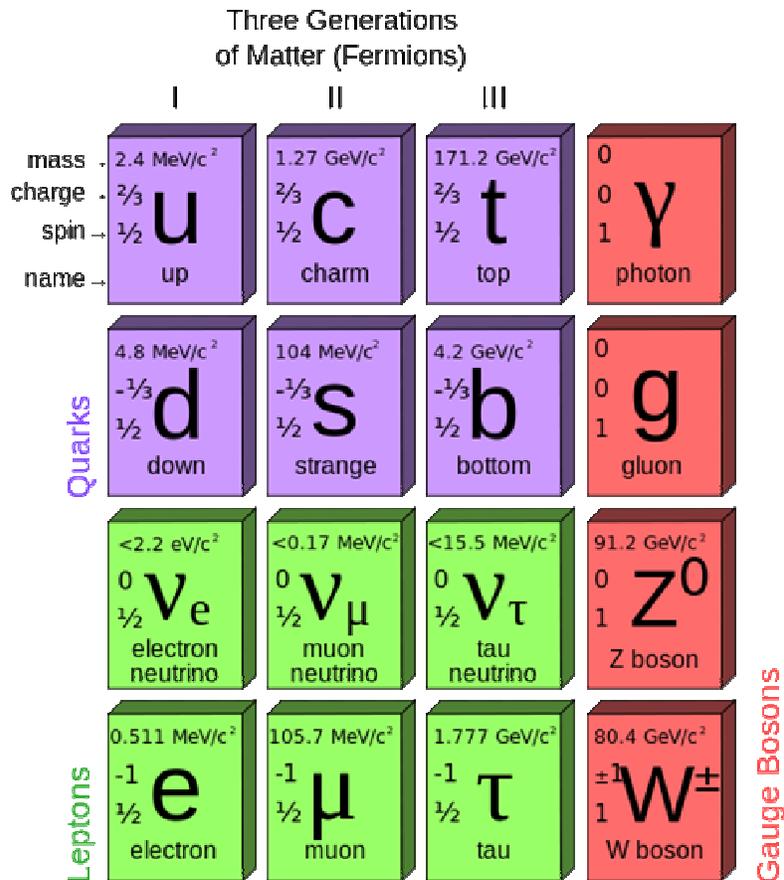


Figura 4 – O modelo Standard de Física de Partículas (SMPP) compreendendo: 6 quarks (up, down, strange, charm, bottom e top), 6 léptões (elétron, muão, tauão e neutrinos associados) e 4 tipos de bósons (fotão, gluão, Z⁰ e W[±]). O bóson de Higgs não aparece nesta figura.

Na Fig. 5 repetimos o Modelo Standard de Física de Partículas mas agora indicando a massa/energia de cada uma delas. As mais energéticas (maior massa) são o quark do tipo top e bóson de Higgs. As menos energéticas são os neutrinos. Ao fóton e ao gluão não faz sentido associar uma massa.

Cada partícula representada nas Figs. 4 e 5 tem a si associada uma antipartícula, isto é, uma partícula com a mesma massa mas carga elétrica simétrica. Quando uma partícula encontra a sua antipartícula ambas aniquilam-se libertando energia sob a forma de fótons. Inversamente dois fótons altamente energéticos podem provocar o aparecimento de um par partícula-antipartícula. Nos instantes iniciais do Universo ambos os processos aconteciam constantemente: as altas temperaturas faziam com que as colisões fossem frequentes e com elas a aniquilação e formação de pares partícula-antipartícula ocorria de forma equilibrada.

Passamos a descrever de seguida as diferentes etapas da evolução do Universo desde os primeiros instantes até ao presente começando pela **Era de Planck**.

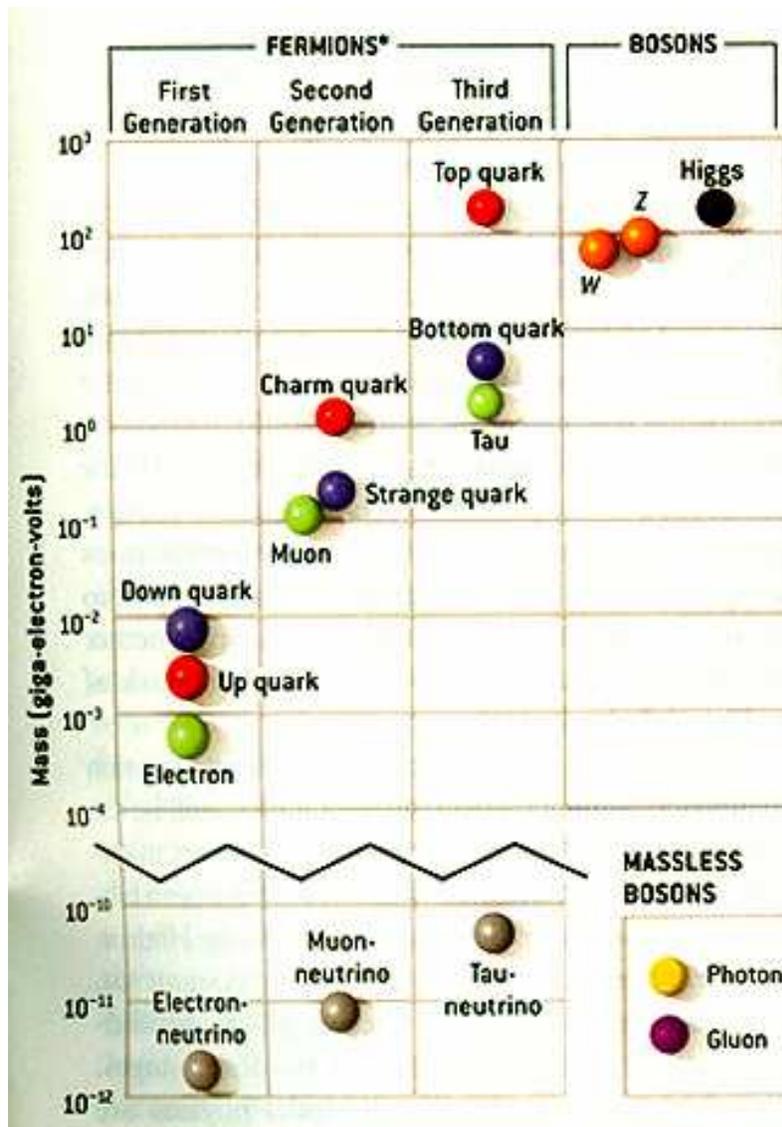


Figura 5 - Modelo Standard de Física de Partículas indicando a energia/massa associada a cada partícula. A unidade utilizada é o Giga elétron-Volt (GeV). Um elétron-Volt (eV) vale aproximadamente 1.6×10^{-19} Joules. O prefixo Giga indica 10^9 pelo que a massa do quark tipo top, por exemplo, ronda os 180 GeV o que equivale a $180 \times 10^9 \times 1.6 \times 10^{-19}$ Joules.

2- Era de Planck

Quando a idade do Universo era inferior ao Tempo de Planck (10^{-43} s) todas as quatro forças fundamentais estavam unificadas numa única força (ver Fig. 2). Durante esta fase, designada por era de Planck, a Teoria da Relatividade Geral deve ser substituída por uma teoria da Gravidade Quântica (combinando a Relatividade Geral com a Mecânica Quântica). Esta teoria deve unificar a gravidade ao lado das outras três forças fundamentais. Seria aquilo a que chamamos uma **Teoria de Tudo**. Alguns físicos/matemáticos (e.g. Roger Penrose) defendem que esta teoria deve ser puramente matemática.

Acontece que ainda não descobrimos essa teoria apesar dos grandes esforços que têm sido feitos nas últimas décadas. Assim as Leis da Física, tal qual as conhecemos, não

são aplicáveis na era de Planck. Não podemos deduzir, por exemplo, se existiu um instante zero ou se o Universo sempre existiu e, por algum motivo, começou a expandir-se em determinado momento.

Existem 3 constantes fundamentais na natureza:

Velocidade da luz : $c = 299\,792\,458$ m/s (aprox. 300 000 000 m/s)
Constante de gravitação: $G = 6.674 \times 10^{-11} \text{Nm}^2\text{kg}^{-2}$
Constante de Planck: $h = 6.62606957 \times 10^{-34}$ Js

Podemos combinar estes valores de diversas formas. Em particular tomando:

$$t_P \equiv \sqrt{\frac{\hbar G}{c^5}} \approx 5.39106(32) \times 10^{-44} \text{ s}$$

obtemos uma grandeza com as dimensões do tempo. A ordem de grandeza do seu valor é 10^{-43} s. Este intervalo de tempo, designado por **tempo de Planck**, representa o instante mais pequeno com significado para a Física atual. Se multiplicarmos este valor pela velocidade da luz obtemos uma distância (10^{-35} m): é o chamado **comprimento de Planck** e representa a distância mais pequena com significado para a Física atual. Representa também a ordem de grandeza da dimensão do Universo durante a Era de Planck.

3 - Era da Grande Unificação

Aos 10^{-43} s acontece algo de extraordinário no Universo: a força gravítica separa-se das outras três que continuam unificadas (ver Fig. 2). Entramos na Era da Grande Unificação. O Universo é, nesta fase, um plasma composto por quarks, gluões, leptões, fotões, **bosões X** e respetivas antipartículas. Todas as partículas estão presentes em igual abundância e são continuamente convertidas umas nas outras mediante colisões altamente energéticas. Em particular os bosões X (partícula hipotética) com uma massa/energia da ordem dos 10^{14} GeV são responsáveis pela conversão entre leptões e quarks.

O Universo encontra-se em expansão e, portanto, a sua temperatura decresce. Quando a temperatura do Universo desce abaixo dos 10^{14} GeV os bosões X consumidos nas colisões deixam de ser substituídos por outros novos. As colisões deixaram de ser suficientemente energéticas para produzirem mais bosões X. Deixa também de ser possível a conversão entre leptões e quarks. Como consequência temos que a Força Forte separa-se das outras duas num processo a que designamos por **transição Forte-EletoFrac**. A partir deste momento apenas as forças Fraca e Eletromagnética continuam unificadas (constituindo a chamada força EletoFrac).

4 - Inflação

Quando a idade do Universo era de 10^{-35} s deu-se a **inflação**. Durante este processo o Universo deixou de se expandir ao ritmo normal para sofrer uma expansão

exponencial. O tamanho do Universo aumentou entre 10^{50} e 10^{70} vezes entre os 10^{-35} s e os 10^{-33} s. Embora discutível, a introdução do mecanismo de inflação na teoria do Big Bang permite resolver uma série de problemas. Durante esta fase o Universo foi completamente dominado por um campo designado por **inflatão**. A inflação conduziu a um tremendo arrefecimento do Universo. No entanto, no final de todo o processo a energia acumulada no campo do inflatão acabou por decair originando uma série de colisões que levaram ao re-aquecimento do Universo para uma temperatura equivalente à verificada antes da inflação (Fig. 6).

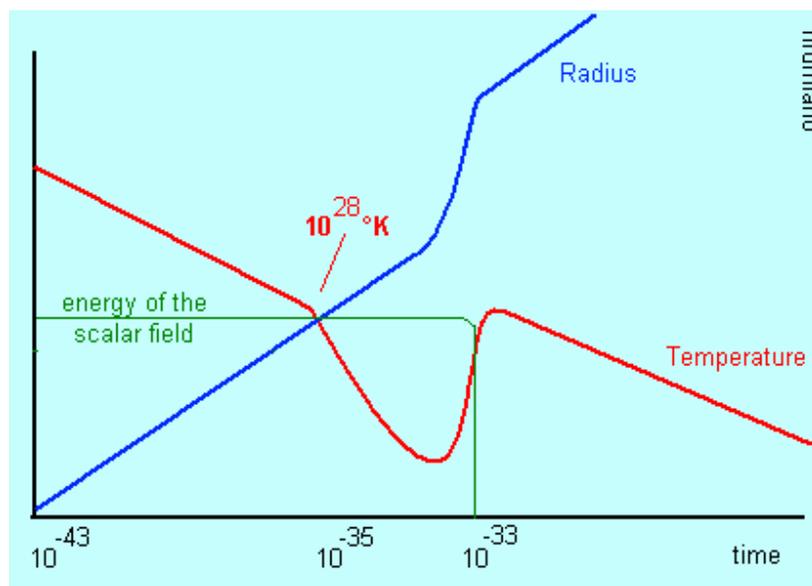


Figura 6 – Variação do raio e temperatura do Universo durante a inflação (http://nrumiano.free.fr/Ecosmo/cg_inflation.html)

5- A Era dos Quarks e a transição EletroFraca

O período entre o final da inflação (10^{-33} s) e os 10^{-10} s é conhecido por Era dos Quarks. Nesta fase o Universo consiste num plasma composto por quarks, fótons, glúons e as suas antipartículas. Pares partícula-antipartícula estão constantemente a ser criados e aniquilados.

Quando a temperatura do Universo desce abaixo dos 180 GeV deixa de ser possível criar quarks do tipo top (ou do tipo anti-top) pois a energia destes é 180 GeV. Assim, os quarks top e anti-top existentes no Universo aniquilam-se mutuamente ou decaem em partículas menos energéticas deixando de existir na natureza. O mesmo acaba acontecendo com o leptão tau (ou tauão) e com os quarks bottom e charm (conferir energias na Fig. 5).

Quando a temperatura do Universo desce aos 100 GeV estão reunidas as condições para que a Força Fraca e a Força eletromagnética se separem. O processo designa-se por **transição ElectroFraca** (EW). A partir deste momento a Força Fraca passa a ser mediada pelos bósons Z e W e a força eletromagnética pelos fótons. É também durante este processo que entra em cena o bóson de Higgs o qual confere massa às partículas materiais.

A era dos quarks continua depois desta transição. À medida que decorre a expansão e o Universo vai arrefecendo podem formar-se partículas cada vez mais elaboradas. Estão nesta situação os bariões (partículas compostas por quarks – **charmíões** se incluírem o quark charm, **hiperões** se incluírem o quark strange mas não o charm). São partículas que têm, no entanto, tempos de vida muito curtos (como conseguimos comprovar experimentalmente). Ao se desintegrarem libertam outras partículas mais simples incluindo prótons e neutrões. Estes foram, assim, os primeiros prótons e neutrões com existência estável no nosso Universo.

Quando a idade do Universo se aproxima dos 10^{-4} s ocorre a transição entre quarks e hádrons descrita pela teoria da **Cromodinâmica Quântica** (QCD) durante a qual os quarks up e down juntam-se com a ajuda dos glúons para formarem neutrões e prótons estáveis (pois a radiação existente já não é suficiente para destruir estas partículas compostas)

6 - Era dos Leptões

Quando a idade do Universo atinge os 3.5×10^{-4} s inicia-se a chamada Era dos Leptões. Esta fase começa logo depois de terem decaído os últimos mesões Pi (ou píões). O Universo é agora composto por fótons, prótons, neutrões, electrões, pósitrons, neutrinos e antineutrinos (já muito semelhante à constituição actual).

Quando a idade do Universo é de 1s os neutrinos deixam de participar nas colisões podendo então mover-se livremente a grandes distâncias. Dizemos que o Universo tornou-se transparente para os neutrinos. Muitos dos neutrinos que cruzam o Universo no presente são provenientes desta época.

Aos 3s deixam de ser produzidos pares de partículas electrão-pósitron. Os pósitrons existentes aniquilam-se com os electrões sobrando no processo apenas um pequeno excesso de electrões: aqueles que existem no Universo actual. Este evento marca o fim da era dos leptões.

7 - Nucleosíntese primordial

O Universo continua a expandir-se e, conseqüentemente, a arrefecer. Aos 200s a temperatura caiu já para os 10^9 K. Nestas condições prótons e neutrões podem juntar-se de forma estável formando assim os **primeiros núcleos atómicos** num processo designado por Nucleosíntese primordial.

A primeira reacção de fusão nuclear a ter lugar é aquela em que um próton e um neutrão juntam-se para dar origem a um núcleo de **Deutério** (também designado por Deuterão). Para separar as duas partículas é necessário a incidência de um raio gama de energia 2.23MeV. No entanto tal já não é possível no Universo a partir dos 200s. Assim, praticamente todo o deutério formado nesta época continua presente no Universo actual.

A partir do momento em que existe uma determinada abundância de deutério no Universo estão reunidas as condições para que se produzam núcleos mais complexos.

Em particular formam-se núcleos de trítio, Hélio-3, Hélio-4, Lítio e Berílio (estes dois últimos apenas em quantidades residuais) – ver Fig. 7.

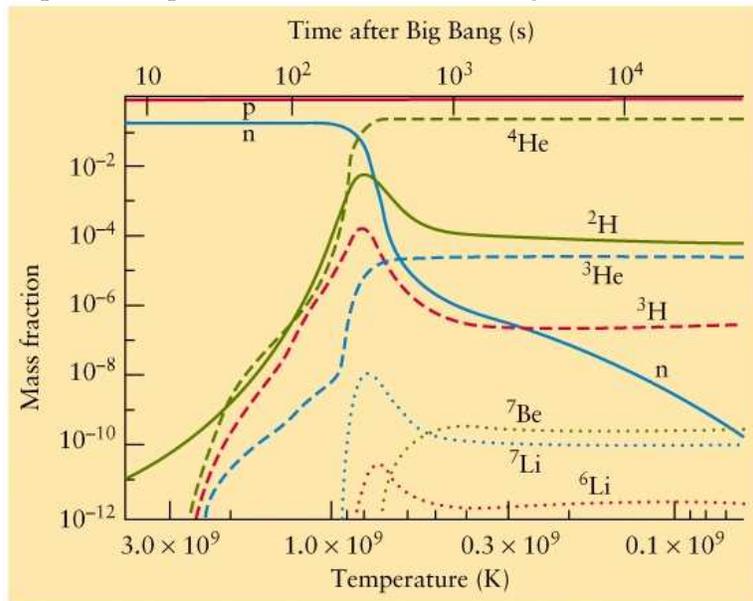


Figura 7 – Evolução da nucleossíntese no Universo.

Apenas estes elementos foram formados no Universo primordial. Elementos com número de massa mais elevado não se formaram por duas razões: 1) a temperatura do Universo, cada vez mais baixa, não permitiu as aproximações necessárias entre componentes e 2) não existem núcleos estáveis com números de massa entre 5 e 8. Aos 1000s termina a nucleossíntese primordial deixando o Universo composto, em termos de matéria, por núcleos de Hidrogénio, Hélio e vestígios de Lítio e Berílio.

8 – Universo dominado pela matéria

O Universo continua em expansão. A densidade total da radiação bem como a densidade total de matéria decrescem continuamente, ou seja, os fótons e núcleos atómicos diluem-se num volume cada vez maior. Para além disso os fótons também perdem energia (são desviados para o vermelho - **redshift**) pelo que a densidade da radiação (fótons) decresce mais rapidamente do que a da matéria (núcleos atómicos).

Quando a idade do Universo é da ordem dos 100 000 anos a densidade da matéria ultrapassa em valor densidade da radiação. O Universo deixa de ser dominado pela radiação para passar a ser dominado pela matéria – ver Fig. 8.

Aos 280 000 anos a temperatura do Universo desceu já para os 3800K o que permite que os eletrões se combinem com os núcleos atómicos formando átomos neutros. Este processo é designado por **Recombinação**.

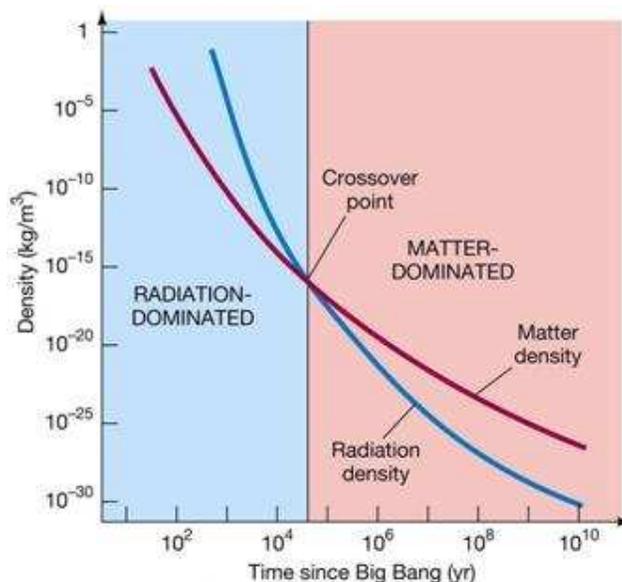


Figura 8 – O Universo é, numa primeira fase dominado pela radiação. Quando a sua idade é da ordem dos 100 000 anos a matéria passa a dominar (<http://usersguidetotheuniverse.com/?p=1981>).

9 - Libertação dos fótons

Quando o Universo tinha cerca de 380 000 anos e a sua temperatura tinha descido para os 3000K a densidade de eletrões livres atingiu um valor suficientemente baixo de tal forma que os fótons passaram a percorrer grandes distâncias sem interagir com qualquer eletrão (Fig. 9). Dizemos que o Universo tornou-se transparente para os fótons. Muitos destes fótons estão ainda hoje a atravessar o Universo. Constituem a chamada **Radiação Cósmica de Fundo (CMB)**. A observação destes fótons permite obter a imagem mais antiga que conseguimos do nosso Universo.

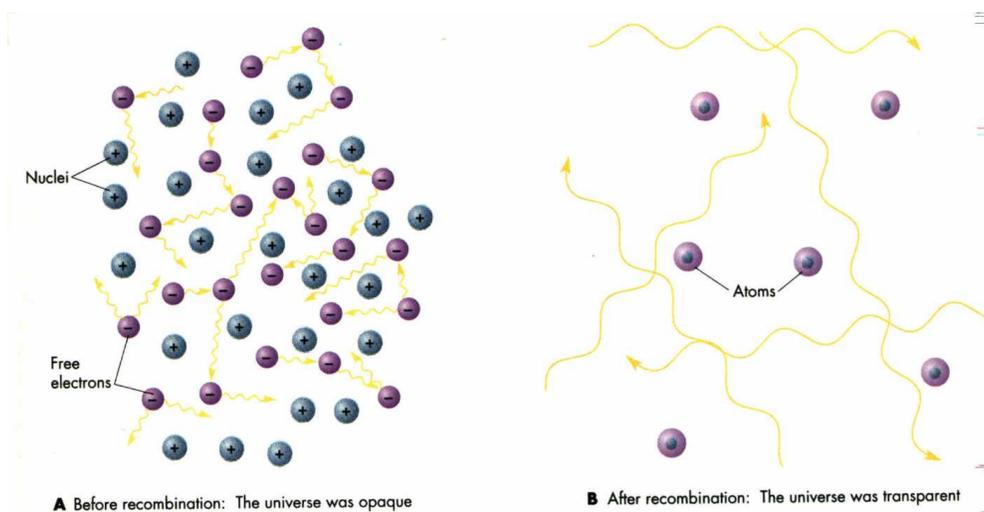


Figura 9 – Na imagem do lado esquerdo temos a situação em que os fótons estão constantemente a ser absorvidos e refletidos pelo que não podem viajar grandes distâncias livremente. Aos 380 000 anos tudo mudou (imagem do lado direito): os fótons ficaram livres com a possibilidade de percorrer grandes distâncias no Universo.

No momento da libertação estes fotões eram altamente energéticos (3000K). Com a expansão do Universo foram perdendo energia, ou seja, foram sendo desviados para o vermelho. Atualmente estes fotões observam-se na banda rádio (nas micro-ondas). Se ligarmos um televisor a uma antena exterior, parte da radiação obtida, vulgarmente designada por "arroz", é radiação cósmica de fundo.

Como a libertação dos fotões não foi instantânea, ao observar a CMB o que obtemos é na realidade uma imagem dinâmica dos últimos instantes antes de o Universo se ter tornado transparente para a luz.

10 - Idades escuras do Universo

Entre a libertação dos fotões e a formação dos primeiros objectos luminosos decorre um período relativamente longo designado por **Cosmic Dark Ages**. Durante este período o Universo continuou em expansão mas não existiam fontes de radiação que nos possam informar sobre os processos que decorreram durante essa fase.

11 - Reionização

Depois de se terem formado as primeiras estrelas no Universo a radiação emitida por estas acabou por ionizar o hidrogénio neutro disperso pelo Universo (aprox. aos 10^{16} s). Assim, o Universo voltou a ser composto por um plasma como já havia acontecido antes quando a sua temperatura era mais elevada. A grande diferença é que agora além desse plasma existem estrelas (provavelmente já agrupadas em galáxias).

12 - Universo dominado pela energia escura

Quando a idade do Universo atingiu os 2.8×10^{17} s (0.7 da idade atual) este passou a ser dominado pela chamada **Energia Escura**. A expansão do Universo que, até então vinha desacelerando, passou a acelerar exponencialmente. A natureza desta energia escura permanece desconhecida.

13 - O Futuro do Universo

Neste momento (4.3×10^{17} s), de acordo com as observações, o Universo é dominado pela Energia Escura e esta está a acelerar a expansão do Universo. Se assim continuar o Universo caminha em direção ao chamado **Big RIP**. Tudo irá se afastar demasiado e o Universo irá arrefecer eternamente. Se por outro lado existir um retrocesso na expansão então podemos caminhar para o outro extremo que será o **Big Crunch**: o Universo colapsa sobre si mesmo fazendo o percurso inverso ao que fez desde o Big Bang. Entre o Big Crunch e o Big RIP podemos imaginar uma infinidade de situações (Fig. 10).

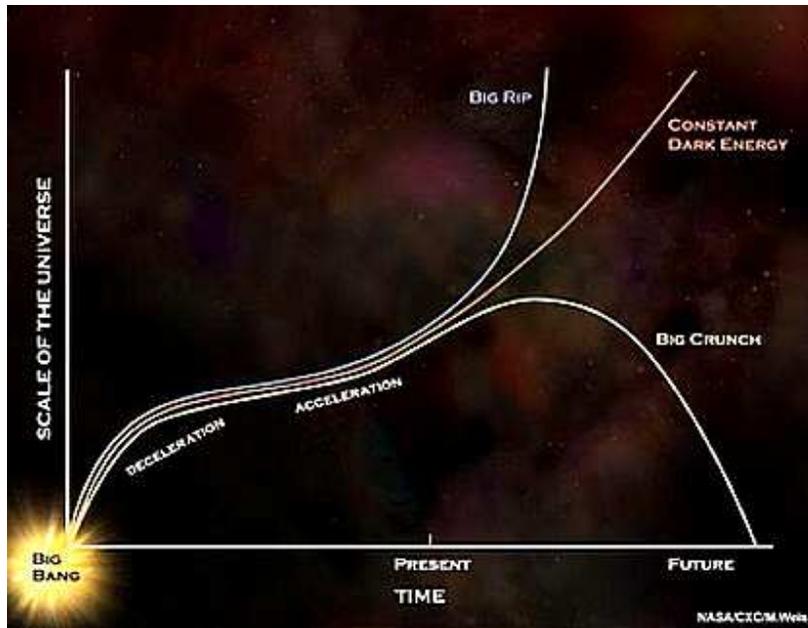


Figura 10 – Possíveis cenários para a evolução de um Universo dominado pela energia escura (http://www.speed-light.info/video_dark_energy.htm).

Bibliografia principal:

- Freedman R. A. & Kaufmann III, W. J., 2005, *Universe*, seventh edition, W. H. Freeman and Company, New York.
- Kutner, M. L., 2003, *Astronomy: A Physical Perspective*, 2nd edition, Cambridge University Press, United Kingdom.
- Sobrinho J. L. G., 2011, *The possibility of primordial black hole direct detection*, UMa [<http://digituma.uma.pt/handle/10400.13/235>].

Nota: este texto foi especialmente preparado para ser utilizado como material de apoio ao módulo 9 do “Curso de Iniciação à Astronomia e Observações Astronómicas” o qual teve lugar entre 14 de abril e 05 de maio do ano de 2012, numa iniciativa conjunta da Associação de Astrónomos Amadores da Madeira (AAAM) e do Grupo de Astronomia da Universidade da Madeira (GAUMa). [<http://www3.uma.pt/Investigacao/Astro/Grupo/Divulgacao/Cursos/AAAM2012/curso2012.htm>]

> 2012 Grupo de Astronomia da Universidade da Madeira.