

***Faculdade de Ciências da Universidade do Porto***

**Mestrado em Física para o Ensino 2000/2002**

**Tema de Dissertação**

***A matéria escura no Universo***



**Carlos Manuel Teixeira Pires**

**Orientado por:**

**Doutor Pedro Pina Avelino  
FCUP**

**Mestrado em Física para o Ensino 2000/2002**

**Faculdade de Ciências da Universidade do Porto**

**Tema de Dissertação**

***A matéria escura no Universo***

**Carlos Manuel Teixeira Pires**

**Orientado por:**

**Doutor Pedro Pina Avelino  
FCUP**

## **Introdução**

Visa esta dissertação fazer uma abordagem simples e de fácil compreensão de uma questão de grande actualidade da Astronomia, com implicações no destino do Universo, a matéria escura.

Não pretende ser um estudo exaustivo da matéria em questão, nem sequer um livro de aprofundamento matemático da mesma, mas tão simplesmente uma forma simplificada de abordar alguns conceitos físicos, com aplicação no ensino básico e também no secundário.

## Cosmologia

O estudo do Cosmos começa praticamente com início da Humanidade. Desde muito cedo o homem se questionou sobre a regularidade de certos eventos, como os eclipses, a sucessão dos dias e das noites ou as estações do ano. O elevado número de estrelas que compõem o céu nocturno cedo foi registada por várias civilizações, tendo por exemplo os Chineses relatado o aparecimento de uma supernova na nebulosa do Caranguejo, no ano de 1054 da era cristã. Em geral, antes do estabelecimento da Astronomia como Ciência com a consequente separação da Astrologia, os registos efectuados pelos diversos povos, possuíam tanto de místico como de científico. Tratava-se portanto de versões mais cosmogónicas do Mundo, no sentido de o explicar de uma forma mais ou menos religiosa, do que da sistematização científica das leis que o regem, Cosmologia. Aparentemente estas duas palavras deveriam ser referidas com o mesmo significado, ou seja, o estudo das estruturas que compõem o Universo ou Cosmos. No entanto, embora ambas se refiram ao cosmos, a *Cosmogonia* refere-se ao conhecimento da criação do Universo (*Kosmogonia* do grego, “Criação do mundo”).

Por seu turno, a *Cosmologia*, refere-se ao estudo das leis físicas que regem o Cosmos. A Cosmologia é a Ciência cujo objecto é o estudo das estruturas de larga escala do Universo e cujo objectivo é tornar compreensível a sua evolução.

Para representar o Universo, a Cosmologia pressupõe que este, em larga escala deverá ser o mais simples possível e considera que as características deste não dependem da posição nem da direcção, Homogeneidade (semelhança entre regiões) e Isotropia (não há direcções privilegiadas). Estas suposições constituem o Princípio Cosmológico. O modelo actualmente mais consensual, assente neste princípio, é o modelo Padrão do Big Bang.

Podemos considerar a história da Cosmologia dividida em três partes distintas, a saber:

1. - Uma primeira que contempla os cosmólogos/cosmogonos da antiguidade clássica onde se destacam Pitágoras, que preconizava um sistema em que um fogo central era circundado entre outros planetas, por uma Terra esférica em revolução, bem como pelo Sol; Aristóteles que configurou um modelo matemático composto por 55 esferas concêntricas

onde os céus eram imutáveis; Por seu lado, Ptolomeu preconizava um modelo Geocêntrico que vigorou até ao Renascimento.

2. Numa segunda parte, contamos com os pioneiros da Cosmologia, onde se destacam: Nicolau Copérnico, pela introdução do modelo heliocêntrico; Ticho Brahe cujos rigorosos registos de observação, permitiram a Johannes Kepler estabelecer as Leis do movimento planetário; Galileu Galilei descobriu os satélites de Júpiter, as manchas solares e as fases de Vénus;

Um dos mais notáveis homens da Ciência de todos os tempos, Isaac Newton descobriu a Lei da gravitação Universal que foi demonstrada pelas observações por William Herschel.

3. Na terceira parte temos a Cosmologia Moderna que se inicia com Albert Einstein, autor da Teoria da Relatividade e que com base nesta elaborou uma nova teoria da Gravitação; Alexander Friedmann e independentemente Georges Lemaître, pioneiros da Cosmologia física, descobriram e desenvolveram modelos de universos em expansão, a que se seguiu a comprovação da mesma pela via experimental, através das observações astronómicas de Edwin Hubble; Hubble foi influenciado também por Willem de Sitter, que além de propor um Universo em expansão, interpretou as observações e considerou que a luz que provinha das galáxias mais distantes sofria um desvio para o vermelho tanto maior quanto mais distante se encontrava a galáxia.

Questões como:” porque é que a noite é escura?”fazem parte do manancial de questões que sempre preocuparam o ser pensante, e foram as tentativas de responder a inquirições como esta que fizeram evoluir a Cosmologia.

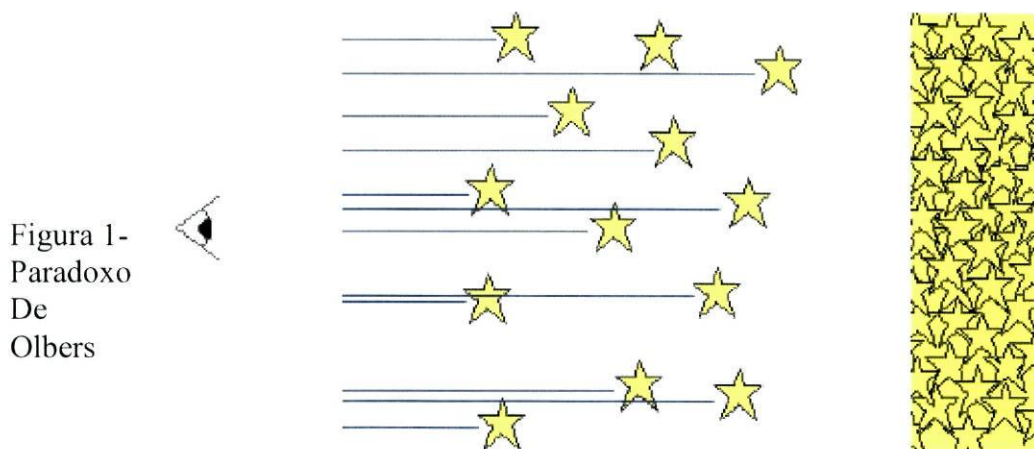
Newton pressupunha que o Universo só fazia sentido se fosse infinito e com as estrelas espalhadas aleatoriamente pelo espaço, pois caso contrário se elas estivessem

distribuídas apenas numa região, a sua gravidade acabaria por fazê-las colapsar umas contra as outras.

Desde logo Kepler e Halley insistiam na contradição que há em as estrelas brilharem eternamente num Universo infinito [6].

Olbers levou este paradoxo, *Paradoxo de Olbers*, ao extremo, demonstrando que num Universo infinito e estático o céu deveria ser tão brilhante como o Sol, pois com a infinidade de estrelas existente num tal espaço, a linha de visão do observador deve sempre cruzar-se com uma estrela[30].

Esta ideia, foi modificada pelo conceito de espaço-tempo einsteiniano. Por outro lado os conhecimentos actuais permitem-nos verificar que as estrelas possuem um ciclo de vida, e portanto, não brilham eternamente.



## Pressupostos Fundamentais

### Newton, Einstein e espaço-tempo

Após Kepler ter estabelecido as leis que regulam o movimento dos planetas, o génio físico e matemático de Newton, permitiu-lhe elaborar uma Teoria da Gravitação Universal que perdurou até aos nossos dias, embora, não possa ser aplicada a todos os casos, somente se restringe às condições de campos gravitacionais fracos e baixas velocidades.

Newton, ao contrário de Descartes, concebe espaço e tempo absolutos. O entendimento sobre o tempo de Newton, seguia os passos de Isaac Barrow, seu professor de matemática que dizia: "Qualquer que seja o movimento das coisas, o tempo, esse, prossegue inexoravelmente o seu curso regular e constante"[14].

Quanto ao espaço, esse, é o espaço Euclidiano a três dimensões, representadas por três coordenadas cartesianas. Num espaço deste tipo, homogêneo e isotrópico, a distância mais curta entre dois pontos é uma linha recta.



### Leis de Kepler

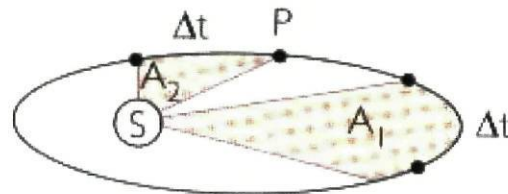
#### 1.<sup>a</sup> - Lei das órbitas

Todos os planetas descrevem órbitas elípticas em torno do Sol, ocupando este um dos focos.

#### 2.<sup>a</sup> - Lei das áreas

O segmento de recta que une qualquer planeta ao Sol varre áreas iguais em intervalos de tempo iguais.

Figura 2 – Lei das áreas



#### 3.<sup>a</sup> - Lei dos períodos

O quadrado do período de revolução de qualquer planeta, em torno do Sol, é proporcional ao cubo da distância média do planeta ao Sol.

$$\frac{T^2}{R^3} = K$$

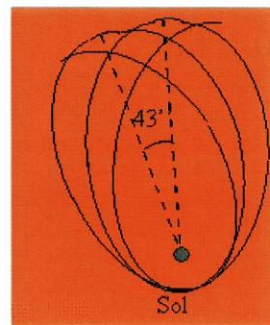


### Lei da Gravitação Universal de Newton

O valor da força atractiva entre dois corpos, é directamente proporcional às suas massas e inversamente proporcional ao quadrado das distâncias entre eles:  $\|\vec{F}\| = G \frac{Mm}{d^2}$

Usando as Leis de Kepler e de Newton, não é possível explicar o desvio de 43'', que se verifica no movimento de precessão de Mercúrio (segundo estas leis, este deveria descrever uma elipse), era necessária uma explicação convincente para este facto!

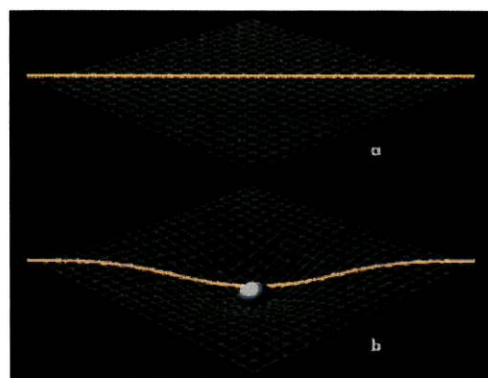
Figura 3 - a precessão de Mercúrio



Einstein veio revolucionar as concepções sobre espaço e tempo, mostrando que o intervalo de tempo entre dois acontecimentos depende do observador. Cada observador tem o seu tempo. Ao elaborar a Teoria da Relatividade Restrita, Einstein estabelece dois princípios: 1- As leis da Física devem ser as mesmas em todos os referenciais; 2- A velocidade da luz no vácuo é constante e independente da velocidade do observador. Uma das alterações mais marcantes introduzidas por Einstein foi a introdução do conceito de espaço-tempo quadridimensional, usando as três dimensões de espaço mais o tempo, como tecido estrutural do Universo. A Teoria da Relatividade Geral é uma teoria geométrica da gravitação que relaciona a presença de matéria com a geometria do espaço-tempo. A presença de matéria encurva o espaço-tempo, sendo a trajectória descrita por uma partícula, uma geodésica (distância mais curta entre dois pontos). Uma representação muito simples deste facto pode ser descrita da seguinte forma:

*Geometria do espaço-tempo  $\Leftrightarrow$  matéria*

Figura 4 – encurvamento do Espaço-tempo.



### **Friedmann e Lemaître & companhia**

A Cosmologia moderna assenta em bases físicas e matemáticas sólidas, de modo a que se possam estabelecer com o máximo rigor possível, equações e leis que descrevam quantitativamente a evolução do Universo.

Nesse sentido, a história da Cosmologia não pode esquecer os contributos de grandes cientistas e pensadores como o russo Alexander Friedmann e o padre belga Georges Lemaître, que respectivamente em 1922 e 1927, independentemente, descobriram uma família de soluções para as equações da gravidade de Einstein, e que, permitem descrever a expansão do Universo (esta expansão não fora prevista por Einstein, que considerara o Universo estático, tendo para isso introduzido a famosa constante Cosmológica de que falaremos mais adiante).

## Big Bang – o modelo padrão

Várias são as questões que se podem pôr acerca do Universo, como por exemplo: O Universo teve início? O que é que existia antes? Que significa ter início? Há quanto tempo isso aconteceu? Em suma qual a causa da sua existência?

Estas foram questões que sempre incomodaram a mente humana foram sendo respondidas das mais variadas formas, sobretudo de um modo, religioso ou filosófico, em suma transpunham-se estas questões e possíveis respostas para um plano metafísico.

Então há cerca de cinquenta anos, um conjunto de cientistas, entre os quais se encontrava George Gamow, decidiu elaborar uma teoria, que pressupunha a existência de uma grande explosão inicial, de onde teria surgido o Universo. A esta grande explosão chamaram Big (grande) Bang (explosão). Este acontecimento representa a criação do próprio espaço e também do tempo, e portanto não pode comparar-se à explosão de uma enormíssima bomba que espalha os seus fragmentos desde uma região central através do espaço e na qual invertendo o filme no tempo chegaremos ao instante inicial [30].

A história a partir deste evento está descrita na Tabela 1 que aqui se apresenta.

Tabela 1[30]

<i>Tempo</i>	<i>Temperatura</i>	<i>Energia típica</i>	<i>Fenómenos possíveis</i>
$10^{-43}$ s	$10^{32}$ K	$10^{19}$ GeV	A gravidade é forte. É necessária uma teoria quântica da gravidade (não existe ainda).
$10^{-37}$ s	$>10^{29}$ K	$>10^{16}$ GeV	Forças forte, electromagnética e fraca unidas.
$10^{-33}$ s	$10^{27}$ K	$10^{14}$ GeV	Provavelmente estabelecida a prevalência da matéria sobre a antimatéria. Desacoplamento da interacção forte e electrofraca.
$10^{-9}$ a $10^{-12}$ s	$10^{15}$ K	$10^2$ GeV	Força fraca enfraquece em relação à electromagnética. (Energia máxima dos aceleradores de partículas mais recentes).
$10^{-3}$ s	$10^{13}$ K	1 GeV	Surgem neutrões e protões.

<i>Tempo</i>	<i>Temperatura</i>	<i>Energia típica</i>	<i>Fenómenos possíveis</i>
$10^0$ s	$10^9$ K	0,1 MeV	Nucleossíntese – criam-se o Hélio e o deutério.
$10^6$ anos	$10^3$ K	0,1 eV	Os fótons dissociam-se da matéria. Origem da radiação de fundo (não é possível ver para lá desta época).
$10^{10}$ anos	3 K	$10^{-3}$ eV	Hoje. Vida e galáxias.
$10^{32}$ anos			Toda a matéria decai se não se der o “big crunch”, (grande colapso).

Tabela 1[30], continuação.

Como se pode verificar a parte mais difícil de explicar prende-se com a própria grande explosão, a época de Planck, quando a idade do Universo era inferior a  $10^{-43}$  segundos. Este é hoje um modelo consensual, pois as observações da expansão do Universo, da abundância relativa de elementos leves, da radiação cósmica de fundo e da formação de estruturas em larga escala, estão de acordo com as previsões do modelo.

### Evidências que corroboram a Teoria do Big Bang

- **Expansão**

A *expansão* do universo, foi detectada pela primeira vez por Edwin Hubble, em 1929, através do desvio para o vermelho, da luz emitida pelas galáxias distantes. De acordo com a teoria da relatividade restrita, quanto mais rápido se move um corpo radiante, maior é a diferença entre a frequência emitida pelo corpo e a detectada pelo observador.

Na figura 6, registo fotográfico obtido por Edwin Hubble

- Foi também possível verificar que as galáxias mais longínquas se afastam de nós com maior velocidade, figura 5.

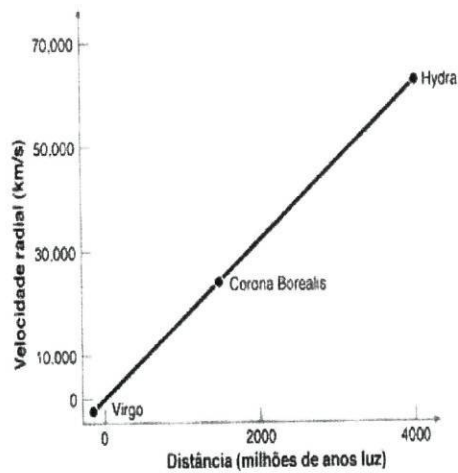


Figura 5

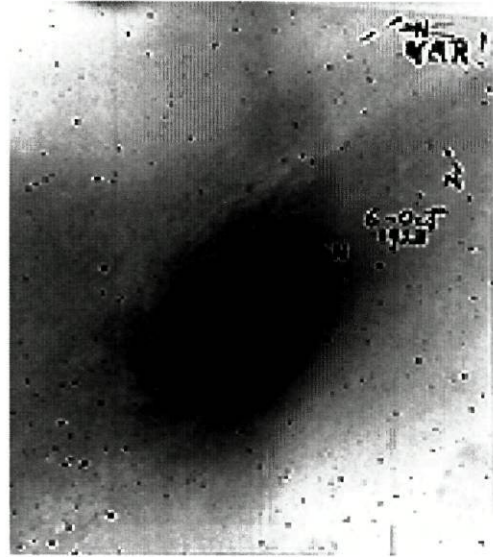


Figura 6

- **A abundância relativa de elementos leves**

### **Hélio, He**

Este elemento pode formar-se por fusão termonuclear, no coração das estrelas. Estrelas como o Sol queimam hidrogénio e, portanto produzem algum hélio, o qual é conservado no seu interior.

Das observações, conclui-se que existe um 1 átomo de hélio por cada 10 de hidrogénio, o que em massa representa cerca de 25 %.

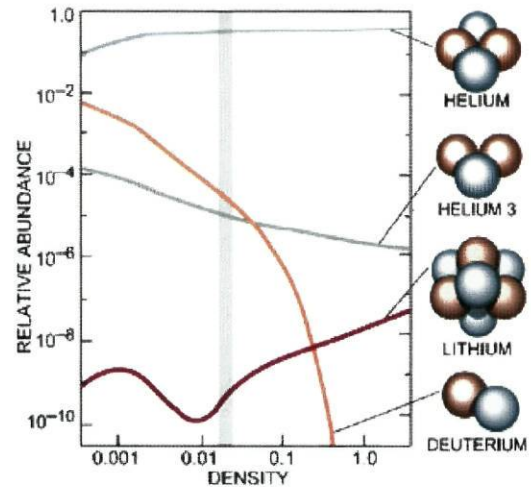
A maior parte do hélio não se terá formado nas estrelas, mas sim num período anterior à formação destas.

### **Deutério**

Este isótopo do hidrogénio, é um elemento frágil, que é destruído à temperatura de  $10^6\text{K}$ , o que fica muito abaixo das temperaturas verificadas no núcleo das estrelas. Deste ponto de vista pode verificar-se que o deutério é mais facilmente destruído nas estrelas do que é produzido.

Mais uma vez, pelas observações, podemos inferir que a sua abundância constitui cerca de 0,01% da de hidrogénio, sendo que a sua abundância relativa só pode resultar da Nucleossíntese primordial, figura 7.

Figura 7



- **Radiação cósmica de fundo em microondas**

Quando tentavam resolver o problema do ruído de fundo para um satélite de comunicações, Arno Penzias e Robert Wilson, verificaram em 1965, a existência de uma radiação persistente, na banda das microondas, com intensidade uniforme em todas as direcções. Para o efeito, construíam uma antena com a qual realizaram uma série de medidas.

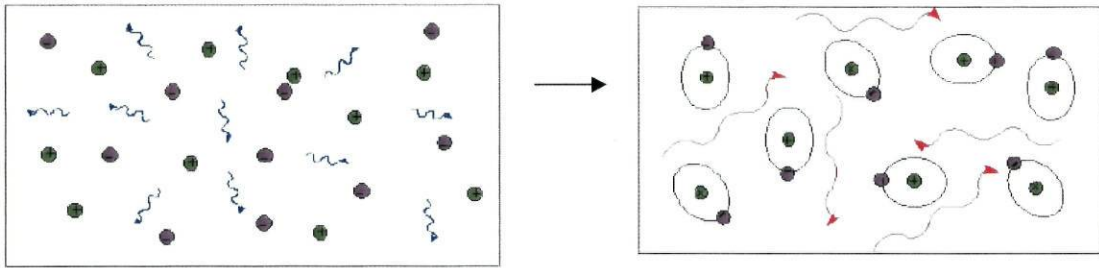
O Universo é uma fonte prolífica de radiação em microondas, proveniente de todas as direcções, e cuja intensidade produz um brilho que se compara ao brilho da Via Láctea, se esta ocupasse todo o nosso horizonte visível. No entanto, a intensidade absorvida pelo ser humano é apenas da ordem de  $10^{-5}$  watt, ou seja cerca de 1 parte em  $10^7$  de uma vulgar lâmpada de 100 W [6].

*Qual será então a origem desta radiação?*

Para produzir os elementos leves no primeiro minuto de vida do Universo, foram necessárias temperaturas elevadíssimas, da ordem das centenas de milhões de kelvin, mas com a expansão a processar-se, a temperatura foi descendo, deixando hoje um resíduo radiativo frio, de cerca de 3 K.

Cerca de 300 000 anos após o Big Bang, com a expansão em curso, há um decréscimo de temperatura, os fotões perdem a capacidade de ionizar o

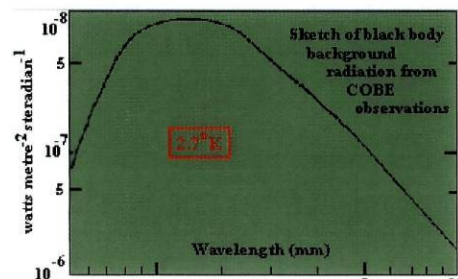
hidrogénio e passa-se da fase de plasma de protões e electrões à formação de átomos. Este processo deixa mesmo assim uma fracção residual de hidrogénio ionizado. Este desacoplamento dos fotões e recombinação atómica produz a transparência do Universo e a radiação de fundo.



Figuras 8 e 9 - Recombinação

Por outro lado o espectro evidenciado por esta radiação ajusta-se perfeitamente à curva produzida pelo *Corpo negro*. Este espectro característico representa um equilíbrio térmico quase perfeito entre a matéria e a radiação à data da sua emissão, cerca de  $10^6$  anos após o Big Bang. Basicamente comporta-se como se fosse originada numa cavidade perfeita tão densa e opaca que nenhuma radiação entrava ou saía dela, forçando a que a temperatura da radiação igualasse a temperatura das paredes da cavidade. Após os registos efectuados por um satélite construído para o efeito, o COBE (Cosmic Background Explorer) sabemos que essa temperatura de fundo é de exactamente 2,726 K.

Figura 10 – Radiação do corpo negro



Pela Lei de Stefan Boltzmann, sabemos que a densidade de radiação do corpo negro ( $u$ ), é proporcional à quarta potência da temperatura ( $T^4$ ),  $u = aT^4$ .  
Através desta relação, os registos energéticos do fundo cósmico, efectuados pelos satélites, podem ser convertidos em mapas de temperaturas.

O mapeamento da radiação cósmica de fundo revela pequenas anisotropias, cerca de 1 parte em 100 000, o que evidencia o facto de pequenas flutuações de densidade iniciais amplificadas por acção da gravidade terem dado origem às estruturas de larga escala que hoje observamos no Universo.

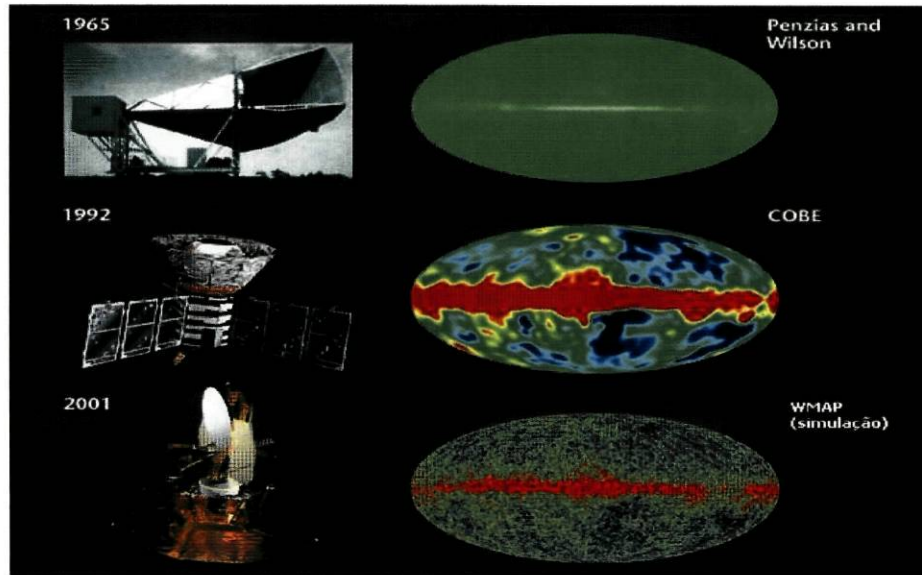


Figura 11 – A busca da anisotropia



### A Física do Modelo Padrão

Tomaremos o formalismo Newtoniano para descrever o modelo físico do Big Bang

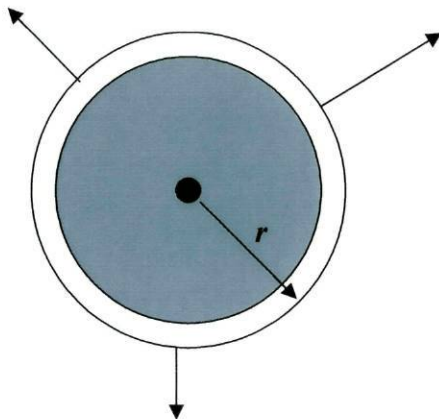
Vamos então considerar uma região do espaço circunscrita por uma esfera fictícia que se expande com a expansão do Universo, como um balão infinitamente elástico, esfera co-móvel. Dentro desta esfera, consideramos que a massa está uniformemente distribuída. Assumindo que neste invólucro não há criação ou destruição de matéria, o número de partículas aí presente manter-se-á constante, bem como a sua energia. Considerando então a esfera dividida em finas cascas concêntricas, como uma cebola, em expansão com velocidade  $v$  e com  $r$ , o raio actual da esfera, a casca possui energia cinética por unidade de massa,  $\frac{1}{2}v^2$  devida ao movimento, e energia potencial gravítica por unidade de massa,  $-GM/r$ , devido a presença de matéria. A massa inscrita num volume esférico é dada em função da sua densidade,  $\rho$ , ou seja  $M = (4\pi r^3/3)\rho$ . Cada tipo de energia aumenta sempre às custas do outro e, portanto a soma das duas será igual a uma constante, *cte*, por aplicação da Lei da conservação de energia ao

movimento da esfera. Aplicando a Lei de Hubble que veremos adiante ( $v = Hr$ ) e substituindo obtém-se uma equação simples:

$$\frac{1}{2} H^2 r^2 - \frac{4\pi}{3} G \rho r^2 = cte . (1)$$

Por hipótese, esta equação deve aplicar-se não só a esta esfera, mas a todas as possíveis esferas. Se se considerar inicialmente o raio da esfera,  $r_i$ , ela vai expandir-se de um determinado factor  $R$ , dependente do tempo, ou seja:  $r = R(t)r_i$ .  $R$  é o factor de escala.

O valor da constante que aparece na equação (1) pode tomar significados diferentes, conforme se faça uma abordagem Einsteiniana ou Newtoniana. Em ambas as teorias o valor de  $K$  é determinante para o futuro do Universo. Se  $K$  é negativo, o Universo agora em expansão, entrará no futuro em contracção enquanto que se  $K \geq 0$  o Universo expande-se para sempre (isto assumindo um Universo constituído por matéria ou radiação).



$$M = \text{Massa interior da "casca"} = \frac{4}{3} \pi r^3 \rho$$

$r$  = raio da casca

$\rho$  = densidade dentro da esfera

$v$  = velocidade de expansão

$H$  = constante de Hubble

$G$  = constante gravitacional de Newton

$k$  = constante de curvatura

$c$  = velocidade da luz

$R$  = factor de escala =  $r/r_{inicial}$

Figura 12 – O modelo de Friedmann

**Equação de Friedmann:** 
$$H^2 = \frac{8\pi G \rho}{3} - \frac{K}{R^2}$$

## Modelos cosmológicos, geometria e densidade do Universo

A geometria do Universo é fortemente condicionada pela presença da matéria. Por outro lado, consoante o valor de  $k$  na equação de Friedmann, poderemos ter três tipos de Universos.

Se  $k = 0$ ,  $\rho = \rho_0 = 3 H_0^2 / 8\pi G$ ; a densidade do Universo é a própria densidade crítica,  $\rho_0$ , e neste caso o Universo é aberto e plano.

Assim se  $k = -1$ , a densidade de matéria é inferior à densidade crítica  $\rho < \rho_0$  o que proporciona um Universo aberto (hiperbólico);

Finalmente no caso de  $k = +1$ , o Universo é fechado e esférico, com densidade superior à crítica.

Se o espaço for plano dois raios de luz que partam paralelos da Terra continuaram paralelos até aos confins do Universo, se for fechado como uma bola estes mesmos acabarão por se encontrar, mas se este é hiperbólico eles divergirão eternamente. Na figura 13, esta analogia é feita com formigas.

Por ser uma equação dinâmica, o que contrariava a ideia inicial de Einstein, este introduziu nela uma Constante Cosmológica,  $\Lambda$ , que obrigava o Universo ser estático. Mais tarde, as observações de Hubble, vieram provar que o Universo em larga escala, era realmente dinâmico.

Esta constante tem actualmente um significado diferente dos propósitos iniciais de Einstein como adiante se verá.

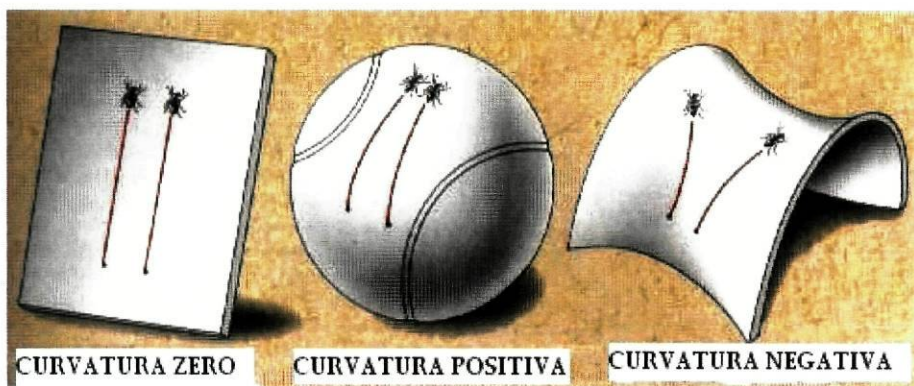


Figura 13 – Geometrias possíveis

Na figura 13, vemos superfícies tridimensionais num espaço bidimensional, pois não é possível representar de forma simples as superfícies tridimensionais de curvatura zero, positiva e negativa e por isso se recorre a esta analogia.

## A luz

Em geral ao falarmos de luz, estamos a referir-nos ao fluxo radiante que impressiona a nossa retina, estimulando em nós o sentido da visão. Porém esta nossa percepção não capta senão uma ínfima parte de todo o espectro electromagnético, ou seja o olho humano, consegue apenas detectar radiação na zona do visível, isto é, luz com comprimentos de onda compreendidos entre 390 e 780 nanómetros [25],[26].

A radiação electromagnética, propaga-se sob a forma de pequenos pacotes de energia, os fótons, associados a perturbações ondulatórias.

### O espectro electromagnético

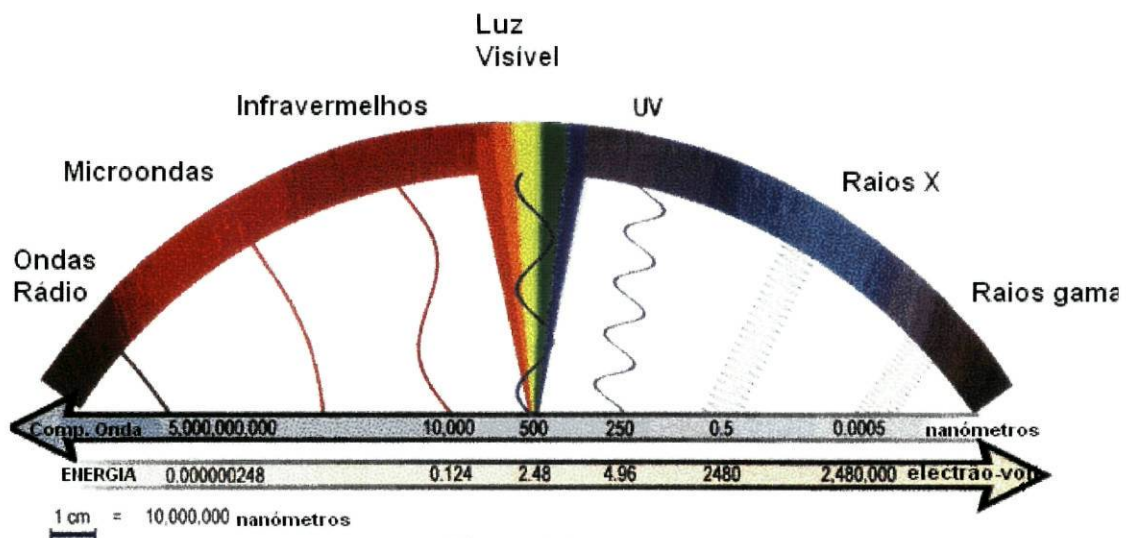


Figura 15

Adaptado de: CHANDRA X-RAY CENTER /Harvard-Smithsonian Center for Astrophysics

Na figura acima está representado, de uma forma relativamente simples, o espectro electromagnético, tanto em função do seu comprimento de onda, como da sua frequência e portanto da sua energia.



### Quantificar a luz

Em geral pode definir-se uma onda pela expressão harmónica de um seno ou de um co-seno (na realidade a onda pode ser a sobreposição de várias ondas harmónicas).

Tomando o exemplo sinusoidal,  $\psi(x,t) = A \sin k(x - vt) = f(x - vt)$ , devemos considerar:

Amplitude ( $A$ ): valor máximo da perturbação;

Comprimento de onda ( $\lambda$ ) ou período espacial: representa a distância a que se propaga o movimento oscilatório, durante um período do respectivo movimento[26].

O comprimento de onda depende da frequência da onda e da natureza do meio onde se propaga.

O período temporal ( $\tau$ ): é o intervalo de tempo necessário para que uma onda completa passe por um observador fixo.

Frequência ( $\nu$ ): representa o número de comprimentos de onda que passam por unidade de tempo num ponto fixo do espaço. A frequência é o inverso do período temporal e fornece-nos também a medida de energia de que a onda é portadora ( $E = h \nu$ ).

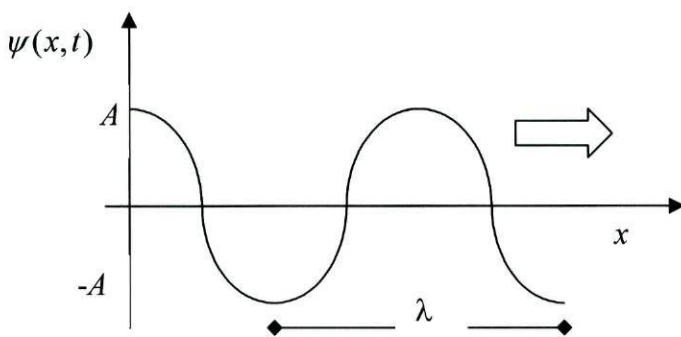
Velocidade (de fase) ( $v$ ): é a distância que a onda percorre durante um segundo (no vácuo a velocidade da luz é  $2,99 \times 10^8 \text{ m.s}^{-1}$ )

Algumas relações importantes:

(1)  $k = \frac{2\pi}{\lambda}$  (número de propagação, constante positiva)

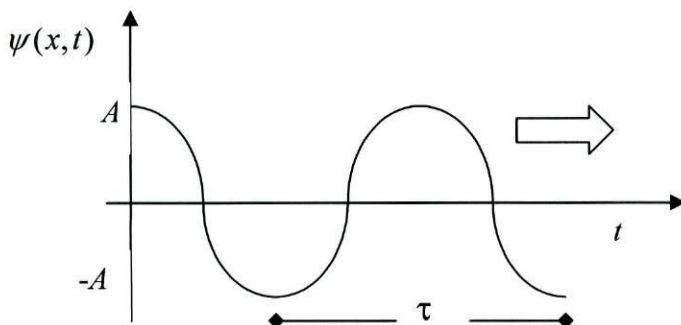
(2)  $k v \tau = 2\pi$  ou  $\frac{2\pi}{\lambda} v \tau = 2\pi$ , donde (3)  $\tau = \frac{\lambda}{v}$

(4)  $v \equiv 1/\tau$  donde (3) se transforma em (5)  $v = \nu \lambda$



Período espacial (Comprimento de onda)

Figuras 16 e 17



Período temporal

Com estes rudimentos estamos em melhores condições para analisar o espectro electromagnético apresentado acima. Assim começando por ordem crescente de frequência e portanto energia temos as *ondas rádio*, com frequências que vão desde Hz até  $10^9$  Hz (comprimento de onda,  $\lambda$ , de cerca de 30 cm até alguns quilómetros). Estas ondas são características de circuitos eléctricos e electrónicos e são usadas para transporte de sinais de rádio e televisão.

As *microondas* cuja região se estende desde  $10^9$  Hz até  $3 \times 10^{11}$  Hz (com comprimento de onda desde 1,0 nm a 30 cm), são importantes na Astronomia, uma vez que os átomos neutros de hidrogénio emitem no comprimento de onda de 21 cm, e nas comunicações com veículos espaciais. Hoje em dia tem também aplicações de uso doméstico na confecção de alimentos.

A zona do *infravermelho (IV)*, vai desde  $3 \times 10^{11}$  até  $4 \times 10^{14}$  Hz. O corpo humano radia nesta região, embora de um modo fraco, daí se usarem, para fins militares, os dispositivos de visão nocturna para sua detecção. A nível microscópico a fonte responsável por estas emissões encontra-se nos electrões das camadas mais exteriores dos átomos, bem como na rotação e vibração moleculares.

A *luz branca*, responsável pela estimulação dos nossos olhos, é na realidade uma composição de todas as cores do visível, que podem ser obtidas por dispersão através de um prisma, como reconheceu Newton. O nome, *Luz branca*, advém da percepção que o olho humano tem ao receber a mistura de frequências que ela possui como branco.

Muito próxima da zona do visível surge a radiação *ultravioleta (UV)* com frequências da ordem de  $8 \times 10^{14}$  Hz até  $3,4 \times 10^{16}$  Hz, que é bastante energética e ionizante, pelo que o escudo de ozono existente nas camadas superiores da atmosfera que a absorve na sua maior parte evita que soframos danos irreversíveis na pele ou nos olhos. Além do seu uso estético nos solários, os UV são também importantes quer na microscopia quer na Astronomia.

Os *raios X*, possuem frequências da ordem de  $2,4 \times 10^{16}$  a  $5 \times 10^{19}$  Hz, que fazem com que o seu comprimento de onda se situe quase sempre abaixo dos diâmetros atómicos. Podem obter-se por desaceleração rápida de partículas carregadas, e usam-se não só na medicina, como também são muito úteis na Astronomia, permitindo perceber melhor a composição de alguns corpos celestes.

Por fim e com radiações extremamente energéticas temos os *raios gama*, produzidos por transições no interior dos núcleos atômicos. Estes possuem comprimentos de onda tão pequenos que se torna difícil comprovar o seu comportamento ondulatório[26]. Os *raios gama* podem ser detectados com contadores Geiger.

### - Espectrometria

Como sabemos, a luz pode ser decomposta em várias cores, vemos isso no arco-íris ou na difracção por um prisma óptico. Esta separação de cores em geral constitui um espectro contínuo de cores, no visível, desde o alaranjado com maior comprimento de onda e portanto menor energia até ao azul claro, o mais energético (Figura 18)

Figura 18



Os átomos das diversas substâncias também revelam as suas impressões digitais, ao emitirem apenas em cores específicas (Figura 19) formando o *espectro de riscas*.

Figura 19



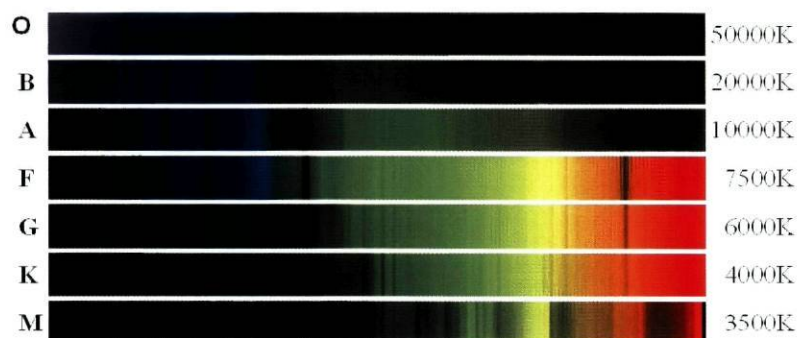
Se estes átomos se encontrarem frente a um objecto luminoso, então eles absorvem energia em riscas específicas, formando o *espectro de absorção* (Figura 20)

Figura 20



O conhecimento proporcionado pelos espectros ajuda os astrónomos não só a saber a constituição das estrelas, como também a sua temperatura e a distância a que elas se encontram de nós.

Figura 21





## O desvio para o vermelho

### *Efeito Doppler*

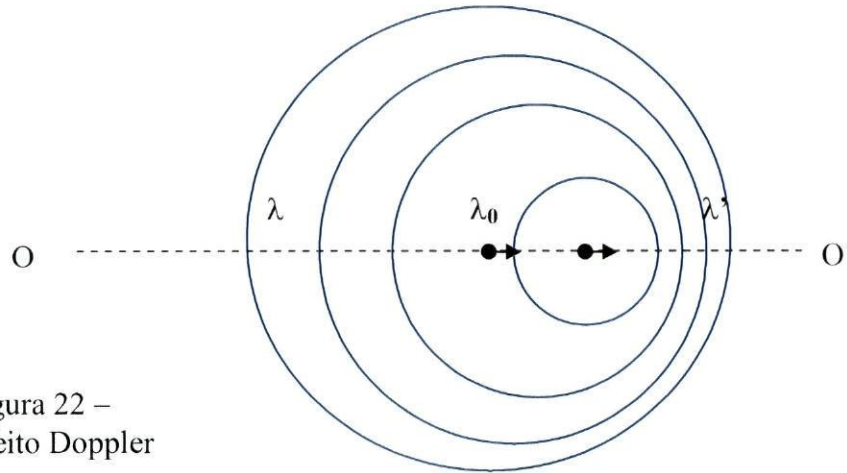


Figura 22 –  
Efeito Doppler

Para melhor compreensão deste efeito, tomamos a analogia com as ondas sonoras. Suponhamos que dois amigos, O e O', se encontram junto a uma passagem de nível do mesmo lado, mas afastados alguns metros. O comboio passa por O a apitar e aproxima-se de O'. O ouve um som mais grave, enquanto O' escuta, à aproximação do comboio, um som mais agudo. Como se pode observar na figura 22, o comprimento de onda do som emitido pelo apito do comboio,  $\lambda_0$ , detectado por O, possui um valor,  $\lambda$ , superior ao valor escutado por O,  $\lambda'$ .

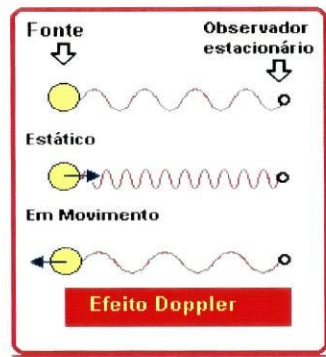
Esta discrepância de comprimento de onda também seria detectada por um só observador que se encontrasse na mesma situação de qualquer dos observadores acima descrita. Este, escutaria à aproximação, um ruído agudo e no afastamento um som grave.

Este fenómeno, que já foi decerto experimentado por todos nós no quotidiano, ao escutar comboios, ambulâncias, vendedores ambulantes, e outros é muito útil aos astrónomos como iremos ver adiante.

Um efeito semelhante ocorre com as ondas electromagnéticas. Consideremos uma estrela, em movimento, como fonte de ondas electromagnéticas.

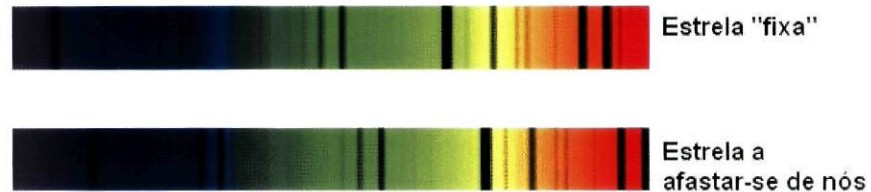
Se a estrela se estiver a aproximar do observador, o comprimento de onda da luz observada será menor; se ela se estiver a afastar então o seu comprimento de onda será maior deslocando-se para a zona do vermelho do espectro electromagnético, figuras 23 e 24.

Figura 23



Este efeito é importante se aplicado à espectrometria, pois permite verificar a aproximação/afastamento dos objectos astronómicos (por exemplo galáxias, estrelas, ...).

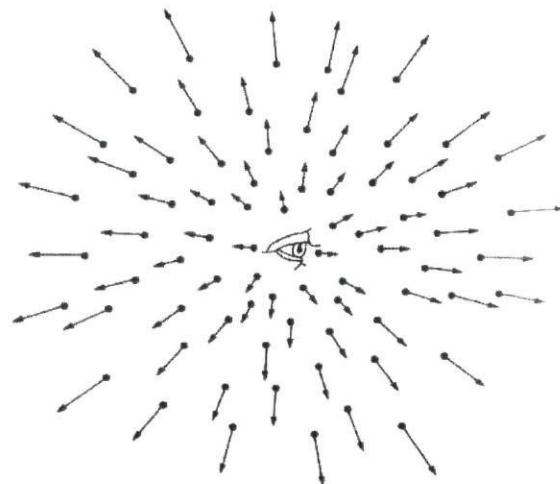
Figura 24



### Hubble e o desvio para o vermelho

Em 1929, instalado no telescópio do monte Wilson, na época um dos melhores do mundo, Edwin Hubble, dedica-se ao estudo de algumas das galáxias, pretendendo determinar a relação entre a velocidade e a distância a que estas se encontram. Anteriormente já se haviam efectuado estudos da mesma índole para estrelas e tinha-se concluído que algumas se afastavam e outras se aproximavam de nós. Depois de longas observações e registos, Hubble descobre uma coisa extraordinária, as galáxias estão em fuga! (figura 25)

Figura 25



À exceção das galáxias mais próximas todas as outras se afastavam de nós, sendo que as mais distantes possuíam velocidades muito superiores às mais próximas. Esta constitui uma das primeiras evidências daquele que viria a ser conhecido como o modelo do Big Bang.

***O desvio para o vermelho (cosmológico)***

Podemos observar na figura 19, o desvio das riscas espectrais provocado pelo afastamento de uma estrela, o mesmo sucedendo com as galáxias.

Assim a variação relativa no comprimento de onda pode ser traduzido pela forma (3):  $\Delta\lambda = (\lambda_0 - \lambda_c) / \lambda_c = z$ , é proporcional à distância,  $r$ , da galáxia emissora, com  $\lambda_0$ , comprimento da onda observada,  $\lambda$  é o comprimento da onda emitida e  $z$  é o *desvio para o vermelho*. Verifica-se que (4):  $z = \lambda_0/\lambda - 1 = v/c$  se a velocidade da fonte for muito inferior à velocidade da luz. O desvio para o vermelho gravitacional (efeito diferente do anterior), é devido à passagem dos raios luminosos nas proximidades de um campo gravítico

***A Lei do inverso quadrado***

O fluxo luminoso vindo de uma fonte pontual isotrópica é independente da direcção, e é interceptado normalmente pela superfície de uma esfera de raio  $r$ , concêntrica à fonte. Segundo esta Lei, o fluxo de um corpo luminoso varia com o inverso ao quadrado da

sua distância,  $r^2$ , da forma:  $\text{fluxo luminoso} = \frac{\text{Intensidade luminosa}}{4\pi(\text{distância})^2}$

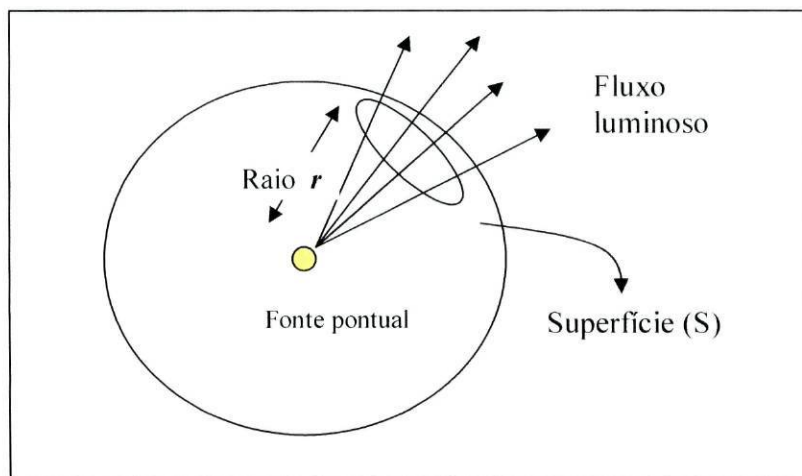


Figura -26

Esta lei revela-se importante em Astronomia, pois da análise do brilho e da cor das estrelas pode inferir-se respectivamente, a massa de um corpo celeste (estrelas mais massivas serão também mais luminosas), e da cor de uma estrela podemos determinar a sua temperatura.

As Cefeidas, são estrelas da constelação de Cefeus, cujo brilho é variável por períodos que podem ir de um a cem dias. Por estarem bem estudadas servem de referência para o cálculo de distâncias a estrelas que apresentem características idênticas.

Este método que possibilita a identificação de distâncias da ordem dos  $5 \times 10^7$  anos luz.

A cor de uma estrela dá uma ideia da sua temperatura, sendo as estrelas azuis as mais quentes e as vermelhas as mais frias.

Foi com base nestes conhecimentos que dois cientistas, Hertzsprung e Russell, de países diferentes construíram um diagrama de classificação dos corpos celestes, que ficou conhecido como o diagrama de Hertzsprung-Russell, também conhecido por diagrama H-R, directamente relacionado com o ciclo de vida das estrelas que abaixo se apresenta.

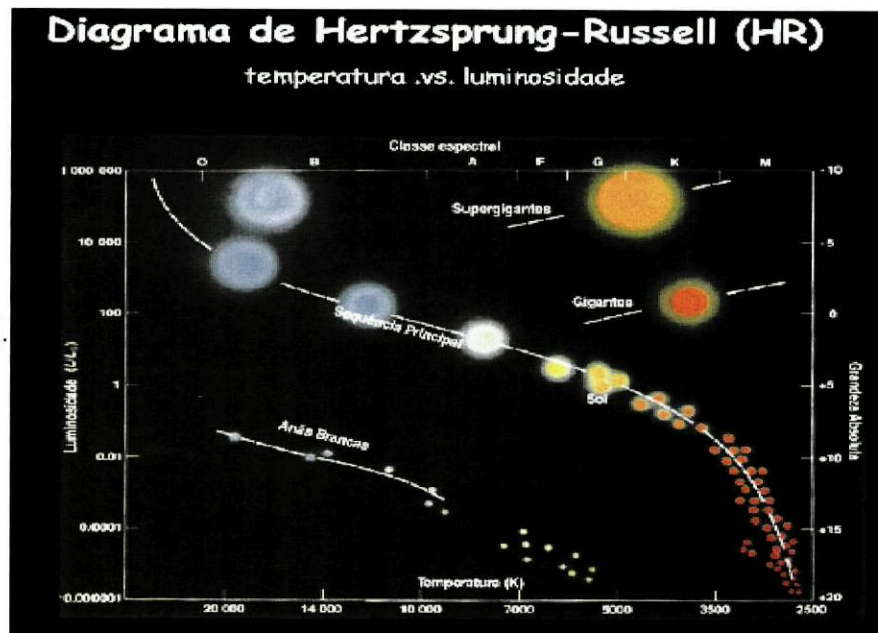


Figura -27, [31].

Uma maneira de estimar a massa de algumas estrelas é usar a razão  $M/L$ , (*razão massa/luminosidade*), que consiste tomar como referência a massa e a luminosidade do Sol e por comparação obter os dados para essas estrelas.

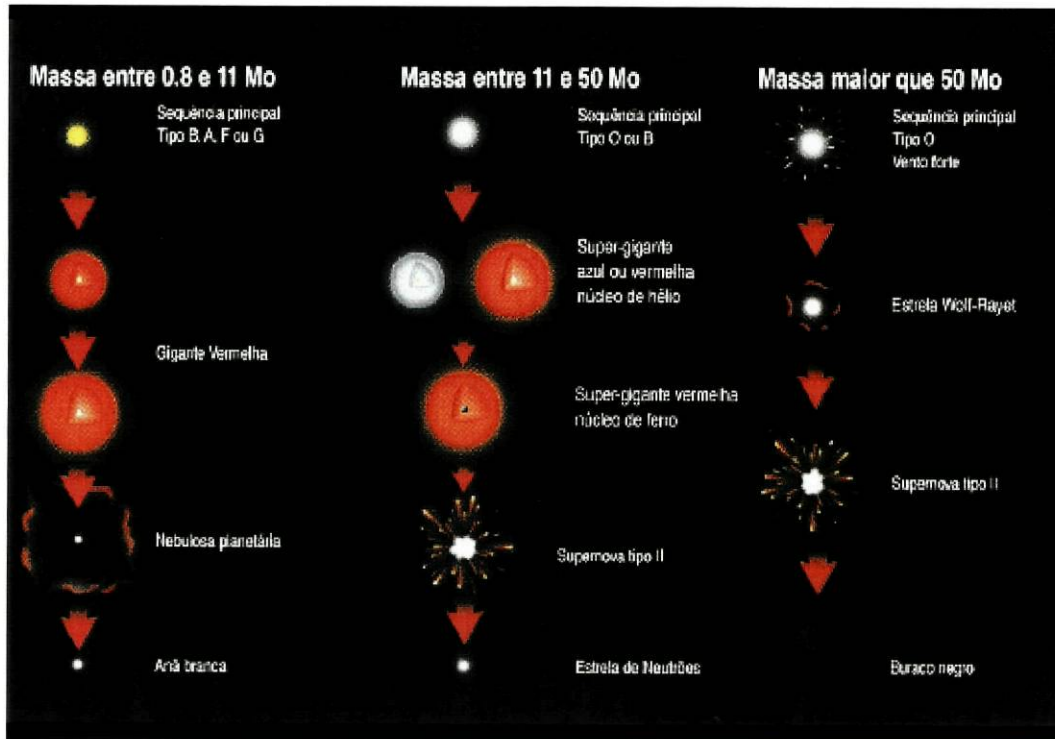


Figura - 28, [31].

Podemos também, aplicando estes conhecimentos, determinar o ciclo de vida de uma estrela e portanto a sua evolução no diagrama de HR



### O desvio da luz

Um “elemento de luz”, um fóton, sente o efeito de um campo gravítico, produzido por uma massa,  $M$ , como se fosse uma partícula material, sofrendo um desvio angular, que pode ser calculado, usando alguns rudimentos da física clássica. De facto, já nos anos 60, os físicos, Pound e Rebka, da Universidade de Harvard, verificaram, usando fótons de raios gama, que os quanta do campo electromagnético [25] se comportam como se possuíssem uma massa  $m = E/c^2$ .

Assim, um fóton, que passa a uma distância  $r$ , da superfície de uma estrela, por exemplo, sente uma força atractiva,  $F$ , pela acção gravítica da massa  $M$ , desse corpo, inversamente proporcional ao quadrado da distância a que se encontra deste, bem como directamente proporcional ao produto das massas, multiplicado pela constante de gravitação universal  $G$ .

Esta força é importante para o cálculo do desvio vertical do feixe de luz, pois a sua componente perpendicular é usada no cálculo do momento transverso do fóton, cuja razão com o momento paralelo, fornece o valor do desvio angular,  $\varphi$  do raio luminoso.

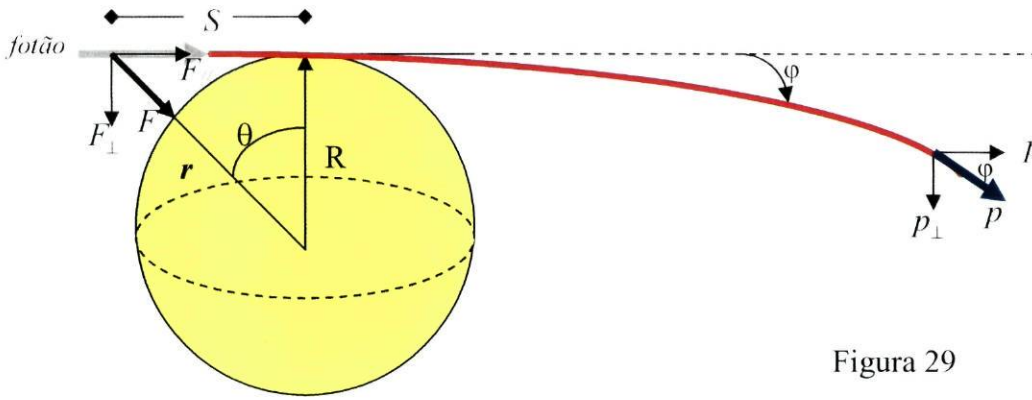


Figura 29

Da figura :  $F = G \frac{Mm}{r^2}$  com,  $r^2 = R^2 \sec^2 \theta$ , ou seja  $F = G \frac{Mm}{R^2 \sec^2 \theta}$

Como  $F_{\perp} = F \cos \theta$ , então  $F_{\perp} = G \frac{Mm}{R^2 \sec^2 \theta} \cos \theta$ ,

Ora o fóton percorre uma distância  $S = cdt$ , donde  $dt = R \cdot \sec^2 \theta \cdot d\theta / c$ .

Por integração  $p_{\perp} = \int_{-\pi/2}^{\pi/2} F_{\perp} \cdot dt$ , o momento transverso do fóton só depende de  $\cos \theta$  e o

resultado desta operação vem  $p_{\perp} = \frac{2GMm}{cR}$

O desvio angular  $\varphi = \frac{p_{\perp}}{p_{\parallel}}$ , e como  $p_{\parallel} = mc$ , vem  $\varphi = \frac{2GM}{c^2 R}$ .

Se por acaso a estrela em causa fosse o Sol,  $M_{\odot} = 1,991 \times 10^{30} \text{ kg}$  e  $R = 6,690 \times 10^8 \text{ m}$ , o desvio produzido é  $\varphi = 2,45 \times 10^{-4}$  graus ou 0,88 segundos de arco.

## Escalas no Universo

### *Distâncias, Tempo e Massa*

A primeira dificuldade com que nos debatemos é a medida das distâncias entre nós e os corpos celestes que observamos, o que não é uma tarefa fácil. As medidas que mais usamos no quotidiano como o cm, o metro ou mesmo o km, não são as mais adequadas para medir escalas astronómicas.

Também as unidades usuais de medida do tempo (s,segundo) e da massa (kg,quilograma) , não são as mais convenientes em Astronomia. As dimensões observadas possuem muitas ordens de grandeza acima daquelas com que lidamos no quotidiano, e por isso, é mais cómodo usar: para o tempo, a unidade *giga-ano* =  $10^9$  anos cerca de  $3 \times 10^{16}$  s, aproximadamente a idade estimada do Universo; para a massa o nosso termo de comparação é a massa do Sol,  $M_{\odot}$ , cerca de  $2 \times 10^{33}$  g [33].

Uma unidade de comprimento importante nas observações astronómicas é a *unidade astronómica* (UA), que representa a distância média da Terra ao Sol (pois como sabemos o movimento de translação da Terra em torno do Sol é ligeiramente elíptico e não circular).

Outra unidade de medida usual para distâncias astronómicas é o *ano-luz*, que corresponde ao espaço percorrido à velocidade da luz no período de um ano.

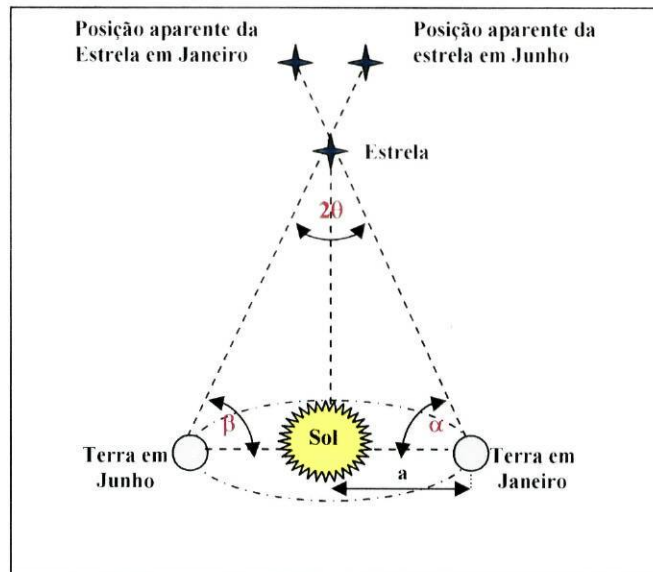
$$1 \text{ UA} = 1,496 \times 10^8 \text{ km}$$

$$1 \text{ ano-luz} = 9,46 \times 10^{12} \text{ km ou } 63,240 \text{ UA}$$

$$1 \text{ parsec (pc)} = 3,26 \text{ anos-luz} = 206265 \text{ UA}$$

A *paralaxe* é um dos métodos, no qual se usam conhecimentos trigonométricos simples para determinação de distâncias. A posição angular das estrelas próximas varia com o movimento translação da Terra em torno do Sol, isto é em Janeiro vemos a estrela numa posição e em Junho esta será vista numa posição ligeiramente diferente. Assim consideramos que a terra descreve aproximadamente uma circunferência de raio  $a \approx 1.5 \times 10^8$  km (ou 1 unidade astronómica, UA) em torno do Sol. As posições aparentes da estrela em Janeiro e seis

Figura 30



meses depois formam os lados de um triângulo cuja base é o diâmetro da circunferência ( $2a$ ) que subtende um ângulo  $2\theta$ .

Tomando o triângulo inscrito, sabendo que a soma dos seus ângulos internos é  $\pi$  radianos, verificamos que  $\theta = \frac{1}{2}(\pi - \alpha - \beta)$ , em que os ângulos  $\alpha$  e  $\beta$  são medidos em relação à estrela, respectivamente em Janeiro e em Junho. O ângulo  $\theta$  assim obtido constitui a paralaxe estelar. A distância  $r$  à estrela é dada pela relação  $a = r\theta$ , em que  $\theta$  é medido em radianos[19].

A distância assim medida é dada em *parsec* (1 parsec é a distância obtida quando  $\theta = 4,85 \times 10^{-6}$  rad ( $1''$  de arco); há 60 segundos num minuto de arco e 60 minutos em  $1^\circ$ ).

A paralaxe pode ser usada tendo como base duas posições diferentes na Terra, por exemplo dois observatórios em continentes diferentes, de qualquer forma deste modo só conseguimos medir com rigor a posição dos planetas do Sistema Solar, ou seja uma distância máxima de 1 hora-luz, enquanto que se usarmos o raio médio da órbita da Terra podemos alcançar até 300 anos-luz.

A partir deste limite teremos que usar outros métodos de medida que implicam o recurso à medição local do brilho ou do tamanho do objecto, bem como de outras grandezas como sejam: a cor, a magnitude, a velocidade de rotação.

Há no entanto, um limite técnico de distância que não conseguimos ultrapassar por mais que nos esforcemos, pois é impossível ultrapassar a velocidade da luz, esse limite é o horizonte.

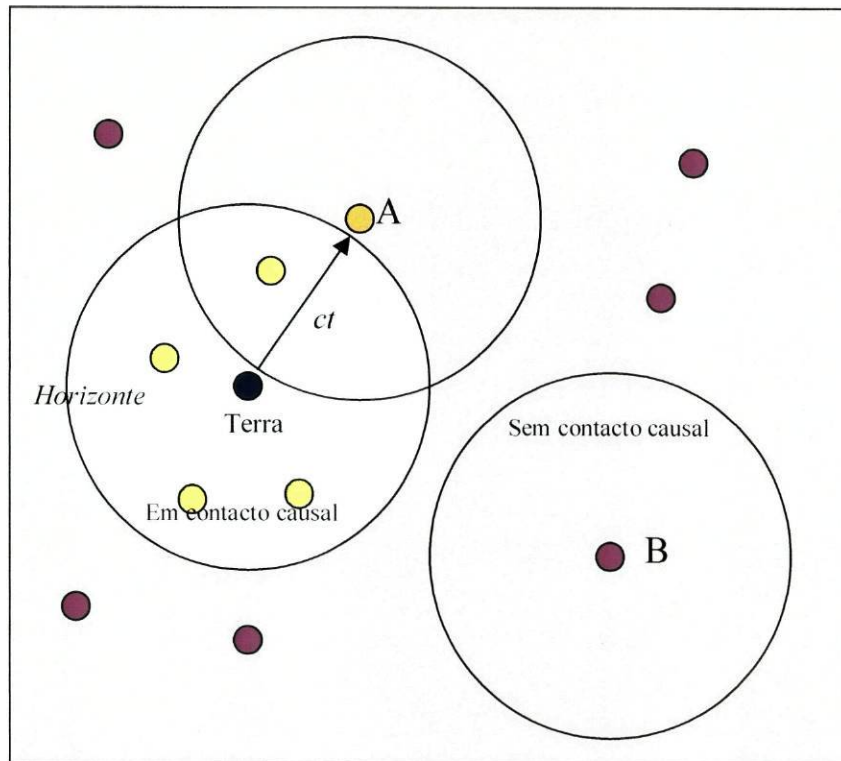


### O problema do Horizonte

Com a luz a deslocar-se a 300 000 km/s só podemos ver o registo dos fótons emitidos num raio de digamos:  $h(t) = ct$ ; com  $h(t)$ , horizonte, com,  $c$ , velocidade da luz e  $t$ , tempo decorrido desde o Big Bang. Não conseguimos ver mais além do que a distância percorrida pela luz num tempo  $t$ .

Para além desta fronteira torna-se impossível observar, logo, considerando uma galáxia, A, separada de nós por uma distância  $h(t)$  anos luz, esta, só estará em contacto causal connosco, quando tiverem decorrido  $h(t)$  anos da expansão do Universo. Até aí a luz dela não teve tempo suficiente para chegar até nós. Por outro lado, uma galáxia B, que se encontra fora deste limite só entrará em contacto causal connosco quando a expansão do Universo o permitir, isto é quando este possuir uma idade suficiente para que este raio,  $h$ , aumente e ela entre no nosso horizonte visível (figura 31). À medida que o Universo envelhece vamos conseguindo ver mais além.

Figura 31



### A Lei de Hubble

Nas suas observações, Hubble verificou, que as galáxias distantes se afastavam de nós com velocidade,  $v$ , proporcional à distância,  $r$ , que nos separa delas  $v = Hr$ . O termo de proporcionalidade, é apelidado de *Constante de Hubble* e costuma representar-se por  $H_0$ , quando referido à época actual. Na verdade  $H$ , não é realmente uma constante, e seria mais preciso chamar-lhe *Parâmetro de Hubble*.

Deste modo a lei de Hubble diz-nos que a velocidade de afastamento das galáxias ( $v$ ) é proporcional à distância ( $r$ ) que as separa de nós por um factor de  $H$  e representa-se da forma (5) :  $v = H_0 r$ .

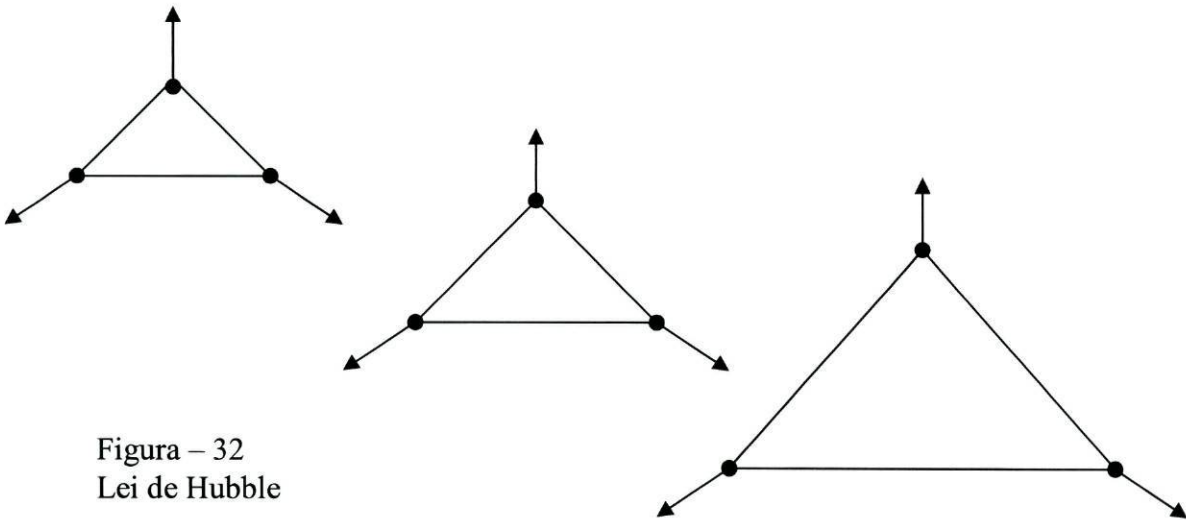


Figura – 32  
Lei de Hubble

Do que acima foi afirmado, podemos muito simplesmente fazer a analogia com a expansão de um triângulo definido por três quaisquer pontos no espaço (por exemplo galáxias), Figura 32. A exigência do Princípio Cosmológico, obriga a que conforme o triângulo se expande, este mantenha a mesma forma. Deste modo se a velocidade relativa entre dois dos seus vértices deverá ser directamente proporcional à distância que os separa, caso contrário o triângulo não mantém a sua forma original.

Um parâmetro importante em cosmologia, que aqui emerge, é o *factor de escala* ( $R$ ). Este relaciona a distância ( $r$ ) entre dois quaisquer pontos (galáxias) e a sua separação original ( $r_i$ ), fornecendo assim uma medida da expansão do Universo,  $R = r/r_i$ .

Por seu turno, de  $v = r/\Delta t$  donde,  $\Delta t = r/v$ , donde, logo por analogia com a Lei de Hubble temos que o inverso da constante funciona como um relógio para o Universo,  $\Delta t = 1/H_0$ . Por definição, a constante de Hubble tem por unidades,  $\text{kms}^{-1}\text{Mpc}^{-1}$  e o seu

valor mais consensual é de  $\pm 70 \text{ km/s/Mpc}$ . Para este valor de  $H_0$ , a idade do Universo é de cerca de 15 mil milhões de anos.

**Relação do desvio para o vermelho com a Lei de Hubble**

É evidente a relação entre o desvio para o vermelho e a Lei de Hubble, para tal basta substituir na equação (4)  $z = \lambda_0/\lambda - 1 = v/c$  a velocidade por (5)  $v = H_0 r$  e obtemos  $z = H_0 r/c$ .

**Relação do desvio para o vermelho com o factor de escala**

Podemos também relacionar simplesmente o desvio para o vermelho com o factor de escala. Desprezando os processos de absorção ou emissão que possam ocorrer no seu trajecto da luz, os comprimentos de onda que são emitidos de uma estrela,  $\lambda = R(t_{emitido})r_i$ , são observados por nós como,  $\lambda_0 = R(t_{observado})r_i$ , e o seu desvio relativo dá o

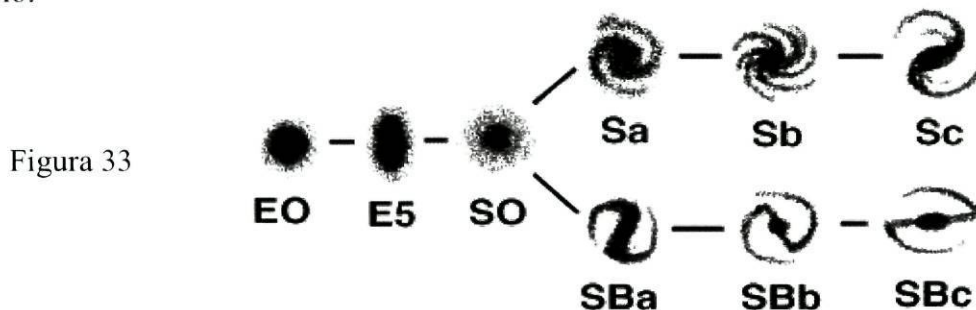
$$\text{desvio para o vermelho: } z = \frac{R(t_{observado})r_i - R(t_{emitido})r_i}{R(t_{emitido})r_i} = \frac{1}{R(t_{emitido})} - 1$$

Portanto, podemos determinar, z, como função de R, da forma:  $z = \frac{1}{R(t)} - 1$ .

**Estruturas**

A Cosmologia tem como objectos de estudo as galáxias (extensão típica de cerca de 100 000 anos luz), os enxames de galáxias (contendo de 10 a 1000 galáxias), os super-enxames de galáxias (cerca de  $10^8$  anos luz de extensão), que formam as maiores estruturas de larga escala do Universo.

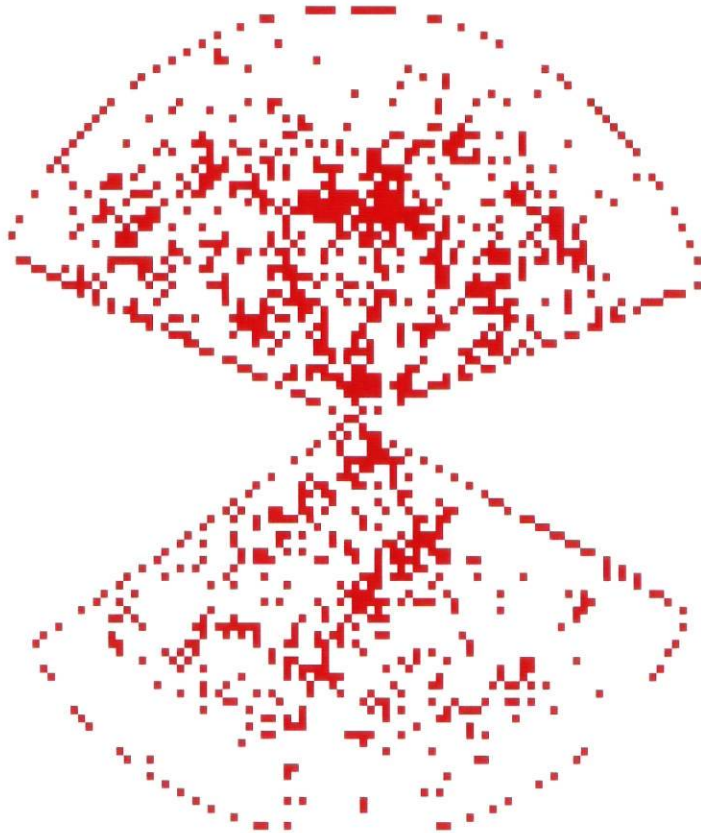
Hubble caracterizou as galáxias conforme a sua forma e brilho como se vê na figura abaixo.



Quanto à forma, aqui se apresentam: galáxias elípticas de E0 a S0; galáxias espirais, de Sa a Sc; e ainda espirais com barra de SBa a SBc.

Outras estruturas importantes à escala cósmica, são os imensos vazios, entre enxames e superenxames de galáxias, geralmente associados a perturbações negativas, ou seja regiões de densidade inferior à média [30].

Figura – 34  
O universo em larga  
escala - pedaço com  
cerca de 10000  
galáxias.  
Imagem do CfA.



## Matéria escura



### Afinal quanta matéria existe no Universo?

A resposta a esta questão poderá fornecer a chave para outra mais inquietante que é a de saber qual o destino do Universo.

Ao longo da sua existência, o homem cogitou sobre as mais variadas questões e embora não conseguisse uma “balança” para tal tarefa, arranjou maneiras de chegar a alguns resultados importantes. Para objectos não muito longínquos e não muito pequenos podemos saber o seu tamanho, e daí inferir o seu raio, através do cálculo: *tamanho = separação angular × distância*.

Para galáxias próximas é possível usar um método dinâmico de determinação de massa, pela medida da sua velocidade de rotação. Uma outra forma de medir a massa das galáxias é usar a razão  $M/L$ , (*razão massa/luminosidade*), já referida na página 24.

Tomando a luminosidade de cada estrela presente na galáxia e comparando com a massa conhecida do Sol bem como a sua luminosidade ( $M_{\odot}/L_{\odot} \cong 5.1 \times 10^{-11} \text{ kg.J}^{-1}.\text{s}$ ), pode estimar-se a massa da galáxia.

No caso de galáxias espirais foi possível determinar a sua velocidade de rotação, a partir do desvio para o vermelho/azul das emissões na banda rádio do hidrogénio neutro, existente nelas e verificar, ainda que grosseiramente, a sua constância.



### A força centrípeta

A força que mantém as estrelas no disco de uma galáxia deduz-se das equações de Newton.

Assim considerando a massa em função do raio da galáxia,  $M(r)$  constante,

$$F_{centrípeta} = m \frac{v^2}{r}; F_{gravítica} = G \frac{mM}{r^2}$$

$$F_{centrípeta} = F_{gravítica} \Leftrightarrow \frac{v^2}{r} = G \frac{M}{r^2} \Rightarrow v \propto r^{-1/2}$$

Este método dinâmico permite o cálculo da densidade de matéria, através das curvas de rotação de diversas galáxias, por comparação com a massa das estrelas nela contidas. O número actual de estrelas contadas, reflecte a possível existência de matéria escura.

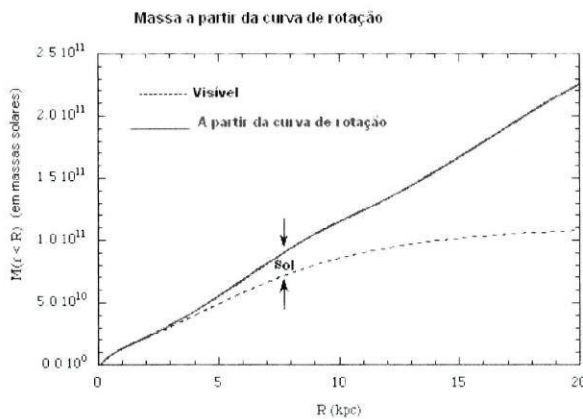


Figura 35

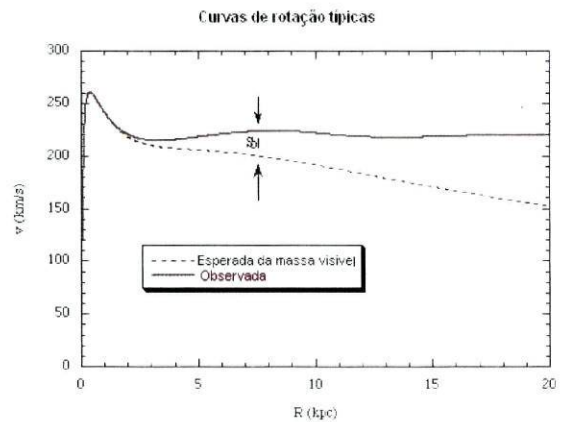
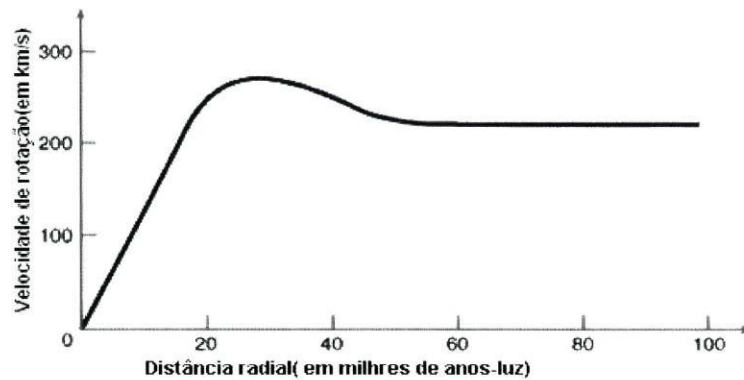


Figura 36

Figura 37

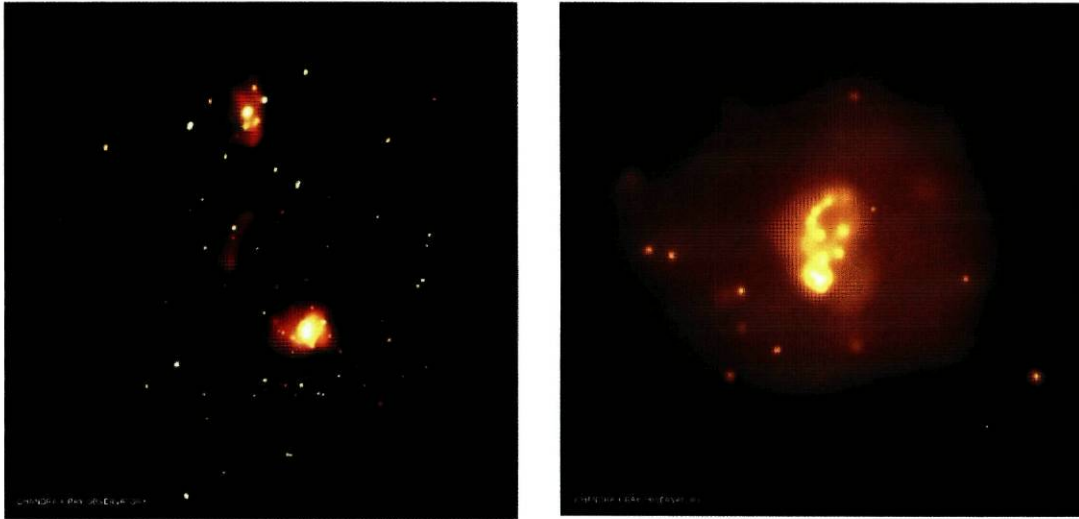


A figura 37 mostra, para o caso concreto da galáxia M31, onde seria de esperar um decaimento ( $r^{-1/2}$ ) da velocidade de rotação, mas na realidade isso não se verifica.



### Emissão de raios X

A existência de matéria escura nas galáxias pode ser inferida a partir das emissões de raios X provenientes do gás ionizado dos seus halos.



Figuras 38 (esquerda) e 39

Nas figuras acima podemos verificar a galáxia M51, sem recurso à detecção de raios X, imagem 38, e com detecção dos mesmos, imagem 39, através do Chandra Ray Observatory.



### *O Teorema de Virial*

Segundo este teorema: num sistema ligado, a energia cinética média é igual a metade da energia potencial gravítica, ou seja:  $\langle 2E_c \rangle + \langle E_p \rangle = 0$ . Isto implica que  $v^2 - GM/r = 0$  e então podemos obter a massa, M, desse sistema, da forma:  $M = v^2 r / G$ .

Poderia pôr-se a hipótese de a matéria sombra que existe nas galáxias ser composta por gás, que à primeira vista não seria observado. Mas, de tal parece não se tratar, pois quando ionizado, o gás, será difícil de esconder, pois emitiria um espectro característico. O gás que se descobriu até agora nos espaços inter galácticos não é suficiente para colmatar as discrepâncias notadas [6].

Uma coisa é certa esta massa escura deixa a sua marca gravítica pelo desvio produzido nos raios de luz provenientes de galáxias distantes.



## Lentes gravitacionais

Este fenómeno é observado quando a luz proveniente de galáxias muito afastadas é encurvada no seu trajecto, à passagem por estruturas de larga escala, que funcionam como lentes gravitacionais, figura 40.

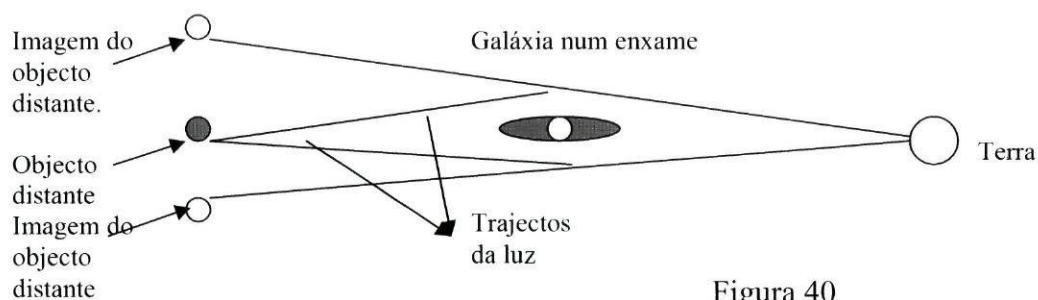


Figura 40

As perturbações de densidade produzidas por estas estruturas de larga escala produzem distorções da ordem de 1% e são portanto mais fracas que as produzidas por enxames de galáxias. Na figura 41, podem ser observados pequenos arcos concêntricos resultantes deste efeito.

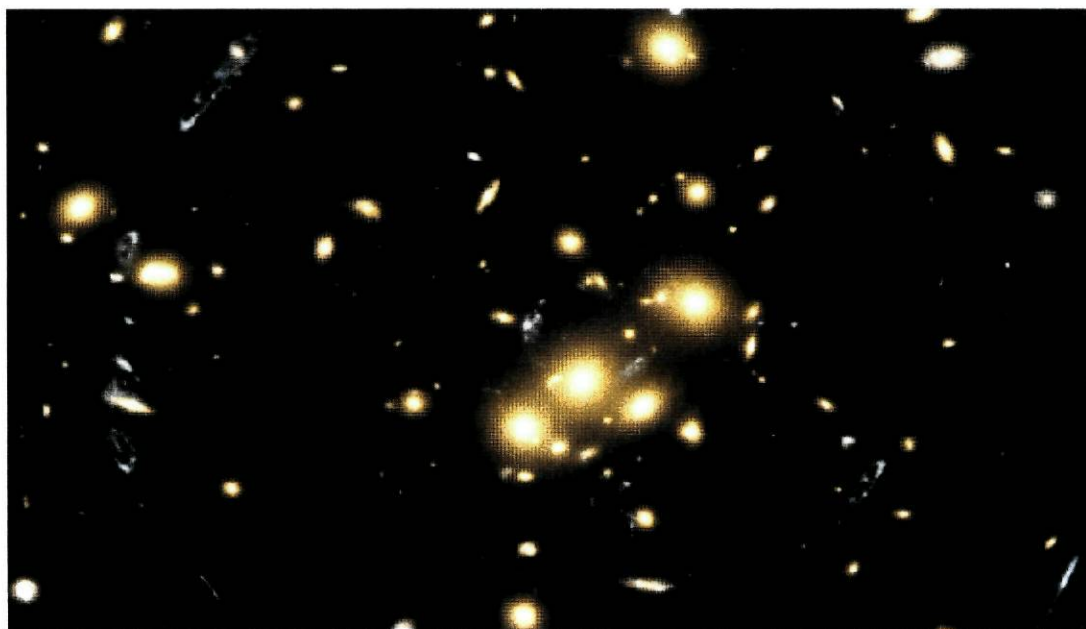


Figura 41

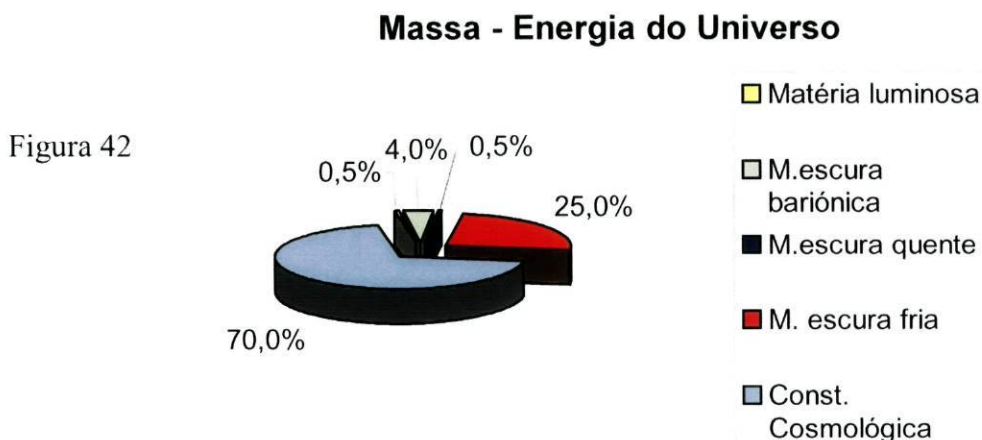
## Fritz Zwicky e a *Matéria Escura*

Há cerca de cinquenta anos, o astrónomo Fritz Zwicky, confrontado com este problema, começou a conjecturar sobre a predominância da presença de matéria em alguma forma não luminosa na constituição dos enxames de galáxias. Esta matéria não luminosa, que foi apelidada de *matéria escura* e a sua busca iniciada desde então, primeiro referenciada nos halos das galáxias, há cerca de vinte anos, até recentemente ser confirmada a sua existência em escalas muito maiores, os super-enxames de galáxias.



**Afinal o que é a matéria escura?**

As estimativas mais recentes do recenseamento de matéria no Universo, mostram que a matéria luminosa constitui apenas 0,5% da massa-energia total, figura 42. De que se trata afinal?



Para tentar responder à questão colocada temos então que considerar duas propostas, não mutuamente exclusivas. A primeira propõe que a *matéria escura* é do tipo bariónico, e é constituída por estrelas de pequena massa, portanto, baixo brilho, por isso ainda não detectadas, ou então é constituída por anãs brancas ou buracos negros, resultantes de gerações primordiais de estrelas massivas. A densidade média deste tipo de matéria escura constituirá cerca de 0,05 da densidade crítica do Universo, consistente com os dados da nucleossíntese;

A segunda proposta supõe que a maior parte da *matéria escura* é definitivamente do tipo não bariónico, constituída por uma das muitas partículas exóticas de fraca interacção com a matéria – por isso difíceis de detectar - propostas por vários modelos, que estariam em tão grande número que contribuiriam para abrandar a expansão do Universo. A contribuição deste tipo de *matéria escura* na densidade crítica do Universo será de cerca de 25%.

A questão inicial não deixa de ser uma das questões mais relevantes da Cosmologia actual, de tal modo que da sua resolução depende a concretização do seu principal objectivo, a determinação do valor e da composição da densidade de energia do Universo e as suas génese e evolução [4].



### Qual será a natureza desta matéria?

Analisemos a primeira proposta antes enunciada. Uma pequena fracção da matéria escura poderá ser bariónica constituída por estrelas de pequena massa.

Estes objectos de pequena massa podem tratar-se também de estrelas falhadas como Júpiter, ou seja, corpos que não possuíam massa suficiente para iniciar a fusão nuclear.

De acordo com a Nucleossíntese primordial e com as mais recentes observações da radiação cósmica de fundo, a primeira hipótese está excluída pois a fracção bariónica da matéria representa apenas meio por cento da massa-energia total.



### *Buracos negros*

Uma consequência importante da relatividade geral é a possibilidade de existência de buracos negros. Estes corpos possuem massa tal que nem os fotões lhes conseguem escapar.

Existe para qualquer massa gravitacional  $M$  um tamanho crítico,  $r_s$  (raio de Schwarzschild). Quando um corpo destes possui um raio  $r_M$  muito menor que esse tamanho crítico estamos na presença de um buraco negro. Como exemplo, a Terra

possui um raio,  $r_M \approx 6000\text{km}$ . No entanto se o seu raio fosse apenas de 9 mm, ela seria um buraco negro!

A velocidade de escape de um corpo à superfície de um buraco negro, numa interpretação clássica teria que ser superior à velocidade da luz.

A velocidade de escape é calculada classicamente com o recurso à conservação de energia e assim:  $E_P + E_C = 0$  o que implica que  $r = \frac{2GM}{c^2}$ .



### *Anãs brancas e estrelas de neutrões*

**Anãs brancas** são estrelas densas e quentes e com fraca luminosidade, que esgotaram o combustível nuclear e estão no seu estágio final. Possuem massas da ordem de  $1,4 M_{\odot}$  e densidades da ordem de  $10^5$  a  $10^8 \text{g/cm}^3$ .

As anãs brancas correspondem ao final da vida de uma estrela com massa da ordem da do Sol,  $1M_{\odot}$ .

**Estrelas de neutrões**, são estrelas cujo núcleo é denso, cerca de  $10^{14} \text{g/cm}^3$ , composto fundamentalmente por neutrões e derivam de estrelas em final de vida que possuíam massas da ordem de 8 a 30 massas solares. Neste estágio final não possuem mais de 2 massas solares e o material remanescente é ejetado durante a fase anterior ou por explosão de supernova. As estrelas de neutrões magnetizadas em rotação, com uma a duas massas solares formam pulsares com raios típicos de cerca de 10 km.

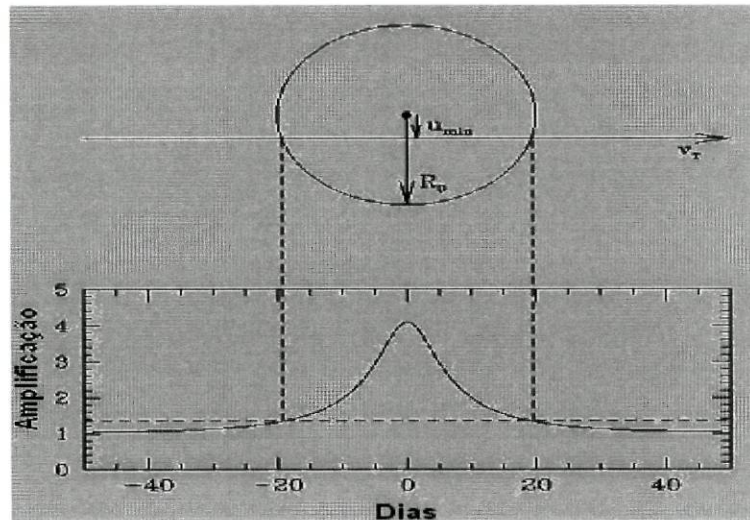
### **Detecção de MACHO's**

Objectos mais pequenos que os antes relatados, que nunca iniciaram a fusão do combustível nuclear e que possuem massas inferiores a 0,1 massa solar, constituem uma população importante dos halos das galáxias. Estes objectos foram chamados de MACHO's que é o acrónimo inglês de Massive Astronomical Compact Halo's Object e possuem massas compreendidas entre  $10^{-6}$  e 0,1 massas solares, encontram-se nos halos das galáxias. Os mais sérios candidatos a MACHO's são as anãs castanhas, com massas entre 0,001 e  $0.1 M_{\odot}$ , em contracção lenta e temperatura a rondar os 1000 K. Se

possuíssem mais massa seriam estrelas com pouca capacidade para iniciar a fusão termonuclear, enquanto que se fossem menos massivas comportar-se-iam como planetas estáveis. Por emitirem no infravermelho não são completamente escuras [3],[6].

Uma técnica para detecção destes objectos é o “*Microensing*”, que consiste no ligeiro encurvamento dos raios luminosos, à passagem na proximidade de um MACHO. A estrela em observação, multiplica-se em múltiplas imagens, separadas por mili segundos de arco, demasiado pequenas para ser observadas da Terra. No entanto o brilho da estrela é alterado temporariamente, conforme o MACHO se move ao longo da linha de visão no decurso da sua órbita no halo da galáxia. Para ultrapassar a dificuldade relacionada com pequena probabilidade de observar um fenómeno de “*Microensing*”, são monitorizadas alguns milhões de estrelas, da Grande Nuvem de Magalhães, onde cada estrela é observada centenas de vezes ao longo de um ano. Na figura 43 pode ver-se a curva teórica esperada para uma estrela, onde se nota um pico de ampliação.

Figura 43



Espera-se que em futuras experiências se consigam detectar objectos deste tipo, a partir das suas, embora fracas, emissões na banda do infravermelho.

### *Matéria escura do tipo não bariónico*

Uma outra hipótese sobre a natureza desta matéria é a possibilidade de ela ser constituída por partículas de muito fraca interacção. A razão para aceitar estas partículas, também chamadas de WIMP's, acrónimo inglês para Partículas Massivas de

Interacção Fraca, como candidatas, baseia-se na previsão com êxito da abundância de elementos leves, proposta e verificada pela Teoria do Big Bang.

### **Detecção WIMP's (axiões, neutrinos,...)**

Na tabela abaixo referem-se alguns dos candidatos exóticos a matéria escura não bariónica [20].

Nome da partícula	Spin	Presumível massa em repouso (eV/c <sup>2</sup> )	Límite actual de densidade*(cm <sup>-3</sup> )
Gravitino	3/2	10 <sup>3</sup>	1
Neutrino	½	5 - 10	10 <sup>2</sup>
Fotino	½	10 <sup>3</sup>	1
Gluino	½	-	-
Wino	½	-	-
Zino	½	-	-
Neutrino massivo	0	10 <sup>11</sup>	10 <sup>-8</sup>
Axião	-	10 <sup>-5</sup>	10 <sup>9</sup>
Monopólo magnético	-	10 <sup>25</sup>	10 <sup>-22</sup>
Partícula KK	-	10 <sup>28</sup>	10 <sup>-25</sup>

Para a detecção destes candidatos são construídos detectores, normalmente em profundidade no solo Terrestre.

Um dos candidatos mais falados actualmente é o Axião, que como vemos na tabela proposta por Fang Li Zhi, deverá possuir uma massa em repouso de 10<sup>-5</sup> eV/c<sup>2</sup>, ou seja da ordem de 10<sup>-41</sup>kg.

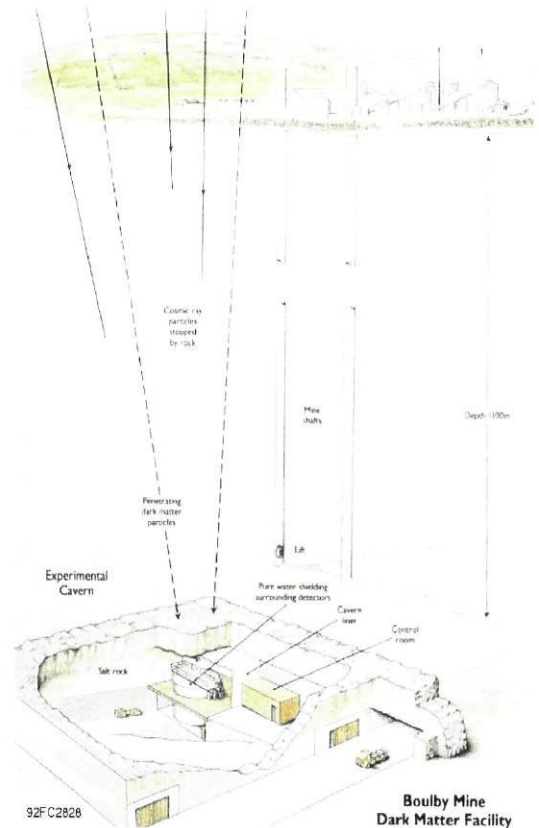
Os neutrinos são também partículas cuja detecção necessita de instalações especialmente sensíveis.

Em particular esta detecção é efectuada em minas a grande profundidade, como no exemplo da imagem 44, uma mina de sal desactivada, a cerca de 2 km abaixo da superfície.

Estes detectores funcionam a estas profundidades para evitar o ruído produzido por outras fontes de contaminação. Assim sendo uma barreira de matéria de 2km de profundidade poderá actuar como filtro.

Devido ao facto de os neutrinos serem de interacção fraca é, necessário que os detectores sejam de grandes dimensões, para apurar a sua sensibilidade.

Figura 44- esquema da mina de Boulby no Reino Unido (www.rl.ac.uk/ukdmc)



Para a hipótese não bariónica surgem no entanto duas propostas, a da *matéria escura fria*, CDM (Cold Dark Matter) e a *matéria escura quente*, HDM (Hot Dark Matter), que como veremos adiante possuem diferenças significativas.

### *Matéria escura fria*

Os principais candidatos desta matéria são os fotonos, axiões, neutralinos, entre outros. Estas partículas são não relativistas durante as épocas relevantes para a formação de estruturas cosmológicas (a partir da transição entre a época da radiação e a época da matéria).

### *Matéria escura quente*

Por antítese à *matéria escura fria*, temos a *matéria escura quente*, partículas com velocidades elevadas na transição da época da radiação para a época da matéria, o que resulta numa supressão (por dispersão) das flutuações existentes em pequenas escalas.

### *A influência da matéria escura na formação das grandes estruturas do Universo*

As observações actuais favorecem a existência de matéria escura fria e eventualmente uma muito pequena quantidade de matéria escura quente. De acordo com esta teoria, a partir pequenas variações de densidade, e da instabilidade gravitacional por elas provocada, começam por agregar-se nuvens de matéria escura com mistura de bariões, dando origem a pequenas galáxias, que por agregação formam enxames e superenxames. Temos aqui um cenário “Bottom-Up”, de baixo para cima, desde os tijolos do Universo, as galáxias, até às grandiosas superestruturas do Universo.

No caso dos modelos de *matéria escura quente*, a construção das super estruturas cósmicas, funciona no sentido inverso ao anterior. Trata-se de um modelo “Top-Down”, ou seja, de cima para baixo. Neste caso as flutuações de densidade primordiais em escalas abaixo dos grandes enxames de  $10^{15}$  massas solares, seriam apagadas. As galáxias surgem assim do colapso e fragmentação de estruturas de maior dimensão.

O principal problema que neste caso se põe é o facto de no modelo de *matéria escura quente*, as galáxias se formarem muito mais tarde.

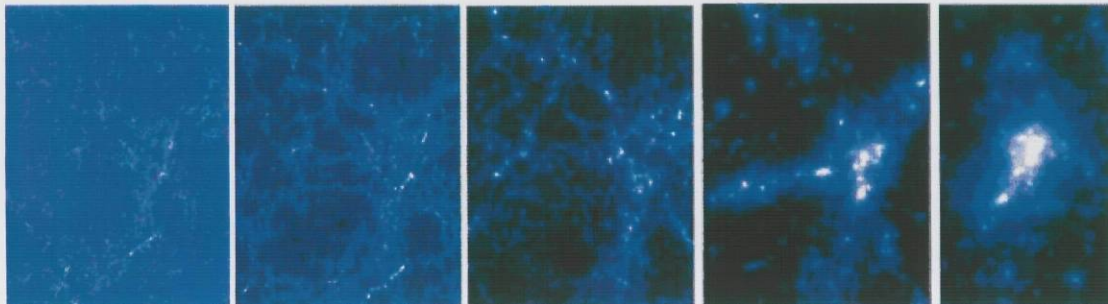


Figura - 45

Formação de super estruturas por coalescência de matéria escura.

## Implicações da Matéria escura no destino do Universo

### *O Triângulo Cósmico*

Das observações efectuadas até agora constata-se que a matéria bariónica contribui com menos de 5% da densidade assumindo um modelo plano de Friedmann,  $\rho_c = 3H_0^2 / 8\pi G$ , que fornece uma densidade crítica aproximada de  $1,7 \times 10^{-29} \text{g.cm}^{-3}$  [3]. A hipótese de um Universo plano é favorecida pelas observações das anisotropias de temperatura na radiação cósmica de fundo em microondas. Ora o modo de conjugar baixa densidade de bariões e um Universo plano é a existência de outras componentes na forma de uma matéria/energia escura que sejam dominantes no Universo.

Medidas recentes da luminosidade de supernovas distantes, como função do seu desvio para o vermelho, fazem acreditar na existência de uma forma dominante de energia com pressão negativa (constante cosmológica,  $\Lambda$ ) [3].

Para tentar resolver estas delicadas questões, um grupo de cosmólogos liderado por Neta A. Bachall, construiu um diagrama de interpretação relativamente acessível que a seguir se descreve.

Para caracterizar a densidade de matéria no Universo usa-se um parâmetro adimensional,  $\Omega$ , determinado pela razão entre a densidade da componente em estudo e a densidade crítica do Universo,  $\Omega = \rho/\rho_c$ . Se o resultado da razão for 1, temos um Universo plano; se for menor que 1, ele será aberto; se for maior do que 1 ele será fechado.

Mais uma vez recorrendo à equação de Friedmann, consideremos um Universo composto matéria, bariónica e exótica (matéria escura), curvatura e constante cosmológica:  $H_0^2 = \frac{8\pi G}{3}(\rho_m + \rho_\Lambda) - \frac{k}{R^2}$ . Se dividirmos ambos os membros por  $H_0^2$ ,

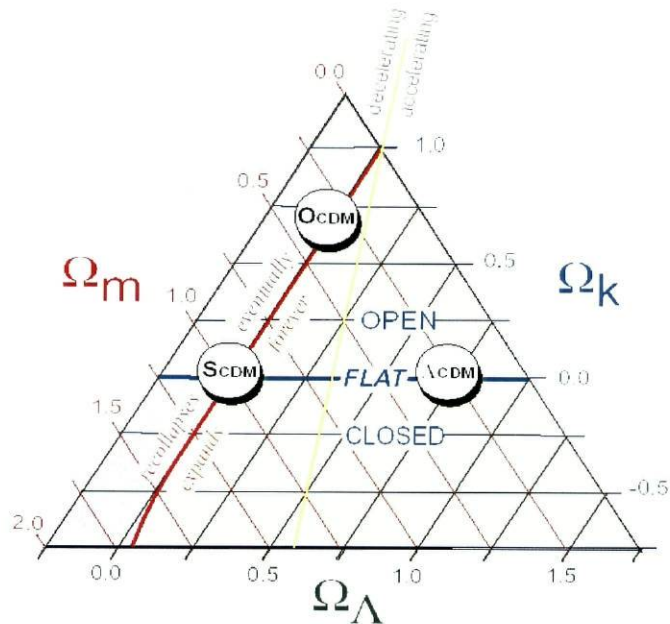
$$\text{obtemos: } 1 = \frac{8\pi G}{3H_0^2} \rho_m + \frac{8\pi G}{3H_0^2} \rho_\Lambda - \frac{k}{(RH_0)^2}$$

Igualando cada um dos três termos no membro direito da equação por  $\Omega_m, \Omega_\Lambda$  e  $\Omega_k$ , respectivamente obtemos:  $1 = \Omega_m + \Omega_k + \Omega_\Lambda$ . Ora esta soma pode ser representada em termos geométricos, sob a forma de um triângulo, equilátero, no qual as linhas de

constante  $\Omega_m$ ,  $\Omega_k$  e  $\Omega_\Lambda$  são representadas paralelamente a cada uma das respectivas faces do triângulo, de modo a que a condição inicial se mantenha satisfeita.

Voltando ao triângulo cósmico, nele estão inscritos os modelos representativos da evolução cósmica. A linha amarela separa os modelos acelerados e desacelerados.

Figura 46- o Triângulo cósmico, [3].



Com este esquema matemático é possível estudar a evolução do Universo no contexto dos vários modelos propostos.

As possibilidades aqui apresentadas são os modelos:  $S_{CDM}$ ,  $O_{CDM}$  e  $\Lambda_{CDM}$ .

No modelo Padrão com matéria escura fria,  $S_{CDM}$ , o Universo completamente dominado pela matéria, sem componentes de curvatura ou componente de constante cosmológica.

Na prática  $\Omega_m = 1$ ,  $\Omega_k = 0$  e  $\Omega_\Lambda = 0$ .

O modelo Aberto com matéria escura fria,  $O_{CDM}$ , faz intersectar  $\Omega_m = 0,3$ ,  $\Omega_k = 0,7$  e  $\Omega_\Lambda = 0$ .

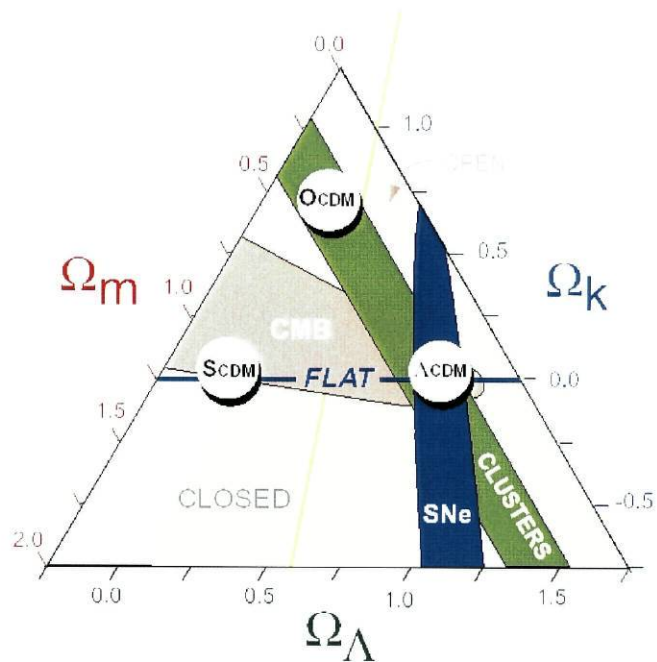
O terceiro modelo  $\Lambda_{CDM}$ , contém implícita a Constante Cosmológica, atribuindo-lhe a preponderância, valor  $\Omega_\Lambda = 0,7$ . A linha da componente  $\Omega_\Lambda$ , intersecta a linha da componente da matéria com o valor  $\Omega_m = 0,3$ , considerando curvatura  $\Omega_k = 0$ .

Como a curvatura só depende de  $\Omega_k$ , os modelos  $S_{CDM}$  e  $\Lambda_{CDM}$ , têm uma geometria plana (assentam na linha azul do triângulo) para o Universo, enquanto que o modelo  $O_{CDM}$ , tem uma geometria hiperbólica.

O modelo  $\Lambda_{\text{CDM}}$  está para além da linha representada a amarelo que demarca a aceleração eterna do Universo.

De qualquer modo, face aos dados observacionais até agora obtidos pode verificar-se que o modelo  $\Lambda_{\text{CDM}}$  é o que melhor se ajusta a estes, Figura 47, [3].

Figura 47.



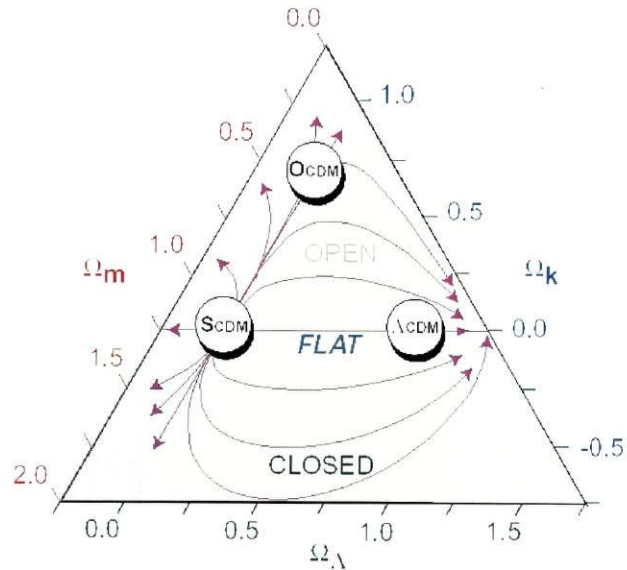
Apresenta-se em seguida uma tabela com a idade do Universo (em milhares de milhões de anos) para os diversos modelos, [3].

Modelo	$\Omega_m$	$\Omega_\Lambda$	$\Omega_k$	$H_0$	idade
Constante Cosmológica ( $\Lambda_{\text{CDM}}$ )	1/3	2/3	0	65	14,1
Universo Aberto ( $O_{\text{CDM}}$ )	1/3	0	2/3	65	12,0
Padrão ( $S_{\text{CDM}}$ )	1	0	0	50	13,0

## O destino do Universo

Podemos usar o triângulo cósmico para sistematizar o passado e o futuro do Universo e toda as suas trajectórias possíveis da sua evolução, figura 48, [3].

Figura 48



$(\Omega_m=1, \Omega_\Lambda=0)$  é um ponto de equilíbrio instável, no espaço de parâmetros  $(\Omega_m, \Omega_\Lambda)$ . No caso do modelo que melhor se ajusta às observações,  $\Lambda_{CDM}$ , temos que assintoticamente é  $\Omega_m \rightarrow 0$  e  $\Omega_\Lambda \rightarrow 1$ . Estas condições configuram um futuro em expansão eterna num espaço plano, levando ao desaparecimento da matéria e deixando para trás energia do vácuo inerte.

Qualquer que seja o destino do Universo este depende fortemente da sua composição em termos energéticos.

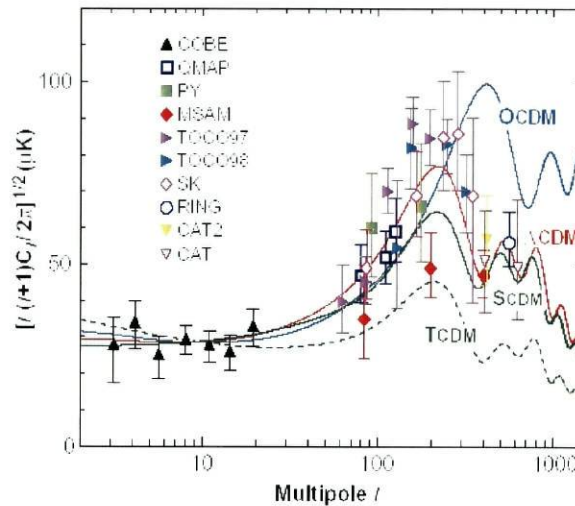
### *Experiências relacionadas com a busca da matéria escura*

#### *Análise da radiação cósmica de fundo CMBR*

A observação das anisotropias da temperatura da radiação cósmica de fundo, apresentada como função de escala angular, em que o multipolo  $l$  corresponde a uma escala angular de  $\pi/l$  radianos, efectuados por várias experiências pode entre outros

aspectos fornecer uma ideia sobre a curvatura do Universo e portanto contribuir para a determinação da composição da matéria/energia escura. Na figura abaixo estão referenciadas várias experiências, das quais se destaca a efectuada pelo satélite COBE, Figura 49, [3].

Figura 49

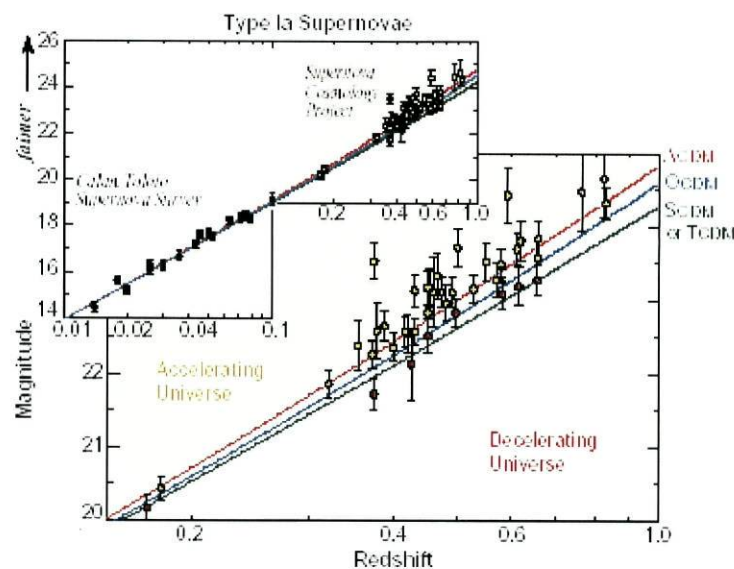


### Supernovas do tipo Ia

As supernovas são usadas também como padrões de distância, pois possuem um brilho intrínseco muito elevado, para medir a expansão do Universo.

Neste caso são traçados gráficos de magnitude em função do seu desvio para o vermelho, que parecem confirmar a existência da constante cosmológica (ou de uma forma de energia muito semelhante). Dois grupos se têm distinguido neste método, o Supernova Cosmology Project (SCP) e o HZS, equipa de pesquisas de de objectos cósmicos com grande desvio para o vermelho, Figura 50, [3].

Figura - 50



**Supernova** –são explosões catastróficas de estrelas no final da sua vida. Podem ser do tipo I, e são anãs brancas de sistemas binários de estrelas que acrescem matéria até que a fusão nuclear é tão potente que desmantela a estrela na sua totalidade. Se forem do tipo II, correspondem 8 vezes a massa do Sol e a fusão no seu núcleo produz todos os elementos pesados até ao ferro. Como a fusão do ferro não liberta energia a reacção pára por aí e o núcleo de ferro é inerte. Quando a estrela atinge 1,4 massas solares (limite de Chandrasekhar) a pressão é tão grande que a estrela se afunda nele e o colapso desta é eminente, acabando por explodir.

O brilho da Supernovas do tipo I é superior às do tipo II, ambas brilham mais do que as galáxias onde se encontram, e este permanece alguns meses. Se o núcleo da estrela não for destruído pela explosão, dependendo da massa, torna-se numa estrela de neutrões ou num buraco negro.

### Evolução da abundância de Enxames de Galáxias (Cluster Abundance)

Pela observação da abundância e sua evolução dos enxames de galáxias é possível avaliar o modelo que melhor se adequa à evolução e destino final do Universo. Aqui abundância, em enxames por  $(\text{Mpc}/h)^3$  é função do “redshift” (desvio para o vermelho) e do modelo proposto para evolução do Universo, Figura 51, [3].

Tanto para desvios para o vermelho próximos de 0 como para desvios para o vermelho maiores, verificamos que tanto o modelo Aberto  $\Omega_{\text{CDM}}$ , como o modelo com Constante Cosmológica,  $\Lambda_{\text{CDM}}$ , se adequam razoavelmente bem, às observações.

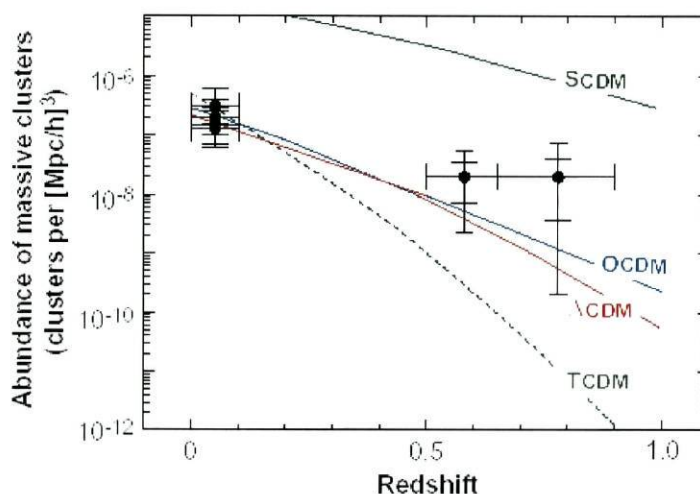
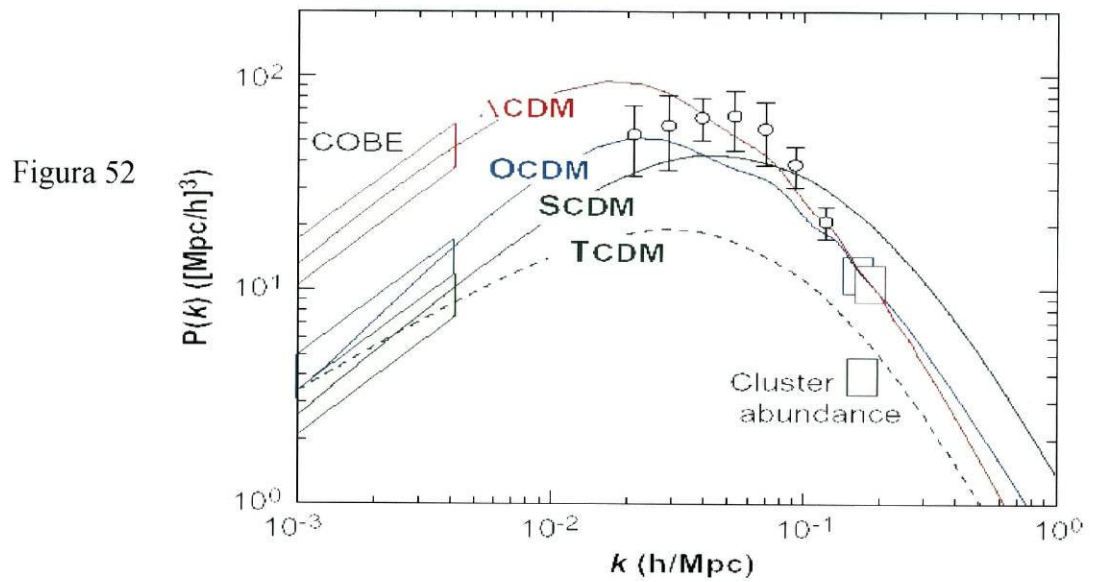


Figura 51

Outras experiências das quais só se faz referência revelam que a maioria dos dados registados é mais consistente com o modelo  $\Lambda$ CDM.

Na representação gráfica seguinte mostram se os resultados registados no traçado do espectro de massa-energia com a ajuda do satélite COBE, mais uma vez apontando para um Universo de baixa densidade de matéria, [3].



*Equipas de pesquisa (<http://www.astron.berkeley.edu/~mwhite/#galsrv>.)*

- [SDSS](#): Sloan Digital Sky Survey
- [AAT 2dF](#): The Anglo-Australian Telescope 2 degree Field Galaxy Redshift Survey
- [AAT 6dF](#)
- [2dF QSO redshift survey](#)
- [2 MASS](#): 2 micron all sky survey
- [DEEP](#): deep extragalactic evolutionary probe
- [The VIRMOS](#) project on the VLT.
- [The XMM-LSS](#) project.
- [LCRS](#): The Las Campanas Redshift Survey
- [ESP](#): The European Southern Observatory Slice Project
- [IRAS PSC](#): The Infra-Red Astronomical Satellite Point Source Catalogue Redshift Survey
- [APM](#): The Automated Plate Measuring laser scanner Galaxy Survey
- [MRSP](#): The Muenster Redshift Project
- [CNOC](#): The Canadian Network for Observational Cosmology redshift survey.
- [CFRS](#): Canada-France redshift survey
- [ISO](#) nearby Abell cluster survey
- The VLA [FIRST](#) survey home page.
- The [SIRTF](#) home page -- SIRTF should be able to obtain photometric redshifts to galaxies at  $z \sim 3$ .
- The [GALEX](#) home page. GALEX can obtain redshifts for 100,000 objects to  $z \sim 2$  and 10,000 QSO spectra.

## Citações e Bibliografia em Geral

- [1]- Cambridge Relativity: *Low Density Universes and Inflation*.html,  
<http://cambridge.edu/>
- [2] – M. Srednicki, 18. *Dark Matter*, <http://pdg.lbl.gov/>, Novembro 9,1999
- [3] – Bahcall, Neta A. ;Ostriker, Jeremiah P., Perlmutter, Saul and Steinhardt, Paul J;  
*The Cosmic Triangle: Assessing the State of the Universe*, <astro-ph/9906463> v4 1 Aug  
1999
- [4] – Golwala, Sunil, *Dark Matter and WIMPs*  
[http://cosmology.berkeley.edu.preprints.cdms.golwalthesis.thesis\\_ch1.pdf](http://cosmology.berkeley.edu.preprints.cdms.golwalthesis.thesis_ch1.pdf)
- [5] – Silk, Joe, *Dark Matter*, Essay, <http://www.cfpa.berkeley.edu>
- [6] – Silk, Joseph, *The Big Bang*, W. H. Freeman and Company 3rd ed. 2001
- [7] – Green, Bryan R., *O Universo Elegante*, Gradiva, Outubro 2000
- [8] – Hawking, Stephen W., *Breve História do Tempo*, Gradiva Dezembro de 1988
- [9] – Refregier, Alexandre, *Weak Lensing by large Scale Structure: Introduction*,  
[http://www.astro.princeton.edu/~refreg/weak\\_lensing/introduction.html](http://www.astro.princeton.edu/~refreg/weak_lensing/introduction.html)
- [10]– Hogan, C. J.,17. *The Hubble Constant*, Aug.1997, <http://pdg.lbl.gov/> Novembro  
9,1999
- [11] - Sadoulet, Bernard, *Direct searches for dark matter*, ,  
<http://www.cfpa.berkeley.edu>
- [12] – Steinhardt, P.J, Turok, Neil, *A Cyclic Model of the Universe*,  
<http://www.princeton.edu/>
- [13]- Steinhardt, P.J , Caldwell, Robert.R, *Quintessence*, Nov.2000.  
<http://feynman.princeton.edu/~steinh/> e  
[www.dartmouth.edu/artsc/physics/faculty/caldwell.html](http://www.dartmouth.edu/artsc/physics/faculty/caldwell.html)
- [14] – Auffray, Jean-Paul, *O Espaço-Tempo*, Biblioteca Básica de Ciência e Cultura,  
Instituto Piaget, 1999
- [15]– Einstein, Albert, *O Significado da Relatividade*, Coleção Studium, Arménio  
Amado – Editora, Coimbra 1984
- [16] – Geroch, Robert, *Relatividade Geral de A a B*, Editorial Presença, Lisboa 1991
- [17] – Pais, Abraham, *A vida e Pensamento de Albert Einstein*, Círculo de Leitores,  
Lisboa 1992

- [18] – Deus, Jorge Dias, *Viagens no Espaço-Tempo*, Gradiva, Lisboa, 1998
- [19] - Alonso, M. & Finn, E.J., *Física, Um Curso Universitário*, Volume I –Mecânica, Editora Edgard Blücher, São Paulo, Brasil, 2001
- [20] – Li Zhi, Fang, Xian, Li Shu, *A Criação do Universo*, Gradiva, Lisboa , Maio de 1994
- [21] – Reeves, Hubert, *Últimas Notícias do Cosmos, De regresso ao primeiro segundo*, Gradiva, Lisboa, Janeiro de 1995
- [22] – Rees, Martin, *O Nosso Habitat Cósmico*, Gradiva, Lisboa, Maio de 2002
- [23] – Varela, João, *O Século dos Quanta*, Gradiva, Lisboa, Novembro de 1996
- [24] – Born, Max, *Física Atómica*, Fundação Calouste Gulbenkian, Lisboa, 4ªedição.
- [25] – Hecht, Eugene, *Óptica*, Fundação Calouste Gulbenkian, Lisboa, 4ªedição.
- [26] - Editora, Dicionários, *Dicionário de Língua Portuguesa 2003*, Porto Editora, Porto, Outubro 2002
- [27] - Greffoz, Valérie, *Edelweiss détectera-t-il la matière sombre ?* Science & Vie, pg. 138, N.º1031, Agosto 2003
- [28] - Carvalho & al., Rómulo, *Física, para o 12.º ano de escolaridade/Via de Ensino, Vol.1* , Livraria Sá da Costa Editora, 1.ª edição 1981, Lisboa
- [29] - Bueche, Frederick J., *Física Geral*, Schaum – Editora McGraw-Hill do Brasil, São Paulo, 1983
- [30] - Maurício, J. P. *Cosmologia Cap.4 – Curso de Formação de Astronomia – C.A.U.P. – Porto, Abril de 03*
- [31] - Martins, Carlos, *Sistema Solar I, Cap. 3 - Curso de Formação de Astronomia – C.A.U.P. – Porto, Abril de 03*
- [32] - Santos, Caroline, *Cosmologia Física, Unidade 2- Cadeira do Curso Física , Ramo Científico 4.º ano, 2002/2003 – F.C.U.P. , Porto 2003*
- [33] - Narlikar, Jayant Vishnu, *An Introduction To Cosmology – 3<sup>rd</sup> ed.*, Cambridge University Press, 2002

<b>Índice</b>	
<b>Introdução</b>	<b>2</b>
<b>Cosmologia</b>	<b>3</b>
<b>Pressupostos Fundamentais</b>	<b>5</b>
<b>Newton e o espaço-tempo</b>	<b>5</b>
<b>Leis de Kepler</b>	<b>6</b>
<b>Lei da Gravitação Universal de Newton</b>	<b>7</b>
<b>Friedmann, Lemâitre &amp; companhia</b>	<b>8</b>
<b>Big Bang – o modelo padrão</b>	<b>9</b>
<b>Evidências que corroboram a Teoria do Big Bang</b>	<b>10</b>
<b>Expansão</b>	<b>10</b>
<b>Abundância relativa de elementos leves</b>	<b>11</b>
<b>Hélio, He</b>	<b>11</b>
<b>Deutério</b>	<b>11</b>
<b>Radiação de fundo em microondas</b>	<b>12</b>
<b>A física do Modelo Padrão</b>	<b>14</b>
<b>Modelos cosmológicos, geometria e densidade do Universo</b>	<b>16</b>
<b>A Luz</b>	<b>17</b>
<b>Quantificar a luz</b>	<b>17</b>
<b>Espectrometria</b>	<b>20</b>
<b>O desvio para o vermelho</b>	<b>21</b>
<b>O Efeito Doppler</b>	<b>21</b>
<b>Hubble e o desvio para o vermelho</b>	<b>22</b>
<b>O desvio para o vermelho cosmológico</b>	<b>23</b>
<b>A Lei do inverso quadrado</b>	<b>23</b>
<b>O desvio da luz</b>	<b>25</b>
<b>Escalas no Universo</b>	<b>27</b>
<b>Distâncias, tempo e massa</b>	<b>27</b>
<b>O problema do Horizonte</b>	<b>29</b>
<b>A lei de Hubble</b>	<b>30</b>
<b>Relação do desvio para o vermelho com a Lei de Hubble</b>	<b>31</b>
<b>Relação do desvio para o vermelho com o factor de escala</b>	<b>31</b>

Estruturas	31
Matéria escura	33
Afinal quanta matéria existe no Universo?	33
A força centrípeta	33
A emissão de raios X	34
O teorema de Virial	35
Lentes gravitacionais	36
Fritz Zwicky e a matéria escura	36
Afinal o que é a matéria escura?	37
Qual será a natureza desta matéria?	38
Buracos negros	38
Anãs brancas e estrelas de neutrões	39
Detecção de MACHO's	39
Matéria escura do tipo não bariónico	40
Detecção de WIMP's (axiões, neutrinos,...)	41
Matéria escura fria	42
Matéria escura quente	42
A influência da matéria escura na formação das grandes estruturas do Universo	43
Implicação da matéria escura no destino do Universo	44
O Triângulo cósmico	44
O destino do Universo	47
Experiências relacionadas com a busca da matéria escura	47
Análise da radiação cósmica de fundo	47
Supernovas do tipo Ia	48
Evolução da abundância de enxames de galáxias (Cluster abundance)	49
Equipas de pesquisa	51
Citações e Bibliografia em geral	52
Índice	54