

Ensino a Distância

# COSMOLOGIA

Da origem ao fim do universo

# 2015

**Módulo 3**

*A Teoria relativística da Gravitação e a  
nova visão do conteúdo do universo*

Presidente da República  
Dilma Vana Rousseff

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

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

Subsecretário de Coordenação de Unidades de Pesquisas  
Kayo Júlio César Pereira

Diretor do Observatório Nacional  
João Carlos Costa dos Anjos

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

Criação, Produção e Desenvolvimento (*Email*: [daed@on.br](mailto:daed@on.br))



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

Equipe de realização

Conteúdo científico e texto  
Carlos Henrique Veiga

Projeto gráfico, editoração e capa  
Vanessa Araújo Santos

Web Design  
Giselle Veríssimo  
Caio Siqueira da Silva

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

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

© 2015 Todos os direitos reservados ao Observatório Nacional.



Imagem do Grande Aglomerado Globular da Constelação de Hércules. Mostra uma grande diversidade de galáxias em interação. Foi descoberto pelo inglês Edmond Halley em 1714. Está a uma distância de 25100 anos-luz do Sistema Solar. Pode conter mais de um milhão de estrelas

Ensino à Distância

# COSMOLOGIA

Da origem ao fim do universo

# 2015

## ***Módulo 3***

*A Teoria relativística da Gravitação e a  
nova visão do conteúdo do universo*

# 20

## O “Deslocamento para o Vermelho” (Redshift)

### O “DESLOCAMENTO PARA O VERMELHO” (REDSHIFT)

Apresentaremos alguns detalhes de um dos conceitos mais importantes no estudo da astronomia extragaláctica e da cosmologia: o “deslocamento para o vermelho” ou “redshift”. Este conceito será mais detalhado à medida que formos progredindo no conhecimento da teoria do Big Bang.

#### O Espectro Eletromagnético

A física nos diz que a luz que nossos olhos conseguem perceber é somente uma pequena parte de um conjunto muito maior de formas de radiação que chamamos de **radiação eletromagnética**.

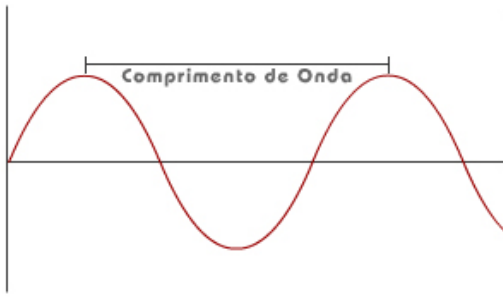
Foi o físico escocês James Clerk Maxwell quem primeiro mostrou que essa radiação eletromagnética tinha as propriedades de uma onda. Ela então passou a ser chamada de **onda eletromagnética**.

Sendo uma onda, a radiação eletromagnética possui todas as propriedades que caracterizam as ondas, ou seja, comprimento de onda e frequência.

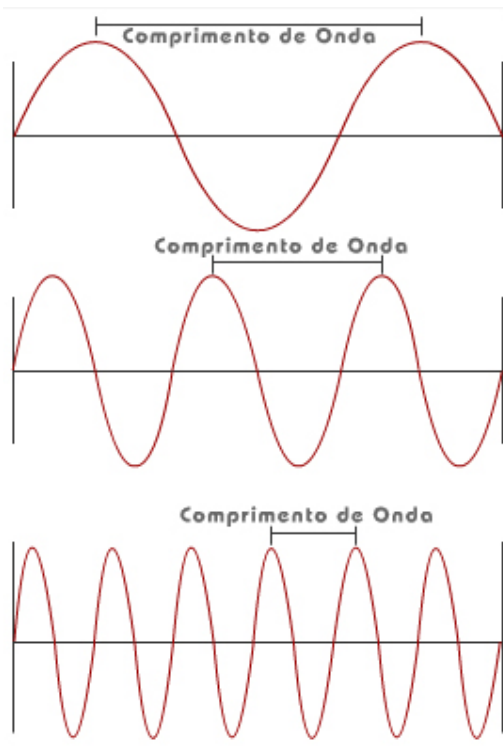
Vamos então definir algumas grandezas básicas do movimento ondulatório.

Caracterizamos uma onda por:

- Seu comprimento de onda: que é a distância entre os máximos da onda.
- Sua frequência: que é o número de máximos da onda que passam por um determinado ponto em um segundo.



PROPRIEDADE	SÍMBOLO	UNIDADE DE MEDIDA
FREQUÊNCIA	$\nu$	Hertz (Hz) = ciclos/segundo
COMPRIMENTO DE ONDA	$\lambda$	centímetro (cm) ou Ångstroms (Å) = $10^{-8}$ cm ou nanômetros (nm) = $10^{-9}$ m = $10^{-7}$ cm = $10\text{Å}$



A velocidade de propagação de uma onda eletromagnética é representada pela letra  $c$  e corresponde a

$$c = 2,99792458 \times 10^8 \text{ m/s} \sim 3,00 \times 10^8 \text{ m/s no vácuo}$$

Após Maxwell ter provado que a onda eletromagnética se propaga no vácuo com uma velocidade constante de aproximadamente 300000 quilômetros por segundo, foi fácil verificar que havia uma relação entre a velocidade  $c$  de propagação da onda eletromagnética, sua frequência  $\nu$  e seu comprimento de onda  $\lambda$ . Esta relação é

$$c = \lambda \nu$$

que pode ser escrita como

$$\lambda = \frac{c}{\nu}$$

ou então

$$v = \frac{c}{\lambda}$$

## A DESCOBERTA DO REDSHIFT

Em maio de 1842 o físico austríaco Christian Johann Doppler apresentou em um congresso de ciências naturais que ocorreu na cidade de Praga um artigo onde descrevia uma descoberta que o tornaria imortal na ciência. Ele verificou que a frequência do som emitido por uma fonte sonora mudava quando havia um movimento relativo entre o corpo emissor e um observador. A comunicação apresentada por Doppler tinha o título “Über das farbige Licht der Doppelsterne und einiger anderer Gestirne des Himmels”, e foi apresentada por escrito em 1843 na revista *Abh. königl. böhm. Ges. Wiss.* 2, 465-482, 1843.

Em junho de 1845 o meteorologista Christoph H.D. Ballot, de Utrecht, Holanda, confirmou a descoberta de Doppler durante uma viagem de trem que realizou entre Utrecht e Amsterdam.

Pouco tempo depois o próprio Doppler realizaria uma experiência para provar sua teoria. Sua ideia foi brilhante. Ele colocou em um vagão de um trem um grupo de músicos que deveria tocar a mesma nota musical durante toda a viagem. Ao mesmo tempo, um outro grupo de músicos foi colocado em uma estação de trem e tinha a missão de registrar qual a nota musical que eles estavam ouvindo tanto quando o trem se aproximasse da estação como quando ele se afastasse. Ou seja, a experiência mostrava que frequências mais altas produzem sons mais agudos e frequências mais baixas produzem sons mais graves.

Anos mais tarde o físico francês Armand Hippolyte Louis Fizeau verificou que as conclusões de Doppler se aplicavam não só ao som mas também à radiação eletromagnética. Em 1848 ele observou que os corpos celestes que se aproximam da Terra eram vistos com uma cor mais azulada (frequências maiores) enquanto que aqueles que se afastam de nós tinham uma cor mais avermelhada (frequências menores). Isso quer dizer que o espectro eletromagnético é deslocado para maiores ou menores frequências dependendo do movimento relativo entre o observador (no caso o nosso planeta) e a fonte que emite a radiação.

No caso da radiação que compõe a parte visível do espectro eletromagnético, quando a fonte emissora se aproxima do observador sua frequência é deslocada na direção do ultravioleta extremo do espectro. Quando esta fonte se afasta do observador a frequência da onda emitida é deslocada para o infravermelho extremo do espectro eletromagnético. Isso quer dizer que, do mesmo modo que as ondas sonoras, as ondas eletromagnéticas possuem frequências mais altas quando se aproximam de nós e mais baixas quando se afastam.

O efeito descoberto por Doppler se aplica a qualquer tipo de onda e ficou conhecido como **efeito Doppler**.

## O EFEITO DOPPLER CLÁSSICO

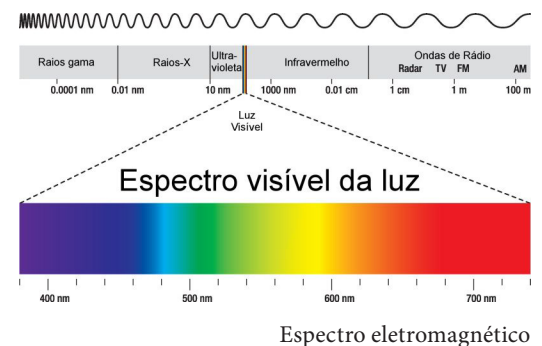
Certamente todos já sentimos o efeito sonoro que ocorre quando um carro de polícia se aproxima de nós. O som emitido por sua sirene é mais agudo à medida que o carro se aproxima e quando ele se afasta ouvimos um som mais grave. O som emitido pelos carros de corrida na Fórmula 1 também apresenta esse efeito.



Christian Johann Doppler (1803 - 1853).



Armand Hippolyte Louis Fizeau (1819 - 1896).



## POR QUE ISSO ACONTECE?

Para entender melhor esse fenômeno vamos considerar uma fonte sonora e um observador que se locomovem ao longo da reta que os une. Suponha que a fonte sonora está em repouso em relação ao meio e o observador está em movimento em relação à fonte (se afastando ou se aproximando) com uma velocidade  $v_0$ . A frequência emitida pela fonte sonora é representada por  $\nu$ . A física diz que a frequência  $\nu'$  ouvida pelo observador é dada por:

$$\nu' = \nu \frac{v \pm v_0}{v}$$

- A letra  $v$  representa a velocidade do som no meio considerado.

Nesta expressão o sinal positivo se refere à situação na qual o observador se aproxima da fonte. Quando isso acontece o observador intercepta um número maior de ondas. Veja que, neste caso, a frequência recebida pelo observador é maior do que a frequência que ele ouviria se estivesse em repouso, portanto ele escuta um som mais agudo.

O sinal negativo nesta equação corresponde ao caso em que o observador se afasta da fonte, quando então ele recebe um número menor de ondas à medida que se afasta. Veja, também, que neste caso a frequência recebida pelo observador é menor do que a frequência que ele ouviria se estivesse em repouso, ou seja, ele escuta um som mais grave.

O mais importante é notar que em ambos os casos considerados acima a causa da variação da frequência é devida ao fato do observador interceptar um número maior ou menor de ondas, por intervalo de tempo, devido ao seu movimento através do meio.

É importante notar que estas equações mudam se considerarmos agora que a fonte é que se desloca e o observador permanece estacionário. Suponha agora que a frequência da fonte é dada por  $\nu$  e sua velocidade de deslocamento é  $v_f$ . A variação da frequência do som recebido pelo observador será dada pela expressão:

$$\nu' = \nu \frac{v}{v \mp v_f}$$

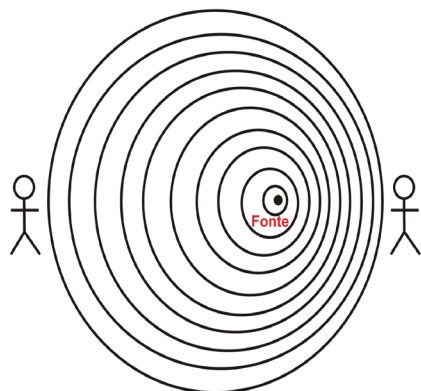
Agora o sinal negativo se refere ao caso em que a fonte se aproxima do observador e o sinal positivo à fonte se afastando do observador. A causa da variação da frequência é devida ao fato de que o movimento da fonte, através de um meio, faz diminuir ou aumentar o comprimento de onda transmitido através dele.

E se a fonte e o observador estiverem em movimento? Neste caso a equação é

$$\nu' = \nu \frac{v \pm v_0}{v \mp v_f}$$

onde os sinais superiores, positivo no numerador e negativo no denominador, correspondem à situação em que a fonte e o observador estão se aproximando. Os sinais inferiores, negativo no numerador e positivo no denominador, se referem à situação em que a fonte e o observador estão se afastando.

Chama-se a atenção para o fato de que todas as equações acima se referem à situação particular em que fonte e observador se deslocam ao longo de uma reta que os liga. Vale lembrar que a frequência emitida pela fonte depende apenas da própria fonte e não se altera com o movimento. Isso significa,



Como a fonte se aproxima do observador à direita, este intercepta um número maior de ondas por unidade de tempo. A frequência é maior, portanto o som fica mais agudo. Já o observador à esquerda, escuta um som mais grave, pois intercepta um número menor de ondas por unidade de tempo (frequência menor).

por exemplo, que o piloto do carro de Fórmula 1 escuta o barulho do motor sempre na mesma frequência, e não percebe a variação na frequência que os espectadores escutam.

Embora o efeito Doppler seja comum a qualquer tipo de onda, existem diferenças entre as equações do efeito Doppler para o som, mostradas acima, e aquelas para o caso da radiação eletromagnética. Isso ocorre porque a radiação eletromagnética não precisa de um meio material para se propagar e sua velocidade tem sempre o mesmo valor constante,  $c$ , tanto em relação à fonte como ao observador, como foi provado pela Teoria da Relatividade Especial criada por Henri Poincaré e Albert Einstein. Deste modo, só deve existir uma única equação (e não duas) para o deslocamento Doppler da radiação eletromagnética e esta equação é relativística.

Para a radiação eletromagnética o efeito Doppler é descrito pela equação

$$\nu' = \nu \sqrt{\frac{1 \mp \beta}{1 \pm \beta}}$$

onde:

$$\beta = \frac{V}{C}$$

C= Velocidade da onda eletromagnética.  
V= Velocidade relativa entre a fonte e o detector.

Os sinais negativos do numerador e positivo do denominador se referem à situação em que a fonte e o detector estão se afastando. O sinal positivo no numerador e negativo no denominador se referem à situação em que a fonte e o detector estão se aproximando.

## O QUE É O “REDSHIFT”?

A maior fonte de informação sobre os corpos celestes que a astronomia possui é a radiação eletromagnética que eles emitem ou refletem. É natural então que nos concentremos no “*redshift*” da radiação eletromagnética.

“*Redshift*” é uma palavra da língua inglesa que significa “deslocamento para o vermelho”. O “*redshift*” é um deslocamento produzido na frequência de uma onda eletromagnética na direção de frequências mais baixas ou, equivalentemente, comprimentos de onda maiores.

O “*redshift*” é definido como a variação no comprimento de onda da luz dividida pelo comprimento de onda desta mesma luz medido em repouso.

A expressão do “*redshift*” é:

$$z = \frac{\text{comprimento de onda observado} - \text{comprimento de onda emitido}}{\text{comprimento de onda emitido}}$$

ou seja,

$$z = \frac{\lambda_{\text{observado}} - \lambda_{\text{emitido}}}{\lambda_{\text{emitido}}}$$

Como o comprimento de onda é dado por

$$\lambda = \frac{c}{\nu}$$

podemos escrever o “*redshift*” como:

$z = (\text{frequência emitida} - \text{frequência observada}) / (\text{frequência observada})$   
ou seja,

$$z = \frac{\nu_{\text{emitida}} - \nu_{\text{observada}}}{\nu_{\text{observada}}}$$

Também podemos escrever estas equações como:

$z = (\text{comprimento de onda observado}) / (\text{comprimento de onda emitido}) - (\text{comprimento de onda emitido}) / (\text{comprimento de onda emitido}) = (\text{comprimento de onda observado}) / (\text{comprimento de onda emitido}) - 1$   
ou seja,

$$z = \frac{\lambda_{\text{observado}}}{\lambda_{\text{emitido}}} - \frac{\lambda_{\text{emitido}}}{\lambda_{\text{emitido}}} = \frac{\lambda_{\text{observado}}}{\lambda_{\text{emitido}}} - 1$$

Do mesmo modo, temos que

$z = (\text{frequência emitida}) / (\text{frequência observada}) - (\text{frequência observada}) / (\text{frequência observada}) = (\text{frequência emitida}) / (\text{frequência observada}) - 1$   
ou seja,

$$z = \frac{\nu_{\text{emitida}}}{\nu_{\text{observada}}} - \frac{\nu_{\text{observada}}}{\nu_{\text{observada}}} = \frac{\nu_{\text{emitida}}}{\nu_{\text{observada}}} - 1$$

Juntando tudo isso temos

$z = (\text{comprimento de onda observado}) / (\text{comprimento de onda emitido}) - 1 = (\text{frequência emitida}) / (\text{frequência observada}) - 1$   
ou seja,

$$z = \frac{\lambda_{\text{observado}}}{\lambda_{\text{emitido}}} - 1 = \frac{\nu_{\text{emitida}}}{\nu_{\text{observada}}} - 1$$



Em geral esta equação é colocada na forma:

$$1 + z = (\text{comprimento de onda observado}) / (\text{comprimento de onda emitido}) \\ = (\text{frequência emitida}) / (\text{frequência observada}) \\ \text{ou seja,}$$

$$1 + Z = \frac{\lambda_{\text{observado}}}{\lambda_{\text{emitido}}} = \frac{\nu_{\text{emitida}}}{\nu_{\text{observada}}}$$

## OS VÁRIOS TIPOS DE REDSHIFT

- **efeito Doppler**

Se uma fonte luminosa está se afastando de um observador dizemos que está ocorrendo um “*redshift*” ( $z > 0$ ).

Se uma fonte luminosa está se deslocando na direção do observador dizemos então que está ocorrendo um “*blueshift*” ( $z < 0$ ).

Isto é verdade para todos os tipos de ondas eletromagnéticas e é explicado pelo **efeito Doppler**. Consequentemente, este tipo de redshift também é chamado de “*redshift* Doppler”.

Se a fonte está se afastando do observador com uma velocidade  $v$ , então, ignorando os efeitos relativísticos, o redshift é dado por:

$$Z \approx \frac{v}{c}$$

onde  $c$  é a velocidade da luz.

Note, entretanto, que esta expressão é apenas aproximada e precisa ser modificada quando estamos tratando com velocidades próximas à velocidade da luz.

- **expansão do espaço-tempo**

Um efeito muito semelhante ao efeito Doppler é causado pela expansão do espaço-tempo prevista pelos modelos atuais da cosmologia física. Mais uma vez as propriedades da fonte não são modificadas, mas os comprimentos de onda da luz serão “esticados” à medida que o espaço-tempo através do qual ela está se deslocando se expande. Isso aumenta o comprimento de onda da luz.

Este tipo de redshift também é chamado de ***redshift* cosmológico** ou ***redshift* de Hubble**.

Podemos usar as seguintes equações neste caso:

$$1 + Z = \left(1 + \frac{v}{c}\right) \gamma$$

onde:

$$\gamma = \frac{1}{\sqrt{1 - \frac{V^2}{C^2}}}$$

- **gravitacional**

A teoria da Relatividade Geral mostra que quando a radiação eletromagnética se desloca através de fortes campos gravitacionais o seu comprimento de onda sofre ou um deslocamento para o vermelho (*redshift*) ou um deslocamento para o azul (*blueshift*). Isto é conhecido como **redshift gravitacional**.

Este efeito é muito pequeno, mas mensurável, na Terra usando o chamado efeito Mössbauer. Entretanto ele é bastante significativo próximo a um buraco negro e à medida que um objeto se aproxima do horizonte de eventos o redshift se torna infinito. Ele também é a causa principal das flutuações de temperatura em grande escala angular que observamos na radiação de fundo de microonda cósmica.

## OS MAIORES “REDSHIFTS” ATÉ AGORA DETECTADOS

O telescópio óptico-infravermelho japonês Subaru, com 8,2 metros de diâmetro do espelho principal, detectou a presença de uma galáxia afastada de nós 12,8 bilhões de anos-luz. Esta é a galáxia mais distante até agora detectada. Observando uma área do céu equivalente ao tamanho da Lua, este grupo de pesquisadores japoneses detectou mais de 50000 objetos, entre os quais estavam incluídas muitas galáxias extremamente fracas. Eles então selecionaram as galáxias preferencialmente brilhantes no vermelho, encontrando cerca de 70 possíveis objetos que poderiam ter redshifts de 6,6, o que equivale a uma distância de cerca de 13 bilhões de anos-luz.

Observações posteriores confirmaram que duas dessas galáxias candidatas tinham redshifts de 6,578 e 6,56. A primeira é a galáxia SDF132418 e a segunda é a galáxia HCM-6A. Estas medidas de redshift indicavam que a luz proveniente delas e que estava sendo registrada havia sido emitida quando o Universo tinha somente cerca de 900 milhões de anos de idade.

Uma outra detecção de grande redshift ocorreu no Very Large Telescope (VLT) do European Southern Observatory (ESO). No ano de 2004 um grupo de pesquisadores suíços e franceses encontrou uma galáxia à qual eles atribuíram o redshift 10,0. Esta galáxia estava localizada no aglomerado de galáxias Abell 1835 IR1916 e estava a cerca de 13,23 milhões de anos-luz de nós. Sua luz havia sido emitida quando o Universo tinha apenas 470 milhões de anos. A imagem ao lado mostra a detecção feita por estes astrônomos.

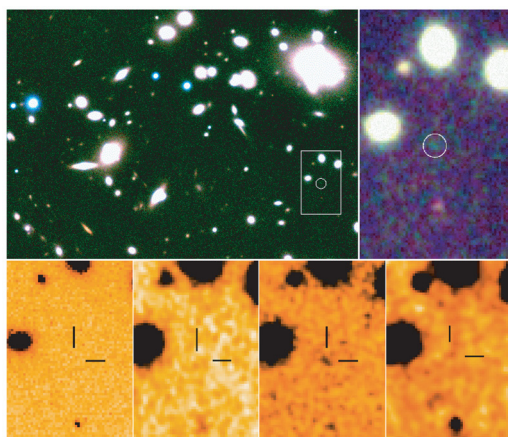
No entanto, levantamentos posteriores feitos por outros observatórios não conseguiram detectar este objeto. No momento não podemos afirmar se a determinação feita pelos astrônomos franceses e suíços é correta.

## A LEI DE HUBBLE

Quando Hubble combinou suas medições de distâncias de galáxias com as medições de redshifts associados com as galáxias que tinham sido obtidas por Vesto Slipher, ele verificou que havia uma aproximada relação de proporcionalidade entre as distâncias medidas e os correspondentes *redshifts*. Com



Telescópio Subaru, montado no Mauna Kea, Havai.



Abell 1835 IR1916 - the Farthest Galaxy - Seen in the Near-Infrared (VLT ANTU + ISAAC)

ESO PR Photo 05a/04 (1 March 2004)

© European Southern Observatory

Galáxia com *Redshift* 10,0 no aglomerado Abell 1835 IR1916.

apenas 46 galáxias estudadas, Hubble descobriu que a relação linear entre a velocidade de afastamento e a distância às galáxias podia ser escrita como:

$$V = \text{constante } D$$

onde  $v$  é a velocidade de afastamento da galáxia medida a partir do seu redshift e tipicamente expressa em km/s. A letra  $D$  é a distância que a radiação eletromagnética gerada pela galáxia viajou até chegar ao referencial inercial do observador. A distância  $D$  é medida em megaparsecs (Mpc).

Hoje escrevemos a expressão acima como

$$V = H_0 D$$

onde  $H_0$  é a chamada **constante de Hubble**. Na verdade a expressão mais geral deve ser escrita como

$$V = HD$$

onde  $H$  é o **parâmetro de Hubble** que é um valor **que varia com o tempo**. Consideramos que  $H_0$  é o valor de  $H$  no momento da observação.

## QUAL O VALOR DA CONSTANTE DE HUBBLE?

O valor da constante de Hubble foi (e é) um dos grandes problemas da cosmologia. Quando Hubble estabeleceu a expressão matemática que mostramos anteriormente, obteve para essa constante o valor aproximado de 440 km/s/Mpc. Durante a maior parte da segunda metade do século XX o valor da constante de Hubble  $H_0$  foi estimado entre 50 e 90 km/s/Mpc. O valor da constante de Hubble foi o assunto de uma longa e um tanto amarga controvérsia entre Gérard de Vaucouleurs, que dizia que o valor de  $H_0$  era 100 km/s/Mpc, e Allan Sandage, que afirmava este valor ser de 50 km/s/Mpc.

Em 1996 foi feito um debate sobre esta questão, sob a presidência de John Bahcall, no qual participaram os astrônomos Gustav Tammann e Sidney van den Bergh. Em maio de 2001 o “Hubble Key Project” divulgou que a estimativa final do valor da constante de Hubble  $H_0$  era de  $72 \pm 8$  km/s/Mpc.

Em 2003 o satélite artificial norte-americano Wilkinson Microwave Anisotropy Probe (WMAP), usando um método completamente independente, baseado na medição das anisotropias da radiação de fundo de microondas cósmicas, obteve que o valor da constante de Hubble era de  $70,1 \pm 1,3$  km/s/Mpc.

A importância da medição do valor correto da constante de Hubble é imensa. Veja a partir da equação que se conhecermos o valor atual de  $H_0$  e obtendo o valor de  $v$  a partir das medições de redshift, podemos saber, com muita facilidade, a que distâncias estão as galáxias!

## DEFINIÇÕES IMPORTANTES PARA A COSMOLOGIA

A partir da constante de Hubble os cosmólogos passaram a definir algumas unidades que se mostraram úteis na descrição do Universo. Elas são o **tempo de Hubble**, o **comprimento de Hubble** e o **volume de Hubble**. Veremos agora suas definições e, mais tarde, mostraremos sua aplicação à teoria.

### Tempo de Hubble

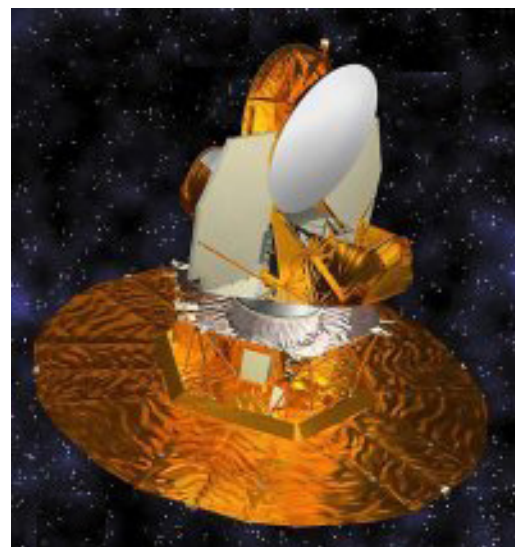
A constante de Hubble  $H_0$  tem as unidades de inverso do tempo. A partir disso, definimos um “tempo de Hubble” como sendo o inverso da constante de Hubble.

Magaparsec (Mpc) é uma unidade de medida astronômica para comprimento, sendo que 1 magaparsec equivale a 3 milhões de anos-luz.

Referencial inercial de um observador é aquele no qual o observador está em equilíbrio.

O observador em equilíbrio é aquele que não tem forças atuando sobre ele: ele está ou parado (em repouso) ou em movimento retilíneo uniforme. O observador em equilíbrio não está sofrendo qualquer forma de aceleração.

Atenção: a “constante” de Hubble na verdade não é uma constante e sim um parâmetro que varia com o tempo. No entanto ela é uma constante para cada instante de observação.



Satélite Wilkinson Microwave Anisotropy Probe (WMAP).

# 21

## Os aglomerados de galáxias

$$t_H = \frac{1}{H_0}$$

O valor do tempo de Hubble no modelo cosmológico padrão é de

$$t_H = 4,35 \times 10^{17} \text{ s} \sim 13,8 \text{ bilhões de anos}$$

### Comprimento de Hubble

O “comprimento de Hubble” é uma unidade de distância usada na cosmologia. Ela é definida como

$$d_H = \frac{c}{H_0} = c t_H$$

ou seja, a velocidade da luz  $c$  multiplicada pelo tempo de Hubble.

O comprimento de Hubble equivale a 4228 milhões de parsecs ou 13,8 bilhões de anos-luz. O leitor atento notou que os valores numéricos do “comprimento de Hubble”, em anos-luz, e do “tempo de Hubble”, em anos, são iguais (valor numérico igual a 13,8). Essa coincidência é feita por definição.

### OS AGLOMERADOS DE GALÁXIAS

Mostramos abaixo o resultado do levantamento feito pelo Center for Astrophysics (CfA) com um total de 30926 galáxias. Embora esse número possa parecer pequeno tendo em vista os bilhões de galáxias existentes no Universo, ele permite ter uma visão bem interessante de como as galáxias se distribuem ou seja, de como é o Universo em larga escala.

Essa primeira imagem nos mostra a distribuição dessas 30926 galáxias, que formam o catálogo do CfA, em um diagrama que usa as chamadas coordenadas galácticas.

As galáxias não estão espalhadas aleatoriamente no Universo. Em vez disso, estudos sobre a sua distribuição nos revelam que a maioria das galáxias está gravitacionalmente associada se reunindo em **aglomerados de galáxias**.

Os aglomerados de galáxias podem ser classificados de acordo com várias propriedades. Por exemplo:

- riqueza (número de membros)
- forma (regular (esférica, achatada) ou irregular)
- conteúdo de galáxias: rico em espirais, pobre em espirais, rico em elípticas

Os aglomerados podem conter um número bastante variado de galáxias. Em função disso, os astrônomos classificam os aglomerados de galáxias em:

- **aglomerados ricos**  
Os aglomerados ricos chegam a possuir milhares de galáxias. O aglomerado de galáxias mais rico que está mais próximo de nós é o aglomerado Virgo, situado a 60 milhões de anos-luz da nossa Galáxia. Ele contém cerca de 2500 galáxias, a maior parte delas elípticas.
- **aglomerados pobres**  
Os aglomerados pobres em geral possuem apenas 20 ou 30 galáxias. Por este motivo eles são também chamados de **grupos de galáxias**. Os



Exemplo do aglomerado Rico de galáxias.



Exemplo do aglomerado Pobre de galáxias.

grupos de galáxias são muito mais numerosos do que os aglomerados ricos.

O Grupo Local, o aglomerado de galáxias ao qual a nossa Galáxia pertence, é formado por cerca de 30 galáxias apenas.

Por outro lado, a forma global de um aglomerado está relacionada com os tipos de galáxias dominantes que ele contém. Os aglomerados regulares, ricos, são formados por uma maioria de galáxias elípticas e S0. Por exemplo, aproximadamente 80% das galáxias pertencentes ao aglomerado Coma são elípticas. Já os aglomerados irregulares, tais como o aglomerado Virgo e o aglomerado Hercules, possuem uma mistura mais equilibrada de tipos de galáxias.

Um outro ponto importante a destacar no estudo dos aglomerados de galáxias é que alguns aglomerados são intensos emissores de radiação rádio enquanto que outros emitem raios X.

## O GRUPO LOCAL DE GALÁXIAS

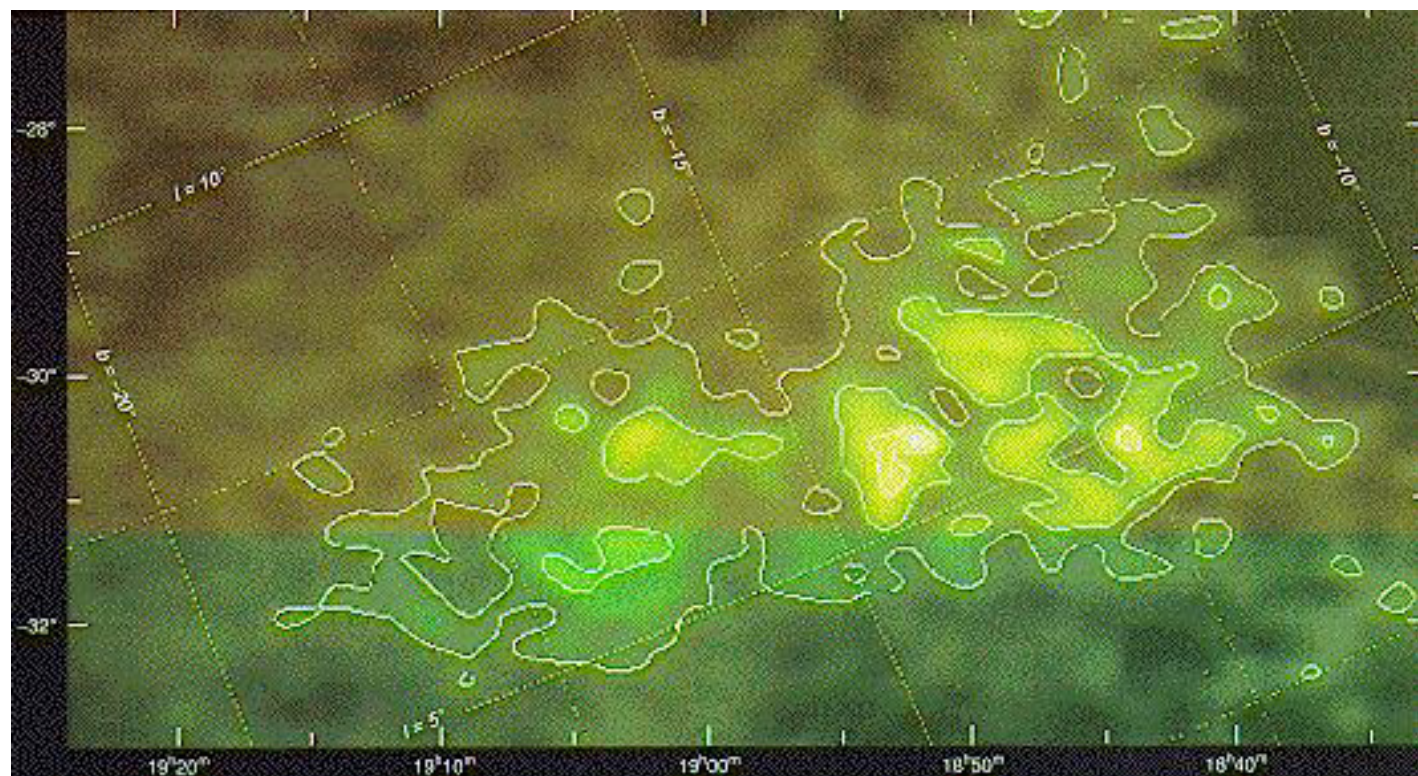
A nossa Galáxia faz parte de um aglomerado pobre, um pequeno grupo de galáxias que é chamado de **Grupo Local**.

O Grupo Local é dominado por duas galáxias espirais gigantes, a galáxia Andrômeda e a nossa própria Galáxia. A terceira maior galáxia do Grupo Local é a galáxia espiral Triangulum (M33).

Além da galáxia Messier 33, uma galáxia tipo Sc de massa intermediária, existem no Grupo Local mais 15 galáxias elípticas e 13 irregulares. A maioria das galáxias pertencentes ao Grupo Local são elípticas anãs.

As galáxias irregulares, Grande Nuvem de Magalhães e Pequena Nuvem de Magalhães, são satélites da nossa Galáxia. Do mesmo modo, as galáxias Messier 32 e NGC 205 são galáxias satélites da grande galáxia Andrômeda.

O Grupo Local tem um diâmetro de cerca de 3 milhões de anos-luz e sua massa total é de  $5 \times 10^{12} M_{\text{solares}}$ .



copyright: R. Ibata, M. Irwin, and G. Gilmore

A imagem acima mostra a galáxia SagDEG abreviação de **Sagittarius Dwarf Elliptical Galaxy** (SagDEG). A SagDEG está localizada a cerca de 80000



copyright: AURA

Aglomerado globular M54, na Galáxia SagDEG.

anos-luz da nossa Galáxia, na constelação Sagittarius, e foi descoberta somente em 1994 pelos astrônomos R. Ibata, M. Irwin, e G. Gilmore. Até outubro de 2005 ela era considerada a galáxia mais próxima de nós, tendo superado a Grande Nuvem de Magalhães que durante muitos anos foi considerada a galáxia mais próxima da nossa.

A galáxia SagDEG no momento está passando por um “encontro” com a nossa Galáxia, o que, provavelmente, irá perturbá-la e modificá-la. Esta galáxia possui um brilho superficial muito baixo e, por esta razão, ficou tanto tempo sem ser conhecida. No entanto, ela é muito grande, com cerca de 10000 anos-luz de comprimento. A galáxia SagDEG possui 4 aglomerados globulares, M54 (imagem à direita), Arp 2, Terzan 7 e Terzan 8, que provavelmente serão capturados pela nossa Galáxia, enriquecendo o “nosso” halo.

## AS GALÁXIAS PERTENCENTES AO GRUPO LOCAL

### AS GALÁXIAS DO GRUPO LOCAL

Galáxia	Ascensão Reta	Declinação	Distância (x 1000 anos-luz)
<b>WLM</b> (Wolf-Lundmark-Melotte)	00:02.0	-15:28	3400
<b>IC 10</b>	00:20.4	+59:18	4200
<b>Cet dw</b>	00:26.1	-11:02	2800
<b>NGC 147</b>	00:33.2	+48:31	2400
<b>And III</b>	00:35.4	+36:31	2900
<b>NGC 185</b>	00:39.0	+84:20	2300
<b>M110</b>	00:41.3	+41:41	2900
<b>And IV</b> (pode ser apenas um grande aglomerado globular na galáxia M31 e não uma galáxia. Pode também ser uma galáxia muito mais longínqua e não pertencente ao Grupo Local)	00:42.5	+40:34	2900
<b>M 32</b>	00:42.7	+40:52	
<b>M 31</b>	00:42.7	+41:16	2900
<b>And I</b>	00:45.7	+38:00	2900
<b>SMC</b>	00:51.7	-73:14	210
<b>Scl dw</b>	01:00.0	-33:42	300
<b>LGS 3</b> (Local Group Suspected 3)	01:03.8	+21:53	3000
<b>IC 1613</b>	01:05.1	+02:08	2900
<b>And V</b>	01:10.3		2900
<b>And II</b>	01:16.4	+33:27	2900
<b>M 33</b>	01:33.9	+30:39	3000
<b>Phe dw</b>	01:51.1	-44:27	1600
<b>For dw</b>	02:39.9	-34:32	500
<b>UGCA 86</b> (pode não ser membro do Grupo Local)	03:59.9	+67:08	6200

UGCA 92	04:27.4	+63:30	4700
LMC	05:19.7	-68:57	179
Car dw	06:14.6	-50:58	360
Leo A (pode não ser membro do Grupo Local)	09:59.4	+30:45	2500
Sex B	10:00.0	+05:20	4700
NGC 3109	10:03.1	-26:09	4500
Ant dw	10:04.1	-27:20	4600
Leo I	10:08.5	+12:18	900
Sex A	10:11.1	-04:43	5200
Sex dw	10:13.2	-01:37	320
Leo II	11:13.5	+22:10	
GR 8 (pode não ser membro do Grupo Local)	12:58.7	+14:13	7900
UMi dw	15:08.8	+67:12	240
Dra dw	17:20.1	+57:55	280
Galáxia (nossa Galáxia)	17:45.6	-28:56	28
SagDEG (Sagittarius Dwarf Elliptical Galaxy)	18:55	-30:30	80
SagDIG (Sagittarius Dwarf Irregular Galaxy)	19:30.1	-17:42	4200
NGC 6822	19:44.9	-14:49	1800
Aqr dw	20:46.8	-12:51	3400
IC 5152 (pode não ser membro do Grupo Local)	22:06.1	-51:17	5800
Tuc dw	22:41.7	-64:25	3200
UKS2323-326	23:26.5	-32:23	4700
And VII	23:27.8	+50:35	3000
And VI	23:51.7	+24:36	2800

## OUTROS GRUPOS DE GALÁXIAS

### O Grupo Compacto Hickson 87

O Grupo Compacto Hickson 87 (Hickson Compact Group 87 - HCG 87) é um conjunto de quatro galáxias localizado na constelação Capricornus a uma distância de cerca de 400 milhões de anos-luz de nós. Este grupo de galáxias tem um diâmetro de 52 kpc, o que corresponde a cerca de 170000 anos-luz.

A imagem ao lado foi obtida pelos astrônomos Sally Hunsberger (Lowell Observatory, Flagstaff, Arizona) e Jane Charlton (Pennsylvania State University) usando a Wide Field and Planetary Camera 2 do Hubble Space Telescope. Ela nos mostra os complexos detalhes que existem nas camadas de poeira do maior objeto do grupo, a galáxia HCG 87a. Esta galáxia tem a forma de um disco mas está tão inclinada em relação a nós que a vemos quase de perfil.

Grupo compacto de Hicksen 87, ou HCG 87.



Tanto a galáxia 87a como sua vizinha de forma elíptica, a galáxia 87b, têm “núcleos galácticos ativos” (AGN), onde buracos negros supermassivos engolem o gás que está na sua vizinhança. Uma fraca “ponte” de estrelas e gás, produzida por efeito de maré, pode ser vista se estendendo da galáxia 87a, vista de borda, às galáxias elípticas.

O terceiro membro do grupo, a galáxia espiral 87c, pode ser uma “galáxia starburst”, um tipo de galáxia que está passando por um violento processo de formação de estrelas.

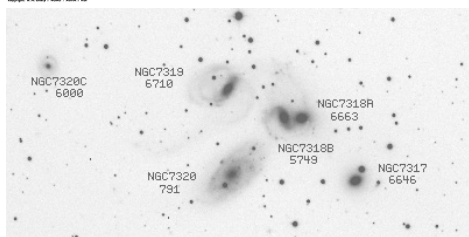
Estas três galáxias estão tão próximas umas das outras que a interação gravitacional entre elas modifica suas estruturas e altera seus processos de evolução.

O quarto elemento deste grupo deve ser a pequena galáxia espiral que está localizada próxima ao centro do grupo. No entanto, alguns astrônomos acreditam que ela é um objeto situado muito mais distante que as outras e não está relacionada com este grupo.

### O QUINTETO DE STEPHAN

O “Quinteto de Stephan”, é um grupo de cinco galáxias localizado na constelação Pegasus. É formado pelas galáxias NGC 7317, NGC 7318A, NGC 7318B, NGC 7319 e NGC 7329. Este grupo apresenta uma característica especial; quatro de suas galáxias apresentam grandes deslocamentos similares em direção ao vermelho nas linhas espectrais, enquanto que a galáxia NGC 7320, que aparenta ser membro do grupo, mostra um deslocamento para o vermelho muito menor. Alguns astrônomos acreditam que a galáxia NGC 7320 não pertença ao “Quinteto de Stephan” e seja membro de um outro grupo, o grupo NGC 7331.

Esta imagem mostra os deslocamentos para o vermelho das galáxias do “Quinteto de Stephan”. Nota-se que há uma sexta galáxia na figura, NGC 7320C, que embora apresente um deslocamento para o vermelho alto, semelhante ao das quatro outras galáxias do quinteto, não pertence a este grupo.

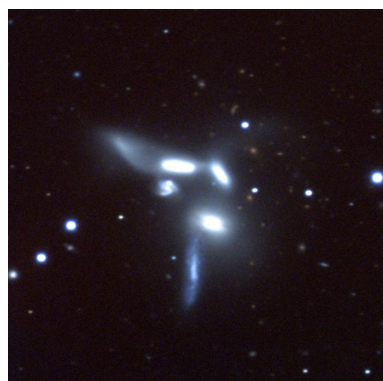


copyright: N. A. Sharp / NOAO / AURA / NSF

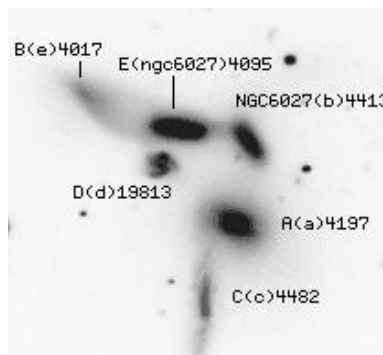
### O SEXTETO DE SEYFERT

A imagem abaixo mostra o “Sexteto de Seyfert”, como o nome diz, um grupo de 6 galáxias localizadas na constelação Serpens. Este grupo se caracteriza por possuir uma galáxia que apresenta um deslocamento para o vermelho completamente diferente das outras cinco. Enquanto que cinco de suas galáxias apresentam deslocamentos para o vermelho bastante similares, entre 4000 e 4500 quilômetros por segundo, a sexta galáxia tem um deslocamento para o vermelho de cerca de 20000 quilômetros por segundo. Alguns astrônomos acreditam que esta galáxia não pertence ao grupo, sendo um objeto muito mais distante do que as outras cinco.

Esta imagem identifica as galáxias do “Sexteto de Seyfert”. O número escrito na imagem é o deslocamento para o vermelho, em quilômetros por segundo, de cada objeto. Pode-se identificar a galáxia anômala graças ao seu deslocamento para o vermelho de 19813 quilômetros por segundo.



copyright: REU program / N. A. Sharp / NOAO / AURA / NSF





## ALGUMAS GALÁXIAS INTERESSANTES

### O AGLOMERADO VIRGO

O Aglomerado de Virgo está afastado cerca de 60 milhões de anos-luz de nós e é o aglomerado rico mais próximo do Grupo Local. Isto o coloca como sendo o aglomerado de galáxias irregular mais próximo da nossa Galáxia. O aglomerado Virgo é muito rico, possuindo mais de 2500 galáxias. Esta é a região das galáxias M84/M86 pertencentes ao aglomerado Virgo. A imagem superior, obtida com o Mayall Telescope de 4 metros do Kitt Peak National Observatory, nos Estados Unidos, nos mostra que entre as brilhantes galáxias M 86 (próxima ao centro) e M 84 (na direita) existem muitas outras galáxias, elípticas ou lenticulares, mais fracas.

A imagem inferior, que mostra a região das galáxias M84/M86 no aglomerado Virgo foi obtida com o UK Schmidt Telescope do Anglo-Australian Observatory. Ela nos revela que as galáxias deste enorme aglomerado de galáxias são muito maiores e estão mais densamente agrupadas. Nota-se que os envoltórios mais externos, e bastante fracos, das galáxias M84 e M86 se aproximam bastante. Veja também que alguns detalhes da estrutura das galáxias mais fracas podem ser observados.



M84 and M86 © Royal Observatory Edinburgh/Anglo-Australian Observatory  
Photo from UK Schmidt plates by David Malin

### O AGLOMERADO ABELL 2218

Esta é a imagem do aglomerado de galáxias Abell 2218, obtida por Andrew Fruchter e seus colaboradores do Space Telescope Science Institute (STScI), usando a Wide Field and Planetary Camera 2 do Hubble Space Telescope. Quase todos os objetos brilhantes que vemos nela são galáxias deste aglomerado. O aglomerado Abell 2218, situado a cerca de três bilhões de anos-luz de nós na constelação Draco do hemisfério norte, é muito compacto e possui uma massa muito grande. Como consequência, sua gravidade curva e focaliza a luz proveniente de galáxias que estão situadas atrás dele. Estas galáxias aparecem na imagem como arcos alongados e fracos. Este é o processo conhecido como lente gravitacional. Um exemplo simples de um efeito análogo ao processo de lente gravitacional pode ser obtido olhando-se lâmpadas distantes na rua através do vidro de um copo de vinho.



copyright: Andrew Fruchter (STScI) et al., WFPC2, HST, NASA

## ALGUMAS GALÁXIAS INTERESSANTES

### O AGLOMERADO CENTAURUS

Este é o aglomerado Centaurus, visível no hemisfério sul. Ele está localizado na constelação Centaurus.



### O AGLOMERADO COMA

Localizado na constelação Coma Berenices, este aglomerado contém mais de 1000 galáxias. A maioria de suas galáxias é do tipo elíptica (E) ou então lenticulares (SO).



copyright: Omar Lopez-Cruz / Ian Shelton / NOAO / AURA / NSF

### O AGLOMERADO HYDRA

Este é o distante aglomerado de galáxias que observamos na constelação Hydra.



## SUPERAGLOMERADOS DE GALÁXIAS

O processo de aglomeração de galáxias possui estruturas ainda maiores do que a dos grupos e aglomerados. Em várias regiões do Universo alguns aglomerados interagem formando estruturas imensas que são os **superaglomerados de galáxias**.

O nosso Grupo Local é um membro externo distante de um superaglomerado de galáxias do qual o aglomerado Virgo é o membro dominante.

A enorme massa do aglomerado Virgo age gravitacionalmente sobre as galáxias e os grupos de galáxias que estão à sua volta. Existem evidências de que o aglomerado Virgo está acelerando o Grupo Local na sua direção. Deste modo, o Grupo Local deverá, algum dia, se fundir com este enorme aglomerado de galáxias formando o Superaglomerado Local ou Superaglomerado Virgo.

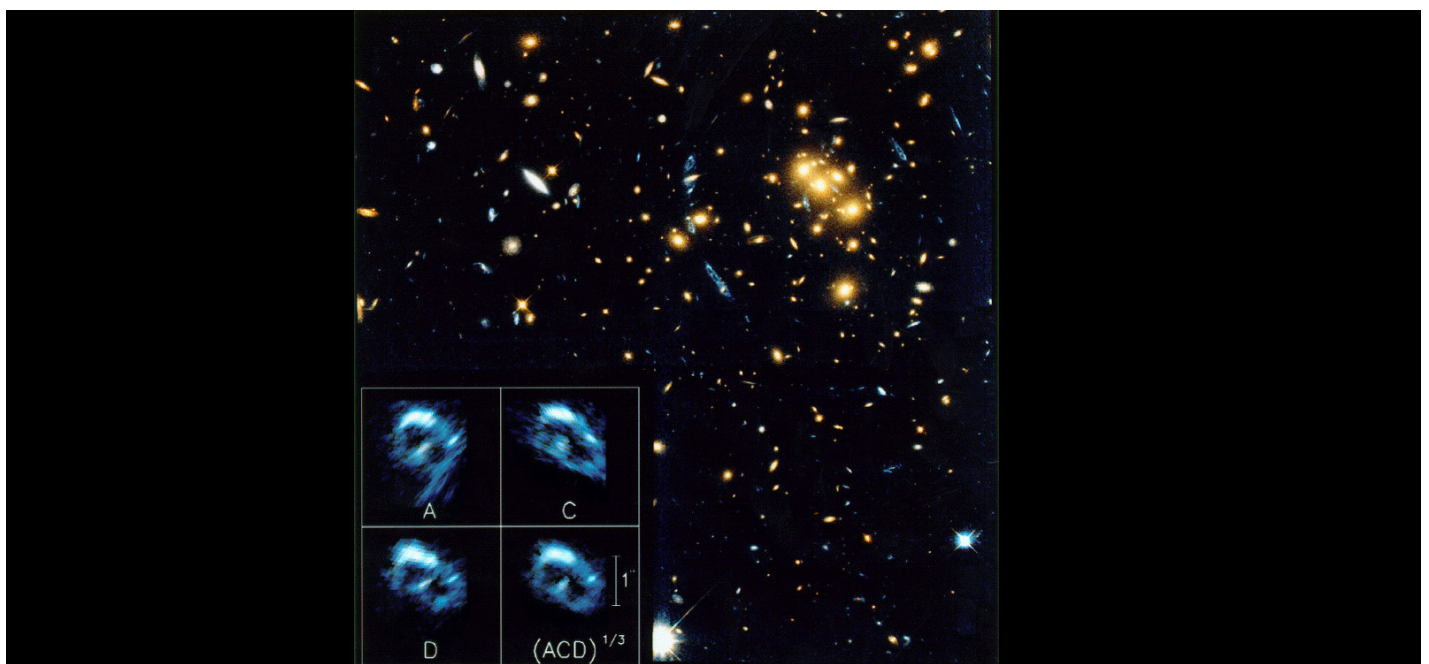
## OLHANDO PARA TRÁS NO TEMPO

A estrutura do Universo é bastante complicada. Com a entrada em funcionamento de poderosos telescópios, tais como o Hubble Space Telescope, o W. M. Keck Telescope, o VLT, etc. tivemos, pela primeira vez, a oportunidade de detectar e observar aglomerados de galáxias situados a distâncias inacreditáveis de nós. Estes aglomerados foram formados no Universo primordial e obter suas imagens é o mesmo que olhar para trás no tempo.

A imagem abaixo, obtida por Wesley N. Colley, J. Anthony Tyson e Edwin L. Turner, usando o Hubble Space Telescope, nos mostra um destes aglomerados distantes. O aglomerado CL 0024+1654 é um grande aglomerado de galáxias localizado a cinco bilhões de anos-luz da Terra. Ele se destaca pela sua riqueza, um grande número de galáxias em interação, e também por mostrar uma magnífica **lente gravitacional**. As linhas azuis situadas na parte da frente da figura são imagens de uma galáxia espiral que está localizada atrás do aglomerado CL 0024+1654. Estas imagens da galáxia espiral, as linhas azuis, estão sendo produzidas pelo processo de lente gravitacional.

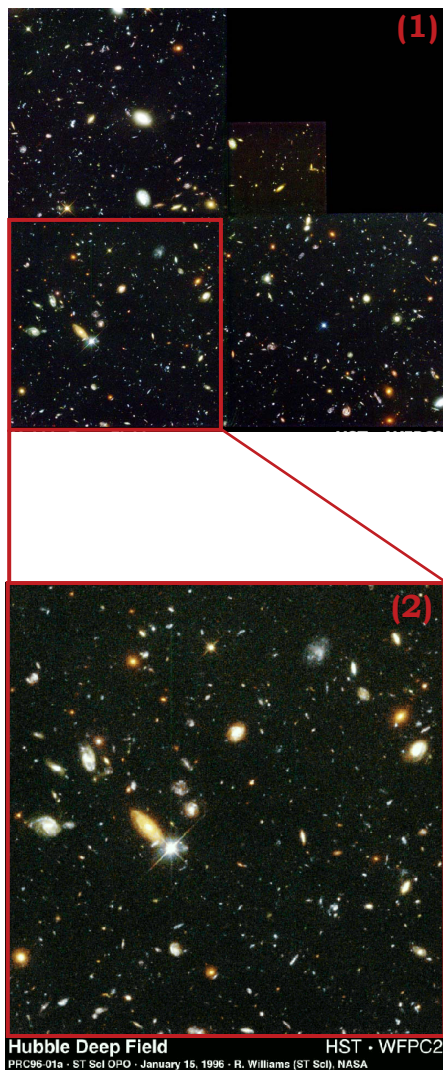
Hoje sabemos que, há bilhões de anos, quando o Universo começou a construir suas estruturas em larga escala, os aglomerados de galáxias continham muito mais galáxias espirais do que eles têm hoje. Isto pode ser explicado considerando-se que estes aglomerados foram, ao longo deste tempo imenso, certamente perturbados por colisões e “fusões” que, inevitavelmente, ocorreram no seu interior.

O aglomerado CL0024+1654, localizado a 5 bilhões de anos-luz da Terra.



# 22

## Vendo o Universo muito distante



Composição de imagens (1) obtidas pelo HST na constelação Ursa Maior. A Imagem (2) mostra em detalhe a riqueza do Universo local.

## VENDO O UNIVERSO MUITO DISTANTE

O conhecimento das propriedades das galáxias é parte da chamada **astronomia extragaláctica**. Esta parte da astrofísica procura analisar tanto as propriedades locais das galáxias como também suas interações. No entanto, o estudo da cosmologia é muito mais abrangente. A cosmologia pretende descrever não os fenômenos locais que ocorrem no universo mas sim o próprio universo.

Para estudar cosmologia precisamos conhecer não apenas o tipo de matéria existente no Universo mas também de que modo ela se distribui.

Com o desenvolvimento das observações astronômicas passamos a conhecer muito mais o universo, sempre a distâncias cada vez maiores. Hoje instrumentos como o Hubble Space Telescope (HST) e os grandes observatórios terrestres tais como o Keck Observatory, o European Southern Observatory (com o famoso Very Large Telescope) e o Gemini Observatory nos revelam galáxias e quasares assombrosamente distantes do nosso planeta.

Importantes trabalhos sobre a estrutura em larga escala do Universo foram feitos nos últimos anos. O Hubble Space Telescope foi utilizado para obter imagens de galáxias e quasares situados a distâncias impressionantes. Esses dois projetos, chamados de “Hubble Deep Field North” e “Hubble Deep Field South” nos revelaram um Universo até então desconhecido.

Durante 10 dias consecutivos, entre 18 e 28 de dezembro de 1995 o Hubble Space Telescope foi apontado para uma região do céu que, mesmo observada pelos grandes telescópios da época, parecia estar livre de qualquer objeto. Esta pequena área, com apenas 144 segundos de arco de diâmetro (o que equivale ao tamanho angular de uma bola de tênis vista a uma distância de 100 metros), estava localizada na constelação Ursa Major. A imagem final consistiu da reunião de 342 exposições isoladas da região feitas com a poderosa Wide Field and Planetary Camera 2 do Hubble Space Telescope. Praticamente todos os objetos mostrados na imagem, cerca de 3000, são galáxias muito distantes.

A imagem 1 do Hubble Deep Field North está mostrada ao lado e deve ser observada com atenção. Uma região do Universo que parecia estar desprovida de estrelas ou galáxias apresentou a riqueza incomum em termos de galáxias e quasares mostrada na imagem. Isso apenas nos provava que ainda conhecíamos muito pouco do conteúdo de matéria do Universo.

Poderíamos argumentar que o HST, casualmente, teria observado uma região atípica do céu. Ao fazer o mesmo tipo de observação prolongada no céu do hemisfério sul, também em uma região onde parecia não haver objetos observáveis, o HST registrou outra vez a riqueza do universo que ainda era desconhecida (imagem 2).

Desta vez o Hubble Space Telescope observou uma pequena região na constelação Tucana durante 10 dias, em setembro e outubro de 1998.

O Hubble Space Telescope não foi o único a obter imagens de campo profundo do Universo. Seguindo esta abordagem o National Optical Astronomy Observatory (NOAO) também fez uma imagem deste tipo fotografando uma pequenina região do céu localizada na constelação Boötes. A imagem a seguir mostra uma parte deste campo onde estão registradas mais de 300000 estrelas e galáxias. Este número é bem maior do que aquele registrado pelo Hubble Space Telescope por que o levantamento do NOAO foi de um campo amplo (wide field), bem maior do que o registrado pelo telescópio orbital. Na verdade, o levantamento total do NOAO inclui mais de cinco milhões de galáxias!

A procura pelos limites do Universo visível ainda continuava. Acumulando dados ao longo do período de 3 de setembro de 2003 a 16 de janeiro de 2004, o Hubble Space Telescope conseguiu a mais profunda imagem do Universo obtida até hoje na região do visível do espectro eletromagnético. Este é o chamado "Hubble Ultra Deep Field" (HUDF), imagem de uma pequena região do espaço que mostra como o Universo era há cerca de 13 bilhões de anos (Imagem abaixo). Esta região está localizada a sudoeste de Orion, na constelação Fornax. Ela tem apenas 3 minutos de arco quadrados, menor do que um grão de areia mantido à distância do comprimento de um braço!

Estima-se que existam cerca de 10000 galáxias nesta imagem cuja área é de apenas 1/10 do diâmetro da Lua Cheia vista da Terra. Esta impressionante imagem é o resultado de uma coleção de 800 exposições feitas pelo Hubble Space Telescope ao longo de 400 voltas em torno do nosso planeta.



Imagem de uma pequena região do céu na constelação BOÖTES.

Imagem de 3 minutos de arco quadrados, a sudoeste de Orion, obtida pelo "Hubble Ultra Deep Field" (HUDF).



# 23

## Superaglomerados de galáxias

### SUPERAGLOMERADOS DE GALÁXIAS

As observações dos objetos existentes no Universo mostraram aos astrônomos que existe uma estrutura hierárquica no Universo. Como já vimos, as estrelas estão reunidas em aglomerados estelares e em estruturas maiores que chamamos de galáxias. Por sua vez as galáxias interagem gravitacionalmente formando grupos e aglomerados de galáxias. Estudos mais detalhados do universo mostraram que os próprios aglomerados de galáxias também interagem formando os chamados **superaglomerados de galáxias**.

Os superaglomerados de galáxias são estruturas imensas em que os elementos participantes são os aglomerados de galáxias. Os superaglomerados de galáxias são separados no espaço por regiões “vazias”, chamadas em inglês de “*voids*”.

Mas porque estruturas tão gigantescas como os superaglomerados de galáxias não foram logo descobertas? Nota-se que acima demos as três dimensões da Grande Parede. Para “ver” uma estrutura tridimensional no universo é necessário localizar a posição das galáxias em três dimensões e isso envolve o conhecimento não só da localização da galáxia pelas suas coordenadas mas a combinação dessas informações com a distância, que é obtida a partir do conhecimento do seu *redshift*.

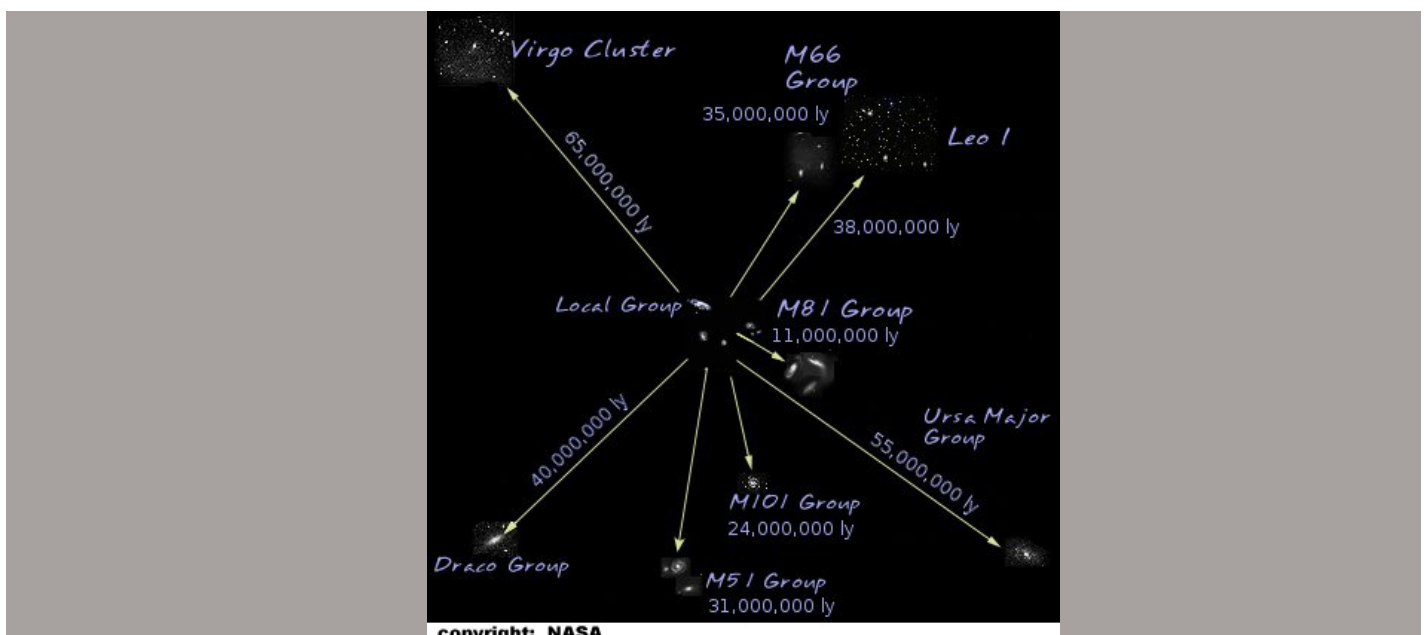
### O Superaglomerado de Virgo ou Superaglomerado Local

Como já vimos, a nossa Galáxia faz parte de um grupo de galáxias chamado Grupo Local. Esse Grupo Local, por sua vez, faz parte de uma estrutura ainda maior que é o superaglomerado de galáxias conhecido como Superaglomerado Local ou Superaglomerado de Virgo.

O diâmetro do Superaglomerado Local é de cerca de 200 milhões de anos-luz. Ele contém cerca de 100 grupos e aglomerados de galáxias mas é dominado pelo poderoso aglomerado de Virgo que se localiza próximo a seu centro. A partir de análises do efeito gravitacional sobre o movimento das galáxias, os astrônomos estimam que a massa total do Superaglomerado Virgo é cerca de  $10^{15}$  massas solares ou seja,  $2 \times 10^{46}$  quilogramas.

O Grupo Local, do qual a nossa Galáxia faz parte, está localizado próximo à borda do Superaglomerado Local. No entanto, devido à intensa força gravitacional exercida pelo aglomerado de Virgo, o Grupo Local está sendo lentamente arrastado na direção deste grande aglomerado de galáxias.

Diagrama que representa o Superaglomerado de Virgo ou Superaglomerado local.



## Superaglomerado Coma

Localizado a cerca de 300 milhões de anos-luz da Terra, o Superaglomerado Coma (Figura A) é o superaglomerado massivo de galáxias mais próximo ao Superaglomerado Virgo, do qual fazemos parte. Ele está situado na constelação Coma Berenices e foi um dos primeiros superaglomerados descoberto pelos astrônomos.

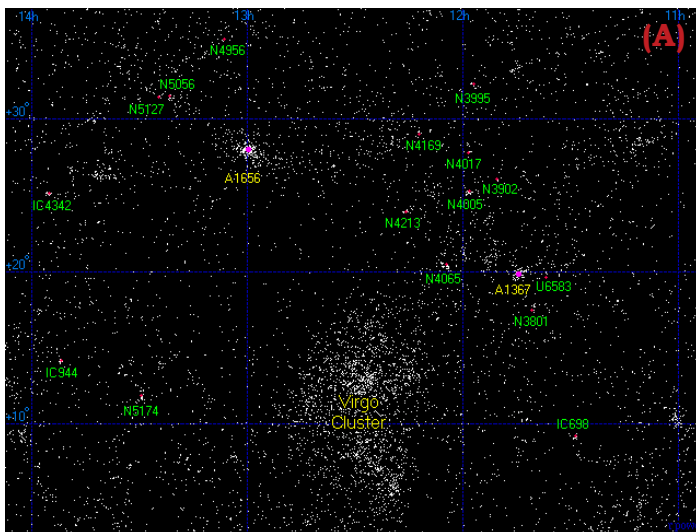
O Superaglomerado Coma inclui o aglomerado de galáxias Coma (Abell 1656) e o aglomerado de galáxias Leo (Abell 1367) e possui mais de 3000 galáxias distribuídas de forma aproximadamente esférica em um diâmetro de cerca de 20 milhões de anos-luz.

Curiosamente, o Superaglomerado de galáxias Coma está localizado no centro da chamada “Grande Parede”, que veremos mais tarde.

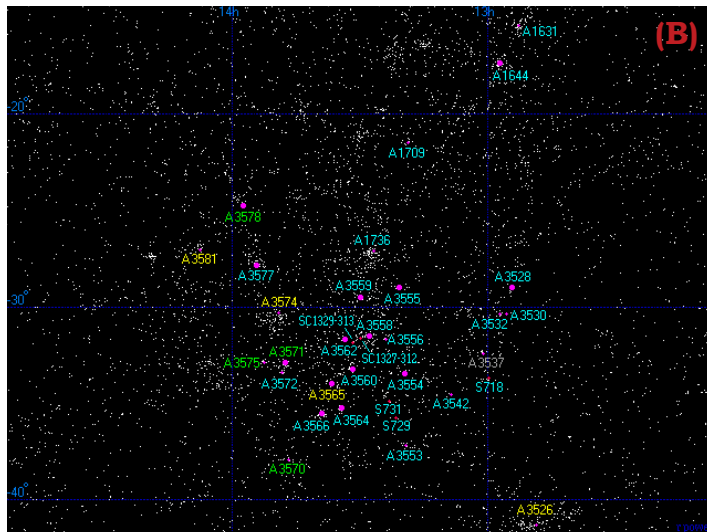
## Superaglomerado Shapley

Esta é a maior concentração de galáxias na nossa vizinhança no Universo (figura B) . Está situada na constelação Centaurus a cerca de 650 milhões de anos-luz da nossa Galáxia.

(A) Configuração do Superaglomerado de Coma.  
(B) Representação do Superaglomerado Shapley.



copyright: The Atlas of The Universe - Richard Powell



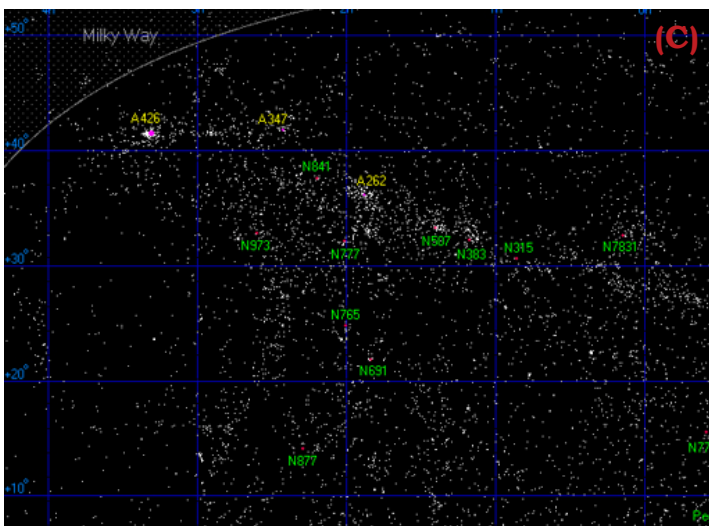
copyright: The Atlas of The Universe - Richard Powell

## Superaglomerado Perseus-Pisces

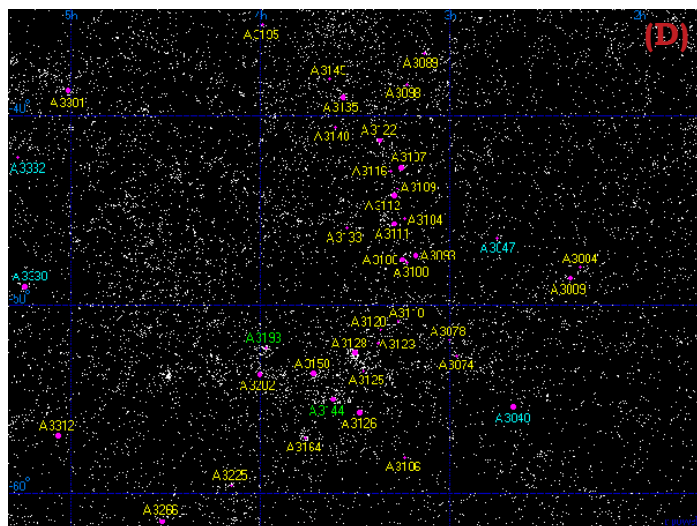
Essa é uma das maiores estruturas conhecidas no Universo (Figura C). Situado a uma distância de 250 milhões de anos-luz de nós, essa cadeia de galáxias se estende por mais de 40° no céu.

Os principais aglomerados do Superaglomerado Perseus-Pisces são conhecidos como Abell 262, Abell 347 e Abell 426.

(C) Distribuição do Superaglomerado de Perseus-Pisces. (D) Representação do Superaglomerado Horologium.



copyright: The Atlas of The Universe - Richard Powell



copyright: The Atlas of The Universe - Richard Powell

## Superaglomerado Horologium

Esse superaglomerado, que também é conhecido como Superaglomerado Horologium-Reticulum, é formado por cerca de 5000 grupos de galáxias, das quais 30000 são galáxias gigantes e 300000 são galáxias anãs (Figura D). Por essa razão ele é considerado como um dos mais massivos superaglomerados conhecidos, com uma massa total de cerca de  $10^{17}$  massas solares.

A parte mais próxima desse superaglomerado está a uma distância de 700 milhões de anos-luz da Terra e é formada pelos aglomerados vistos próximos à parte de baixo (Figura D). Seu limite mais distante está a cerca de 1,2 bilhões de anos-luz de nós e é formado pelos aglomerados localizados na parte superior da figura. Esse superaglomerado tem cerca de 550 milhões de anos-luz de diâmetro. Entre seus aglomerados temos o Abell 3266.

## Superaglomerado Hydra-Centaurus

Esse é um superaglomerado que se divide em duas partes, uma delas situada na constelação Centaurus e a outra na constelação Hydra. Por esse motivo algumas vezes, em vez de superaglomerado Hydra-Centaurus ele é subdividido e chamado de superaglomerado Hydra e superaglomerado Centaurus.

O superaglomerado Hydra-Centaurus é o mais próximo vizinho ao superaglomerado Virgo, onde se encontra a nossa Galáxia (Figura E).

Na parte desse superaglomerado, que se encontra na constelação Centaurus, existem quatro grandes aglomerados de galáxias: o aglomerado de galáxias Centaurus (A3526), A3565, A3574 e A3581. Também fazem parte do superaglomerado Hydra-Centaurus o aglomerado de galáxias Hydra (A1060), que se localiza próximo a nós, e o aglomerado de galáxias Norma (A3627). Muitos outros aglomerados de galáxias pequenos também pertencem a esse superaglomerado.

Os aglomerados centrais do superaglomerado de galáxias Hydra-Centaurus estão a distâncias entre 150 e 200 milhões de anos-luz da Terra.

## Superaglomerado Pavus-Indus

Vizinho ao Superaglomerado Local (que contém o Grupo Local, ao qual a nossa Galáxia pertence), encontramos o Superaglomerado Pavo-Indus.

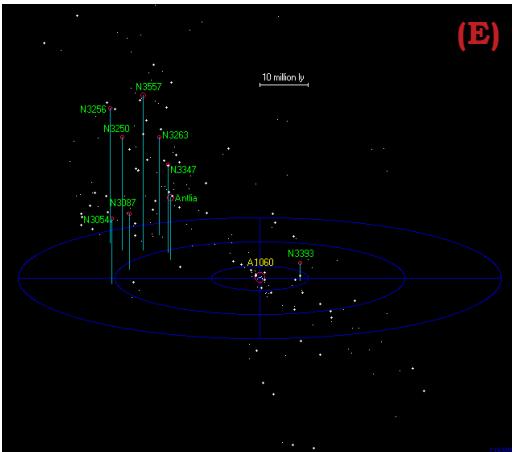
Esse superaglomerado contém quatro aglomerados principais de galáxias, Abell 3656, Abell 3698, Abell 3742 e Abell 3747.

## “O Grande Atrator”

Em 1973 astrônomos notaram que havia uma região no céu que mostrava desvios de uma expansão uniforme do Universo. Isso foi confirmado em 1978 e logo os astrônomos chamaram essa região de “O Grande Atrator” (Figura o lado).

O “Grande Atrator” hoje é entendido como sendo uma anomalia gravitacional existente no espaço intergaláctico que se encontra na região do Superaglomerado de galáxias Centaurus. O “Grande Atrator” revela que, nesse local existe uma grande concentração de massa, equivalente a dezenas de milhares de vezes a massa da nossa Galáxia! O “Grande Atrator” é observado devido ao efeito que ele causa no movimento das galáxias e nos aglomerados de galáxias aos quais elas fazem parte. Essa interação gravitacional ocorre ao longo de uma região de centenas de milhões de anos-luz de distância!

Tem sido difícil estudar detalhes do “Grande Atrator” devido à obstrução causada pela matéria escura que existe no plano da nossa Galáxia. Mesmo assim, os astrônomos conseguiram, em 1986, determinar que o “Grande Atrator”, inicialmente considerado estar a uma distância de cerca de 150 milhões de anos-luz da nossa Galáxia, na verdade está localizado a uma distância de cerca de 250 milhões de anos-luz de nós.



(E) Distribuição do Superaglomerado Hydra-Centaurus.

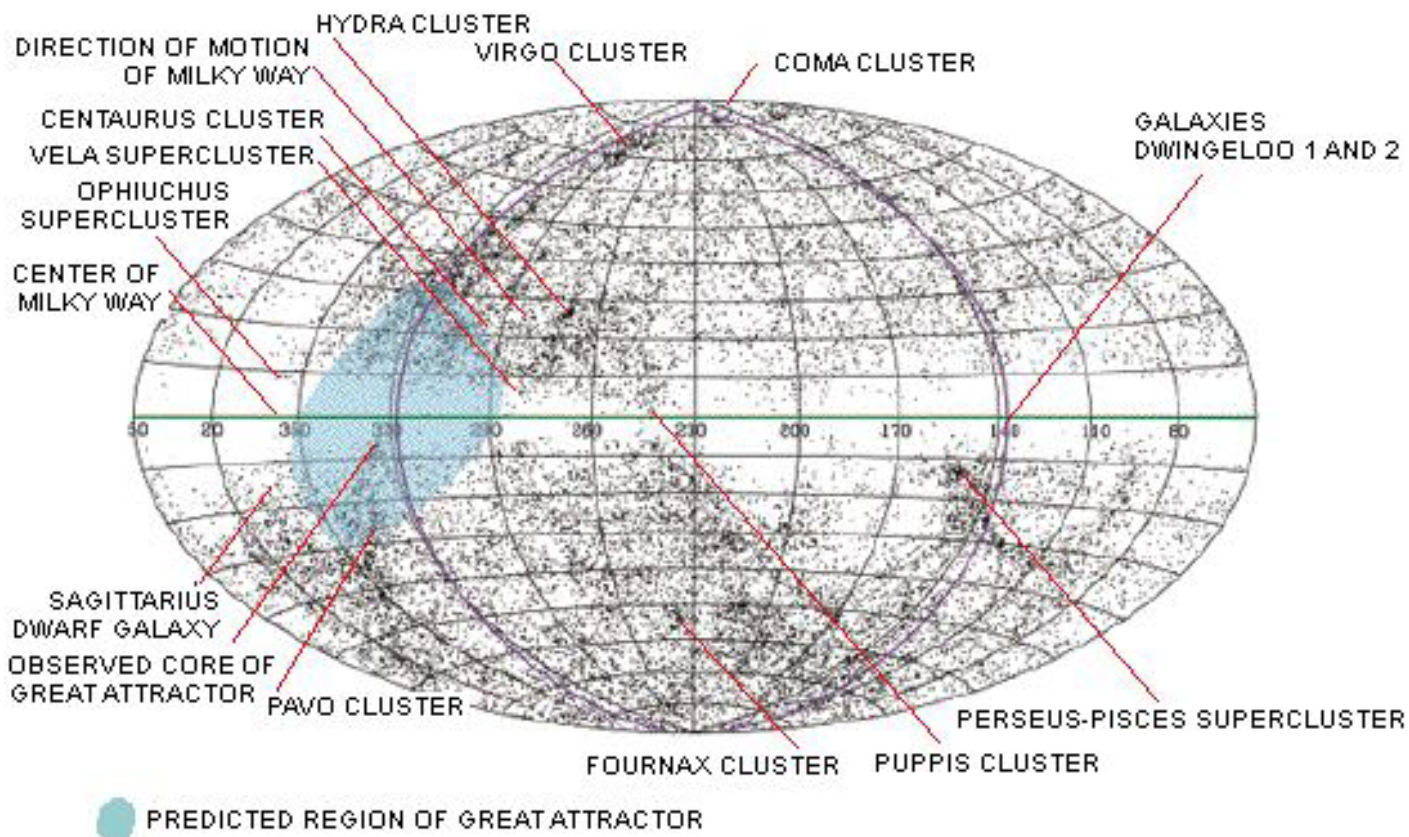


Imagem do Superaglomerado Pavus-Indus.

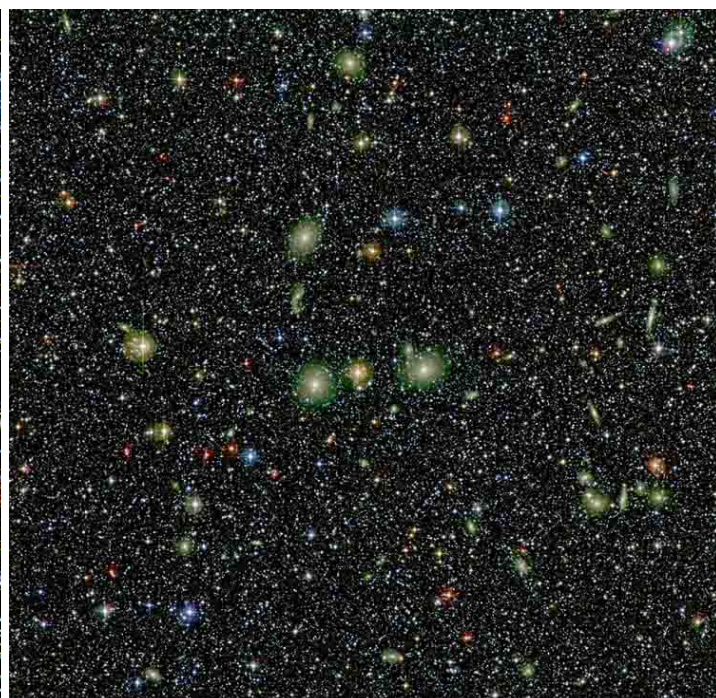
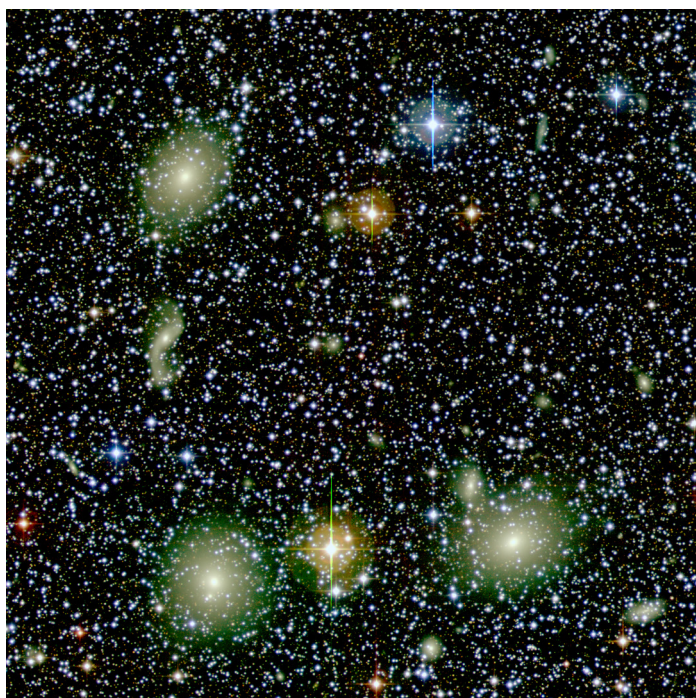


Ele se situa na direção das constelações Hydra e Centaurus, região do espaço que é dominada pelo aglomerado de galáxias Norma (ACO 3627) (Ver figuras abaixo). Esse aglomerado de galáxias é bastante massivo e a maior parte de sua matéria visível é formada por galáxias grandes e velhas. Muitas das galáxias que pertencem ao aglomerado Norma estão sofrendo processos de colisão entre elas e muitas emitem grandes quantidades de ondas radio.

Visão da distribuição espacial do "Grande Atrator".



Detalhes do "Grande Atrator".



View towards the Great Attractor (Detail)

(MPG/ESO 2.2-m + WFI)

ESO PR Photo 46d/99 (21 December 1999)

© European Southern Observatory



View towards the Great Attractor

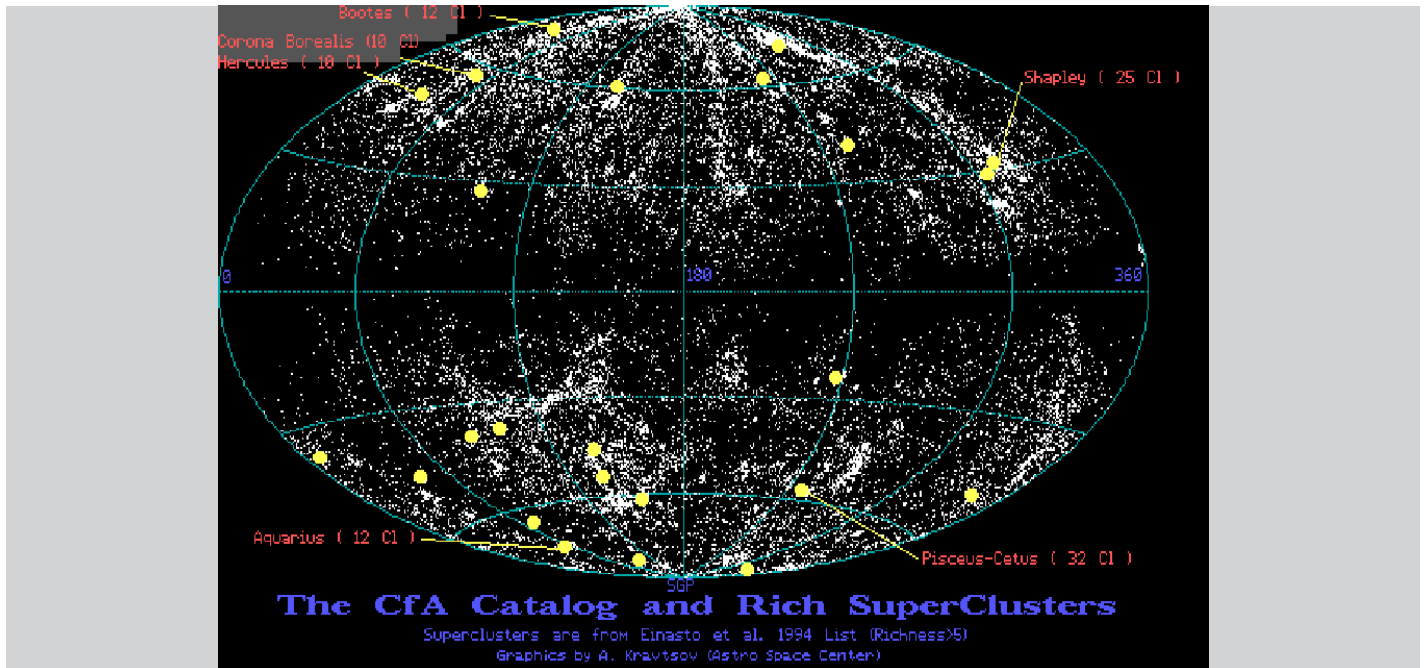
(MPG/ESO 2.2-m + WFI)

ESO PR Photo 46c/99 (21 December 1999)

© European Southern Observatory



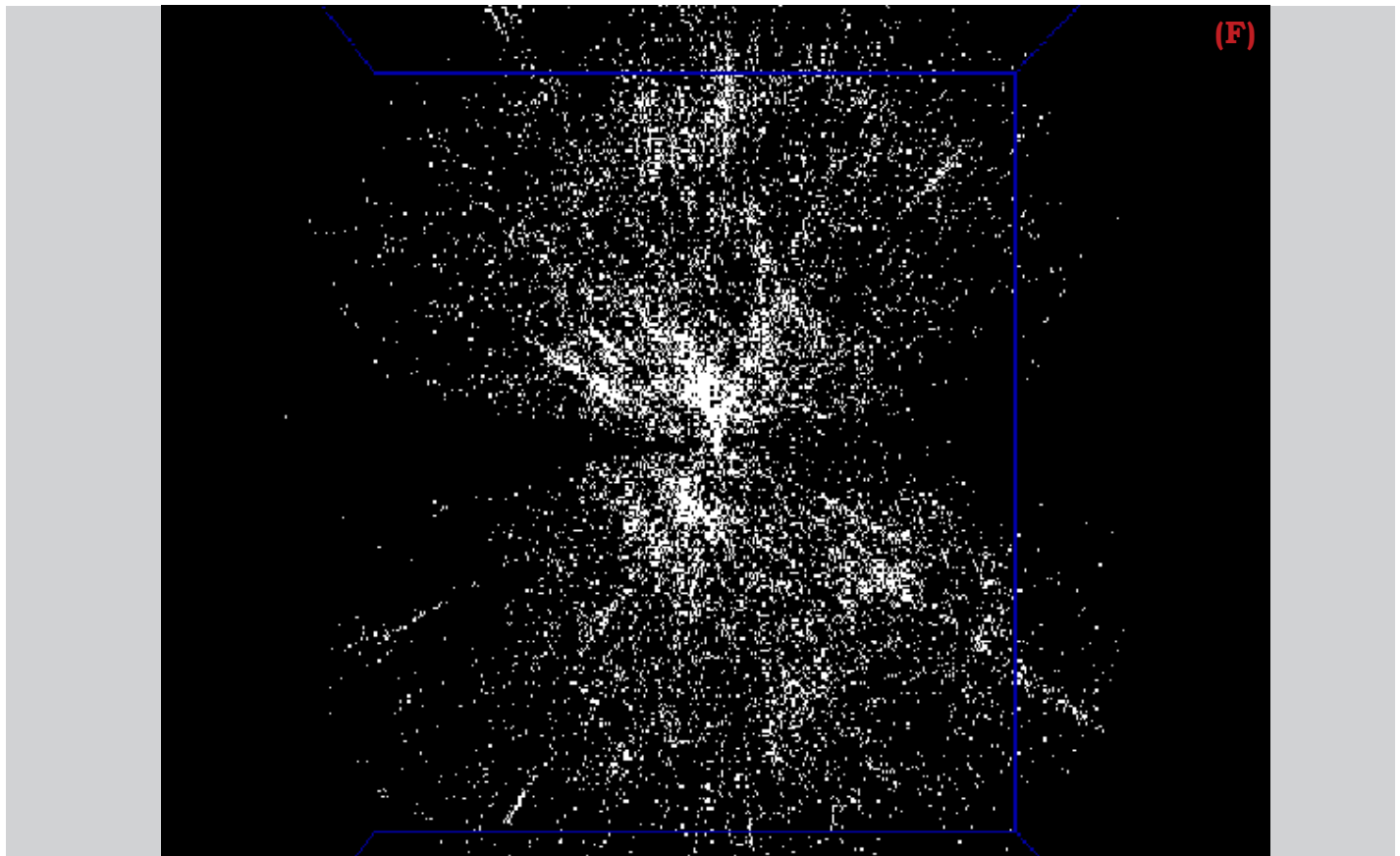
## OS SUPERAGLOMERADOS NO CATÁLOGO DE GALÁXIAS DO CfA



A distribuição, em coordenadas galácticas, de mais de 30000 galáxias, feita pelo CfA, assinalando com pontos amarelos as posições de vários superaglomerados de galáxias conhecidos. Os números apresentados em parênteses nos dão quantos aglomerados de galáxias fazem parte destes superaglomerados, o que nos permite ter uma ideia da riqueza do superaglomerado.

É interessante notar que alguns superaglomerados não parecem estar localizados em regiões superdensas de galáxias. Isto ocorre porque a maioria deles está muito mais distante no espaço do que as galáxias mostradas neste diagrama. Entretanto, a famosa “Concentração de Shapley” e o “Grande Atrator”, que se situam na mesma direção, estão localizados em regiões notadamente superdensas.

(F) Distribuição de mais de 30.000 galáxias em 3D, obtida no CfA.



Os pesquisadores do CfA também obtiveram esta distribuição de mais de 30000 galáxias em 3 dimensões (Figuras F). Neste caso a nossa Galáxia está localizada no centro do diagrama. Como o seu plano é horizontal são criadas “zonas vazias”, que são os cones horizontais escuros e vazios que podemos ver para ambos os lados a partir do ponto central. A escala vertical desta distribuição de galáxias é de 160 Mpc.

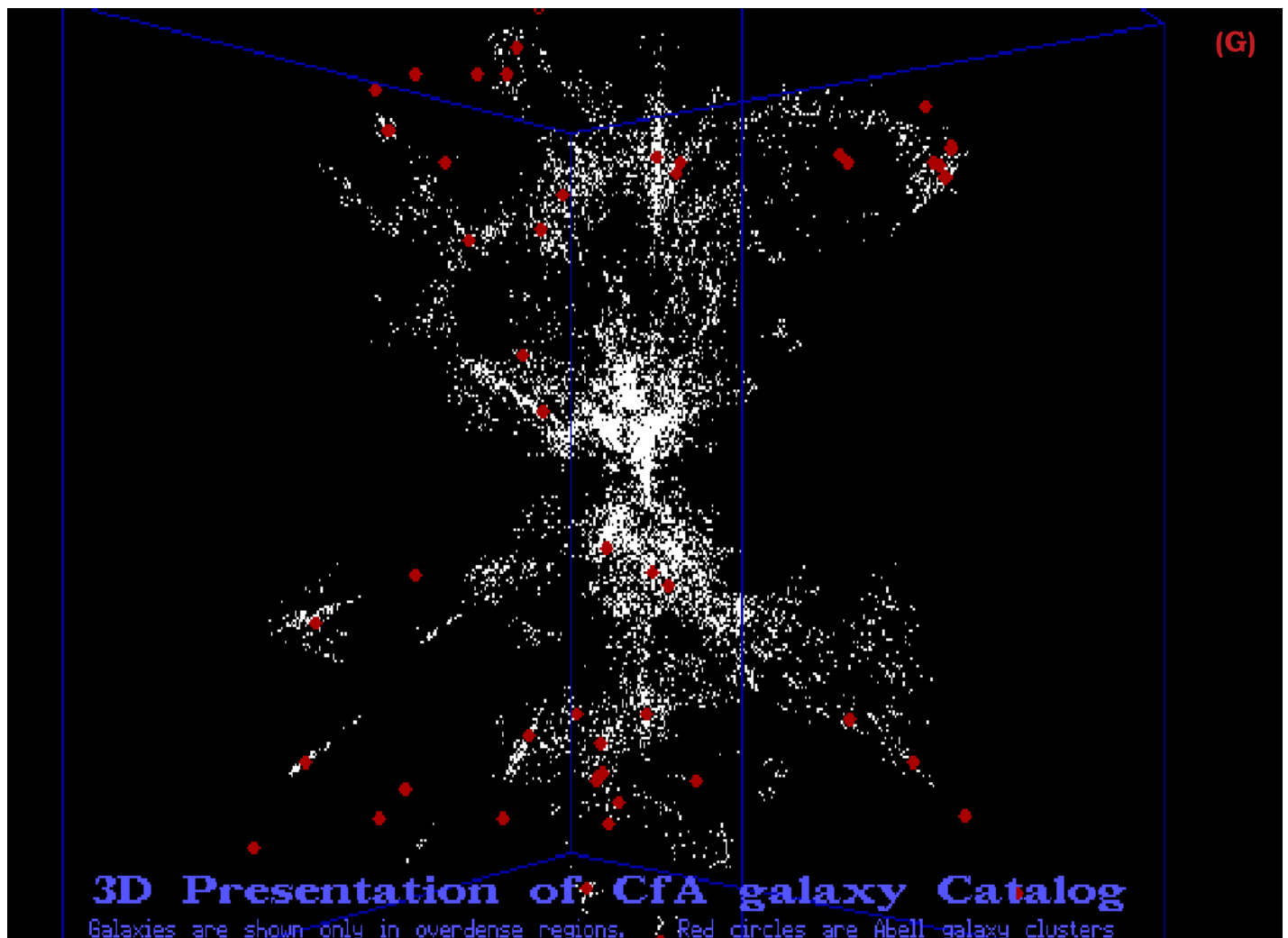
Podemos notar nesta distribuição numerosos “dedos de Deus”, ou seja, cadeias de galáxias que apontam na direção da nossa Galáxia. Como já dissemos, estes “dedos” são explicados pela dispersão de velocidade existente nos aglomerados de galáxias. Observe também a parte superior do diagrama. Ali podemos ver a famosa “Grande Parede” (Great Wall), uma longa e curva cadeia de galáxias.

Para que possamos observar melhor algumas importantes estruturas que aparecem na distribuição em larga escala das galáxias estudadas, os astrônomos do CfA filtraram a imagem acima. Nesta nova figura (G), somente são mostradas as galáxias pertencentes às regiões superdensas. Os círculos vermelhos assinalam aglomerados de galáxias tirados do Catálogo ACO. Note que muitas delas coincidem com os “dedos de Deus”.

A nossa Galáxia continua a ocupar o centro deste diagrama mas, neste caso, a distribuição de galáxias está sendo vista por um observador localizado em um ponto diferente daquele mostrado no diagrama anterior. Agora o observador está no local assinalado pelo cubo azul que limita a distribuição estudada pelo CfA.

Neste diagrama podemos ver bem melhor a localização da Grande Parede. Ela é o semicírculo situado na parte superior do diagrama.

(G) Figura em 3D mostrando apenas as galáxias pertencentes às regiões Superdensas.



# 24

## Mapeando o Universo: os “redshift surveys”

### MAPEANDO O UNIVERSO: OS “REDSHIFT SURVEYS”

O resultado do uso de detectores e telescópios cada vez mais poderosos foi a descoberta de um número cada vez maior de galáxias espalhadas em todas as direções no Universo. Isso fez com que o interesse dos astrônomos logo se voltasse para o mapeamento do Universo. Como as galáxias se distribuem por toda a imensa vastidão do Universo?

Até 1989 os astrônomos acreditavam que a estrutura em larga escala do Universo terminava nos superaglomerados de galáxias. Estas seriam as maiores estruturas existentes no universo e estavam distribuídas de modo mais ou menos uniforme em todas as direções através de todo o universo. Esta visão estava para ser mudada.

No final da década de 1980 vários grupos de astrofísicos desenvolveram um dos mais importantes trabalhos para o conhecimento da estrutura em larga escala do Universo. Estes trabalhos, chamados de “levantamentos de redshifts” (*redshift survey*), procuravam obter o maior número possível de medições de redshifts de galáxias. Deste modo, era possível conhecer suas distâncias e, conseqüentemente, ter uma visão bastante ampla da distribuição de galáxias no universo.

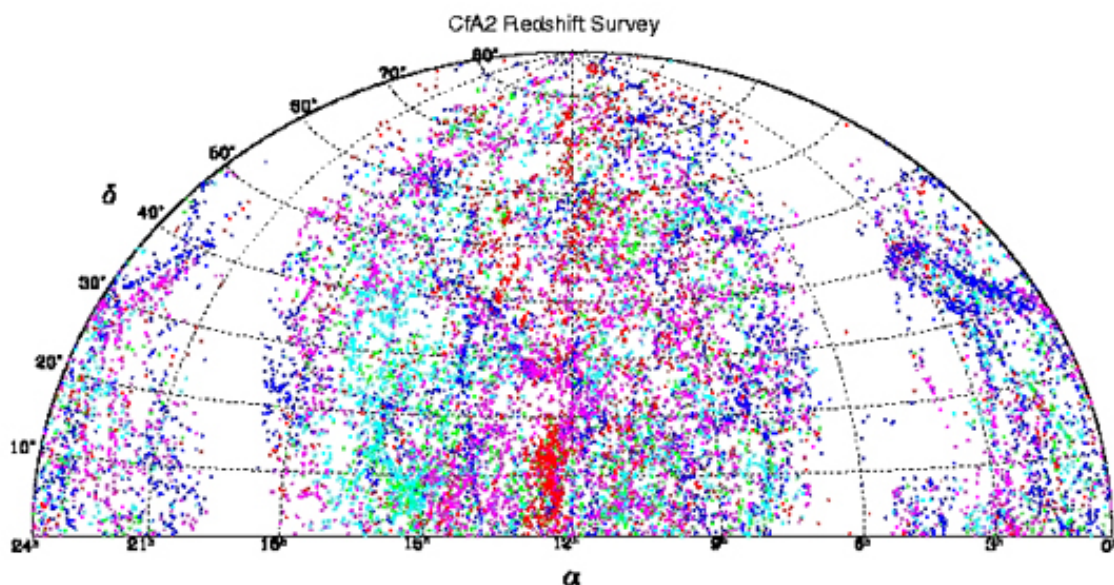
Para realizar esse tipo de mapeamento, que em inglês é chamado de “survey”, é necessário medir o “redshift” de cada um desses objetos. A esse tipo de levantamento dos valores dos “redshifts” de vários objetos de uma determinada área ou seção do Universo, damos o nome de “redshift survey”.

Os resultados que podem ser obtidos a partir de um “redshift survey” são vários. Por exemplo, com o auxílio da lei de Hubble, o “redshift” pode ser usado para calcular a que distância um determinado objeto (que teve seu “redshift” medido) está da Terra. Além disso, combinando-se o “redshift” obtido de cada objeto com o correspondente dado de sua posição angular, um “redshift survey” nos permite obter uma visão tridimensional da distribuição de galáxias pertencentes à região estudada.

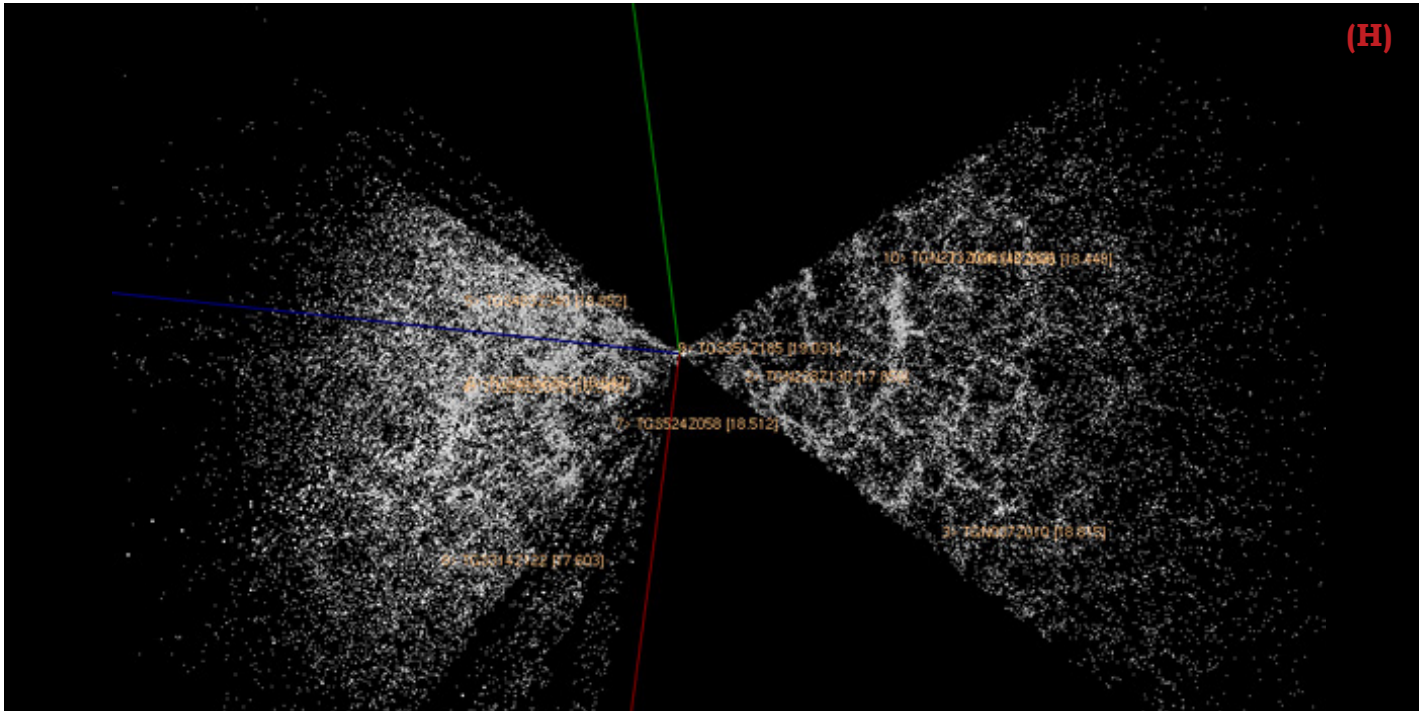
Primeira tentativa de mapeamento da estrutura em larga escala do Universo. As galáxias mais próximas são mostradas na cor vermelha. As galáxias representadas pelas cores azul, magenta, ciano e verde estão respectivamente mais afastadas de nós.

### O “CfA Redshift Survey”

Esse foi o primeiro “redshift survey” realizado, a primeira tentativa de mapear a estrutura em larga escala do Universo. O Center for Astrophysics (CfA) da Universidade da Califórnia iniciou esse trabalho em 1977 e em 1982 completou a coleção inicial de dados. O segundo “CfA survey” foi feito entre 1985



Copyright SAO 2001



e 1995. A partir desses dados, em 1989, os astrônomos descobriram a chamada “Grande Parede” (“Great Wall”), um superaglomerado de galáxias circundado por “vazios” (Figura H).

Mostramos na página anterior um diagrama da distribuição de galáxias no céu, obtido com os dados do “CfA redshift survey”. Cada ponto representa uma galáxia no hemisfério celeste norte que é mais brilhante do que a magnitude azul aparente de 15,5 e com um redshift medido até o valor 15000 km/s.

(H) Mapeamento da grande parede.

### O “2dF Galaxy Redshift Survey”

O 2dF Galaxy Redshift Survey (Two-degree-Field Galaxy Redshift Survey), também conhecido como 2dF ou 2dFGRS, é um dos mais notáveis “redshift surveys” feitos recentemente. Seu nome “2dF” vem do fato de que o instrumento que realizava os levantamentos cobria uma área de aproximadamente dois graus quadrados. O “2dF” é um levantamento de objetos de baixo redshift que foi realizado pelo Anglo-Australian Observatory (AAO) com o telescópio de 3,9 metros dessa instituição. Esse levantamento foi feito entre 1997 e 11 de abril de 2002. Os dados desse levantamento foram liberados para o público no dia 30 de junho de 2003. Esse levantamento determinou a estrutura em larga escala em uma seção do Universo local.

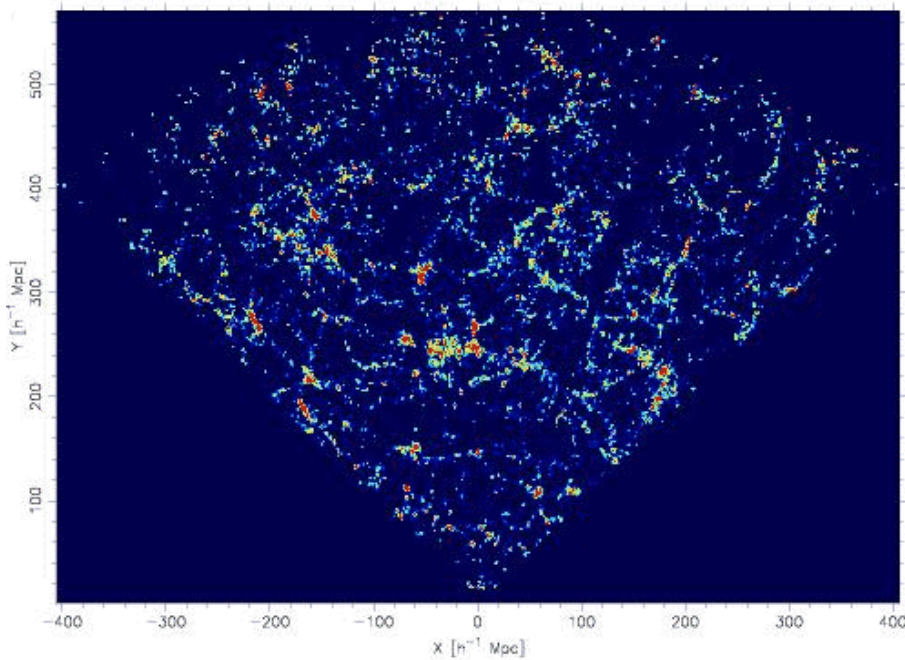
O levantamento “2dF” cobriu uma área de cerca de 1500 graus quadrados que incluía regiões em ambos os pólos galácticos.

### O “Sloan Digital Sky Survey”

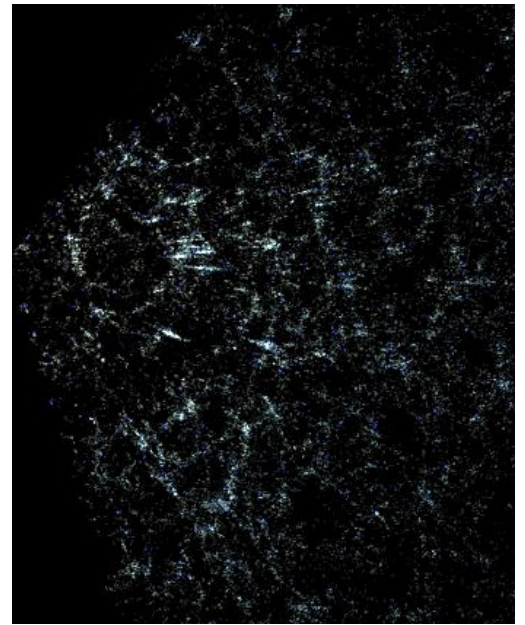
Este levantamento foi feito usando um telescópio óptico dedicado de 2,5 metros de diâmetro do Apache Point Observatory, New Mexico, Estados Unidos. Os trabalhos começaram no ano 2000 e tinham como objetivo mapear cerca de 25% do céu e observar cerca de 100 milhões de objetos, obtendo espectros de aproximadamente um milhão deles. A cada noite o telescópio produz cerca de 200 GB de dados astronômicos.

As imagens a seguir mostram as posições espaciais das galáxias em torno da nossa Galáxia. Elas foram obtidas a partir dos dados do SDSS.

No ano 2006 foi iniciado o SDS-II, uma segunda fase dessas pesquisas.



Mapeamento do céu realizado pelo telescópio ótico do Apache Point Observatory para observar cerca de 100 milhões de objetos.



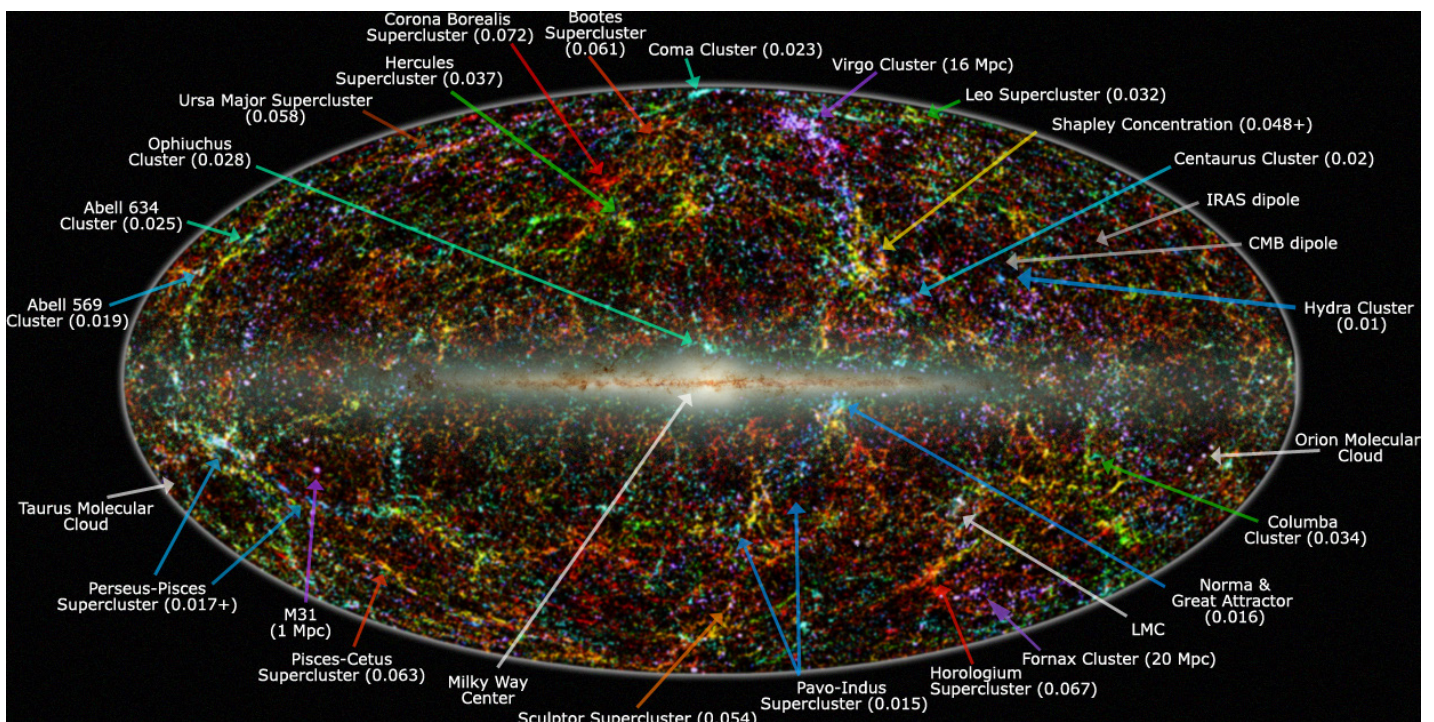
## JUNTANDO TODOS OS LEVANTAMENTOS DE REDSHIFT

Já que tantos levantamentos de redshift foram feitos por diversos observatórios em todo o mundo, nada mais natural do que reunir esse conhecimento e ver o que pode resultar. A imagem abaixo, obtida por Thomas Jarret, do IPAC, nos dá uma visão panorâmica do Universo visto na região espectral do infravermelho próximo. Ela nos revela a distribuição de galáxias até agora conhecida.

Essa imagem foi feita a partir de dados do “2MASS Extended Source Catalogue (XSC), que reúnem mais de 1,5 milhões de galáxias, e o Point Source Catalogue (que registra cerca de 0,5 bilhão de estrelas pertencentes à nossa Galáxia). Nessa projeção a nossa Galáxia está no centro da imagem.

Na imagem as várias cores representam os “redshifts” das galáxias. Assim, as galáxias na cor azul estão mais próximas de nós ( $z < 0,01$ ), as galáxias mostradas na cor verde estão a uma distância moderada da Terra ( $0,01 < z < 0,04$ ). Já as galáxias mostradas na cor vermelha são as mais distantes que o 2MASS é capaz de calcular o redshift ( $0,04 < z < 0,1$ ).

Distribuição de galáxias conhecida até o momento.

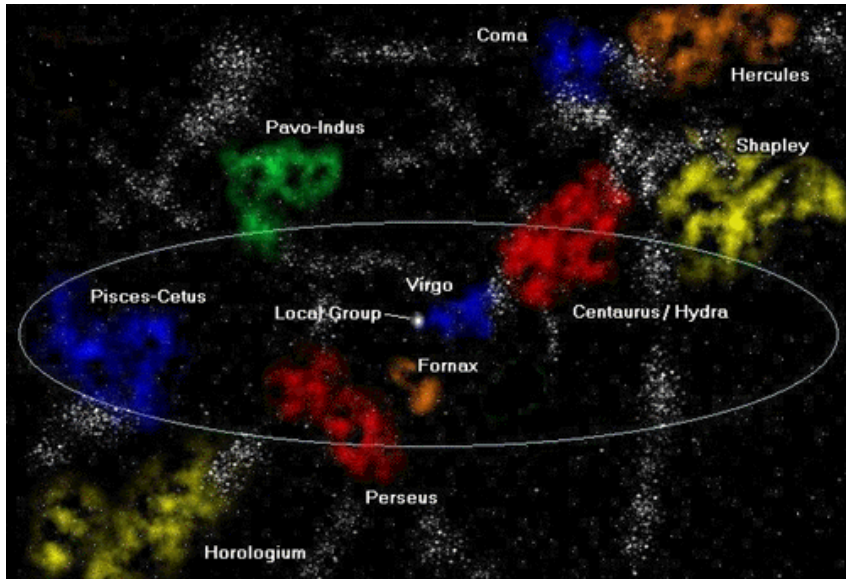


## A ESTRUTURA EM LARGA ESCALA DO UNIVERSO

O Universo possui estruturas muito maiores, mas muito mesmo, que os superaglomerados. Essas estruturas, às quais nem mesmo o nome de “gigantescas” conseguiria realmente expressar seu tamanho, são conhecidas como as “paredes cósmicas”, os “filamentos” e os “vazios”. Isso se não falarmos das “bolhas de Lyman-alpha”! Vamos ver cada uma delas separadamente.

### PAREDES

#### A “Grande Parede” (“Great Wall”)



Em 1989, os astrofísicos Margaret Geller e John Huchra, analisando dados obtidos em um dos “redshift surveys”, descobriram uma distribuição de galáxias com mais de 500 milhões de anos-luz de comprimento e 200 milhões de anos-luz de largura. Esta distribuição tinha a espessura de apenas 15 milhões de anos-luz. A estrutura descoberta por estes astrônomos, uma imensa “folha” de galáxias, passou a ser conhecida como a “Grande Parede” (*Great Wall*).

#### A “Grande Parede do SLOAN” (“SLOAN Great Wall”)

Em abril de 2003 foi descoberta uma outra imensa estrutura no Universo. Trata-se da chamada “Grande Parede do SLOAN” (SLOAN Great Wall).

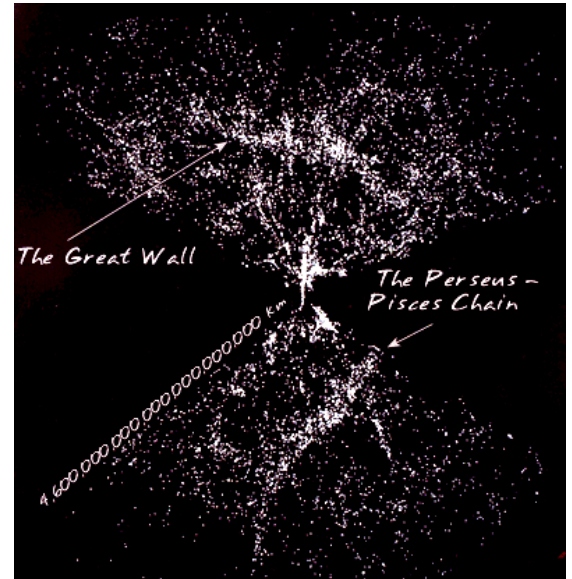
No entanto, tecnicamente, a “Grande Parede do SLOAN” não é uma “estrutura” verdadeira, uma vez que os objetos que fazem parte dela não estão ligados gravitacionalmente ou seja, eles não estão gravitacionalmente relacionados uns com os outros. Eles só parecem estar ligados gravitacionalmente devido à medição de distância que foi usada.

#### Filamentos e Vazios

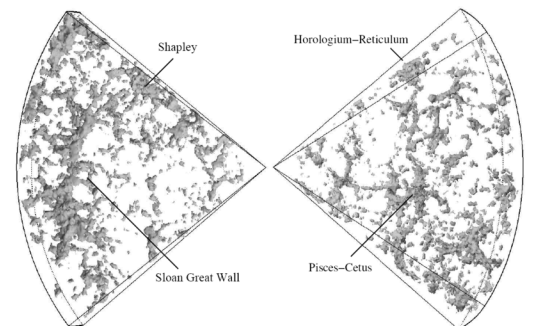
Com a ampliação dos “redshift surveys” cada vez mais os astrônomos puderam esboçar a distribuição tridimensional das galáxias no universo. Hoje os astrônomos descrevem o universo como sendo uma coleção de “vazios” (“voids”) com o aspecto de bolhas, separados por distribuições de galáxias com a forma de “folhas” e “filamentos”. Estas “folhas” e “filamentos” formam uma “rede” retorcida com grandes espaços vazios, que são os “vazios”. Estes “vazios” têm um diâmetro típico de 25 Mpc e preenchem cerca de 90% do espaço. O maior “vazio” até agora observado está localizado na constelação Capricornus e tem o nome de “vazio de Capricornus”. Estima-se que ele tenha um diâmetro de 230 milhões de anos-luz.

# 25

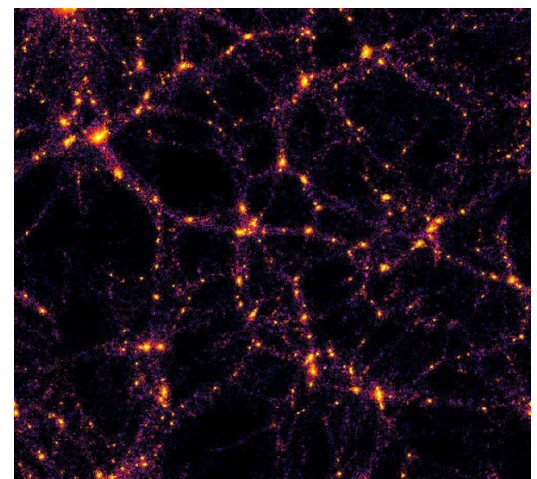
## A estrutura em larga escala do Universo



Representação das gigantescas estruturas do Universo (Paredes cósmicas).



Grande parede do Sloan.



Simulação feita em computador que mostra os filamentos e “vazios” criados a partir da distribuição de matéria no Universo.

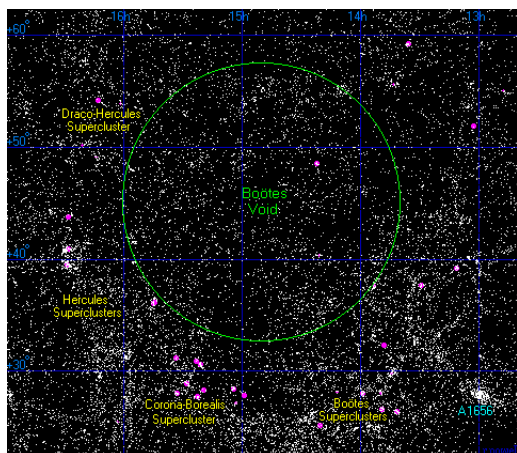
Na descrição que estamos fazendo da estrutura em larga escala do Universo, composto por filamentos e vazios, os superaglomerados aparecem como ocasionais “nós”, relativamente densos, desta “rede”. Os filamentos são as maiores estruturas conhecidas no Universo. São estruturas semelhantes a linhas com um comprimento típico de 50 a 80 megaparsecs. Os filamentos delineiam os contornos existentes entre os grandes “vazios” do Universo.

Os filamentos são formados por galáxias gravitacionalmente ligadas. Nas regiões do filamento onde um grande número de galáxias estão situadas muito próximas umas às outras, dizemos que aí existe um “superaglomerado de galáxias”.

### O “vazio” em Boötes

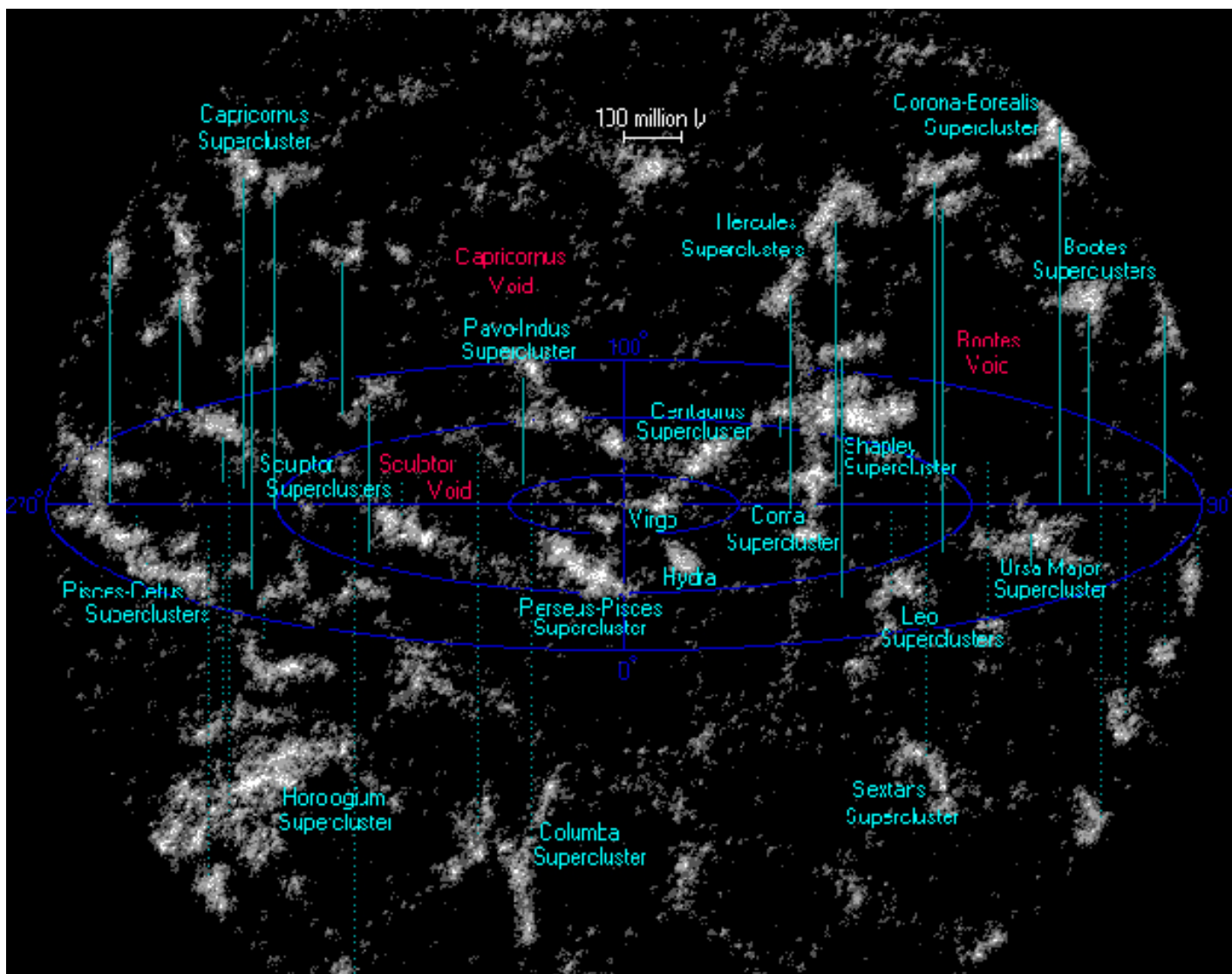
Em 1981 os astrônomos Robert Kirshner, August Oemler, Jr., Paul Schechter e Stephen Shethman, durante um levantamento de “redshifts” de galáxias, descobriram na região da constelação Boötes uma imensa região do espaço vazia, quase totalmente desprovida de galáxias, que ficou sendo conhecida como “vazio de Boötes”.

O “vazio de Boötes” tem uma forma aproximadamente esférica e é muito grande. Com cerca de 250 milhões de anos-luz de diâmetro, é um dos maiores “vazios” encontrados até agora no nosso Universo. Para se ter a real dimensão do “vazio de Boötes”, é bom usar a comparação feita pelo astrônomo Greg Aldering: se a nossa Galáxia estivesse localizada no centro do vazio de Boötes, somente nos anos da década de 1960 é que teríamos sabido que existiam ou-



Representação do “vazio de Boötes”.

Distribuição de alguns superaglomerados de galáxias e alguns “vazios” conhecidos no Universo.





tras galáxias no Universo.

Muitos astrônomos passaram a estudar esse “vazio” tentando verificar se existiam galáxias localizadas no seu interior ou se essa imensa região era realmente completamente vazia. Logo algumas galáxias começaram a ser descobertas no interior do “vazio de Boötes”.

Em 1987 os astrônomos J. Moody, Robert Kirshner, G. MacAlpine e S. Gregory descobriram oito galáxias no interior do “vazio de Boötes”. Em 1989, os astrônomos Greg Aldering, G. Bothun, Robert P. Kirshner e Ron Marzke descobriram mais 15 galáxias nesse imenso vazio. Algumas outras galáxias foram descobertas nessa região e em 1997 conhecíamos 60 galáxias no interior do “vazio de Boötes”. Curiosamente, essas galáxias se dispõem na forma aproximada de um tubo que cruza o meio do “vazio”. Os astrônomos acreditam que o “vazio” de Boötes foi formado a partir da fusão de vários outros “vazios” menores que existiam nessa região, algo semelhante ao que se vê quando bolhas de sabão começam a se juntar formando uma bolha cada vez maior. Nota-se que devido ao seu imenso tamanho, mesmo a descoberta dessas galáxias no interior do “vazio de Boötes” não modifica sua característica principal que é a de ser uma região do Universo quase completamente desprovida de matéria visível.

### **A “mancha fria” do WMAP**

Em 2004, enquanto mapeava o céu fazendo o levantamento das flutuações de temperaturas da radiação de fundo de microondas cósmica (assunto que será abordado mais tarde), o Wilkinson Microwave Anisotropy Probe (WMAP) descobriu a existência de uma enorme região situada na constelação Eridanus na qual a radiação de fundo era mais fria do que na área circundante adjacente. O círculo na imagem ao lado marca a região em questão.

Essa enorme região fica no hemisfério norte da esfera celeste e está centrada nas coordenadas galácticas  $l_{II} = 207,8^\circ$  e  $b_{II} = -56,3^\circ$ . Em coordenadas equatoriais sua localização é ascensão reta = 03h 15m 05s e declinação =  $-19^\circ 35' 02''$ . A ela foi dado o nome de “WMAP Cold Spot” (“mancha fria do WMAP”)

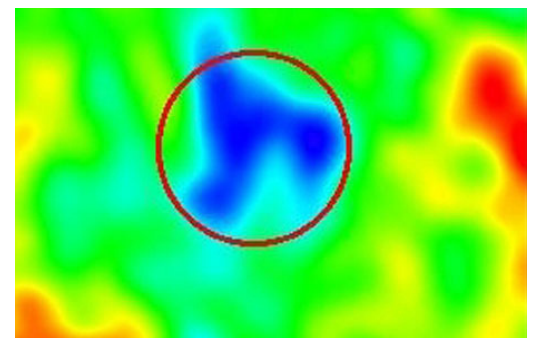
O que seria essa “mancha fria”? A melhor explicação dada é a de que essa “mancha fria” é um enorme “vazio”, um “supervazio”, que existe entre nós e a radiação cósmica de fundo primordial, uma vez que os “vazios” podem produzir regiões mais frias do que suas vizinhanças. Entretanto, seria necessário um “vazio” impressionantemente grande para explicar essa “mancha fria”. Essa região vazia teria de 6 a 10 bilhões de anos-luz de extensão e aproximadamente 1 bilhão de anos-luz de largura.

### **Bolhas de Lyman alpha**

Um outro indicador da estrutura em larga escala do Universo é a chamada “floresta de Lyman alpha” (Lyman alpha forest). Para entendermos o que isso significa precisamos falar um pouco sobre o átomo de hidrogênio.

O hidrogênio é o elemento químico que existe em maior quantidade no Universo. O átomo de hidrogênio é o mais simples de todos os átomos: ele tem um elétron apenas, que gira em torno de um núcleo que também só possui uma única partícula, um próton.

Se o elétron do átomo de hidrogênio absorve um fóton com uma determinada energia ele saltará para uma órbita mais energética, mais afastada do núcleo. Dizemos então que o elétron está excitado e esse processo é conhecido como excitação.



copyright: Rudnick / NRAO / AUI / NSF / NASA

Imagem da “mancha fria do WMAP”.

Todas as partículas elementares que existem no Universo não “gostam” de permanecer em um estado excitado. Sua tendência é liberar esse excesso de energia e voltar para o estado de menor energia possível. Assim, neste estado excitado o elétron em algum momento emitirá um fóton e saltará para um nível de menor energia, um nível mais baixo, mais próximo ao núcleo. Esses processos dão origem às chamadas **séries do hidrogênio** que mostram as possíveis transições que o elétron do átomo de hidrogênio pode fazer.

Estas transições do elétron dão origem às seguintes séries:

SÉRIE	OCORRE UMA TRANSIÇÃO DE QUALQUER NÍVEL EXCITADO PARA O NÍVEL
LYMAN	1 (estado fundamental)
BALMER	2
PASCHEN	3
BRACKETT	4
PFUND	5

As séries mostradas acima são fundamentais para a astrofísica. Entre outros pontos importantes, as séries do átomo de hidrogênio, que representam transições entre níveis atômicos, nos dão informações sobre a composição química das estrelas.

Para o caso que estamos tratando aqui, as chamadas “folhas de Lyman alpha”, nos interessa somente as transições feitas para o nível fundamental do átomo de hidrogênio.

A imagem ao lado nos mostra que quando um elétron do átomo de hidrogênio faz uma transição de um nível excitado (seja ele qual for) para o nível fundamental, são criadas linhas que coletivamente recebem o nome de “linhas de Lyman”. Essas linhas aparecem no espectro.

Ao observarem os espectros dos quasares, um tipo de galáxia ativa, os astrônomos verificaram que havia uma grande profusão de linhas de Lyman alpha nos seus espectros. A isso eles deram o nome de “florestas de Lyman alpha”.

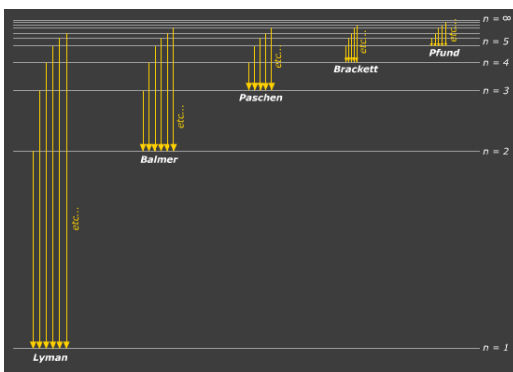
Ao conjunto de linhas de absorção, que aparecem no espectro da luz proveniente dos quasares, os astrônomos dão o nome de “floresta de Lyman alpha”.

As “bolhas de Lyman alpha” (Lyman-alpha blob -LAB) são enormes concentrações de gás que emitem a linha Lyman alpha. Os LABs são alguns dos maiores objetos individuais conhecidos em todo o Universo. Algumas dessas estruturas gasosas têm mais de 400000 anos-luz de diâmetro.

As mais famosas “bolhas de Lyman alpha” foram descobertas no ano 2000 pelo astrônomo Steidel. Astrônomos japoneses, usando o telescópio Subaru, descobriram mais de 30 novas LABs no mesmo campo estudado anteriormente por Steidel, mas todas de menor tamanho do que a original. Essas LABs formam uma estrutura que tem mais de 200 milhões de anos-luz de extensão.

Não se sabe como essas LABs estão conectadas com as galáxias circunvizinhas a elas.

Essas regiões são interpretadas como indicando a existência de enormes “folhas” finas de gás intergaláctico. O principal constituinte deste gás é o hidrogênio. Os astrônomos acreditam que estas “folhas” (ou “bolhas”) estão associadas ao processo de formação de novas galáxias.



Transições eletrônicas do átomo de hidrogênio, formando as séries do hidrogênio.

## A ESTRUTURA EM LARGA ESCALA DO UNIVERSO

A física que ocorre no interior da matéria, na região que designamos como **nível microscópico** ou **nível atômico**, é muito diferente daquela que estamos acostumados a ver no nosso mundo macroscópico, cujas escalas vão do milímetro aos milhares e milhares de quilômetros. Os fenômenos que ocorrem no interior da matéria ou seja, no interior dos átomos, têm aspectos muitíssimo particulares, característicos e algumas vezes surpreendentes.

Os blocos construtores básicos da matéria “normal”, aquela que vemos espalhada por todo o Universo, são os **átomos**. Ao se reunirem, os átomos formam o que chamamos de **moléculas**.

Entretanto, veremos mais tarde que, embora a matéria “normal” seja composta de átomos e moléculas, a maioria da matéria que existe no Universo não se apresenta desta forma. Ao invés disso, a maior parte da matéria no Universo está presente na forma de **plasma**.

### O modelo de Bohr para o átomo

Em nossa discussão das propriedades mais importantes da estrutura atômica e molecular empregaremos um modelo muito simplificado para descrever o átomo, proposto em 1915 pelo prêmio Nobel dinamarquês Niels Bohr. Este modelo é chamado de “átomo planetário” ou “modelo de Bohr”.

O modelo do átomo proposto por Bohr **não é** inteiramente correto nem representa a visão atual que os físicos possuem sobre o interior da matéria. No entanto, ele tem vários aspectos que são aproximadamente corretos, é mais fácil de ser entendido e é plenamente satisfatório para uma grande parte da nossa discussão.

No modelo atômico proposto por Bohr partículas chamadas **nêutrons** e **prótons** ocupam uma região central, densa, do átomo chamada **núcleo atômico**. Em torno deste núcleo outras partículas, os **elétrons**, descrevem órbitas. A atração elétrica entre os prótons e os elétrons é um dos processos que dá estabilidade ao átomo, mantendo-o unido.

Esta descrição se assemelha, em alguns aspectos, àquela que fazemos do nosso Sistema Solar, onde os planetas estão em órbita em torno do Sol. No entanto, fazer uma analogia sem restrições entre o Sistema Solar e o átomo de Bohr não é correto, uma vez que os planetas estão em órbitas que, aproximadamente, permanecem confinadas a um plano enquanto que, no caso de um átomo, as órbitas dos elétrons não estão confinadas a nenhum plano.

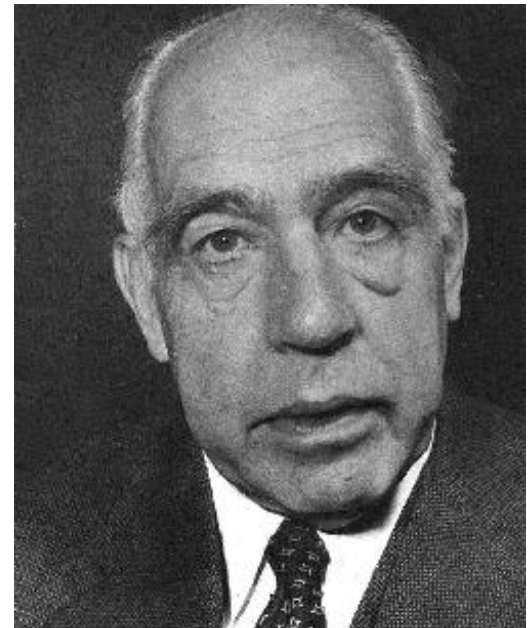
Há um outro aspecto, muito mais complexo, que anula completamente a analogia entre o Sistema Solar e o átomo de Bohr. Veremos mais tarde que os elétrons possuem restrições muito maiores do que aquelas aplicadas aos planetas do Sistema Solar no que diz respeito às suas possíveis órbitas em torno de um objeto central, o núcleo atômico no caso do átomo. Trataremos este aspecto mais tarde, quando falarmos sobre a chamada “quantização dos níveis de energia”.

O tamanho típico de um núcleo atômico é  $10^{-13}$  centímetros com os elétrons descrevendo órbitas a uma distância (raio) de, aproximadamente,  $10^{-8}$  centímetros = 1 Ångstrom (1 Å). Isto quer dizer que o raio do núcleo é cerca de 100000 vezes menor do que o raio do átomo inteiro. Este dado é importante para que você tenha a noção correta de como a matéria é “vazia”.

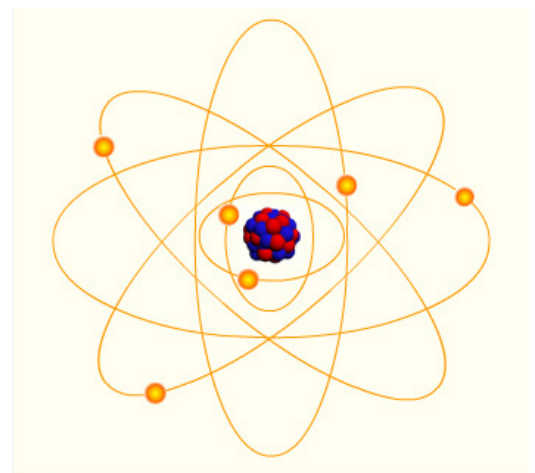
Outro ponto importante é que para o estudo do interior da matéria consideraremos que é válido o princípio de que as partículas de um determinado tipo são **indistinguíveis**. Com isto queremos dizer que um elétron é sempre igual a outro elétron. Não existem elétrons gordos ou magros, novos ou velhos. Até onde sabemos, podemos considerar o elétron como uma partícula

# 26

## A estrutura em larga escala do Universo



Niels Henrik David Bohr (1885 - 1962).



Representação do modelo de Bohr para o átomo.

puntiforme, sem extensão espacial, e cujas propriedades intrínsecas são as mesmas para todos eles, independentemente da situação física.

CONSTITUINTES DO ÁTOMO		SÍMBOLO	CARGA ELÉTRICA	VALOR DA CARGA	MASSA	EQUIVALÊNCIA ENTRE MASSAS	MASSA APROXIMADA
elétron		e <sup>-</sup>	negativa	$1,6022 \times 10^{-19}$ Coulombs	$9,1093897 \times 10^{-31}$ kg	----	$9,11 \times 10^{-31}$ kg
núcleo	próton	p <sup>+</sup>	positiva	igual à do elétron	$1,6726230 \times 10^{-27}$ kg	~1836 vezes a massa do elétron	$1,67 \times 10^{-27}$ kg
	nêutron	n	0	----	$1,6749286 \times 10^{-27}$ kg	aproximadamente igual à do próton	$1,68 \times 10^{-27}$ kg

Vemos pela tabela acima que a maior parte da massa dos átomos reside nos prótons e nêutrons, que ocupam a região central mais densa chamada **núcleo atômico** ou, simplesmente, **núcleo**.

Se os átomos são formados por partículas positivas (prótons) e negativas (elétrons) qual é a sua carga total? Os átomos têm carga positiva ou negativa? Na verdade os átomos são eletricamente neutros por que o número de elétrons, carregados negativamente, que ele possui é exatamente igual ao número de prótons, carregados positivamente.

E quanto aos nêutrons? Qual é a “missão” deles em um átomo? Experimentalmente verifica-se que o número de nêutrons é, aproximadamente, igual ao número de prótons nos núcleos leves estáveis. No entanto, o número de nêutrons cresce rapidamente e é cerca de duas vezes o número de prótons nos núcleos estáveis mais pesados. É esse maior número de nêutrons que dá estabilidade ao núcleo do átomo. Veremos mais tarde que átomos pesados cujos núcleos são ricos em nêutrons serão os responsáveis pela ocorrência de processos nucleares no interior das estrelas.

### **Os isótopos de um elemento**

O número de prótons que participam do núcleo de um determinado átomo é chamado de **número atômico** e é representado pela letra **Z**. Como sabemos que os átomos não possuem carga elétrica resultante, o número de prótons no núcleo tem que ser igual ao número de elétrons que estão em órbita em torno deste núcleo. Daí, podemos dizer que o **número atômico** nos dá o número de prótons no núcleo de um determinado átomo ou o número de elétrons nas respectivas órbitas em torno desse núcleo.

O número total de prótons e nêutrons que formam um determinado núcleo atômico é chamado de **número de massa** do átomo e é representado pela letra **A**. Representando com a letra **N** o número de nêutrons, temos que o número de massa é dado por:

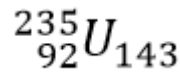
$$A = Z + N$$

Chamamos de **isótopo** de um elemento aquele cujos átomos têm o mesmo número de prótons, e conseqüentemente o mesmo número de elétrons que o elemento original, mas um número diferente de nêutrons.

Assim, os isótopos de um elemento têm o mesmo número atômico mas diferem em seus números de massa.

Um mesmo elemento químico pode ter vários isótopos, todos eles diferindo apenas no número de nêutrons que constituem seus respectivos núcleos.

Uma notação compacta para isótopos de um elemento é ilustrada a seguir:



onde “235” é o número de massa, “92” é o número atômico e “143” é o número de nêutrons do elemento químico.

O hidrogênio, o elemento químico que existe em maior quantidade no Universo, possui isótopos com nomes característicos:

ELEMENTO		ISÓTOPOS	
${}^1_1\text{H}$	${}^2_1\text{H}$	${}^3_1\text{H}$	

O símbolo  ${}^1_1\text{H}$  representa o hidrogênio enquanto que os outros dois símbolos representam seus isótopos.

O isótopo de massa 2 do hidrogênio,  ${}^2_1\text{H}$ , é chamado de **deutério** ou **hidrogênio pesado** enquanto que o isótopo de massa 3,  ${}^3_1\text{H}$ , é chamado de **trítio** ou **trício**.

Observa-se que o núcleo do hidrogênio é formado por um próton apenas, o núcleo do deutério é formado por um próton e um nêutron e o do trítio inclui um próton e dois nêutrons.

O estudo dos isótopos dos elementos químicos é importante para a astrofísica. Os processos nucleares que ocorrem no interior de uma estrela produzem muitos isótopos seja por processos de enriquecimento dos núcleos dos átomos a partir da colisão com nêutrons ou então por processos de decaimento de átomos pesados.

### **A necessidade de um novo modelo para o átomo**

Os cientistas que estudavam a estrutura do átomo no início do século XX descobriram algo muito interessante. As regras estabelecidas pelo físico inglês Isaac Newton, que eram capazes de descrever o comportamento dos corpos macroscópicos, não funcionavam na escala atômica. A mecânica Newtoniana não pode corretamente descrever o comportamento de prótons, nêutrons, elétrons ou átomos.

Niels Bohr, Max Planck, Wolfgang Pauli, Louis de Broglie, Erwin Schrödinger, Werner Heisenberg e outros grandes cientistas daquela época começaram a desenvolver um novo conjunto de “leis” físicas que se aplicavam, bastante bem, ao mundo microscópico dos átomos. Esta nova teoria foi chamada de “Mecânica Quântica”.

Hoje, os físicos acreditam que a teoria correta que descreve o átomo se baseia na **mecânica quântica**, uma teoria matematicamente sofisticada e que apresenta uma descrição muito mais precisa do átomo do que o modelo proposto por Bohr. O modelo do átomo de Bohr é apenas uma aproximação à descrição feita pela mecânica quântica, mas com a virtude de ser muito mais simples.

### **OS NÍVEIS DE ENERGIA DE UM ÁTOMO: EXCITAÇÃO E DESEXCITAÇÃO**

Um dos aspectos básicos da mecânica quântica que está incorporado ao modelo de Bohr, e que o faz ser completamente diferente do modelo planetário



Schrödinger



Plank



Pauli



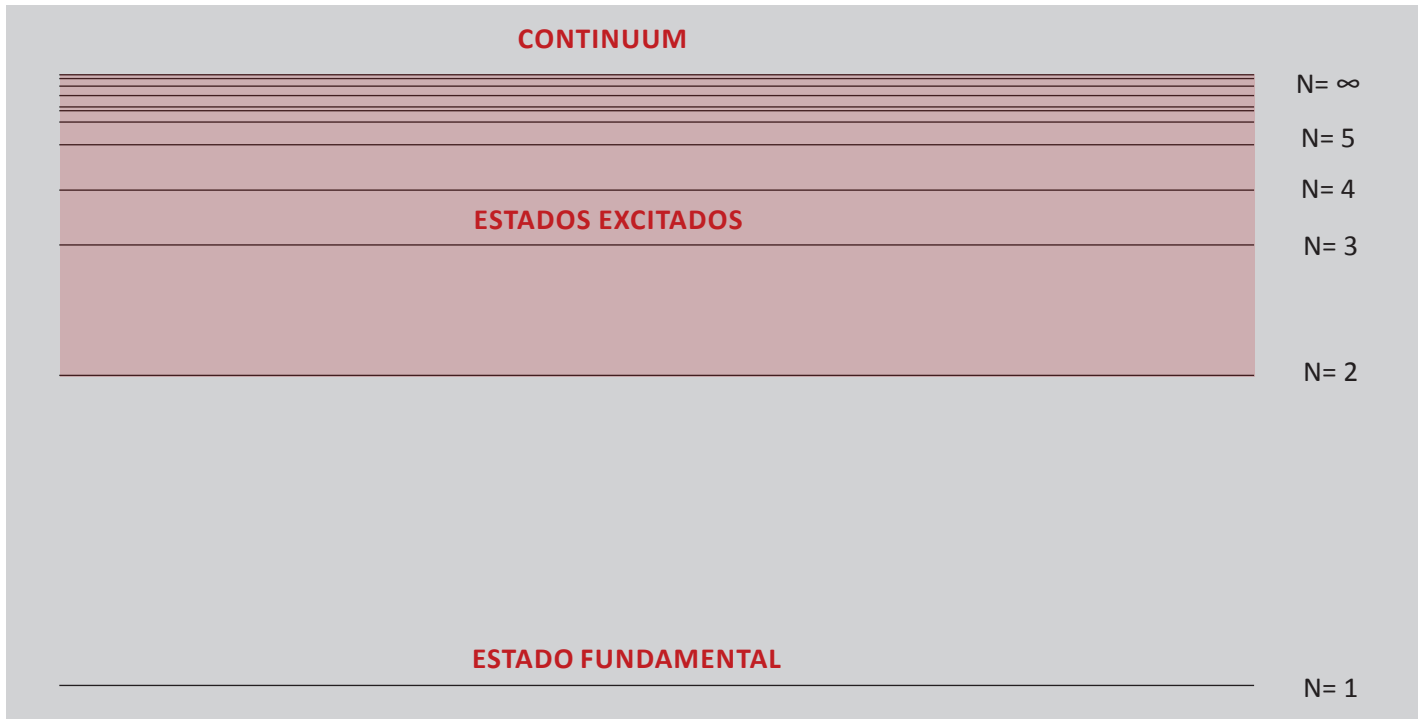
de Broglie



Heisenberg

que tantas vezes é usado como analogia, é que a energia das partículas no átomo de Bohr está restrita a certos valores discretos, muito bem definidos, e somente estes valores são permitidos. Dizemos que a energia do átomo é **quantizada**.

Isto significa que somente certas órbitas, com raios bem estabelecidos, podem ser ocupadas pelos elétrons. As órbitas que poderiam estar situadas dentro destes intervalos estabelecidos pela mecânica quântica **simplesmente não existem**.



Níveis de energia para o átomo de hidrogênio.

A figura acima mostra tais níveis de energia quantizados para o átomo de hidrogênio.

Estes níveis são designados por um número inteiro **n** que é chamado de **número quântico**.

O estado (ou nível) de energia mais baixo é chamado de **estado fundamental**.

Os estados que apresentam, sucessivamente, mais energia do que o estado fundamental são chamados de **estados excitados** e são designados, segundo a ordem de afastamento a partir do núcleo atômico, como **primeiro estado excitado, segundo estado excitado, terceiro estado excitado**, etc.

Além de uma certa energia, chamada **potencial de ionização**, os elétrons que pertencem ao átomo não conseguem mais ficar ligados ao núcleo. Eles passam a ser **elétrons livres**. A partir deste valor de energia os níveis de energia formam uma região que recebe o nome de **continuum**. No caso do hidrogênio seu potencial de ionização ou seja, a energia necessária para destruir a ligação do seu elétron com o núcleo atômico, transformando-o em elétron livre, é de 13,6 elétrons-volt. Dizemos então que o continuum do átomo de hidrogênio começa em 13,6 eV acima do estado fundamental.

### **Excitação e desexcitação de um átomo**

Os elétrons pertencentes a um átomo podem fazer transições entre as órbitas (níveis de energia) permitidas pela mecânica quântica absorvendo ou emitindo *exatamente* a diferença de energia que existe entre estas órbitas.

Galáxia com Redshift 10,0 no aglomerado Abell 1835 IR1916.

Vejamos melhor como isto acontece. Vamos supor que um elétron está em uma órbita qualquer, entre aquelas permitidas pela mecânica quântica, em torno de um núcleo. É claro que existem outras possíveis órbitas, ou níveis de energia, que este elétron pode ocupar se ele tiver energia suficiente para isto. A diferença de energia entre cada uma destas várias órbitas possíveis e aquela onde está efetivamente o elétron pode ser facilmente calculada. Vamos supor então que, por algum processo, por exemplo aquecimento, transmitimos energia para este átomo. Esta energia incidente, seja qual for a sua origem, é formada por fótons com vários comprimentos de onda. Eventualmente um destes comprimentos de onda pode corresponder à diferença de energia que existe entre algum dos possíveis níveis atômicos deste átomo e o nível onde está o elétron.

Quando esta energia externa incide sobre o elétron, ele absorverá um dos fótons incidentes desde que a energia desse fóton corresponda à diferença de energia entre um dos possíveis níveis atômicos e o nível onde o elétron está. Ao absorver esta energia o elétron realiza um **salto quântico** para o nível de energia mais alta que corresponde à sua nova energia total. Deste modo, a diferença em energia entre níveis corresponde a um comprimento de onda específico da radiação incidente.

Por exemplo, um elétron está no segundo nível quântico. Incidimos radiação de vários comprimentos de onda sobre o elétron. Entre estes comprimentos de onda está aquele que corresponde à diferença de energia entre o nível quântico 5 e o nível 2 onde está o elétron. Nosso elétron absorve este fóton e passa para o nível 5, ocupando agora um estado de maior excitação do que aquele em que ele estava anteriormente.

Em outras palavras, quando o átomo encontra um fóton com um comprimento de onda específico, correspondente à diferença de energia entre níveis quânticos, o fóton será absorvido pelo átomo, e o elétron saltará do nível de energia mais baixa para o nível de energia mais alta.

O elétron neste novo nível de energia está em um **estado excitado**. No entanto, todos os elétrons que estão em estados excitados querem retornar a um nível de energia mais baixa. Para realizar isto o elétron libera um fóton, que transporta este excesso de energia, e retorna para um nível de energia correspondente a uma excitação menor. A este processo de emissão de energia damos o nome de **desexcitação**.

Em outras palavras, quando o elétron cai de um nível de maior energia para um de menor energia ele emite um fóton cuja energia é equivalente à diferença de energia entre estes dois níveis. Se o elétron excitado volta para o seu estado original, o átomo emite um fóton com o mesmo comprimento de onda específico daquele que o havia excitado inicialmente.

A imagem ao lado mostra uma excitação atômica causada pela absorção de um fóton e uma desexcitação causada pela emissão de um fóton.

No entanto, as regras para que a excitação ou desexcitação ocorram são muito rígidas. Em cada caso o comprimento de onda da radiação emitida ou absorvida, ou seja o fóton absorvido ou emitido, é **exatamente** a diferença de energia entre as duas órbitas atômicas envolvidas no processo. Esta energia pode ser calculada dividindo o produto de uma constante  $h$ , chamada de constante de Planck e velocidade da luz  $hc$  pelo comprimento de onda da luz. Assim, um átomo somente pode absorver ou emitir certos comprimentos de onda discretos (ou, equivalentemente, frequências ou energias). Podemos dizer, de modo equivalente, que somente certos fótons podem ser absorvidos ou emitidos por um átomo.

Um outro ponto importante, que constantemente leva a interpretações erradas, é o fato de que quando dizemos que um elétron passou de um nível

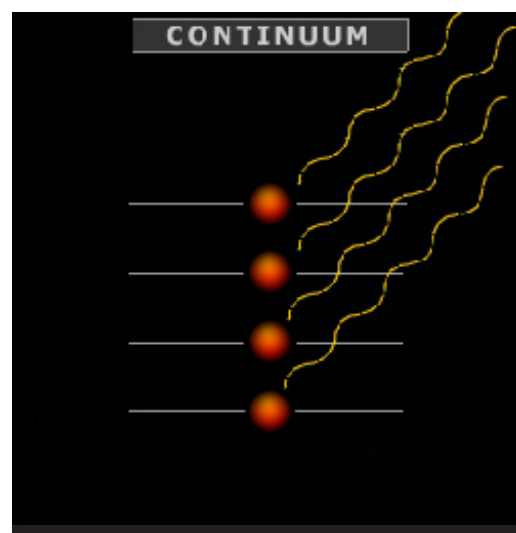


Ilustração da absorção e desexcitação causada pela emissão de um fóton.

quântico para outro contíguo, somos, erroneamente, levados a supor que esta passagem é contínua. Por exemplo, quando dizemos que o elétron passou do nível 2 para o nível 3 podemos ser levados a imaginar que o elétron se deslocou, de modo contínuo, por todo o intervalo de energias que fica entre os dois níveis citados. Isto não é verdade. Lembre-se que uma das regras da mecânica quântica nos diz que não podem existir níveis intermediários entre dois níveis permitidos contíguos. Assim, quando constatamos que o elétron passa do nível 2 para o 3, por exemplo, estamos dizendo que ele “desapareceu” do nível 2 e “reapareceu” no nível 3. Misterioso, não é? Mas esta é a beleza da mecânica quântica.

## **IONIZAÇÃO E PLASMA**

Já vimos que os átomos são eletricamente neutros uma vez que sua carga total negativa, fornecida pelos seus elétrons, é exatamente igual à sua carga positiva dada pelos prótons que formam seus núcleos. Uma grande parte da “matéria normal” que encontramos em torno de nós é desta forma.

Entretanto, particularmente quando existem fontes de energia disponíveis atuando próximas aos átomos e moléculas, eles podem ganhar ou perder elétrons adquirindo, conseqüentemente, uma carga elétrica resultante. Este processo é chamado de **ionização** e é extremamente importante para a astrofísica.

### ***O que é a ionização de um átomo?***

A ionização é o ganho ou a perda de elétrons por um átomo. O processo de ionização pode ocorrer de várias formas, algumas delas até mesmo presentes na nossa vida diária. Quando se passa um pente rapidamente no cabelo constata-se que ele se torna capaz de atrair pequenos pedaços de papel e isto se deve ao processo de ionização que ocorreu por meio do atrito do pente com o seu cabelo. O mesmo ocorre quando você anda sobre um carpete ou tapete e em seguida recebe um pequeno choque elétrico ao tentar abrir uma porta com fechadura metálica.

A perda de elétrons, que é o processo mais comum nos meios ambientes astrofísicos, converte um átomo em um **íon positivamente carregado**. O ganho de elétrons por um átomo o converte em um **íon negativamente carregado**.

É fácil entender esta nomenclatura porque se um átomo perde elétrons, mas não prótons, isto faz com que o número de prótons seja maior do que o número de elétrons. Conseqüentemente, sua carga positiva fica maior do que a carga negativa. Daí chamarmos o átomo que tem estas características de **íon positivo**. No outro caso, quando um átomo ganha um elétron, mas não prótons, o seu número de elétrons fica maior do que o número de prótons. Neste caso o átomo fica carregado negativamente ou seja, ele é um **íon negativo**.

Veja que íon é o átomo que perdeu ou ganhou elétrons e que, portanto, tem carga elétrica total diferente de zero.

E para onde vão os elétrons arrancados dos átomos? Eles ficam sob a forma de elétrons livres até que, ao se aproximarem suficientemente de algum átomo, sejam capturados permanecendo, então, em uma de suas órbitas permitidas.

Na discussão subsequente, usaremos os termos **ionização** e **ionizar** no sentido de perda de elétrons com a conseqüente formação de íons positivos.

Há uma notação padrão na astrofísica para os vários níveis de ionização de um átomo. Como mostrado na tabela seguinte esta notação usa números romanos crescentes para indicar níveis mais altos de ionização.



## NOTAÇÃO PARA GRAUS DE IONIZAÇÃO

SUFIXO	IONIZAÇÃO	EXEMPLOS	NOTAÇÃO DA QUÍMICA
I	não ionizado (neutro)	H I, He I	H, He
II	uma vez ionizado	H II, He II	H <sup>+</sup> , He <sup>+</sup>
III	duplamente ionizado	He III, O III	He <sup>++</sup> , O <sup>++</sup>
...	...	...	...
XVI	15 vezes ionizado	Fe XVI	
...	...	...	...

Fica fácil entender esta notação ao percebermos que o número romano que acompanha o símbolo do elemento químico tem uma unidade a mais do que o seu **grau de ionização**. Por exemplo, Fe XIV significa que o elemento ferro está ionizado  $(14 - 1) = 13$  vezes.

Um outro ponto a notar é que o maior grau de ionização possível de um determinado átomo é dado pelo número de elétrons que ele possui. Deste modo, o hidrogênio, que só tem um elétron, só pode ser ionizado uma vez, formando o H II. No espaço entre as estrelas existem regiões onde o hidrogênio está ionizado. Estas são as “regiões HII”, regiões do espaço interestelar onde a radiação proveniente de estrelas vizinhas ionizou completamente o hidrogênio local. O estudo das regiões H II é um importantíssimo tema na astrofísica. Vemos ao lado uma dessas regiões HII, a nebulosa M16, também chamada de “nebulosa Águia”.

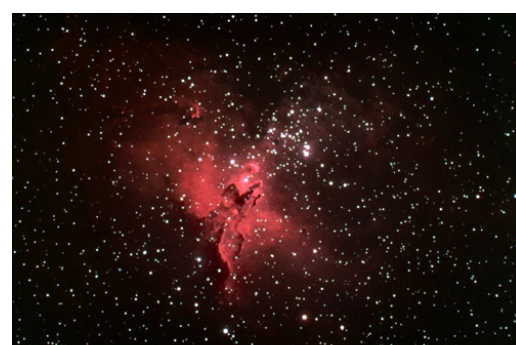
Os processos de ionização são muito importantes para a astrofísica por estarem associados à temperatura. À medida que fornecemos energia a um gás, sua temperatura aumenta. Os elétrons de cada elemento químico que o forma vão absorvendo esta energia, passando para níveis cada vez mais excitados até que se transformam em elétrons livres. O gás passa então a ser formado por átomos cada vez mais ionizados e por elétrons livres. Como somos capazes de determinar no laboratório qual a temperatura correspondente a cada nível de ionização, ao constataremos a presença destes átomos ionizados no espaço sabemos a temperatura dos fenômenos locais.

### O plasma

Se a maioria dos átomos ou moléculas em uma região estão ionizados, o estado resultante da matéria corresponde a um gás que é eletricamente neutro em uma escala global, mas composto microscopicamente de íons carregados positivamente e elétrons (obviamente com carga negativa) que foram arrancados dos átomos quando os íons foram formados. Tal estado da matéria, formado por íons e elétrons livres, é chamado de **plasma**.

A maior parte da matéria nas estrelas está na forma de um estado de plasma.

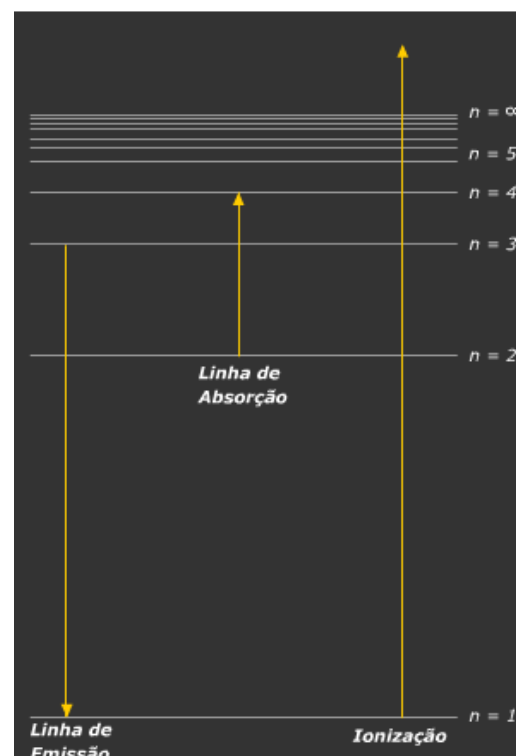
Dissemos anteriormente que o Universo é formado por “matéria normal” ou seja, aquela formada por átomos e moléculas em estado neutro, não ionizados. No entanto, os dados observacionais nos revelam que a forma mais abundante de matéria no Universo não está na forma de átomos ou moléculas neutras mas, ao contrário, no estado de plasma, ou seja, átomos e moléculas ionizados.



copyright: John Flaherty / Adam Block / AURA / NOAO / NSF

Nebula M16, ou "Nebulosa Águia".

Representação das linhas de emissão e absorção com a ocorrência do processo de ionização.



## **UMA NOVA DESCRIÇÃO DA MATÉRIA: A MECÂNICA QUÂNTICA**

A estrutura de um átomo é muito mais complicada do que mostramos até agora. Como já dissemos anteriormente, o modelo atômico de Bohr é apenas uma aproximação. Na verdade não temos, no interior da matéria, esse “aspecto planetário” descrito pelo modelo de Bohr. As partículas atômicas seguem regras bastante particulares, muito diferentes daquelas a que estamos acostumados ao estudarmos o nosso Universo macroscópico.

No interior da matéria acontecem fenômenos que, vistos sob o ponto de vista da física clássica, poderiam sugerir “ficção científica”. Quando foi que você viu um carro, um ônibus, ou mesmo uma pessoa atravessar uma parede sem destruí-la? Nunca, e jamais verá um fenômeno como esse porque ele é proibido pelas leis da física clássica. A isto damos o nome de barreira de potencial e dizemos que corpos macroscópicos não podem penetrar em uma barreira de potencial.

No entanto o domínio da física atômica e nuclear é tão emocionante que fenômenos como este são permitidos. E pior, acontecem! As partículas que formam os átomos, chamadas de **partículas elementares**, podem ultrapassar estas barreiras de potencial, podem “sumir” de um lugar e “aparecer” em outro. Essas partículas elementares também podem, espontaneamente, se transformar em outras partículas. Isto jamais acontece no nosso mundo macroscópico, algo como se, de repente, um pão se transformasse em um biscoito, um bolo e um doce!

O que acontece no nosso mundo diário, no domínio da física clássica, quando dois carros colidem? Ficamos com dois carros amassados e um grande prejuízo. No ambiente atômico, novas partículas, inteiramente diferentes, podem ser criadas a partir da colisão de duas ou mais partículas. É algo como se dois carros colidissem e o resultado fosse um ônibus, um trem e uma bicicleta, algo impossível de ser imaginado no nosso mundo macroscópico.

Estes fenômenos atômicos, por mais incríveis que pareçam, ocorrem nos laboratórios e a física clássica, aquela descoberta por Isaac Newton e que já havia demonstrado grande poder na solução dos problemas do Universo em grande escala, mostrou-se impotente perante eles. Para descrever, explicar e analisar os fenômenos que ocorriam no interior da matéria foi preciso criar a mecânica quântica, uma sofisticada teoria física que permite aos cientistas estudar o interior dos átomos.

### **As Regras da Mecânica Quântica**

Não é simples apresentar os princípios da mecânica quântica sem que surja uma avalanche de dúvidas. Suas regras são sofisticadas e muitas vezes surpreendentes. No entanto, por mais estranhas que pareçam, elas funcionam muito bem e suas previsões são facilmente demonstradas nos laboratórios.

Não nos aprofundaremos nos princípios da mecânica quântica. Ao invés disso, somente apresentaremos algumas noções bem fundamentais que serão úteis mais tarde.

Estas são algumas regras da Mecânica Quântica:

Várias características físicas que ocorrem no nível atômico são *quantizadas*. Isto significa que elas podem ter somente certos valores bem determinados, que chamamos de **valores discretos**. Por exemplo, as energias disponíveis

para um átomo são limitadas a valores bem específicos.

Para simplificar, vamos pensar de novo no modelo de Bohr para o átomo. As regras da mecânica quântica dizem que os elétrons só têm permissão para percorrerem certas órbitas muito bem determinadas. Assim, em um átomo de hidrogênio, o elétron no estado de energia mais baixa percorre uma órbita com um raio de cerca de 0,5 Å. A próxima órbita permitida, ou seja, energia permitida para o elétron, tem um raio de cerca de 2 Å, e assim por diante. A mecânica quântica nos assegura que, neste caso do átomo de hidrogênio, ou o elétron está na órbita de 0,5 Å ou está na órbita de 2 Å, etc. Ele **nunca** será encontrado em uma órbita entre estes valores. Órbitas ou energias intermediárias, aquelas que poderiam estar situadas entre esses valores, não são permitidas de modo algum!

Em um determinado instante, duas ou mais partículas **absolutamente idênticas** não podem ocupar um mesmo estado particular de energia ou seja, o mesmo nível de energia de um átomo. Partículas que ocupam um mesmo estado de energia em um átomo **têm que diferir por alguma propriedade intrínseca**. De modo algum elas podem ser totalmente idênticas. Isto é chamado de “Princípio de Exclusão de Pauli”, em homenagem ao físico alemão Wolfgang Pauli que o descobriu.

Por exemplo, se voltarmos a usar o modelo de Bohr para representar o átomo, na primeira órbita atômica permitida, aquela de energia mais baixa, somente podemos encontrar dois elétrons. Os dois são elétrons mas eles diferem pelo fato de que um deles estará “girando” na direção dos ponteiros do relógio e o outro estará “girando” na direção contrária aos ponteiros de um relógio. Porém deve-se tomar cuidado com esta analogia pois ela não é correta. Na verdade o elétron não é uma “bolinha” que gira em torno do seu eixo. A mecânica quântica nos mostra que o elétron possui certas propriedades que, matematicamente, nos levam a pensar em rotação. No entanto, a “rotação” do elétron é muito mais complicada do que a rotação de uma bolinha, como o modelo de Bohr nos leva a imaginar.

A luz, os prótons, os elétrons e outras partículas exibem tanto comportamentos de uma onda como de uma partícula. Por exemplo, em alguns fenômenos o fóton (nome dado à menor partícula de “luz”) se comporta como uma onda e obedece às leis da óptica física, enquanto que em outras experiências o seu comportamento é o de uma partícula obedecendo às conhecidas regras de colisões entre partículas. Como o fóton decide se vai se comportar como uma onda ou como uma partícula é um dos mistérios ainda não resolvidos pela física quântica. A este comportamento irregular da matéria, sendo às vezes onda e às vezes partícula, damos o nome de “Dualidade Onda-Partícula”.

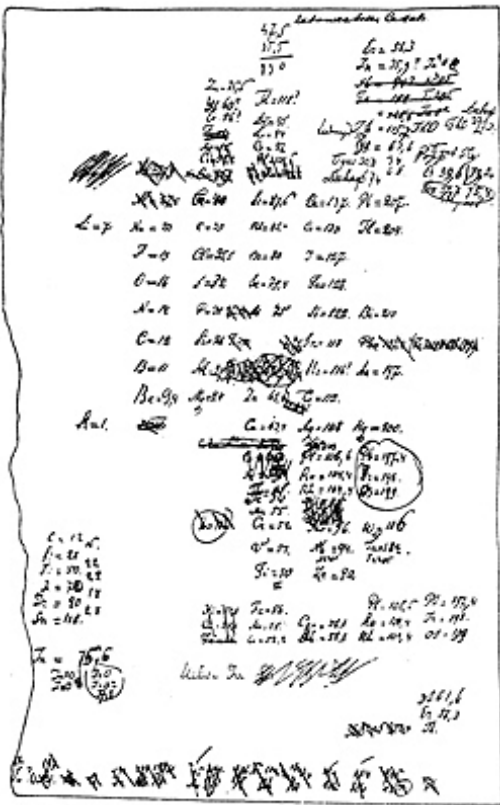
Os fenômenos que ocorrem no interior da matéria são de natureza *probabilística* ao invés de *determinística*. Isto significa que, mesmo sabendo tudo sobre um átomo não podemos prever exatamente o que ele vai fazer a seguir. As leis da física atômica somente podem apresentar “probabilidades” para comportamentos específicos das partículas que formam a matéria. Este comportamento é totalmente diferente daquele que estamos acostumados no mundo macroscópico.

## A TABELA PERIÓDICA E A MECÂNICA QUÂNTICA

O que descrevemos acima como sendo as regras da mecânica quântica pode parecer estranho mas é assim que a matéria se comporta.

A física moderna é realmente surpreendente. A mecânica quântica, com suas estranhas quantizações e regras de exclusão, consegue explicar bastante bem os fenômenos que ocorrem nos átomos. Muitos resultados de observações e experiências envolvendo o interior da matéria, que até então eram inexplicáveis, foram compreendidos com o auxílio da mecânica quântica. Por exemplo, somente após a quantização dos níveis de energia atômica e o aparecimento do Princípio de Exclusão de Pauli é que conseguimos explicar o porque da existência da chamada Tabela Periódica dos elementos químicos.

Ela resume as propriedades e a distribuição dos elementos químicos existentes na natureza e foi idealizada pelo químico russo Dimitri Ivanovich Mendeleev. Sem o auxílio da mecânica quântica é impossível saber porque os elementos se distribuem dessa maneira.



Primeiras anotações de Mendeleev sobre a tabela periódica, feitas em 17 de fevereiro de 1869.

1 IA Novo Original																	18 VIIIA																														
1 H Hidrogênio 1.00794																	2 He Hélio 4.002602																														
3 Li Lítio 6.941	4 Be Berílio 9.012182															10 Ne Neônio 20.1797																															
11 Na Sódio 22.989770	12 Mg Magnésio 24.3050	13 Al Alumínio 26.981538	14 Si Silício 28.0855	15 P Fósforo 30.973761	16 S Enxofre 32.066	17 Cl Cloro 35.453	18 Ar Argônio 39.948																																								
19 K Potássio 39.0983	20 Ca Cálcio 40.078	21 Sc Escândio 44.955910	22 Ti Titânio 47.887	23 V Vanádio 50.9415	24 Cr Cromo 51.9961	25 Mn Manganês 54.938049	26 Fe Ferro 55.8457	27 Co Cobalto 58.933200	28 Ni Níquel 58.6934	29 Cu Cobre 63.546	30 Zn Zinco 65.409	31 Ga Gálio 69.723	32 Ge Germânio 72.64	33 As Arsênio 74.92160	34 Se Selênio 78.96	35 Br Bromo 79.904	36 Kr Criptônio 83.798																														
37 Rb Rubídio 85.4678	38 Sr Estrôncio 87.62	39 Y Ítrio 88.90585	40 Zr Zircônio 91.224	41 Nb Níbio 92.90638	42 Mo Molibdênio 95.94	43 Tc Tecnécio (98)	44 Ru Rutênio 101.07	45 Rh Ródio 102.90550	46 Pd Paládio 106.42	47 Ag Prata 107.8682	48 Cd Cádmio 112.411	49 In Índio 114.818	50 Sn Estanho 118.710	51 Sb Antimônio 121.760	52 Te Telúrio 127.60	53 I Iodo 126.90447	54 Xe Xenônio 131.293																														
55 Cs Césio 132.90545	56 Ba Bário 137.327	57 to 71																																													
87 Fr Frâncio (223)	88 Ra Rádio (226)	89 to 103																																													
Massas atômicas em parênteses são aquelas do isótopo mais estável ou comum.																																															
<table border="1"> <tr> <td>57 La Lantânio 138.9055</td> <td>58 Ce Césio 140.116</td> <td>59 Pr Praseodímio 140.90765</td> <td>60 Nd Neodímio 144.24</td> <td>61 Pm Promécio (145)</td> <td>62 Sm Samário 150.36</td> <td>63 Eu Európio 151.964</td> <td>64 Gd Gadolínio 157.25</td> <td>65 Tb Térbio 158.92534</td> <td>66 Dy Díprolio 162.500</td> <td>67 Ho Hólmio 164.93032</td> <td>68 Er Érbio 167.259</td> <td>69 Tm Tulio 168.93421</td> <td>70 Yb Ítrio 173.04</td> <td>71 Lu Lutécio 174.967</td> </tr> <tr> <td>89 Ac Actínio (227)</td> <td>90 Th Tório 232.0381</td> <td>91 Pa Protactínio 231.03688</td> <td>92 U Urânio 238.02891</td> <td>93 Np Neptúnio (237)</td> <td>94 Pu Plutônio (244)</td> <td>95 Am Americio (243)</td> <td>96 Cm Cúrio (247)</td> <td>97 Bk Berquélio (247)</td> <td>98 Cf Califórnio (251)</td> <td>99 Es Einstênio (252)</td> <td>100 Fm Férmio (257)</td> <td>101 Md Mendelévio (258)</td> <td>102 No Nobelio (259)</td> <td>103 Lr Laurêncio (262)</td> </tr> </table>																		57 La Lantânio 138.9055	58 Ce Césio 140.116	59 Pr Praseodímio 140.90765	60 Nd Neodímio 144.24	61 Pm Promécio (145)	62 Sm Samário 150.36	63 Eu Európio 151.964	64 Gd Gadolínio 157.25	65 Tb Térbio 158.92534	66 Dy Díprolio 162.500	67 Ho Hólmio 164.93032	68 Er Érbio 167.259	69 Tm Tulio 168.93421	70 Yb Ítrio 173.04	71 Lu Lutécio 174.967	89 Ac Actínio (227)	90 Th Tório 232.0381	91 Pa Protactínio 231.03688	92 U Urânio 238.02891	93 Np Neptúnio (237)	94 Pu Plutônio (244)	95 Am Americio (243)	96 Cm Cúrio (247)	97 Bk Berquélio (247)	98 Cf Califórnio (251)	99 Es Einstênio (252)	100 Fm Férmio (257)	101 Md Mendelévio (258)	102 No Nobelio (259)	103 Lr Laurêncio (262)
57 La Lantânio 138.9055	58 Ce Césio 140.116	59 Pr Praseodímio 140.90765	60 Nd Neodímio 144.24	61 Pm Promécio (145)	62 Sm Samário 150.36	63 Eu Európio 151.964	64 Gd Gadolínio 157.25	65 Tb Térbio 158.92534	66 Dy Díprolio 162.500	67 Ho Hólmio 164.93032	68 Er Érbio 167.259	69 Tm Tulio 168.93421	70 Yb Ítrio 173.04	71 Lu Lutécio 174.967																																	
89 Ac Actínio (227)	90 Th Tório 232.0381	91 Pa Protactínio 231.03688	92 U Urânio 238.02891	93 Np Neptúnio (237)	94 Pu Plutônio (244)	95 Am Americio (243)	96 Cm Cúrio (247)	97 Bk Berquélio (247)	98 Cf Califórnio (251)	99 Es Einstênio (252)	100 Fm Férmio (257)	101 Md Mendelévio (258)	102 No Nobelio (259)	103 Lr Laurêncio (262)																																	

Tabela periódica dos elementos químicos.

## AS FORÇAS QUE ATUAM NA NATUREZA

# 27

### As forças que atuam na natureza

#### As Leis de Newton para o movimento dos corpos

No nosso dia-a-dia sempre vemos, à nossa volta, corpos em movimento. Observando o céu notamos que os corpos celestes também se movem. Embora as estrelas pareçam estar fixas na esfera celeste, a Lua e os planetas demonstram, muito evidentemente, que os objetos celestes se deslocam no espaço.

Curiosamente, as mesmas leis que regem o movimento dos corpos sobre o nosso planeta também conseguem descrever o movimento dos corpos celestes.

Estas leis básicas do movimento, na verdade apenas três leis, foram descobertas pelo físico inglês Isaac Newton.

#### Primeira Lei de Newton

Esta lei, também chamada de **Lei da Inércia**, fala sobre a ação que deve ser realizada para manter um corpo em movimento.

*“Um corpo permanece em repouso ou em movimento retilíneo uniforme a menos que haja uma influência externa, ou seja uma **força**, atuando sobre ele.”*

Assim, se não há nenhuma força agindo:

- um corpo em repouso permanecerá em repouso
- um corpo que se move continuará se movendo com a mesma velocidade e na mesma direção

Então porque quando um carro é empurrado ele anda um pouco e para? Isto ocorre devido à presença de forças, também externas, que atuam sobre o carro no sentido contrário ao seu movimento. Estas forças, chamadas de **forças de atrito**, são as responsáveis pelo fato do carro parar. Se as forças de atrito não existissem, ao aplicarmos uma força sobre um corpo ele iniciaria um movimento que duraria para sempre (felizmente para nós existe a força de atrito. Imagine por que?).

#### Observações:

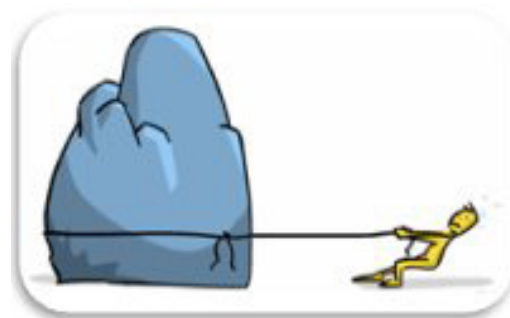
- veja que a primeira lei de Newton fala de “movimento **retilíneo uniforme**”. A palavra “uniforme” chama a atenção para o fato de que a velocidade do corpo é constante. A palavra “retilíneo” significa obviamente que o corpo não está realizando qualquer curva uma vez que o corpo que segue uma trajetória curva está acelerado.
- não confundir velocidade com aceleração. Aceleração é uma variação da velocidade de um corpo em um intervalo de tempo. No entanto, esta variação que dá origem à aceleração tanto pode ser no “valor” da velocidade quanto na “direção” da velocidade.

#### Segunda Lei de Newton

Esta lei estabelece uma relação entre os conceitos de **força**, **massa** e **aceleração**.

Estes três conceitos são fundamentais para a física:

- **massa**: é uma medida da inércia de um corpo. Ela está relacionada com a dificuldade que temos para colocar um corpo em movimento. A massa de um corpo é representada pela letra **m**.



1ª Lei de Newton.



2ª Lei de Newton.

- **força:** é a influência externa sobre um corpo. Ela é representada pela letra  $F$ .
- **aceleração:** é uma variação no movimento. Esta variação pode ser de aumento ou diminuição na velocidade de um corpo e/ou de mudança na direção de deslocamento do corpo. Ela é representada pela letra  $a$ .

Se considerarmos corpos que se movem com velocidades muito menores que a velocidade da luz, a massa do corpo é constante e a segunda lei de Newton pode então ser escrita como:

$$\mathbf{F} = m \mathbf{a}$$

#### Observações:

- não confundir **massa** com **peso**: massa é a quantidade de matéria em um corpo. Massa é uma grandeza fundamental da física. Peso é a ação da gravidade sobre um corpo de massa  $m$ . Deste modo, o peso de um corpo na Terra é dado pela **massa** do corpo multiplicada pela aceleração da gravidade na superfície do nosso planeta.
- o conceito de “força” não está associado apenas a algo externo a um corpo. Também existem forças atuando no interior de todos os corpos.

### Terceira Lei de Newton

Também é conhecida como **Lei da Ação e Reação**.

*Quando um corpo A exerce uma força sobre um corpo B, o corpo B exercerá uma força igual e em sentido oposto sobre o corpo A.*



3ª Lei de Newton.

Se chamarmos de  $\mathbf{F}_{AB}$  a força que um corpo A exerce sobre um corpo B então a terceira lei de Newton nos assegura que o corpo B exercerá uma força de mesmo valor e de sentido contrário sobre o corpo A, que representamos por  $-\mathbf{F}_{BA}$ .

O sinal negativo caracteriza o sentido contrário que esta força tem em relação à primeira força.

A Terceira Lei de Newton, é escrita como:

$$\mathbf{F}_{AB} = - \mathbf{F}_{BA}$$

Esta terceira lei, na verdade, nos revela como é conservado o **momentum** de um corpo. Momentum (também chamado de “momentum linear”) é definido como o produto da massa do corpo pela sua velocidade.

É com base na Terceira Lei de Newton que explicamos porque um foguete consegue voar.

### AS FORÇAS FUNDAMENTAIS DA NATUREZA

A partir das definições acima das três leis de Newton poderíamos facilmente ser levados a pensar que elas descrevem todos os fenômenos que ocorrem na natureza envolvendo forças.

Isto não é verdade. As leis de Newton descrevem a ação das forças sobre os corpos de grande tamanho, os chamados corpos macroscópicos. No entanto elas não dizem quais são as **forças fundamentais**, também chamadas de **interações fundamentais**, que ocorrem em todas as escalas de tamanho do Universo, sejam elas microscópicas ou macroscópicas.

Quando estudamos o interior da matéria, os átomos e as moléculas, vemos fenômenos muito diferentes daqueles que acontecem no nosso mundo diário. Para descrever estes fenômenos foi necessário introduzir diversos outros conceitos de forças na física.

Mas afinal, por que isso interessa à astronomia? Pelo simples fato de que **todos** estes fenômenos aparecem em processos físicos que determinam a existência dos corpos celestes.

Sabemos que existem apenas quatro forças, ou interações, fundamentais na natureza. Todos os fenômenos físicos que ocorrem na natureza são produzidos por estes quatro tipos de forças, ou interações, fundamentais e cada uma delas é descrita por uma teoria física. Elas são:

<b>INTERAÇÃO GRAVITACIONAL</b>	<b>INTERAÇÃO ELETROMAGNÉTICA</b>	<b>INTERAÇÃO FRACA</b>	<b>INTERAÇÃO FORTE</b>
------------------------------------	--------------------------------------	----------------------------	----------------------------

## **AÇÃO À DISTÂNCIA E CAMPOS**

Para que haja uma interação entre corpos é preciso que cada um deles saiba o que está acontecendo, ou o que foi mudado, no outro. É preciso que haja uma *troca de informações* entre eles. Por exemplo, um deles se move e, de algum modo, esta informação é levada até o outro corpo que então reage a esta mudança de acordo com as leis físicas correspondentes. Antigamente os físicos pensavam que esta informação era instantânea. Isto quer dizer que a propagação da informação se dava com velocidade infinita. Este era, basicamente, o conceito de **ação à distância**.

No entanto, a partir do fato de que existe uma velocidade máxima para os corpos materiais, que é a velocidade da luz, os cientistas concluíram que esta informação não podia se propagar com velocidade infinita mas sim com esta velocidade máxima. Foi então introduzido o conceito de **campo**.

O conceito de campo é muito fácil de ser entendido. Segundo a física atual todo corpo cria no espaço à sua volta uma perturbação que é o campo gerado por alguma propriedade intrínseca que ele possui. Por exemplo, todo corpo que tem massa gera um campo gravitacional à sua volta, todo corpo que tem carga elétrica cria um campo elétrico à sua volta, etc. É este campo que irá interagir com o campo criado pelo outro corpo de modo que informações sejam trocadas entre eles.

O conceito de campo é fundamental para a física. O conceito de força, ou interação, está intimamente associado ao conceito de campo. Todas as interações fundamentais se revelam por meio da ação dos campos, por elas gerados, sobre outros corpos.

Mas, como se dá a interação entre os campos? Para a física moderna um campo interage com outro por intermédio da troca de partículas chamadas **mediadores**. Assim, duas partículas que possuem cargas elétricas criam campos à sua volta e estes campos interagem por meio da troca de partículas mediadoras chamadas fótons.

Os conceitos de **campo** e de **mediadores** são duas conquistas fundamentais da física moderna.

A tabela abaixo mostra, esquematicamente, detalhes sobre estas forças que serão logo explicados:

FORÇA (OU INTERAÇÃO) FUNDAMENTAL	INTENSIDADE	TEORIA	MEDIADOR
FORTE	10	cromodinâmica quântica	gluon
ELETROMAGNÉTICA	$10^{-2}$	eletrodinâmica	fóton
FRACA	$10^{-13}$	flavordinâmica	$W^\pm$ e $Z^0$
GRAVITACIONAL	$10^{-42}$	geometrodinâmica	graviton

É necessário explicar, um pouco, o conteúdo da tabela.

1. **Intensidade:** Os valores acima atribuídos para as intensidades das forças não devem ser considerados de modo absoluto. Serão vistos valores bastante diferentes em vários livros, em particular no que diz respeito à força fraca. O cálculo desta intensidade depende da natureza da fonte e a que distância estamos fazendo a medição. O que é importante notar é a razão entre estas interações: a força gravitacional é, de longe, a mais fraca entre todas, porém é a de maior alcance, sendo a responsável pela estabilidade dinâmica de todo o Universo.
2. **Teoria:** Vemos na tabela que cada força está associada a uma teoria física. Elas serão comentadas mais adiante.
3. **Mediadores:** Já comentamos rapidamente que, após a física ter abandonado o conceito de “ação a distância”, foi introduzido o conceito de “campo”. Os físicos passaram a entender que cada partícula cria à sua volta uma perturbação, seu “campo”, que é sentido pelas outras partículas. Foi uma parte da física chamada “Teoria Quântica de Campos (TQC)” que introduziu o conceito de “mediadores”.

Segundo a TQC cada uma das forças que existem na natureza é mediada pela troca de uma partícula que é chamada de “mediador”. Estes mediadores transmitem a força entre uma partícula e outra. Assim, a força gravitacional é mediada por uma partícula chamada graviton. A força eletromagnética é mediada pelo fóton, a força forte pelos gluons e as forças fracas pelas partículas  $W^\pm$  e  $Z^0$ , que são chamadas de **bósons vetoriais intermediários**.

A descrição que será vista a seguir sobre as forças que regem todos os fenômenos que ocorrem no Universo é muito elegante mas, como você irá notar, ela complica ainda mais o estudo das interações entre as partículas. Por exemplo, antes descrevíamos a interação entre dois prótons como sendo a interação entre duas partículas. Hoje, sabendo que os prótons são partículas compostas por três quarks, vemos que a interação entre dois prótons, regida pelas interações fortes, é, na verdade, uma interação entre seis quarks que trocam gluons, os mediadores deste tipo de interação, incessantemente durante todo o processo. E é bom lembrar que existem oito tipos de gluons. Como você pode ver, não existe simplicidade na maneira como a física moderna descreve a matéria e suas interações.



## A FORÇA GRAVITACIONAL

Ao observarmos o movimento dos corpos celestes vemos que eles não são objetos errantes que seguem trajetórias quaisquer no espaço. Todos eles, sem exceção, percorrem órbitas bem determinadas obedecendo a leis gerais que são válidas em todo o Universo. Isto é importante por nos indicar que os corpos celestes estão sob a ação de forças que os mantêm em suas órbitas. Melhor ainda, sabemos que os objetos na Terra interagem e conhecemos as leis que regem essas interações.

Observamos que ao usarmos a primeira lei de Newton e aplicarmos uma força sobre um corpo qualquer, uma pedra por exemplo, atirando-a para cima ela retorna à Terra. Por que isso acontece? Se a única força atuante sobre a pedra fosse o atrito com o ar que forma a nossa atmosfera, a pedra diminuiria a sua velocidade até parar e permaneceria flutuando no ar. No entanto, isso não ocorre. A pedra volta para a superfície da Terra. Uma situação tão simples quanto essa nos mostra que a Terra está exercendo algum tipo de força que atrai a pedra de volta para ela. O mesmo tipo de interação deve ocorrer entre todos os corpos celestes e a ela damos o nome de **interação gravitacional**.

A descoberta da lei que nos mostra de que maneira os corpos celestes interagem foi concebida por Isaac Newton. Aplicando uma ferramenta matemática que ele havia recentemente desenvolvido, chamada *fluxions* e que hoje é conhecida como “cálculo diferencial”, à órbita da Lua em torno da Terra, Newton foi capaz de determinar que a força da gravidade deve depender do *inverso do quadrado* da distância entre a Terra e a Lua.

Ao mesmo tempo, hoje sabemos que, segundo a Terceira Lei de Newton, uma vez que a gravidade é uma força exercida por um corpo sobre outro ela deve atuar de modo recíproco entre as duas massas envolvidas.

### A Teoria da Gravitação de Isaac Newton

Newton deduziu então que:

*“A força de atração gravitacional entre dois corpos de massas  $M$  e  $m$  é diretamente proporcional ao produto de suas massas e inversamente proporcional ao quadrado da distância que os separa”.*

Para transformar a proporcionalidade em igualdade Newton introduziu uma “constante de proporcionalidade” na sua equação. Esta constante de proporcionalidade é a **constante de gravitação** de Newton, representada pela letra **G** e que tem o valor:

$$G = 6,67 \times 10^{-8} \text{ dinas centímetro}^2/\text{grama}^2$$

Na equação acima “dina” é uma unidade de medida de forças. Ela corresponde a gramas.centímetro/segundo<sup>2</sup>. Uma outra unidade de força também comumente usada é o “newton” que equivale a quilograma.metro/segundo<sup>2</sup>.

Pela lei da gravitação universal a força de atração gravitacional entre a Terra e a Lua é dada por:

$$F = G \frac{Mm}{d^2}$$



onde  $G$  é a constante gravitacional,  $M$  é a massa da Terra,  $m$  é a massa da Lua, e  $d$  é a distância entre a Terra e a Lua.

#### Observações:

- a gravidade é a mais fraca entre todas as forças fundamentais.
- a gravidade é uma força de longo alcance. Veja, na equação acima, que não há qualquer limite superior para o valor de  $d$ , que é a distância entre os corpos.
- a gravidade é uma força somente **atractiva**. Não existe repulsão gravitacional.
- a história de que Newton teria notado a existência da lei da gravitação a partir da queda de uma maçã é, quase certamente, duvidosa.

É por causa dessas características que a gravidade domina várias áreas de estudo na astronomia. É a ação da força gravitacional que determina as órbitas dos planetas, estrelas e galáxias, assim como os ciclos de vida das estrelas e a evolução do próprio Universo, como veremos mais tarde.

### **A Constante Gravitacional da equação de Newton**

A gravidade é uma força tão fraca que a constante  $G$  que aparece na equação da gravitação de Newton não podia ser medida na época em que a equação foi proposta.

O primeiro a estimar o valor de  $G$  foi o astrônomo Nevil Maskelyne. Para fazer isto ele procurou usar duas massas bastante diferentes de tal modo que a força gravitacional entre elas pudesse ser medida. Nada melhor do que a massa de uma montanha e a de um pedaço de chumbo preso a uma linha. Certamente, a atração gravitacional entre estas duas massas provocaria uma deflexão na linha que sustentava o chumbo.

Em 1774, Maskelyne aproximou o seu peso de chumbo das encostas inclinadas do Monte Schiehallion, na Escócia, e mediu a deflexão da linha ou seja, a ação gravitacional entre a montanha e o peso de chumbo. Como o monte Chiehallion tinha uma forma muito regular, Maskelyne foi capaz de estimar sua massa e, como ele conhecia a massa do peso de chumbo, foi possível então determinar o valor da constante gravitacional  $G$ .

No entanto, o físico inglês Henry Cavendish foi o primeiro a medir  $G$  no laboratório.

### **A ação da gravidade nas nossas vidas**

E de que modo a ação da gravidade se apresenta na nossa vida? O simples fato de se permanecer de pé na superfície da Terra é resultado da existência da força gravitacional. É a ação da gravidade da Terra que nos faz permanecer sobre ela. É claro que se tem uma pequena liberdade para saltar na vertical, mas logo é obrigado a retornar à sua superfície.

E que outra ação da gravidade nos afeta diretamente? A ação gravitacional entre a Terra e a Lua é uma dessas ações. É ela que produz o conhecido fenômeno das marés. Além disso, como a Lua é um satélite de grande massa, se comparado com os outros satélites do Sistema Solar, a atração gravitacional entre ela e a Terra serve como elemento estabilizador da rotação do nosso planeta em torno do seu eixo. No entanto, a Lua está se afastando da Terra e a mudança desta ação gravitacional, daqui a milhares de anos, provocará uma alteração no eixo de rotação da Terra. Esta mudança se refletirá sob a forma de fortes alterações climáticas no nosso planeta.



Nevil Maskelyne (1732 - 1811).



Henry Cavendish (1731 - 1810).

## A Gravitação Quântica

Já vimos que a teoria clássica da gravitação é descrita pela **lei de Newton da Gravitação Universal**. Sua generalização relativística é a teoria da Gravitação de Einstein, também chamada de Teoria da Relatividade Geral de Einstein. Na verdade, a interação gravitacional seria melhor chamada de **Geometrodinâmica**, termo proposto pelo físico norte-americano John Wheeler, uma vez que a relatividade geral geometriza a gravitação. No entanto, para descrever os estágios iniciais da formação do Universo precisamos de uma **teoria quântica da gravitação**.

Até agora os físicos ainda não possuem uma teoria como essa, apesar dos enormes esforços desenvolvidos para isto. As dificuldades para criar uma teoria quantizada para a gravitação têm sido muito grandes: a matemática envolvida é excepcionalmente sofisticada e os conceitos físicos estão na fronteira do nosso conhecimento e imaginação.

## A FORÇA ELETROMAGNÉTICA

A interação eletromagnética, ou força eletromagnética, é aquela que ocorre quando corpos possuidores de cargas elétricas e/ou corpos magnetizados interagem.

As interações eletromagnéticas são descritas por uma parte da física chamada **eletrodinâmica**. Esta é a teoria física que descreve os fenômenos elétricos e magnéticos, ou seja, todos os processos de interação que ocorrem entre corpos carregados que interagem por meio de forças eletromagnéticas. A formulação clássica da Eletrodinâmica foi feita por James Clerk Maxwell.

### Interação entre corpos carregados: a lei de Coulomb

Sabemos que os elétrons têm carga negativa enquanto que os prótons têm carga positiva. Desta forma, quando dois ou mais prótons, elétrons ou uma mistura destas partículas são colocadas próximas, sempre ocorre um processo de interação eletromagnética.

A interação elétrica não ocorre apenas entre elétrons e prótons mas sim entre dois ou mais corpos quaisquer que possuam carga elétrica.

Já era conhecido que corpos possuidores do mesmo tipo de carga elétrica se repeliam, enquanto que se as cargas fossem diferentes eles eram atraídos.

Foi o físico francês Charles Augustin Coulomb que conseguiu, a partir de experiências realizadas em seu laboratório, colocar estas observações sobre o comportamento de corpos carregados em uma forma matemática.

Segundo Coulomb, a força elétrica entre duas partículas carregadas é dada por:

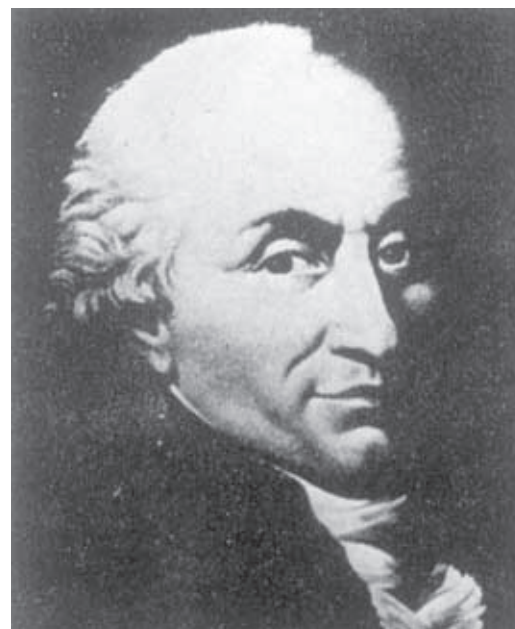
$$F = K \frac{q q'}{d^2}$$

onde  $q$  e  $q'$  são as cargas elétricas dos dois corpos,  $d$  é a distância entre os corpos e  $k$  é uma constante para a eletricidade (análoga à constante  $G$  que surge quando estudamos a gravidade). Esta é a chamada **lei de Coulomb**.

Observa-se que, uma vez que as cargas elétricas podem ter sinais diferentes, a força calculada pode ser positiva ou negativa. Se ela for positiva isso significa que os corpos têm cargas elétricas com o mesmo sinal e, portanto, se repelem. Se o sinal da força for negativo, isso nos mostra que as cargas elétricas possuem sinais contrários e, portanto, os corpos carregados se atraem.



John Archibald Wheeler (1941 - 2008).



Charles Augustin Coulomb (1736 - 1806).

### Forças Eletromagnéticas



Olhe as duas expressões abaixo:

$$F = G \frac{Mm}{d^2} \quad F = K \frac{q q'}{d^2}$$

A da esquerda representa a interação gravitacional entre dois corpos de massa  $M$  e  $m$ . A da direita mostra a interação elétrica entre dois corpos com cargas  $q$  e  $q'$ . Rapidamente notamos que estas equações possuem a mesma forma. No entanto, existem algumas diferenças muito importantes entre elas:

- há somente um tipo de massa, enquanto que existem dois tipos de carga elétrica - positiva e negativa - que se comportam de maneiras opostas.
- a gravitação é puramente atrativa, mas a força elétrica pode ser ou atrativa ou repulsiva - cargas elétricas com o mesmo sinal se repelem, cargas elétricas com sinais opostos se atraem.
- cargas que se movem produzem e respondem à **força magnética**. Ocorre que as forças elétricas e magnéticas são manifestações diferentes de um mesmo fenômeno físico. Por esta razão os astrônomos e físicos falam de uma “força eletromagnética”.

Nota-se também que a lei de Coulomb nos mostra que a interação elétrica é uma força que tem alcance infinito, uma vez que nenhum limite superior é estabelecido sobre o valor de  $d$ .

### **As equações de Maxwell**

As interações eletromagnéticas, ou seja, o conjunto de fenômenos que ocorrem com corpos que possuem carga elétrica ou magnetismo, são regidas pelas chamadas **equações de Maxwell**.

James Clerk Maxwell foi um físico escocês que viveu entre 1831 e 1879 e notou que todos os fenômenos elétricos e magnéticos que ocorrem na natureza podem ser descritos por um conjunto de apenas quatro equações!

As equações de Maxwell não são simplesmente matemáticas, elas estabelecem uma íntima relação entre os fenômenos elétricos e magnéticos, mostrando que estes não são fenômenos isolados. Os fenômenos elétricos produzem os efeitos magnéticos e vice-versa. É por esta razão que os fenômenos elétricos e magnéticos passaram a ser tratados por uma única teoria chamada **eletromagnetismo**.

Saiba mais sobre as equações de Maxwell, propostas por ele em 1865, no final deste tópico.

### **A luz como uma onda**

Também foi Maxwell que mostrou que a radiação eletromagnética, ou seja a luz, se propaga como uma onda. A partir de transformações matemáticas que ele realizou sobre as quatro equações do eletromagnetismo, Maxwell mostrou que elas se reduzem a uma equação de propagação de um fenômeno ondulatório. Desta forma, a luz se propaga no espaço como uma onda e é por este motivo que a eletrodinâmica é o estudo das propriedades das **ondas eletromagnéticas**.

A luz que recebemos das estrelas nada mais é do que a radiação eletromagnética produzida por fenômenos físicos que ocorrem no seu interior e, posteriormente, emitida por elas. Estas ondas eletromagnéticas se propagam no espaço interestelar e chegam até nós permitindo-nos ver os objetos celestes.



James Clerk Maxwell (1831 - 1879).

Também foi Maxwell que mostrou, a partir da obtenção da equação de propagação ondulatória da luz, que a velocidade desta propagação, ou seja a velocidade da luz, no vácuo é

$$v_{\text{luz}} = c = 300000 \text{ km/s}$$

### O alcance da força eletromagnética

Vimos anteriormente que a força eletromagnética é cerca de  $10^{40}$  vezes maior do que a força da gravidade. Se ambas são forças de longo alcance, então porque motivo a gravitação, e não o eletromagnetismo, domina as interações entre os corpos celestes? A gravitação domina essas interações porque a maioria das regiões do espaço são eletricamente neutras e, portanto, não sentem a interação eletromagnética.

A diferença de intensidade entre as forças gravitacional e eletromagnética não é aparente por causa da natureza dual (atrativa/repulsiva) dessa última. No entanto, no nosso dia a dia, as forças que nos impedem de cair no chão ou de uma cadeira, as forças que são exercidas quando se empurra um objeto (fricção, etc.) todas são exemplos da força eletromagnética em ação.

### A Eletrodinâmica Quântica

A teoria clássica da eletrodinâmica, construída por Maxwell, já era consistente com a teoria da relatividade especial de Einstein.

No entanto, para aplicar estas equações aos fenômenos eletromagnéticos que ocorriam entre as várias partículas elementares, foi necessário construir uma nova teoria envolvendo a mecânica quântica. O “casamento” do eletromagnetismo com a mecânica quântica, ou seja, a construção de uma “Eletrodinâmica Quântica”, foi realizada por grandes nomes da física tais como Dirac, Feynman, Tomonaga e Schwinger nos anos de 1940.

A eletrodinâmica quântica é uma das teorias mais bem construídas da física. Os equipamentos eletrônicos utilizados em casa possuem circuitos integrados cuja construção se baseia na eletrodinâmica quântica. A precisão verificada entre os resultados previstos teoricamente e aqueles obtidos no laboratório é realmente surpreendente.

A eletrodinâmica quântica afirma que existe uma partícula que é a mediadora de todas as interações eletromagnéticas. Esta partícula é o fóton.

Sempre que ocorre um processo entre partículas carregadas há uma incessante troca de fótons.

A descrição das interações eletromagnéticas sob o ponto de vista da eletrodinâmica quântica é uma das áreas mais importantes para os que gostam de astrofísica. É bom lembrar que vemos as estrelas porque elas emitem radiação e esta radiação nada mais é do que fótons produzidos por processos quânticos que ocorrem no interior da estrela.

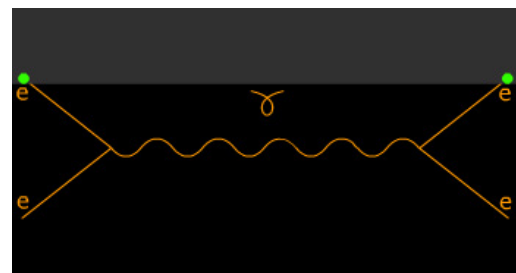
## EQUAÇÕES DO ELETROMAGNETISMO

As leis básicas da eletricidade e do magnetismo podem ser resumidas nas 4 equações seguintes, escritas na forma diferencial:

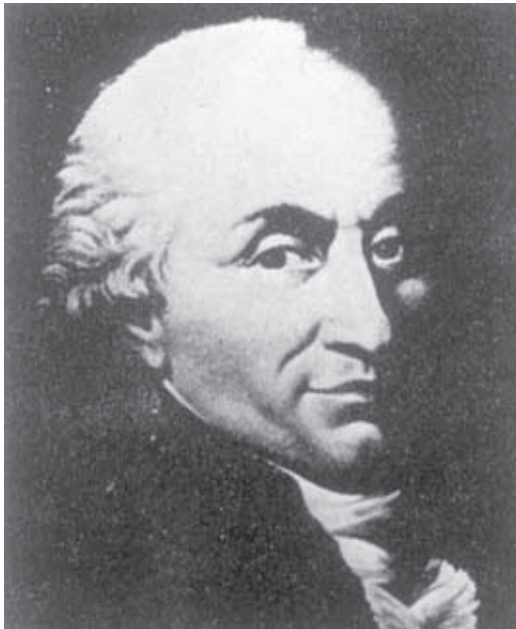
$$\begin{aligned} \nabla \cdot \mathbf{D} &= 4\pi\rho & \nabla \times \mathbf{H} &= \frac{4\pi}{c} \mathbf{J} + \frac{1}{c} \frac{\partial \mathbf{D}}{\partial t} \\ \nabla \cdot \mathbf{B} &= 0 & \nabla \times \mathbf{E} + \frac{1}{c} \frac{\partial \mathbf{B}}{\partial t} &= 0 \end{aligned}$$

#### OBSERVAÇÃO:

É um erro comum vermos escrito que a velocidade de propagação da luz é de 300000 quilômetros por segundo. Isto não é verdade. Esta é a velocidade de propagação da luz no vácuo. Em um meio material a luz tem uma velocidade menor do que essa. Este “detalhe” é importante porque a velocidade da luz no vácuo é a velocidade limite máxima para todos os corpos materiais, princípio esse estabelecido pela Teoria da Relatividade Restrita de Einstein. Em um meio material a velocidade da luz pode ser superada. Saiba mais sobre as equações de propagação ondulatória dos fenômenos eletromagnéticos, propostas por Maxwell em 1865, no final deste tópico.



Partículas carregadas interagem por meio da troca de fótons.



Charles Augustin de Coulomb (1736 - 1806).

Lei de Coulomb:

$$\nabla \cdot \mathbf{D} = 4\pi\rho$$

Lei de Ampère-Maxwell:

$$\nabla \times \mathbf{H} = \frac{4\pi}{c} \mathbf{J} + \frac{1}{c} \frac{\partial \mathbf{D}}{\partial t}$$

Lei de Faraday:

$$\nabla \times \mathbf{E} + \frac{1}{c} \frac{\partial \mathbf{B}}{\partial t} = 0$$

Ausência de pólos magnéticos livres:

$$\nabla \cdot \mathbf{B} = 0$$

Além destas equações, os fenômenos eletromagnéticos devem obedecer a mais duas equações:

Equação da força de Lorentz:

$$\mathbf{F} = q \left( \mathbf{E} + \frac{\mathbf{v}}{c} \times \mathbf{B} \right)$$

Equação da continuidade:

$$\nabla \cdot \mathbf{J} + \frac{\partial \rho}{\partial t} = 0$$

## AS EQUAÇÕES DE ONDA DO ELETROMAGNETISMO

Um aspecto fundamental das equações de Maxwell para o campo eletromagnético é a existência de soluções sob a forma de ondas que se deslocam, e que transportam energia, de um ponto para outro. Estas equações governam o campo eletromagnético em um meio linear, homogêneo, no qual a densidade de carga é zero, seja este meio condutor ou não condutor.

Equação de onda para o campo elétrico:

$$\nabla^2 E - \varepsilon\mu \frac{\partial^2 E}{\partial t^2} - g\mu \frac{\partial E}{\partial t} = 0$$

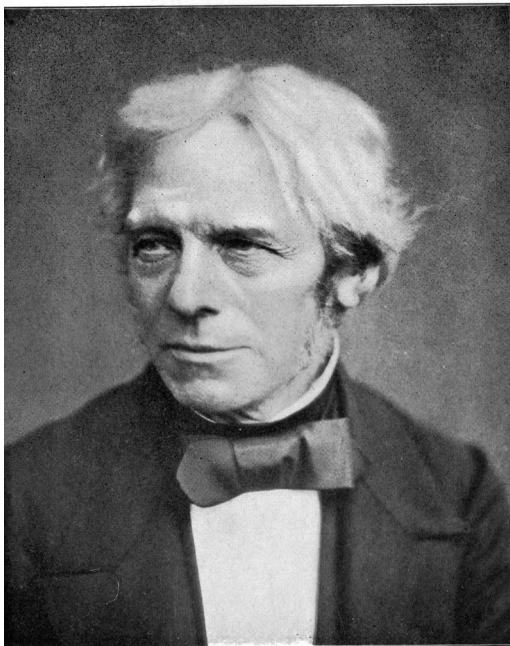
Equação de onda para o campo magnético:

$$\nabla^2 H - \varepsilon\mu \frac{\partial^2 H}{\partial t^2} - g\mu \frac{\partial H}{\partial t} = 0$$

## A FORÇA FORTE

O que mantém o núcleo de um átomo unido? Lembre-se que o núcleo atômico é formado por prótons e nêutrons. Os nêutrons não possuem carga elétrica mas os prótons são partículas dotadas de carga positiva. Deste modo, existe uma intensa força de repulsão eletromagnética entre os prótons. Porque motivo, então, o núcleo de um átomo é estável?

Na verdade, os físicos notaram que a estabilidade nuclear é produzida pela presença de um novo tipo de interação entre partículas, a força nuclear forte,



Michael Faraday Millikan (1791 - 1867).

também chamada de força nuclear, de interação nuclear ou de força forte. É esta interação que mantém o núcleo atômico unido.

A força nuclear é muito importante. Na ausência da força forte, a força dominante no núcleo seria a interação eletromagnética. Como os prótons possuem a mesma carga positiva, eles sofreriam uma intensa repulsão que provocaria o seu rápido afastamento impedindo que eles se aglutinassem para, juntamente com os nêutrons, produzirem os núcleos. E, obviamente, se os núcleos atômicos não existissem, os átomos não existiriam, nem as moléculas (que são formadas por átomos). Deste modo, os seres humanos, que são formados por moléculas, também não existiriam. Pior ainda, se a força forte não existisse a matéria que forma o Universo, tal como o conhecemos, também não existiria, uma vez que até mesmo os prótons e os nêutrons não conseguiriam se formar. Ressalta-se que os prótons e nêutrons são formados por quarks e a interação entre os quarks se dá por meio da força forte.

Se a força forte não existisse o Universo ainda poderia existir, só que ele seria formado por um enorme conjunto de partículas que se deslocariam através dele, eventualmente interagindo, mas não produzindo as formas de matéria que hoje conhecemos.

### **Algumas características da força forte**

A força forte possui características muito particulares. Já vimos que para manter as partículas nucleares agregadas, a força forte deve superar a tremenda repulsão que surge quando os prótons positivamente carregados são “empacotados” no pequeno espaço do núcleo.

Embora a força nuclear seja a mais forte de todas as outras forças fundamentais, ela tem um alcance muito curto. Na verdade, a força forte só é efetiva na escala das dimensões do núcleo atômico ou seja, seu alcance é de  $\sim 10^{-13}$  centímetros.

Deste modo a força forte somente pode superar a repulsão elétrica quando os prótons estão suficientemente próximos para estarem quase se “tocando”.

Como os nêutrons interagem com os prótons por meio da força forte, mas não têm carga elétrica, mais e mais nêutrons são necessários para “diluir” as forças repulsivas e manter os núcleos pesados juntos.

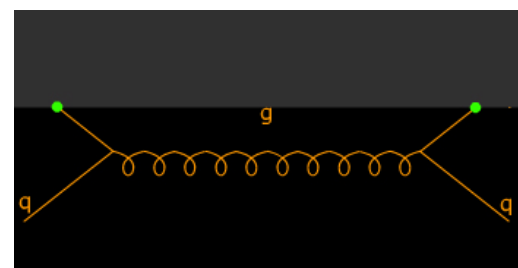
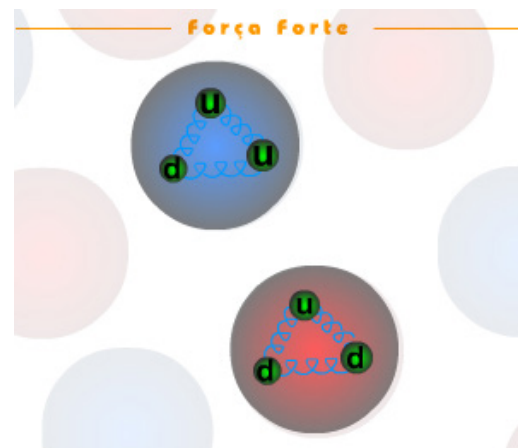
Podemos, então, dizer que as forças fortes são aquelas responsáveis pelos fenômenos que ocorrem a curta distância no interior do núcleo atômico.

Os mediadores das interações fortes são os gluons. São estas partículas sem massa que transportam as informações entre os quarks.

Um próton, que é formado por três quarks com a configuração uud, na verdade é um sistema físico onde ocorre uma intensa troca de gluons, o tempo todo, entre esses quarks. Vemos, portanto, que a estrutura da matéria nuclear é muito mais complicada do que pensávamos anteriormente. Ao invés de estudarmos a interação entre dois prótons como sendo uma interação entre duas partículas, vemos que, com a descrição de quarks e gluons, a colisão entre dois prótons é um processo de interação entre 6 quarks e um número desconhecido de gluons.

Além disso, cabe notar que existem 8 tipos diferentes de gluons. A existência desses gluons é provada a partir de trabalhos teóricos envolvendo uma parte da matemática conhecida como “teoria dos grupos”. Por ser uma questão bastante técnica não mostraremos como isso é provado mas, acredite! É verdade!

O trabalho pioneiro sobre as forças fortes foi realizado pelo físico japonês Yukawa em 1934, mas até meados da década de 1970 não havia, realmente, uma teoria capaz de explicar os fenômenos nucleares. Foi então que surgiu a



A interação entre Quarks é feita por meio da troca de Gluons.

**cromodinâmica quântica**, a teoria que explica os fenômenos que ocorrem no interior do núcleo atômico.

## A FORÇA FRACA

A força fraca, também chamada de força nuclear fraca, é uma das forças que atua no interior do núcleo atômico. Vemos então, surpreendentemente, que duas forças atuam no interior do núcleo atômico: a força nuclear forte e a força nuclear fraca.

Do mesmo modo que a força nuclear forte, a força fraca também é uma força de curto alcance. Ela atua somente em uma vizinhança de cerca de  $10^{-16}$  centímetros.

A força fraca é, aproximadamente,  $10^{-13}$  vezes tão forte quanto a força eletromagnética.

### *Para que serve então a força fraca?*

Se a força **nuclear** forte é a responsável pela estabilidade do núcleo atômico, então para que serve a força **nuclear** fraca?

Existem fenômenos que ocorrem no interior do núcleo atômico que, embora também estejam relacionados com a estabilidade nuclear, não podem ser explicados sem que postulamos a existência de uma outra força, com características bastante diferentes da força nuclear forte.

Entre estes fenômenos nucleares que exigem a presença de um novo tipo de interação está a **radioatividade** e o **decaimento** de partículas nucleares.

A radioatividade é parte integrante da nossa vida. Alguns elementos químicos possuem a característica especial de emitir, espontaneamente, partículas de altas energias. A este fenômeno damos o nome de radioatividade.

Um núcleo radioativo é instável por que ele contém ou prótons demais ou nêutrons demais. Como consequência disso, este núcleo ejetta espontaneamente partículas até se tornar estável. Ao fazer isto, este átomo pode se transformar em um outro elemento químico, processo esse que é chamado de **decaimento**.

Alguns isótopos decaem rapidamente enquanto que outros o fazem muito lentamente. A tabela abaixo mostra a meia-vida de alguns isótopos radioativos. Definimos meia-vida de um isótopo como o tempo necessário para que metade dos núcleos sofram decaimento.

ISÓTOPO RADIOATIVO ORIGINAL	MEIA-VIDA (EM BILHÕES DE ANOS)	ISÓTOPO FINAL ESTÁVEL
Potássio ( $^{40}\text{K}$ )	1,3	Argônio ( $^{40}\text{Ar}$ )
Rubídio ( $^{87}\text{Ru}$ )	47,0	Estrôncio ( $^{87}\text{Sr}$ )
Urânio ( $^{235}\text{U}$ )	0,7	Chumbo ( $^{207}\text{Pb}$ )
Urânio ( $^{238}\text{U}$ )	4,5	Chumbo ( $^{206}\text{Pb}$ )

O estudo dos processos de decaimento radioativo são importantes para determinarmos a idade das rochas. Foram os geólogos, ao datarem a idade de algumas rochas existentes na Terra, que mostraram aos astrônomos que seus cálculos sobre a idade das estrelas estavam errados. Para corrigir isto os cientistas tiveram que procurar novas formas de energia que podiam estar sendo produzidas no interior delas. Foi então que eles descobriram que havia uma grande produção de energia por processos nucleares nas regiões mais centrais das estrelas.

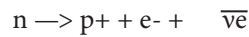


A partir do desenvolvimento da tecnologia a radioatividade passou a fazer parte da nossa vida. A radioatividade está associada à produção de energia e até mesmo a procedimentos médicos usados hoje correntemente para o combate a doenças como o câncer.

As forças fracas também explicam os processos de decaimento nucleares de várias partículas elementares, tais como o decaimento beta nuclear, o decaimento do pión, do muon e de várias partículas “estranhas”.

O que é o decaimento de uma partícula? É a sua transformação em outras partículas por processos espontâneos.

Por exemplo, é a força fraca que modera certos tipos de decaimentos nucleares tais como o decaimento do nêutron mostrado abaixo:



A partícula mais comum que interage somente por meio da força fraca é o **neutrino**, representada pelo símbolo grego  $\nu$ .

Ouviremos mais sobre o neutrino quando falarmos dos processos de reações nucleares que ocorrem no interior das estrelas e determinam a evolução estelar.

### A teoria atual das forças fracas: a “Teoria Eletrofraca”

É interessante notar que a força fraca não era conhecida pela física clássica e que sua formulação como teoria é estritamente quântica. Isto quer dizer que não existem fenômenos clássicos regidos pela força fraca. Somente fenômenos que ocorrem no interior do núcleo atômico, ou seja, no domínio da física quântica, são descritos pela interação fraca.

A primeira teoria das interações fracas foi apresentada por Fermi em 1933. Mais tarde ela foi aperfeiçoada por Lee, Yang, Feynman, Gell-Mann e vários outros nos anos da década de 1950.

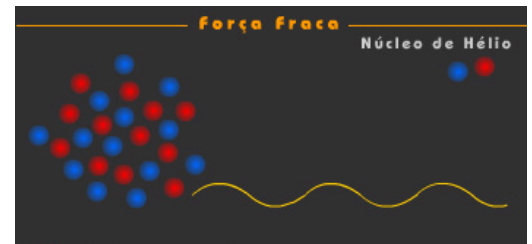
Com o desenvolvimento das pesquisas ficamos sabendo que a força fraca é apenas um aspecto de uma “força unificada” mais geral, chamada “força eletrofraca”, que combina as propriedades da força fraca e da força eletromagnética.

A teoria das interações eletrofracas é devida ao físico inglês Sheldon Glashow, ao físico norte-americano Steven Weinberg e ao físico paquistanês Abdus Salam, que a propuseram nos anos de 1960. A nova teoria das interações fracas, que é chamada de **flavordinâmica** por causa de uma das propriedades intrínsecas das partículas elementares, é também justamente conhecida como **Teoria de Glashow-Weinberg-Salam**.

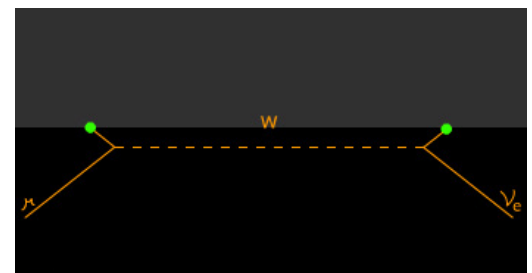
Nesta teoria, as interações fraca e eletromagnética são apresentadas como manifestações diferentes de uma única força, a **força eletrofraca**. Esta unificação entre a interação fraca e a interação eletromagnética reduz o número de interações fundamentais existentes em épocas mais iniciais do Universo a apenas três: **interação gravitacional**, **interação forte** e **interação eletrofraca**.

A teoria eletrofraca introduz dois tipos de mediadores, aquelas partículas que são responsáveis pelo transporte de informações sobre estas interações. Os mediadores da interação eletrofraca são partículas pesadas, obtidas nos grandes aceleradores de partículas. Para interações fracas que envolvem partículas carregadas, os mediadores são as partículas  $W^+$  e  $W^-$ . Por serem mediadas por partículas carregadas, estas interações também são conhecidas como **correntes carregadas**.

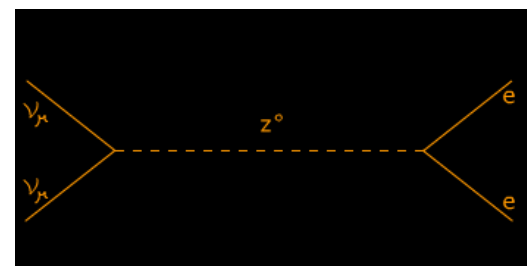
No caso de interações fracas que envolvem partículas sem carga, o mediador da interação é uma partícula sem carga, ou neutra, chamada  $Z^0$ . Por este motivo, estas interações são chamadas de **correntes neutras**. A partícula  $Z^0$  também é uma partícula muito pesada.



Simulação do processo de decaimento nuclear.



Correntes carregadas, interações fracas entre partículas carregadas.



Correntes neutras, interações fracas entre partículas sem carga.

## LÉPTONS E QUARKS: OS CONSTITUINTES BÁSICOS DE TODO O UNIVERSO

Vimos que, segundo o modelo de Bohr, os átomos são formados por elétrons que estão em órbita em torno de um núcleo que, por sua vez, é formado por prótons e nêutrons.

No entanto, a mecânica quântica nos revelou que o átomo é muito mais complexo do que isto. Ao mesmo tempo, a física de partículas elementares, ao estudar o núcleo dos átomos, nos revelou um segredo muito bem guardado: os prótons e nêutrons não eram partículas verdadeiramente elementares. Tanto os prótons como os nêutrons eram formados por partículas ainda menores, estas sim partículas fundamentais.

### Classificação das Partículas Fundamentais

As partículas realmente fundamentais, ou seja, aquelas que não são formadas por nenhuma outra e a partir das quais todas as outras partículas são formadas, são separadas em três grupos chamados coletivamente de **léptons**, **quarks** e **mediadores**.

Todas estas partículas fundamentais possuem antipartículas que também são consideradas fundamentais. A divisão delas nestes grupos é feita de acordo com propriedades características que elas possuem.

Nota-se nas tabelas abaixo que a carga é dada em unidades da carga do elétron. A massa é dada em unidades de  $\text{MeV}/c^2$ , unidade muito usada pelos físicos de partículas elementares. Um  $\text{MeV}$  é equivalente a  $10^6$  elétron-volts ( $\text{eV}$ ) e a letra  $c$  representa a velocidade da luz, cerca de  $300000 \text{ km/s}$ . Deste modo,  $\text{MeV}/c^2 = 1,782676 \times 10^{-30}$  quilogramas.

### LÉPTONS

	NOME DO LÉPTON	CARGA	MASSA (EM $\text{MEV}/C^2$ )	TEMPO DE VIDA (EM SEGUNDOS)
PRIMEIRA GERAÇÃO	elétron	-1	0,511003	infinito
	neutrino do elétron	0	0	infinito
SEGUNDA GERAÇÃO	muon	-1	105,659	$2,197 \times 10^{-6}$
	neutrino do muon	0	0	infinito
TERCEIRA GERAÇÃO	tau	-1	1784	$3,3 \times 10^{-13}$
	neutrino do tau	0	0	infinito

### QUARKS

Estas são partículas fundamentais da natureza que estão no núcleo do átomo. Acreditamos hoje que os quarks são a unidade estrutural mais fundamental a partir da qual todas as partículas nucleares se formam.

Existem seis tipos de quarks: up, down, strange, charm, bottom e top. Chamamos de **flavor** (“sabor”) os diversos tipos de quarks conhecidos.

Na tabela a seguir damos a carga em termos da carga do elétron. Além disso, aparecem vários valores de massa, que é dada em unidades  $\text{MeV}/c^2$ . O termo massa “nu” significa o valor da massa do quark isolado, sem estar combinado com outros quarks, enquanto que a massa efetiva é aquela que o quark possui quando está formando **bárions** ou **mésons** (o significado destes termos está explicado mais abaixo).

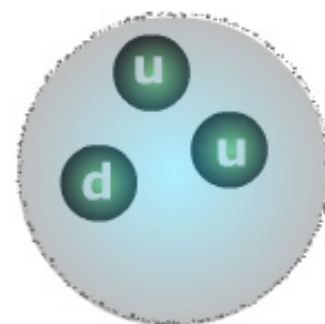
	TIPO DE QUARK (FLAVOR)	CARGA	"NU"	MASSA (ESPECULATIVA)	
				EFETIVO	
				EM BÁRIONS	EM MÉSONS
QUARKS LEVES	u	+2/3	4,2	363	310
	d	-1/3	7,5		
	s	-1/3	150	538	483
QUARKS PESADOS	c	+2/3	1100	1500	
	b	-1/3	4200	4700	
	t	+2/3		>23000	

Veja que, curiosamente, os quarks possuem carga elétrica fracionária!

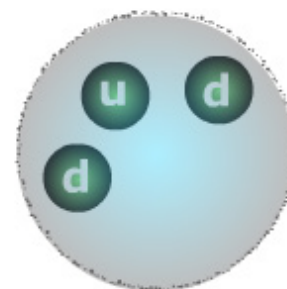
Um próton é constituído por um quark down e dois quarks up. Dizemos então que o próton tem a estrutura uud.

Um nêutron é formado por um quark up e dois quarks down. Daí os nêutrons têm a estrutura udd.

Há uma grande surpresa nisto tudo. Embora estejam listados seis tipos básicos de quarks, o Universo como o conhecemos hoje, ou seja, para o estado de energia atual, é formado simplesmente pelos quarks dos tipos **u** e **d**! As outras partículas, formadas por quarks dos tipos **s**, **c**, **b** e **t**, só existiram no Universo mais primordial, quando a temperatura (e portanto a energia) era muito mais alta. Estas partículas hoje só surgem em experiências realizadas nos grandes aceleradores de partículas que existem em laboratórios tais como o CERN, na Suíça, o FermiLab, nos Estados Unidos, ou o DESY, na Alemanha.



Próton



Nêutron

## MEDIADORES

Existem partículas que são as mediadoras dos vários processos físicos que ocorrem no interior da matéria. A elas damos o nome de **mediadores**. Elas também são partículas fundamentais e assumem um importante papel no estudo das **interações fundamentais**, como veremos mais tarde.

Na tabela abaixo a massa é dada em  $\text{MeV}/c^2$ , a carga é dada em unidades de carga do elétron e o tempo de vida em segundos. O significado das forças citadas abaixo (forte, fraca, eletromagnética) será explicado adiante.

MEDIADOR	SÍMBOLO	CARGA	MASSA	TEMPO DE VIDA	FORÇA	
GLUON	$g$	0	0	infinito	forte	
FÓTON	$\gamma$	0	0	infinito	eletromagnética	
BÓSONS VETORIAIS INTERMEDIÁRIOS	$W^\pm$	$\pm 1$	81800	desconhecido	fraca (carregada)	eletrofraca
	$Z^0$	0	92600	desconhecido	fraca (neutra)	

## O “Bóson de Higgs”

Existe mais uma partícula fundamental, chamada **bóson de Higgs**, que foi prevista a partir de estudos teóricos. Ela não se enquadra em nenhuma das classificações acima e é a única partícula fundamental que até hoje não foi obtida nos laboratórios de física de altas energias.

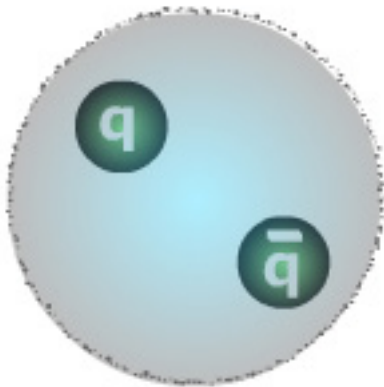
## Classificação das partículas elementares nucleares

O núcleo atômico é muito mais complexo do que um simples aglomerado de prótons e nêutrons. Aliás, damos o nome genérico de **nucleons** aos prótons e nêutrons.

Experiências realizadas com raios cósmicos e em laboratórios de altas energias mostraram a existência de muitas outras partículas, algumas muito pesadas, no interior do núcleo atômico. A descoberta destas partículas é que conduziu os físicos a acreditarem na existência dos quarks como os constituintes básicos das partículas nucleares. A estas partículas que estão no interior do núcleo atômico damos o nome genérico de **hádrons**.

Logo os físicos viram que o número de hádrons aumentava cada vez mais. Uma quantidade enorme de partículas nucleares passou a ser conhecida: pions, kaons, sigmas, eta, lambda, xis, deltas, etc.

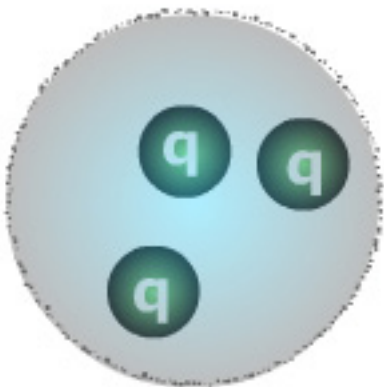
Tendo em vista propriedades comuns entre várias dessas partículas, os físicos as classificaram em duas famílias chamadas **mésons** e **bárions**. Todos os mésons e bárions são formados por quarks embora de modos diferentes. Mésons e bárions são hádrons.



Mésons

### MÉSONS

Esta é uma classe de partículas nucleares que são formadas por um par quark-antiquark. Os mésons são importantes para a astrofísica em particular porque um deles, o méson  $\pi$ , é um dos constituintes dos raios cósmicos que incidem na atmosfera superior da Terra. Os raios cósmicos são formados por núcleos pesados, prótons, elétrons e outras partículas que são produzidas nas estrelas, lançadas ao espaço e aceleradas a energias altíssimas pelos campos magnéticos que permeiam o espaço interestelar.



Bárions

### BÁRIONS

É a classe de partículas subatômicas na qual os **prótons** e **nêutrons** estão incluídos. Os bárions são formados por três quarks e constituem o núcleo atômico, juntamente com os mésons. Nós, formados por prótons e nêutrons, somos feitos de **matéria bariônica**.

Os astrônomos acreditam que o Universo seja formado tanto por matéria bariônica como por **matéria não bariônica**. Toda a matéria que existe no Universo visível é de natureza bariônica. No entanto, os astrônomos acreditam que uma grande parte da matéria que forma o Universo não seja visível. Esta matéria não visível é coletivamente chamada de **matéria escura** e possivelmente é formada, em sua maior parte, por matéria não bariônica. A procura por esta matéria não bariônica, parte importante da estrutura do nosso Universo, é uma das áreas de pesquisa da Cosmologia.

## Os neutrinos

Vimos acima que os neutrinos são léptons e, portanto, são partículas fundamentais da natureza.

O neutrino é uma partícula sem carga elétrica, praticamente sem massa, e que é produzida em grande número em algumas reações nucleares que ocorrem no interior das estrelas. Eles são muito difíceis de detectar uma vez que a maioria deles atravessa completamente a Terra sem sofrer qualquer tipo de interação. Seu símbolo é a letra grega  $\nu$ .

O Sol, assim como as outras estrelas, emite uma quantidade incrível de neutrinos e estes neutrinos incidem sobre o nosso planeta. Neste momento, e em todos os momentos das nossas vidas, os nossos corpos estão sendo atravessados por milhares de neutrinos sem que sintamos qualquer efeito.

Um outro fato importante é que o neutrino é capaz de dar aos astrofísicos informações muito mais atuais sobre o interior profundo das estrelas do que os fótons produzidos na mesma região. Por exemplo, um fóton produzido no interior do Sol leva cerca de  $10^7$  anos para conseguir chegar à sua superfície e ser captado por um observador na Terra. Enquanto isso, um neutrino produzido no interior do Sol leva apenas 2 segundos para escapar dele e atingir os detectores colocados na Terra.

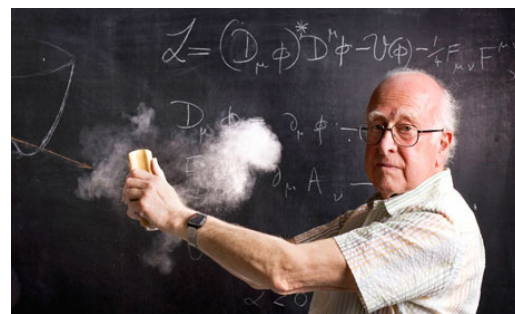
Se alguma coisa desse errado com a fornalha nuclear que existe no interior do Sol e ele, por exemplo, não produzisse mais fótons levaríamos (grosseiramente)  $10^7$  anos para perceber mudanças sensíveis na sua luminosidade. No entanto, estudando a emissão de neutrinos solares, veríamos quase imediatamente que algo anormal deveria estar acontecendo no interior do Sol se, de repente, não captássemos mais seus neutrinos.

Quando uma estrela explode, fenômeno que é a criação de uma **supernova**, uma quantidade imensa de neutrinos é lançada ao espaço. A imagem ao lado mostra a formação de uma supernova que hoje é a nebulosa M1 também conhecida como “nebulosa do Caranguejo”. Além disso, muitas outras fontes de altas energias que existem no Universo emitem grandes quantidades de neutrinos.

O neutrino é tão importante que existe uma área da astrofísica, chamada “astrofísica de neutrinos”, cujo objetivo é estudar a sua participação nos fenômenos que ocorrem nos corpos celestes.

**Em resumo, quantas são e quais são as partículas elementares fundamentais que formam toda a matéria do Universo?**

Abaixo listamos todas as partículas fundamentais conhecidas pela teoria da física de partículas elementares como os elementos fundamentais da matéria em todas as suas formas. À teoria atual mais geral que descreve a matéria como sendo formada por estas partículas damos o nome de “**Modelo Padrão da Física de Partículas Elementares**”.



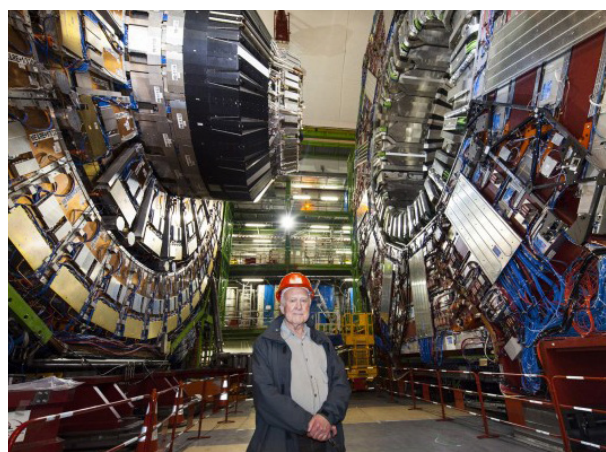
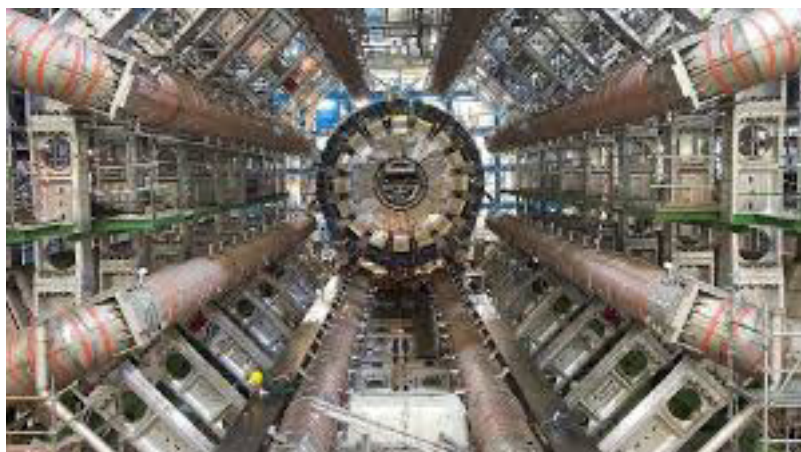
Peter Ware Higgs (1929).

Nebulosa do Caranguejo, que mostra a formação de uma supernova.



copyright: Bill Schoening / AURA / NOAO / NSF

Atualmente o maior acelerador de partículas do mundo (LHC - Large Hadron Collider), localizado próximo a cidade de Genebra, na Suíça, continua suas pesquisas a respeito do Bóson de Higgs, mais conhecido no Brasil com "Partícula de Deus". Segundo Peter Higgs esta seria a partícula que dá massa à matéria.



<b>LÉPTONS</b> (TOTAL = 12 LEPTONS)	elétron	$e^-$
	anti-elétron	$e^+$
	muon	$\mu^-$
	anti-muon	$\mu^+$
	tau	$\tau^-$
	anti-tau	$\tau^+$
	neutrino do elétron	$\nu_e$
	antineutrino do elétron	$\bar{\nu}_e$
	neutrino do muon	$\nu_\mu$
	antineutrino do muon	$\bar{\nu}_\mu$
	neutrino do tau	$\nu_\tau$
	antineutrino do tau	$\bar{\nu}_\tau$
<b>QUARKS</b> (CADA QUARK EXISTEM EM TRÊS "CORES" DIFERENTES) (TOTAL = 36 QUARKS)	up	$u$
	antiup	$\bar{u}$
	down	$d$
	antidown	$\bar{d}$
	strange	$s$
	antistrange	$\bar{s}$
	charm	$c$
	anticharm	$\bar{c}$
	bottom	$b$
	antibottom	$\bar{b}$
	top	$t$
	antitop	$\bar{t}$
<b>MEDIADORES</b> (TOTAL = 12 MEDIADORES)	fóton (mediador das interações eletromagnéticas)	$\gamma$
	(mediadores das interações eletrofracas)	$W^+$
		$W^-$
		$Z^0$
gluons (mediadores das interações fortes)	(8 tipos diferentes de gluons)	
<b>BÓSON DE HIGGS</b>		

Temos então um total de 12 leptons, 36 quarks, 12 mediadores e uma partícula de Higgs, fazendo um total de 61 partículas elementares fundamentais.

## UM ENIGMA NO UNIVERSO: ONDE ESTÁ E O QUE É A MATÉRIA ESCURA?

# 28

## Um enigma no Universo

Como veremos mais tarde, a teoria relativística da gravitação proposta por Hilbert e Einstein baseia-se em equações que levam em conta não somente a geometria do Universo mas também o seu conteúdo material. No entanto, para a cosmologia, os objetos celestes que constituem o Universo não são estudados individualmente mas sim como um conjunto único de matéria. Ao estudioso de cosmologia não interessa uma galáxia, ou um aglomerado de galáxias particular mas sim o conjunto de todos os aglomerados de galáxias que existem no Universo.

A cosmologia moderna também precisa dizer algo sobre como essa matéria surgiu e por que ela se distribui da forma como a vemos. Até algum tempo atrás o estudo da cosmologia permanecia bastante afastado da astrofísica. Pelo desafio exposto em suas equações, a cosmologia se preocupava bem mais com a geometria do universo e descrevia o seu conteúdo de matéria por meio de uma equação em que os aglomerados de galáxias eram considerados partículas de um fluido. Desse modo, a parte das equações relativísticas que descrevia o conteúdo do universo envolvia apenas a pressão e a densidade desse fluido.

Com o desenvolvimento da astrofísica observacional ficamos conhecendo muitíssimo mais o conteúdo de matéria existente no Universo. Ao mesmo tempo em que isso aconteceu, revelando-nos uma rica e nunca imaginada estrutura que envolve superaglomerados de galáxias, filamentos e vazios, surpresas também apareceram. Evidências observacionais mostravam que não era possível explicar o conteúdo de matéria do Universo pensando-se somente na matéria visível ou seja, nas estrelas, galáxias e suas aglomerações.



David Hilbert (1862 - 1943).

## AS CURVAS DE ROTAÇÃO DAS GALÁXIAS

Em 1933 o astrônomo suíço Fritz Zwicky calculou a massa total do aglomerado de galáxias Coma baseado no movimento das galáxias que se situavam próximas à sua borda. Ao comparar essa estimativa de massa com aquela cujo cálculo se baseava no número de galáxias e no brilho total do aglomerado, Zwicky verificou que havia encontrado 400 vezes mais massa do que o esperado! A gravidade produzida pelas galáxias visíveis do aglomerado seria, de longe, pequena demais para permitir que algumas delas se deslocassem de modo tão rápido em suas órbitas. Era necessário que mais matéria existisse no aglomerado. Isso ficou sendo conhecido como o “problema da falta de massa”. Baseado nesses fatos, Zwicky inferiu que deveria existir no aglomerado alguma forma de matéria não visível que, junto com a matéria visível, forneceria massa e gravidade suficiente para mantê-lo unido gravitacionalmente.

Mais tarde verificou-se que essa matéria não visível permeia não só o aglomerado de galáxias Coma mas todos os aglomerados de galáxias. Ela ficou conhecida como “matéria escura”. Esse nome é bem mais adequado do que o de “massa faltante” uma vez que não há falta de massa nas galáxias e em seus aglomerados. A matéria está presente mas, por motivo ainda não determinado, ela não é visível. Como a visibilidade da matéria se dá a partir de suas interações eletromagnéticas (luz), podemos concluir que essa matéria escura, seja lá o que ela for, não emite radiação na região espectral visível do espectro eletromagnético. Ou seja, ela não sofre interações eletromagnéticas.

A maior parte da evidência de que existe uma “matéria escura” vem do estudo dos movimentos das galáxias em aglomerados.

A necessidade da existência de alguma forma de matéria que não é visível (matéria escura) também é encontrada ao se estudar o movimento das estrelas



Fritz Zwicky (1898 - 1974).



Vera Rubin (1928)

presentes em uma galáxia. Se supuséssemos que a massa gravitacional de uma galáxia é devida somente à matéria visível nela, seria observado algo bastante intrigante: existiram estrelas bem afastadas do centro da galáxia que apresentariam velocidades muito mais altas do que as permitidas pela massa total da matéria visível nelas, e isso precisa ser explicado.

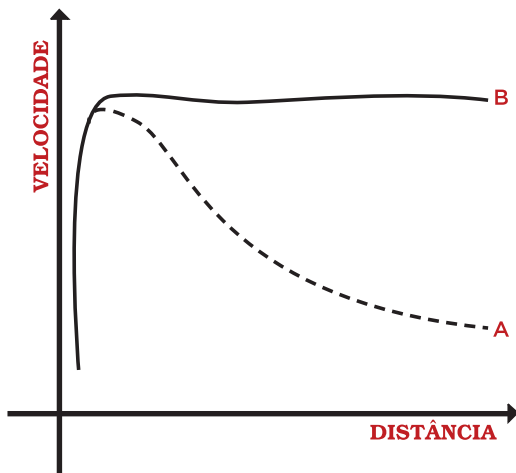
Em 1975 a astrônoma norte-americana Vera Rubin mostrou que a maioria das estrelas nas galáxias espirais tinha praticamente a mesma velocidade orbital. Isso implicava que as densidades de massa dessas galáxias eram uniformes até regiões situadas muito além das localizações da maioria de suas estrelas (que estão no bojo das galáxias, sua região mais central). Após muita discussão, os cientistas interpretaram esse fato como significando que ou a gravitação Newtoniana não se aplicava universalmente ou então, no mínimo, mais de 50% das massas das galáxias estava contida em um halo galáctico de matéria escura.

Esse fato era observado de modo muito claro quando os astrônomos obtinham a chamada “curva de rotação galáctica”, que nos mostra a velocidade de rotação da galáxia versus a distância ao seu centro. A imagem a seguir mostra o que seria uma curva de rotação de uma galáxia espiral típica, a teórica e a observada. Enquanto a curva teórica atinge um máximo e decresce, a curva observada atinge o máximo e mantém um valor praticamente constante. Essa diferença só pode ser explicada se houver mais matéria na galáxia do que somos capazes de observar visualmente.

A melhor maneira de explicar essas discrepâncias, seja em uma galáxia ou em um aglomerado de galáxias, é supor que o material visível é apenas uma pequena parte dela(e). Não é possível explicar o formato dessa curva baseando-nos exclusivamente na matéria visível que a galáxia apresenta.

As medições de curvas de velocidade nas galáxias espirais foram logo seguidas pelas medidas de velocidade de dispersão das galáxias elípticas. Verificou-se que até mesmo as galáxias elípticas apresentam um conteúdo de matéria escura relativamente alto.

Medições do gás interestelar difuso encontrado na borda das galáxias indicam que as distribuições de matéria escura se estendem muito além do limite visível das galáxias. Isso fez com que a matéria escura passasse a ser considerada como 95% (e não 50% como havia sido determinado por Vera Rubin) da massa total de matéria encontrada em uma galáxia ou aglomerado de galáxias.



Curva de rotação de uma galáxia espiral típica. A: Curva teórica; B: Curva observada.

*Matéria escura é uma forma (até o momento teórica) de matéria que não emite nem reflete radiação eletromagnética não podendo, por esse motivo, ser observada diretamente. Sua presença é inferida a partir dos efeitos gravitacionais que ela causa sobre a matéria visível.*

## **ALGUMAS CURIOSIDADES ASTROFÍSICAS SOBRE A DISTRIBUIÇÃO DE MATÉRIA ESCURA**

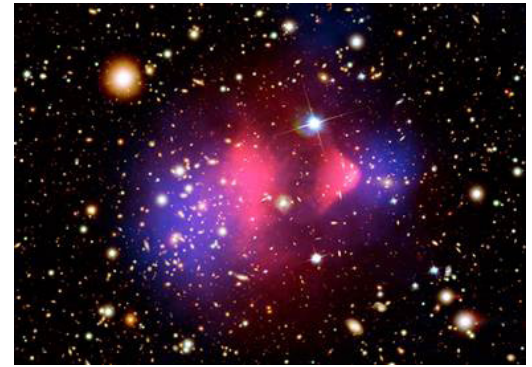
- os aglomerados globulares não mostram evidências de que contém matéria escura.
- a nossa Galáxia parece ter cerca de 10 vezes mais matéria escura do que matéria visível.
- em agosto de 2006 foi publicado que, pela primeira vez, astrônomos haviam conseguido observar matéria escura separada da matéria or-



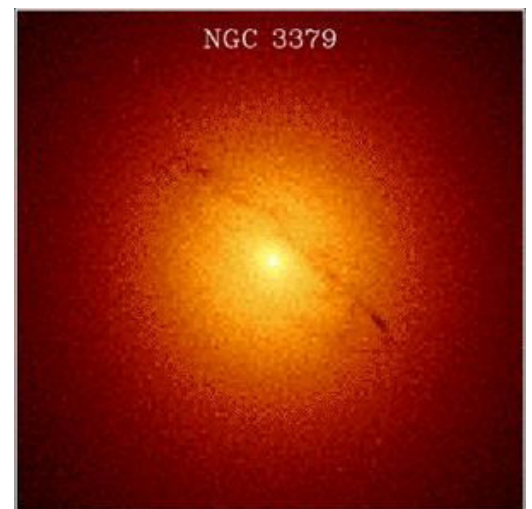
dinária. Isso foi conseguido estudando o Bullet Cluster, na verdade dois aglomerados de galáxias vizinhos que colidiram há cerca de 150 milhões de anos. Durante a colisão os gases quentes interagiram e permaneceram próximos ao centro do aglomerado.

As galáxias individuais e a matéria escura não interagiram e ficaram distribuídas longe do centro. A imagem ao lado mostra a distribuição de matéria ordinária (determinada a partir das emissões de raios X dos gases quentes que formam o aglomerado) na cor vermelha e a massa total do aglomerado em azul.

- em 2005 astrônomos da Cardiff University descobriram uma galáxia feita quase inteiramente de matéria escura. Ela está a 50 milhões de anos-luz da Terra, no Aglomerado Virgo, e foi chamada de VIRGOHI21. De modo bastante estranho essa galáxia não parece conter quaisquer estrelas visíveis (ela foi descoberta a partir de observações em radio frequência do hidrogênio), contém aproximadamente 1000 vezes mais matéria escura do que hidrogênio e sua massa é cerca de 1/10 daquela apresentada pela nossa Galáxia.
- existe um pequeno número de galáxias cujas velocidades orbitais medidas de suas nuvens de gás mostram que elas quase não contêm matéria escura. Uma dessas é a galáxia NGC 3379.
- o aglomerado de galáxia Abell 2029, formado por milhares de galáxias envolvidas por uma nuvem de gás quente, possui uma quantidade de matéria escura equivalente a mais de  $10^{14}$  massas solares.



Bullet Cluster: A matéria ordinária é mostrada em vermelho e a massa total do aglomerado em azul.



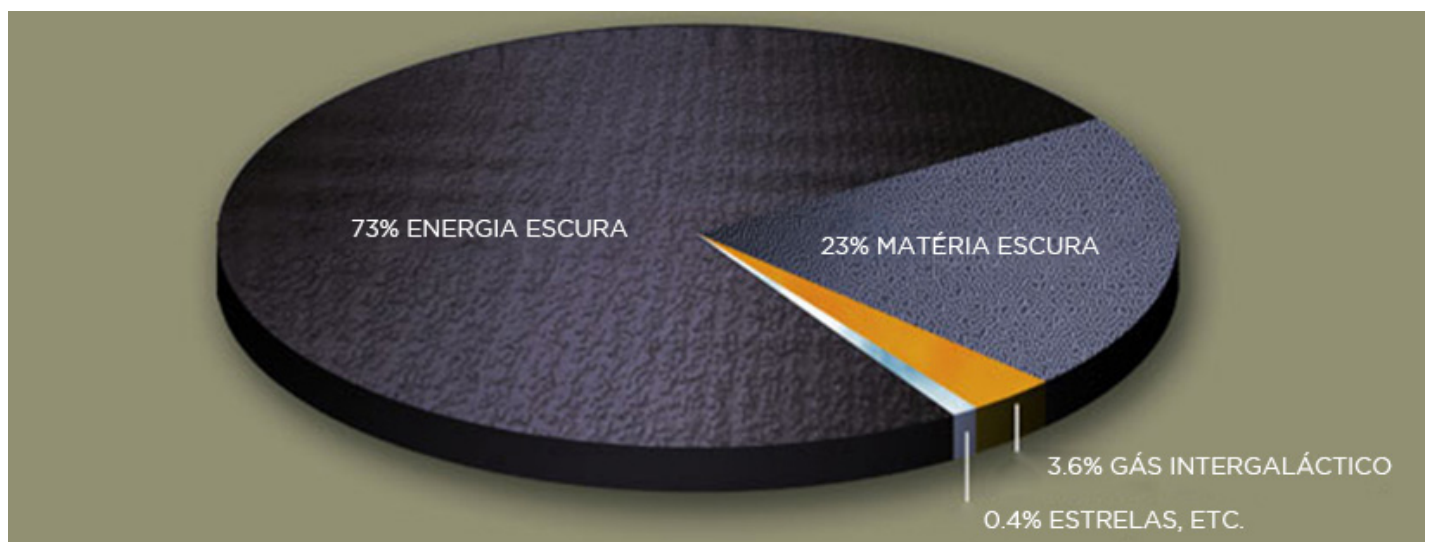
Galáxia NGC 3379 que revela suas nuvens de gás.

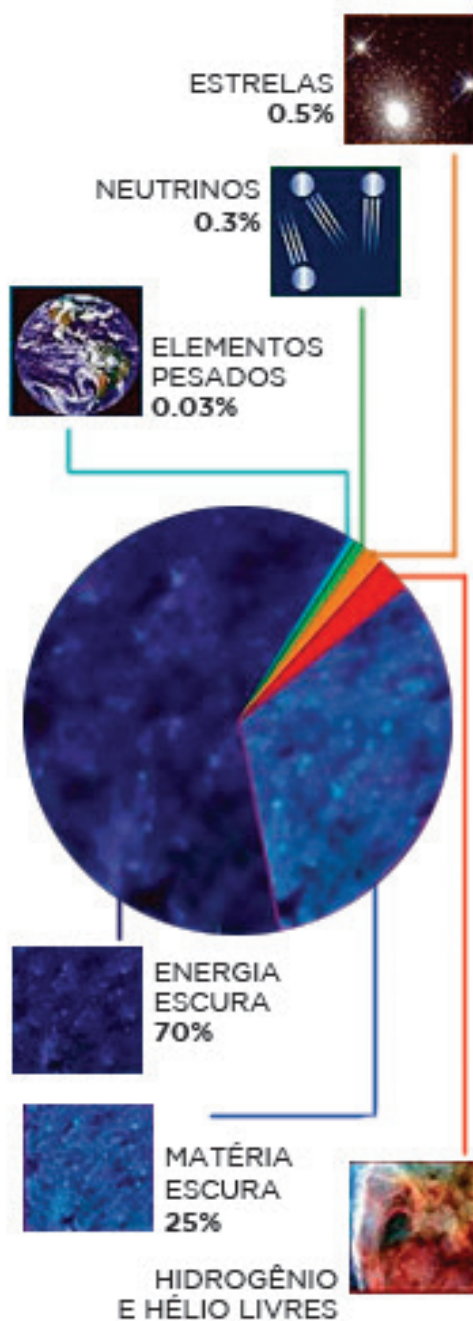
## A MATÉRIA DO UNIVERSO

Vimos que a análise de dados observacionais mostra que existe muito mais matéria no Universo sob a forma de matéria escura do que como componente “visível”, ou seja, planetas, estrelas, galáxias e todos os outros corpos celestes. No momento, a densidade de bárions ordinários e radiação no Universo são estimadas serem equivalentes a cerca de um átomo de hidrogênio por metro cúbico de espaço.

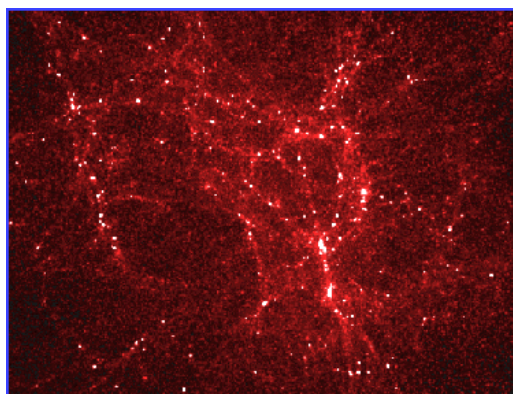
A partir dos efeitos gravitacionais sabemos que somente cerca de 4% da densidade de energia total no Universo pode ser vista diretamente. Imagina-se que cerca de 22% dessa densidade seja composta de matéria escura. Sobram então 74% que acreditamos consistir de “energia escura”, uma componente ainda mais estranha do Universo que se distribui de modo difuso pelo espaço (veremos, mais tarde, o que é a “energia escura”).

Uma representação estatística do conteúdo do Universo.





Distribuição do conteúdo de matéria do Universo.



Simulação computacional do que seria início do Universo.

Essas porcentagens variam muito na literatura. Por exemplo, se considerarmos uma distribuição mais detalhada do conteúdo de matéria do Universo obteremos o diagrama mostrado na figura ao lado.

O importante aqui é verificar não o percentual exato de cada componente do Universo mas sim a proporção entre eles.

Determinar a natureza da matéria escura é um dos mais importantes problemas da cosmologia moderna e da física de partículas. Os nomes “matéria escura” e “energia escura” servem principalmente para resumir o nosso desconhecimento sobre o conteúdo do universo.

## A COMPOSIÇÃO DA MATÉRIA ESCURA

Que tipo de matéria seria o componente principal da matéria escura? Sabemos que uma pequena porção da matéria escura é formada por matéria bariônica, difícil de detectar, mas, falando de uma maneira mais ampla, a ciência desconhece o que é a matéria escura. Muitas propostas surgiram, incluindo neutrinos ordinários e pesados, novos tipos de partículas elementares tais como WIMPs e Axions, uma grande quantidade de pequenos corpos astronômicos bariônicos tais como anãs marrons e planetas (que são coletivamente chamados de MACHOs), buracos negros primordiais e até mesmo nuvens de gás não luminoso.

Algumas soluções ainda mais radicais foram propostas para esse problema. Por exemplo, os defensores de algumas teorias de cosmologia de “branes” propuseram que a matéria existente em outro universo poderia afetar o nosso universo por meio da interação gravitacional.

As evidências obtidas pela astronomia favorecem atualmente modelos cosmológicos no qual a principal componente da matéria escura são novas partículas elementares conhecidas coletivamente como “matéria escura não bariônica”. Isso quer dizer que a matéria escura não seria formada por bárions (prótons, nêutrons, etc) mas sim por um outro tipo de matéria que ainda não foi detectado em laboratório.

## A MATÉRIA ESCURA “FRIA”

A situação é mais complicada, entretanto, porque os físicos de partículas, na sua procura para encontrar uma teoria unificada para a física, sugeriram que pode haver uma ou mais variedades de partículas presentes no Universo que nunca foram detectadas em laboratório.

É curioso notar que a sugestão de que poderia haver mais material no Universo do que jamais vimos, foi feita independentemente da descoberta dos astrônomos de que há mais coisas no Universo do que podemos ver. Deste modo, cientistas operando tanto nas maiores como nas menores escalas (Universo ou átomo) prevêm a necessidade de existirem “novas” formas de matéria.

Variações diferentes sobre o tema física de partículas sugerem candidatos diferentes para a(s) partícula(s) extra(s). Algumas teriam massas comparáveis à do próton, mas seriam muito relutantes de interagir com a matéria usual que encontramos no universo (exceto por meio da gravidade) e, por esse motivo, ainda não foram detectadas. Essas partículas hipotéticas são coletivamente chamadas de WIMPs, as iniciais do termo inglês “Weakly Interacting Massive Particles” (Partículas Massivas que Interação Fracamente).

Experiências feitas com o acelerador de partículas Large Hadron Collider, situado próximo a Genebra, Suíça, sugerem que os WIMPs são pelo menos 100 vezes mais massivos que o próton. Os modelos cosmológicos prevêm que se os WIMPs são as partículas formadoras da matéria escura, trilhões deles

devem passar através da Terra a cada segundo. Apesar de numerosas tentativas de detectar esses WIMPs nenhum até hoje foi encontrado.

Parte da matéria escura fria necessária para explicar a dinâmica das galáxias espirais pode estar na forma de “**Massive Astronomical Compact Halo Objects**” (MACHOs). Esses poderiam ser anãs marrons, objetos formados a partir do colapso gravitacional de parte de uma nuvem molecular gigante que contraiu mas não alcançou massa suficiente para dar início a reações nucleares e se transformar em uma estrela. As anãs marrons ocupam o intervalo de massa que existe entre os grandes planetas gigantes gasosos e as estrelas de menor massa. Consideramos que um objeto é uma anã marrom se sua massa é superior a 13 massas de Júpiter e menor do que 75-80 massas de Júpiter.

Outra possibilidade de MACHOs seriam buracos negros, cada um com uma massa de até um milhão de vezes a do Sol.

Mas embora os MACHOs possam justificar os halos invisíveis necessários para explicar como galáxias como a nossa rodam, eles mesmos são feitos de bárions que foram produzidos no Big Bang e, desse modo, não podem fornecer a enorme quantidade de matéria escura necessária para explicar a estrutura global do Universo. Embora os MACHOs sejam escuros, no contexto da discussão cosmológica, eles são apenas parte do 1% do Universo feito de matéria atômica ordinária.

Várias propostas têm sido feitas de objetos ou grupos de objetos que poderiam formar a matéria escura fria. Uma dessas propostas é a existência de RAMBOs (**Robust Associations of Massive Baryonic Objects**).

A existência de RAMBOs foi apresentada em 1995 pelos astrofísicos B. Moore e J. Silk. Eles seriam aglomerados escuros compostos ou por anãs marrons ou por estrelas anãs brancas. Segundo os autores da proposta, os RAMBOs teriam raios efetivos entre 1 e 15 parsecs (1 parsec = 3,26 anos-luz) e suas massas estariam no intervalo de 10 a 100000 massas solares.

Com esse intervalo tão restrito de massa (todos os objetos seriam anãs marrons ou estrelas anãs brancas) a taxa de evaporação desses RAMBOs deveria ser muito lenta. Teoricamente esses objetos, que existiriam por um tempo muito longo, poderiam ser encontrados em grande número no Universo.

Até hoje RAMBOs não foram detectados.

O nome genérico de todos esses objetos é “matéria escura fria”, tradução do inglês “cold dark matter” (CDM). O nome “fria” se refere ao fato de que esses objetos teriam massas relativamente grandes e, por conseguinte, velocidades muito menores que a da luz.

## **A MATÉRIA ESCURA “QUENTE”**

Uma outra possibilidade de composição da matéria escura seria a chamada “matéria escura quente”. Ela consistiria de partículas que se deslocam no espaço com velocidades ultra-relativísticas.

Logo os cientistas perceberam que um dos candidatos a “matéria escura quente” seria o neutrino. Ao contrário dos WIMPs, os neutrinos têm massa muito pequena (entre 7 e 8 eV) e emergem do Big Bang com velocidades muito altas, próximas à velocidade da luz. Além disso, os neutrinos não participam de duas das quatro interações fundamentais conhecidas que ocorrem no Universo. Eles não sentem a interação eletromagnética (interação produzida pela presença de um campo eletromagnético) e também não sentem a interação forte (aquela que mantém unido o núcleo dos átomos).

O neutrino só realiza as interações fraca e gravitacional. Como esses tipos de interações são caracteristicamente muito fracas, os neutrinos se tornam difíceis de serem detectados.



Joseph Silk (1942).



Ben Moore (1960).

A quaisquer partículas que satisfazem às condições explicitadas acima damos o nome coletivo de “matéria escura quente”, tradução do inglês “hot dark matter” (HDM).

## COMO SE FORMARAM AS GALÁXIAS: MATÉRIA ESCURA “QUENTE” VERSUS MATÉRIA ESCURA “FRIA”

Nas últimas décadas um dos maiores desafios para os astrônomos tem sido determinar se a distribuição de galáxias no céu lembra mais fortemente uma distribuição associada com a CDM ou com a HDM.

A diferença chave é a influência dos dois tipos de matéria escura no universo primordial, logo depois do Big Bang, quando as estrelas e as galáxias começaram a se formar.

Tanto os cálculos teóricos como as simulações em computadores ajudam a indicar que tipo de agrupamento seria visto em um universo dominado por matéria escura quente, e que tipo de aglomerações esperaríamos em um Universo dominado por matéria escura fria.

O que aconteceria se o Universo fosse dominado por “matéria escura quente”? Hoje acreditamos que a matéria escura quente não pode explicar como as galáxias individuais se formaram a partir do Big Bang. Os satélites COBE e WMAP mediram a radiação de fundo de microondas e nos mostraram que sua distribuição é impressionantemente suave. Apesar dessa suavidade, os dados obtidos por esses satélites também nos mostraram que a matéria existente no Universo se aglomerou inicialmente em escalas bem pequenas.

Entretanto, partículas que se movem rapidamente (como os neutrinos) não conseguem se aglomerar nessa escala pequena a partir de uma aglomeração inicial tão suave. As partículas da matéria escura quente varreriam tudo diante delas, suprimindo a aglomeração de outras formas de matéria e mantendo o Universo suave e homogêneo até diminuírem suas velocidades e começarem a permitir o crescimento das irregularidades então existentes.

Como a distribuição de matéria sobre escalas menores já teria sido suavizada por elas, as primeiras estruturas a se formarem seriam na escala de superaglomerados de galáxias, com a forma semelhante a enormes folhas e filamentos, os quais se romperiam para formar galáxias e estrelas - um cenário “de cima para baixo”.

Um universo dominado por neutrinos “quentes” (matéria escura quente) é previsto ter uma estrutura um tanto simples, como as células de uma colméia (embora não tão regular), na qual as galáxias brilhantes se formam somente em folhas bem definidas e de modo algum nos vazios.

E se a matéria dominante fosse “matéria escura fria”? Em um universo dominado por matéria escura fria, entretanto, a estrutura começaria a se formar em escalas menores, muito cedo, logo após o Big Bang. Grupamentos de matéria escura atraem a matéria bariônica e as estruturas se formam “de baixo para cima”, com as estrelas e galáxias se aglomerando para formar superaglomerados e filamentos.

O universo CDM é mais desordenado e complicado, com uma estrutura mais rica que parece mais com o Universo real. Folhas e filamentos também se formam, mas eles se entrelaçam de um modo complicado, e os “vazios” não estão completamente vazios.

Para explicar a estrutura em pequena escala do Universo é necessário invocar a “matéria escura fria”. A “matéria escura quente” hoje é quase sempre discutida como parte das teorias que postulam a existência de uma “matéria escura mista”.

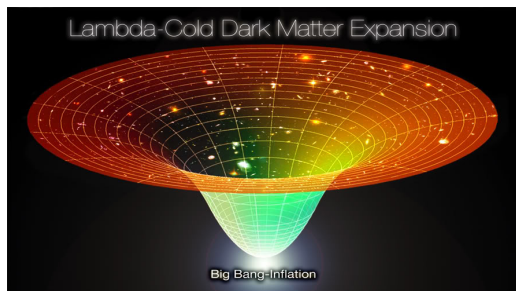


Ilustração do  $\Lambda$ CDM (Cold Dark Matter - Matéria Escura Fria).