



Universidade da Madeira

UM Astronomia

Buracos Negros Artificiais

Laurindo Sobrinho

*VI Semana da Astronomia
06 de Junho de 2006*



Sumário

Buracos Negros artificiais podem ser uma realidade já em 2007.

- 1 - O que são buracos negros e como é que estes são criados pelo Universo.
- 2 - Como é que se poderão produzir buracos negros artificiais na actualidade e o que é que podemos aprender com isso.

(http://www.bbc.co.uk/science/space/images/wallpaper/blackhole_small.jpg)



1. *BURACOS NEGROS*

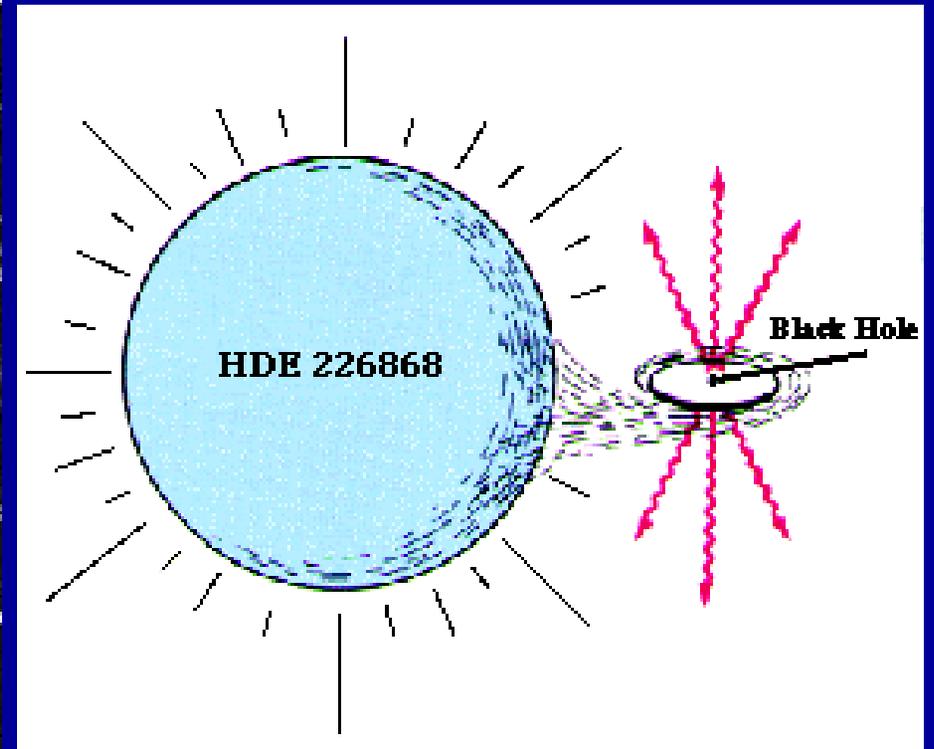


Um buraco negro é uma região onde a força de gravidade é tão intensa que nem a própria luz consegue escapar dessa região. Embora aparentemente exóticos os buracos negros são objectos previstos pela Física.

(http://www.nasa.gov/multimedia/imagegallery/image_feature_132.html)

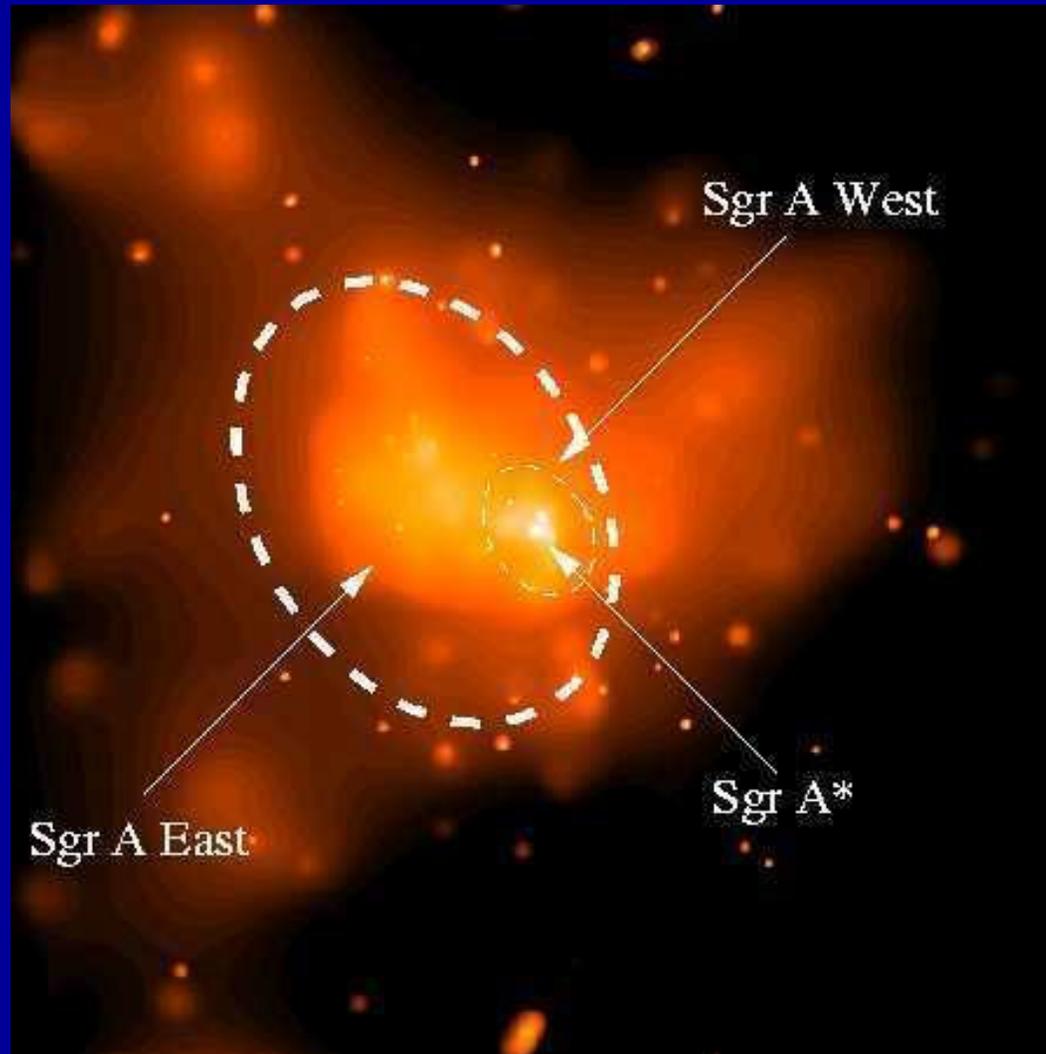


Existem actualmente vários candidatos a buraco negro que vão desde os de massa estelar (1 a 100 massas solares), espalhados um pouco por toda a galáxia, aos supermassivos (massa superior a 1 milhão de massas solares) presentes no centro de muitas galáxias incluindo a nossa. Entre estes encontram-se os buracos negros de massa intermédia (1000 a 100 000 massas solares) que se encontram normalmente no centro de enxames fechados ou mesmo no centro de algumas galáxias.



(http://imagine.gsfc.nasa.gov/docs/science/known_12/black_holes.html)

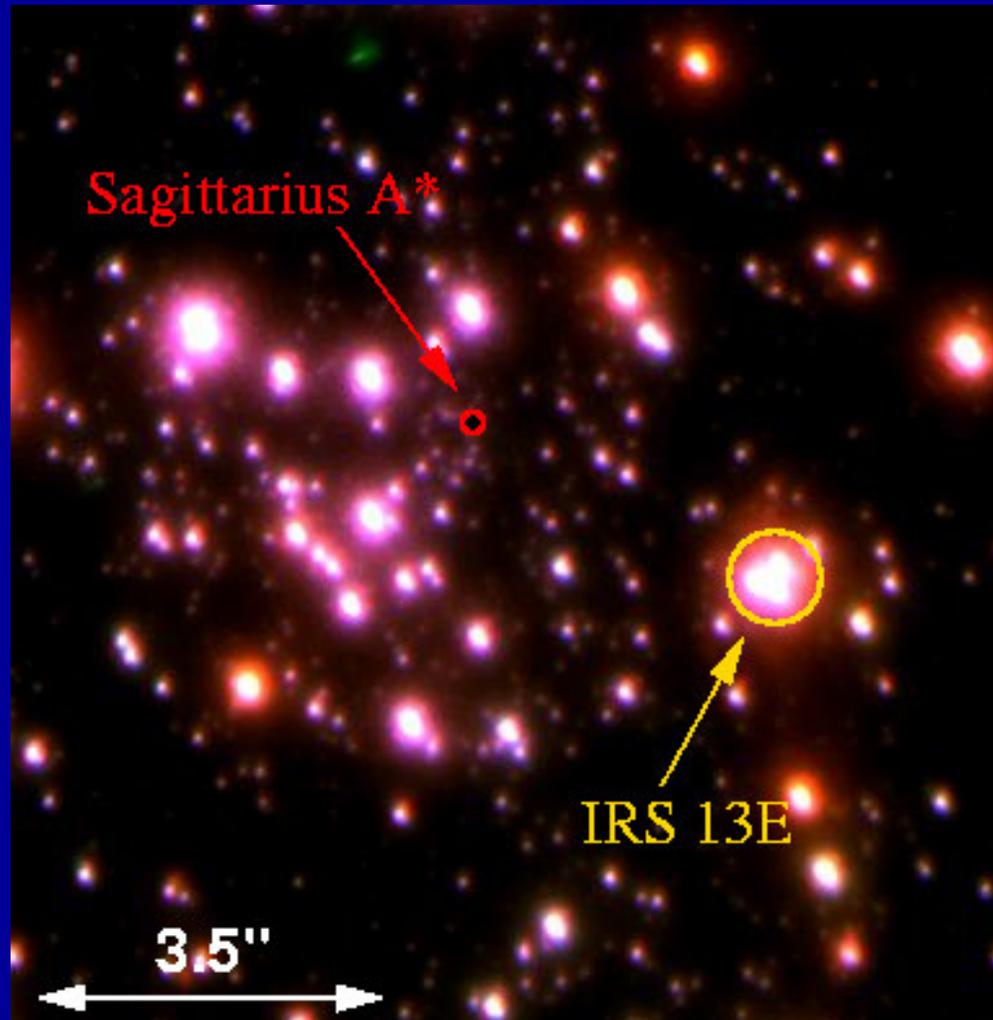
A estrela supergigante **HDE 226868** forma juntamente com a fonte de raios-X **Cyg-X1** um sistema binário. A observação mostra que a massa associada Cyg-X1 deve estar entre as 7 e 14 massas solares. Actualmente Cyg X1 é um dos mais fortes candidatos a buraco negro de massa estelar.



(<http://science.nasa.gov>)

A escassos 25000 anos luz do Sol fica, no centro da galáxia, um buraco negro com cerca de 3 milhões de massas solares.

A presença deste foi detectada indirectamente a partir do estudo da dinâmica estelar e dos gases e poeiras na região envolvente.



IRS 13E é um complexo de estrelas muito concentrado localizado a cerca de 0.5 anos luz do buraco negro supermassivo Sgr A* do centro da Nossa Galáxia. A massa de IRS 13E está estimada em 10 000 Massas solares. Não existe actualmente consenso em considerar este objecto como um candidato a buraco negro.

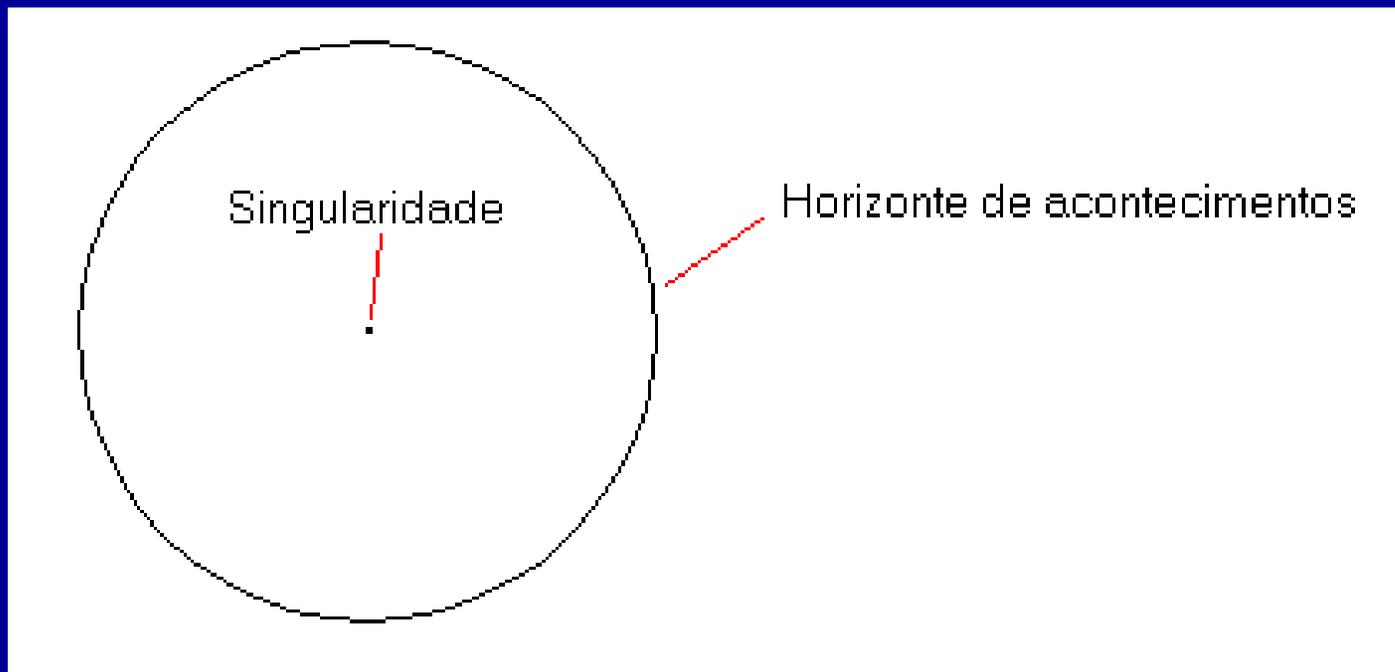
(http://www.ph1.uni-koeln.de/workgroups/obs_astronomy/galactic_center/new/science/IRS13E.html)



Embora ‘não se conheça’ no universo actual processos capazes de produzir buracos negros de massa inferior a uma massa solar, é possível que estes tenham sido criados nos primórdios do universo. Assim, nos instantes iniciais podem ter-se formado buracos negros com massas tão pequenas quanto a massa de Planck (10^{-8}kg)



Os buracos negros mais simples são os de Schwarzschild. Estes são constituídos por uma **Singularidade** (onde deixam de ser aplicáveis as Leis da Física tal qual as conhecemos) e por um **Horizonte de Acontecimentos** (fronteira a partir da qual a velocidade de escape iguala a velocidade da luz).



Buraco Negro de Schwarzschild



A estrutura de um buraco negro (de Schwarzschild) é sempre a mesma independentemente da sua massa. Um buraco negro com massa 1g tem exactamente a mesma estrutura de um buraco negro com uma massa de 10 milhões de massas solares.



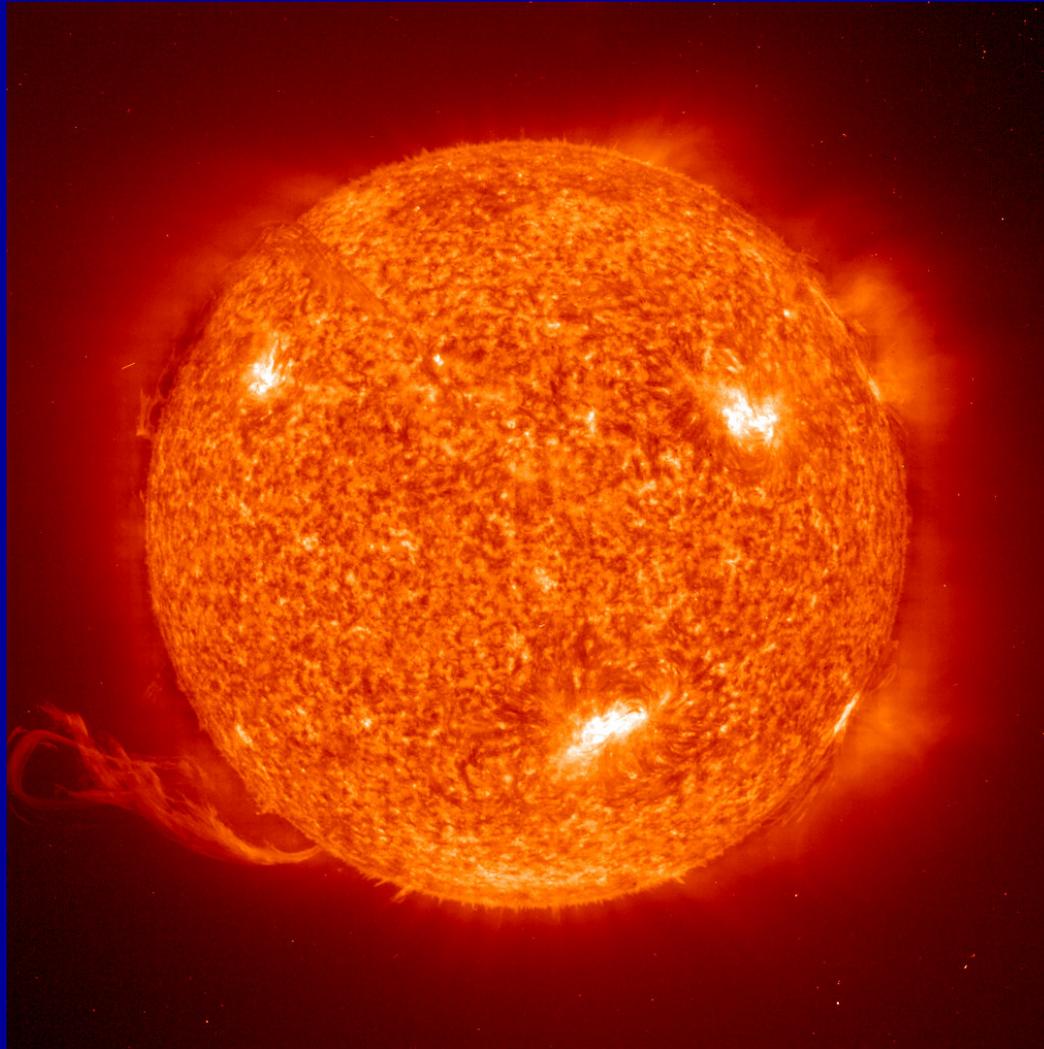
Para criar um buraco negro de massa M é necessário compactar essa massa M numa esfera de raio R_s dado por:

$$R_s = \frac{2GM}{c^2}$$

$$G = 6.6742 \times 10^{-11} \text{ m}^3 \text{ kg}^{-1} \text{ s}^{-2}$$

$$c = 2.99792458 \times 10^8 \text{ ms}^{-1}$$

onde G é a constante de gravitação universal e c é a velocidade da luz no vácuo. Assim a massa e o raio do buraco negro são informações equivalentes.



(http://umbra.nascom.nasa.gov/images/eit_19970914_0121_304.gif)

No caso do **Sol** temos **$R_s = 2954m$** . Isto significa que para construir um buraco negro a partir do Sol seria necessário reduzir o seu raio de $7 \times 10^8 m$ para $2954m$ mantendo a respectiva massa (teríamos de reduzir o raio do Sol cerca de 237 000 vezes).

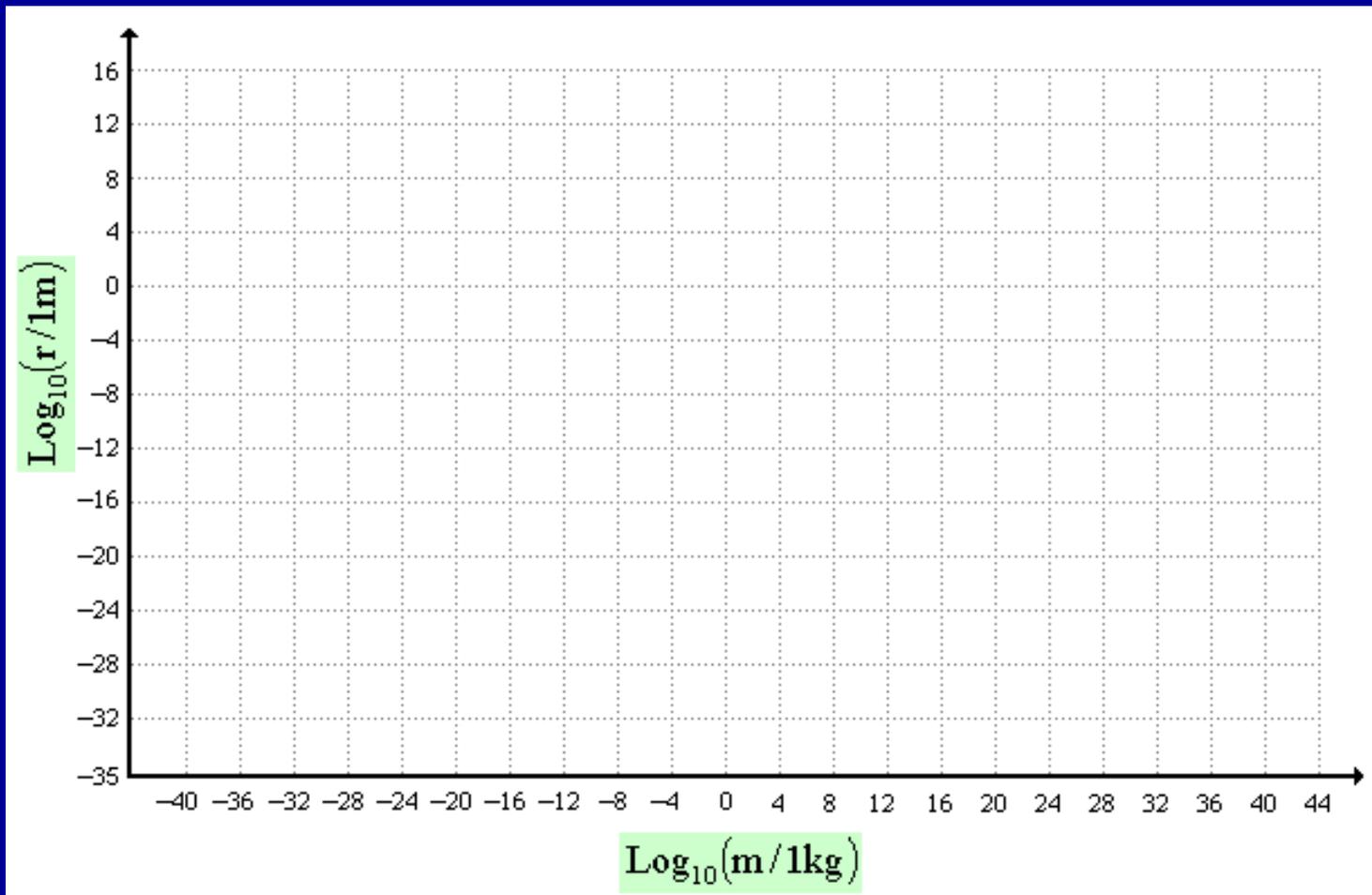


No caso da **Terra** temos **$R_s = 0.88\text{cm}$** . Neste caso para que a Terra desse origem a um buraco negro o seu teria de cair de $6.4 \times 10^6\text{m}$ para 0.88cm . Felizmente para nós isso não acontece.

(http://nssdc.gsfc.nasa.gov/image/planetary/earth/apollo17_earth.jpg)

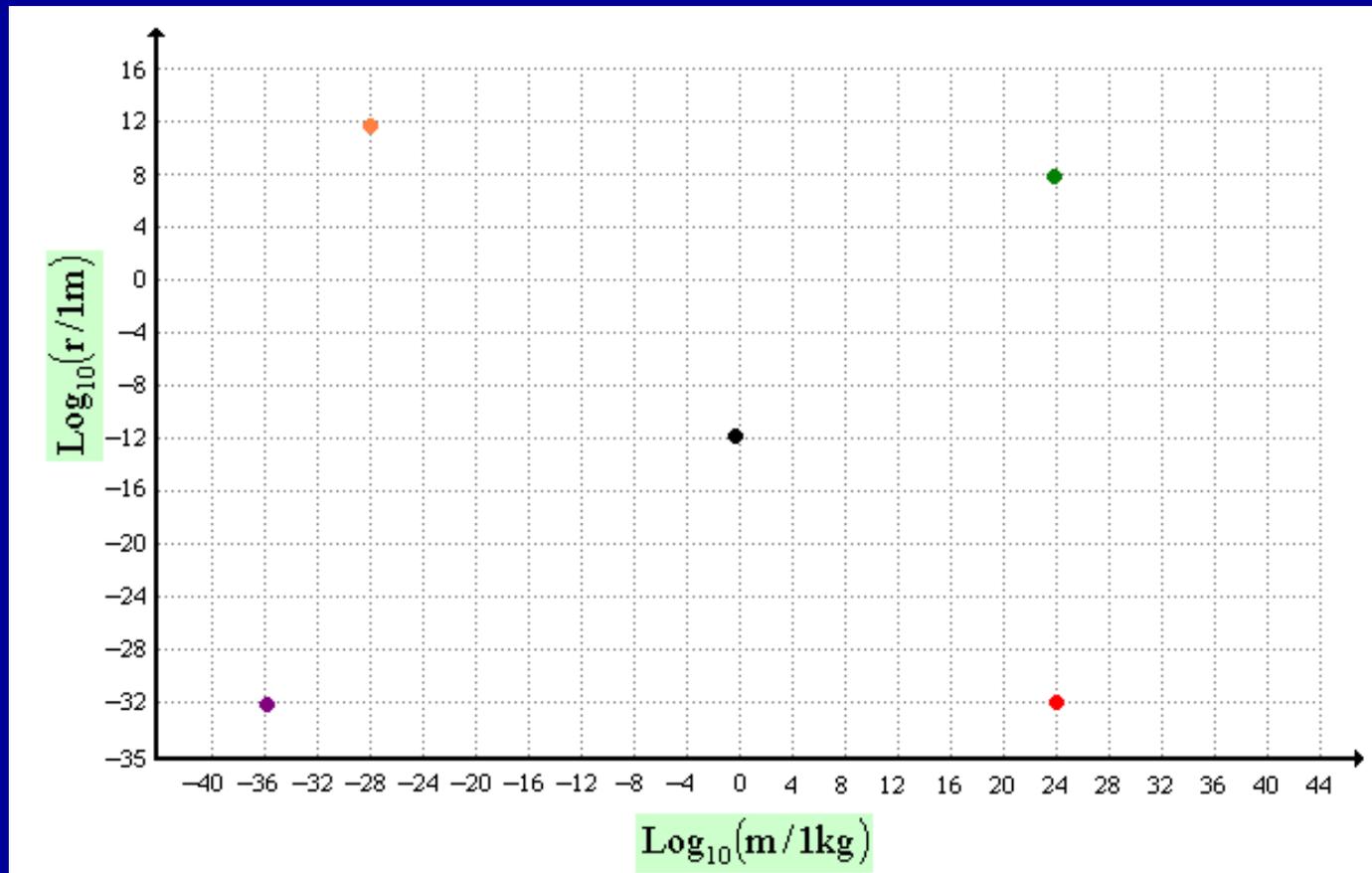


2. *Raio versus Massa*



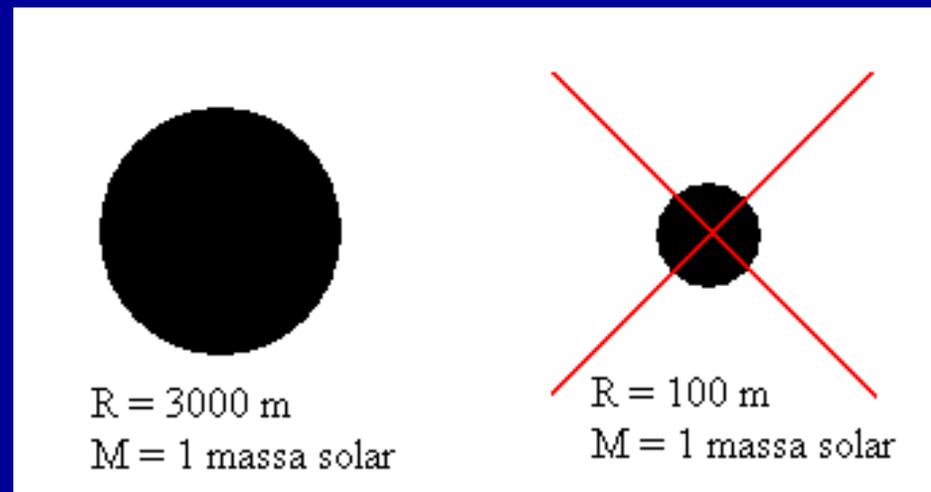


De acordo com a Mecânica clássica todos os pontos do plano Raio-Massa são válidos. Podemos ter corpos de qualquer tamanho e com qualquer massa.





O corpo mais pequeno que se pode conceber com massa igual à massa do Sol é um buraco negro de Schwarzschild de raio aproximadamente igual a 3 km (raio de Schwarzschild do Sol). Não faz sentido falar num corpo com massa igual à do Sol e com raio inferior a esse valor.



NOTA: Na realidade se o buraco negro tiver carga eléctrica (Buraco negro de Reissner-Nordstrom), movimento de rotação (Buraco negro de Kerr) ou ambos (Buraco negro de Kerr-Newmann) o seu raio será, para a mesma massa, inferior (até metade).

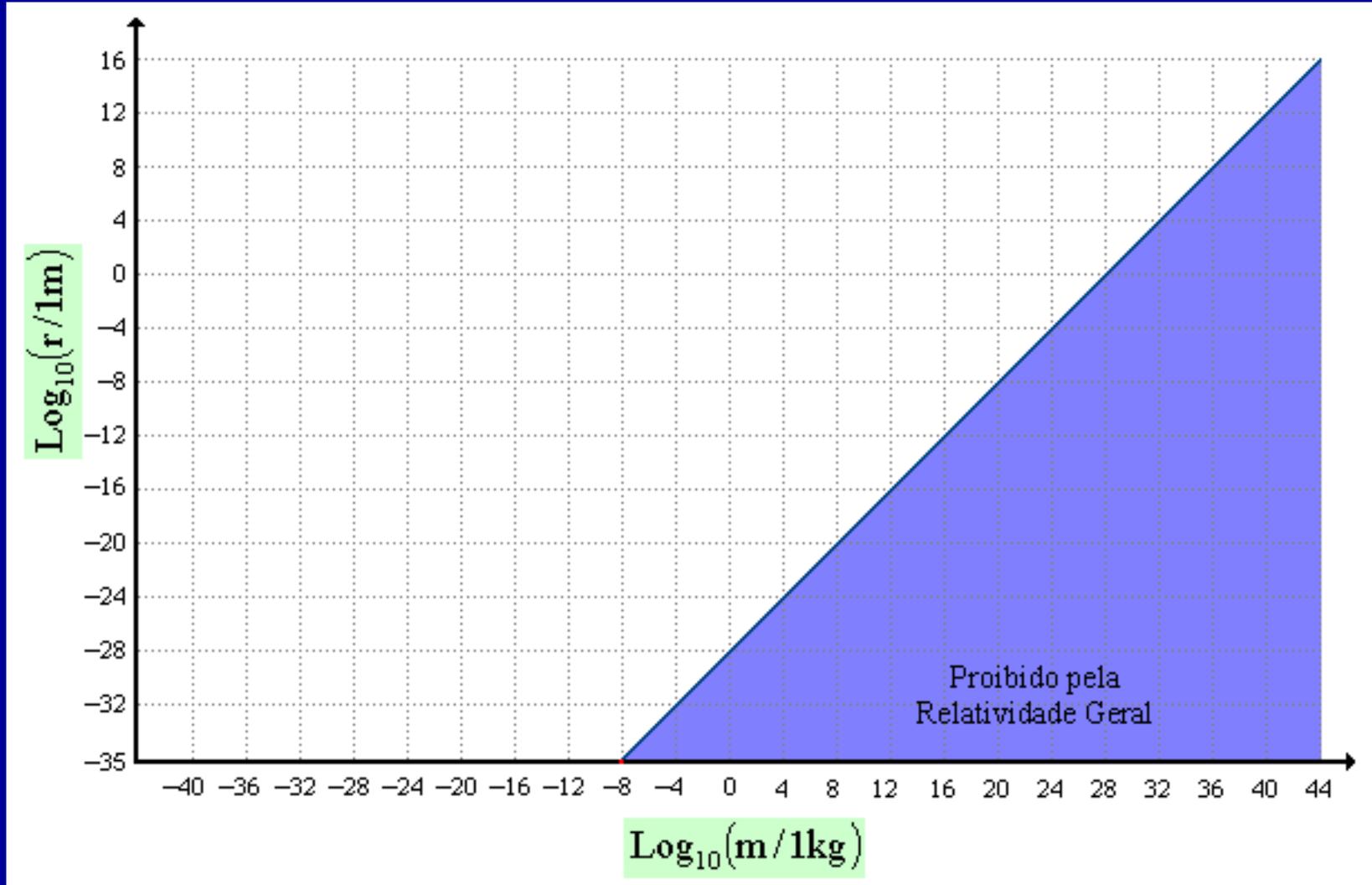


Assim a recta definida pela equação

$$R_s = \frac{2GM}{c^2}$$

separa o plano raio-massa em duas partes distintas. Sobre a recta ficam os buracos negros. Acima da recta ficam todos os objectos conhecidos no Universo e abaixo da recta fica uma região proibida pela **Teoria da Relatividade Geral**.

Esta recta é ainda limitada inferiormente pelo **comprimento de Planck** (10^{-35}m) ao que corresponde a massa de 10^{-8}kg . Não faz sentido falar em buracos negros com massa (ou raio) inferior a este valor. Esta é uma consequência directa do **Princípio da Incerteza de Heisenberg**.





Qualquer partícula pode ser vista como uma onda, ou seja, é possível associar a qualquer partícula um comprimento de onda. É o chamado **comprimento de onda de De Broglie** e a sua expressão é:

$$\lambda_B = \frac{h}{mv}$$

$$h = 6.62620 \times 10^{-34} \text{ Js}$$

onde **h** é a **constante de Planck**, **m** a massa da partícula e **v** a sua velocidade.



Exemplo 1 :

Um carro de 605 kg (Ferrari formula 1 – 2005) a uma velocidade de 200 km/h



$$\lambda_B = 1.96 \times 10^{-38} \text{ m}$$

Este comprimento de onda é inferior ao comprimento de Planck (10^{-35} m) e por isso acaba por não ter qualquer significado.

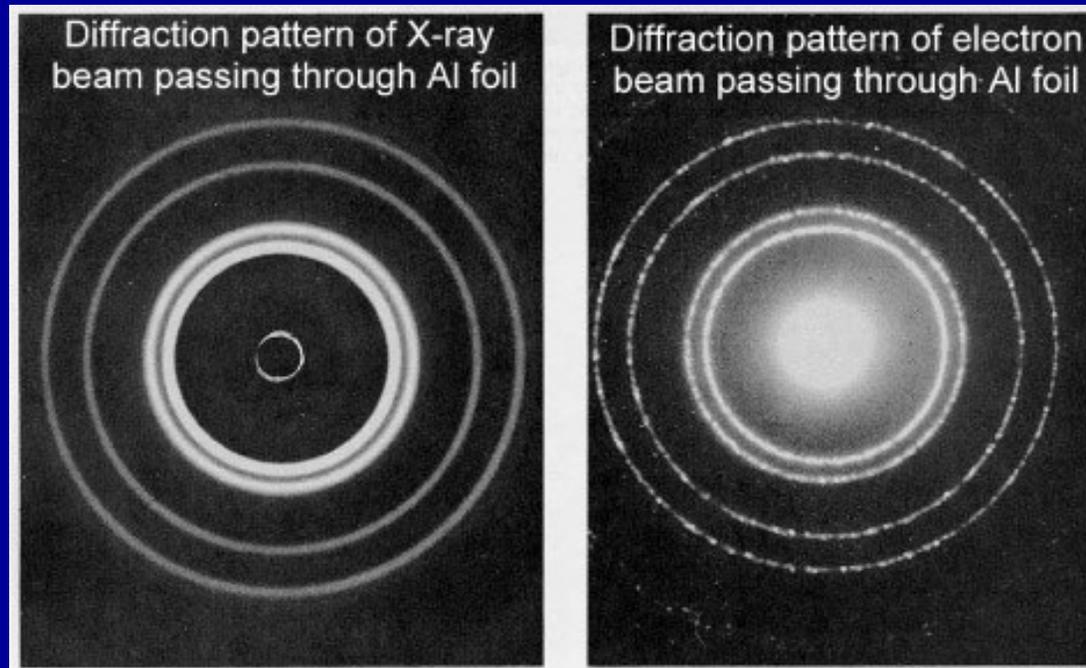


Exemplo 2:

Um electrão deslocando-se a metade da velocidade da luz

$$m_e = 9.1 \times 10^{-31} \text{ kg}$$

$$\lambda_B = 4.86 \times 10^{-12} \text{ m}$$



Neste caso temos um electrão com um comprimento de onda associado semelhante ao dos raios X fortes.

(<http://www.rpi.edu/~schubert/Educational%20resources/Educational%20resources.htm>)



O comprimento de onda mais pequeno que se pode associar a uma partícula

(comprimento de onda característico da partícula) é o **comprimento de onda de De Broglie** quando a velocidade da partícula é igual à velocidade da luz.

Uma partícula não pode ser compactada numa região de tamanho inferior ao seu comprimento de onda característico.

electrão :

$$m_e = 0.511 \text{ MeV} \approx 9.1 \times 10^{-31} \text{ kg}$$

$$\lambda_e = 2.4 \times 10^{-12} \text{ m}$$

protão :

$$m_p = 938 \text{ MeV} \approx 1.67 \times 10^{-27} \text{ kg}$$

$$\lambda_p = 1.3 \times 10^{-15} \text{ m}$$

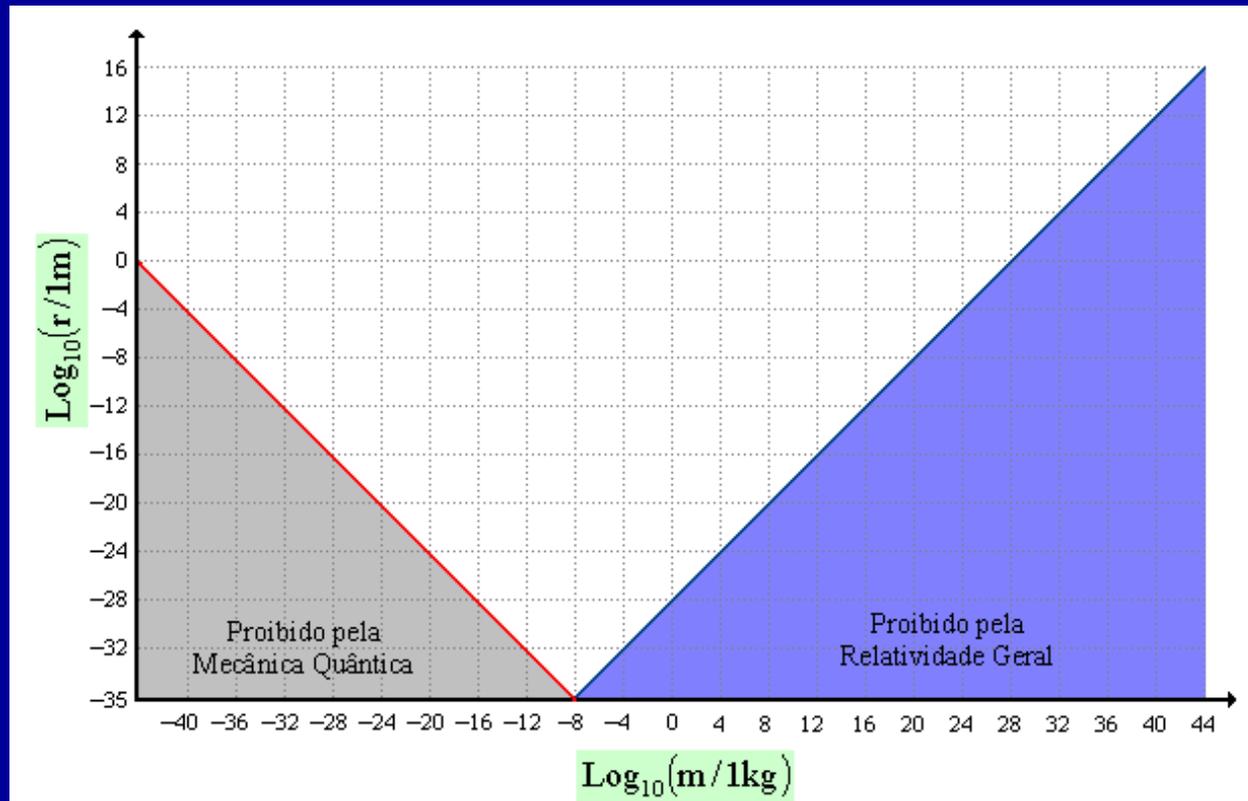
mesão π^+ :

$$m_{\pi^+} = 140 \text{ MeV} \approx 2.5 \times 10^{-28} \text{ kg}$$

$$\lambda_{\pi^+} = 8.8 \times 10^{-15} \text{ m}$$

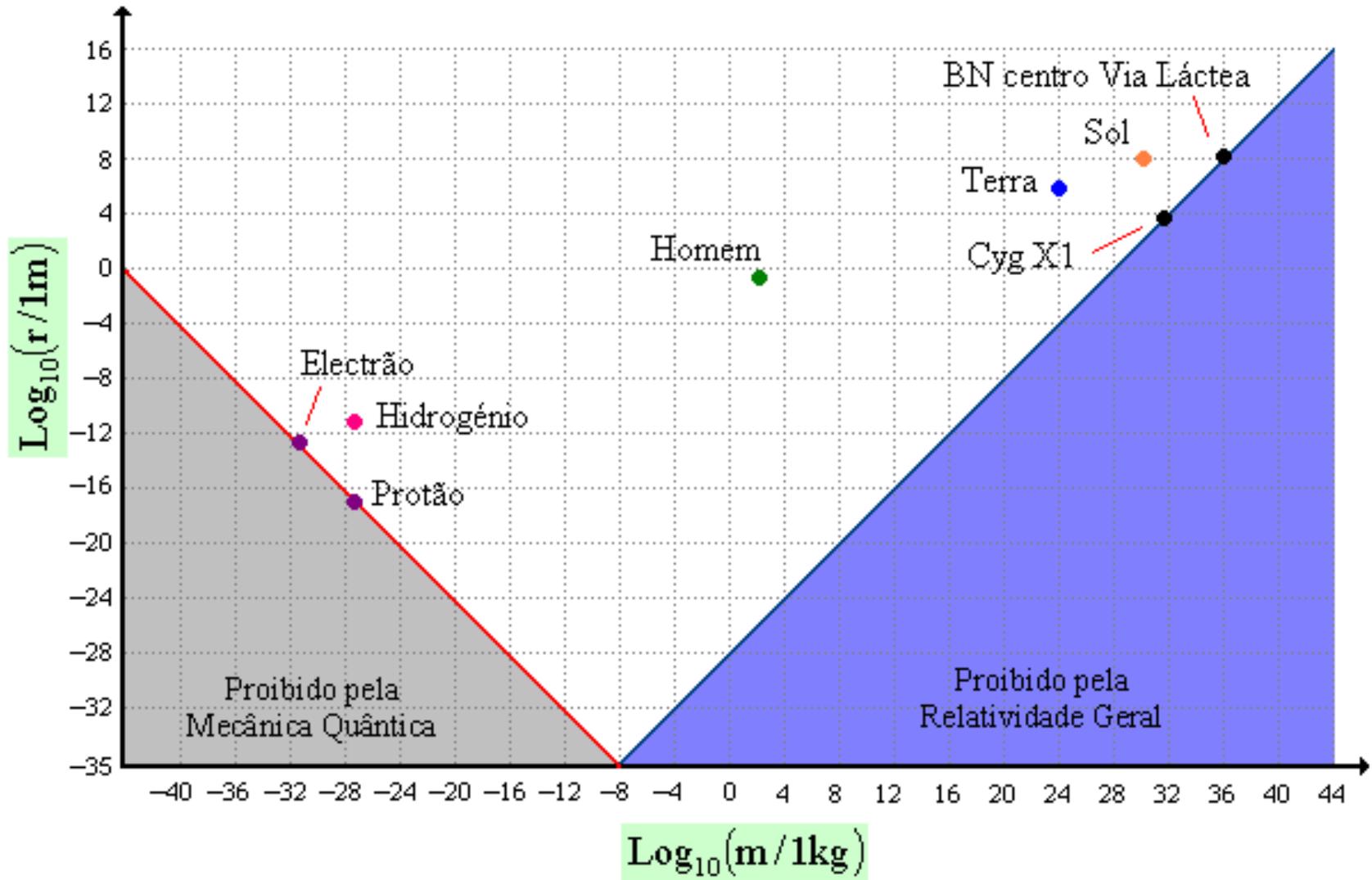


Surge assim uma segunda região proibida no diagrama raio-massa. Neste caso uma região proibida pela **Mecânica Quântica**. No limite desta região ficam as partículas elementares. Entre as duas regiões proibidas ficam todos os corpos conhecidos no Universo.



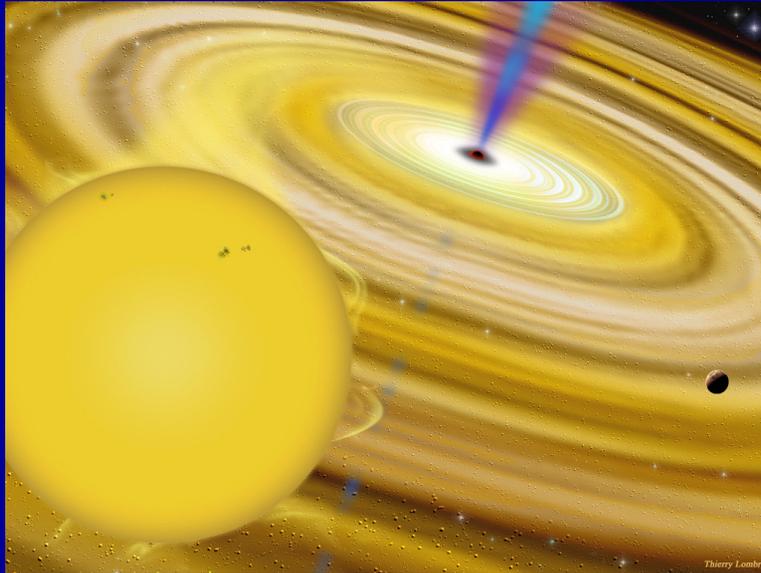


| nome | massa (kg) | raio (m) |
|---------------|--------------------------------|-------------------------|
| BN via Láctea | 5.967×10^{36} | 8.862×10^9 |
| Cygnus X1 | 1.989×10^{31} | 29500 |
| Sol | 1.989×10^{30} | 6.96×10^8 |
| Terra | 5.976×10^{24} | 6.378×10^6 |
| Homem | 80 | 0.26 |
| electrão | 9.1×10^{-31} | 2.4×10^{-12} |
| protão | 1.67×10^{-27} | 1.3×10^{-15} |
| átomo H | $\approx 1.67 \times 10^{-27}$ | 5.292×10^{-11} |





A massa de um buraco negro pode aumentar, quando este acreta matéria da vizinhança, ou pode decrescer, quando este emite a chamada **Radiação de Hawking**. O processo de aumento de massa domina no caso dos buracos negros de massa estelar e superior. O processo de evaporação domina nos buracos negros primordiais.



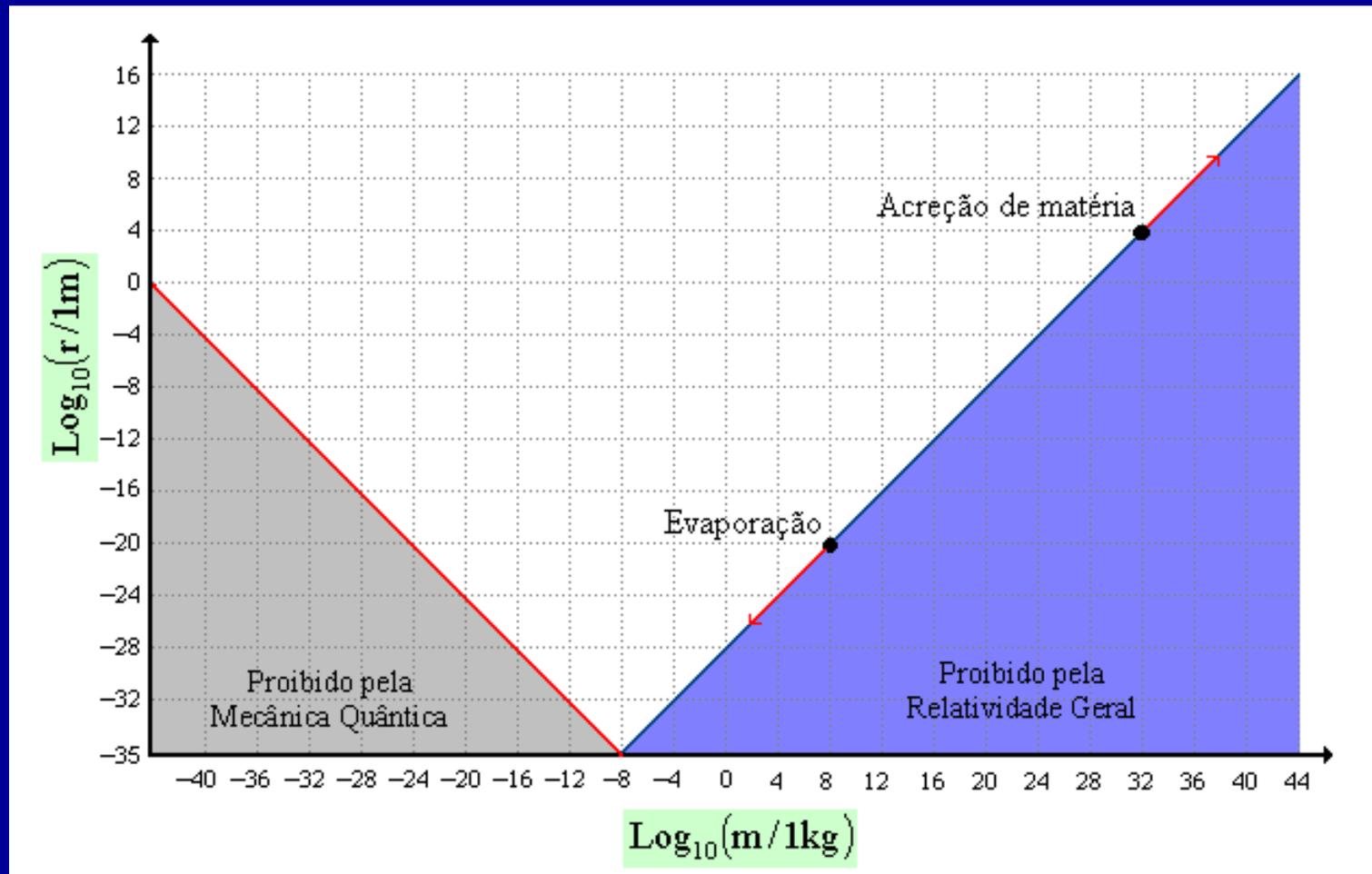
(<http://www.astrosurf.com/lombry/Sciences/black-hole-accretion.jpg>)



(<http://student.fortlewis.edu/TJLEPS/Black%20Hole%20Evaporation.htm>)

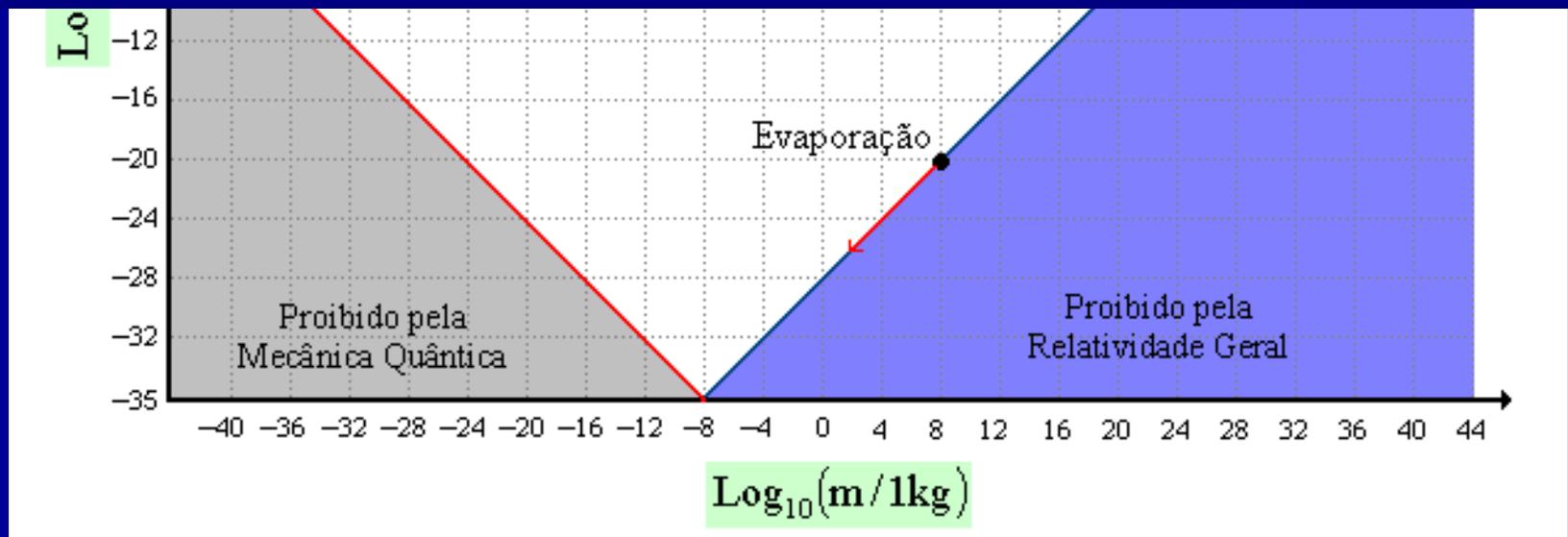


Os buracos negros de maior massa tendem a subir pela linha consoante capturam mais matéria. Os de menor massa descem pela linha à medida que evaporam.





Não sabemos ainda se o processo de evaporação pára quando se atinge a massa de Planck ou se isso acontece um pouco antes ficando aquilo a que chamamos um **resíduo**. A indefinição prende-se com o facto de ainda não possuímos um teoria capaz de conciliar a **Mecânica Quântica** com a **Teoria da Relatividade Geral**.

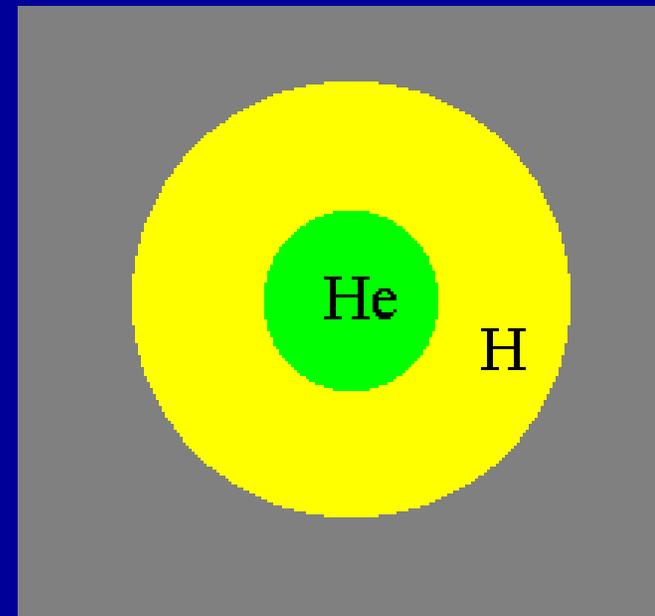


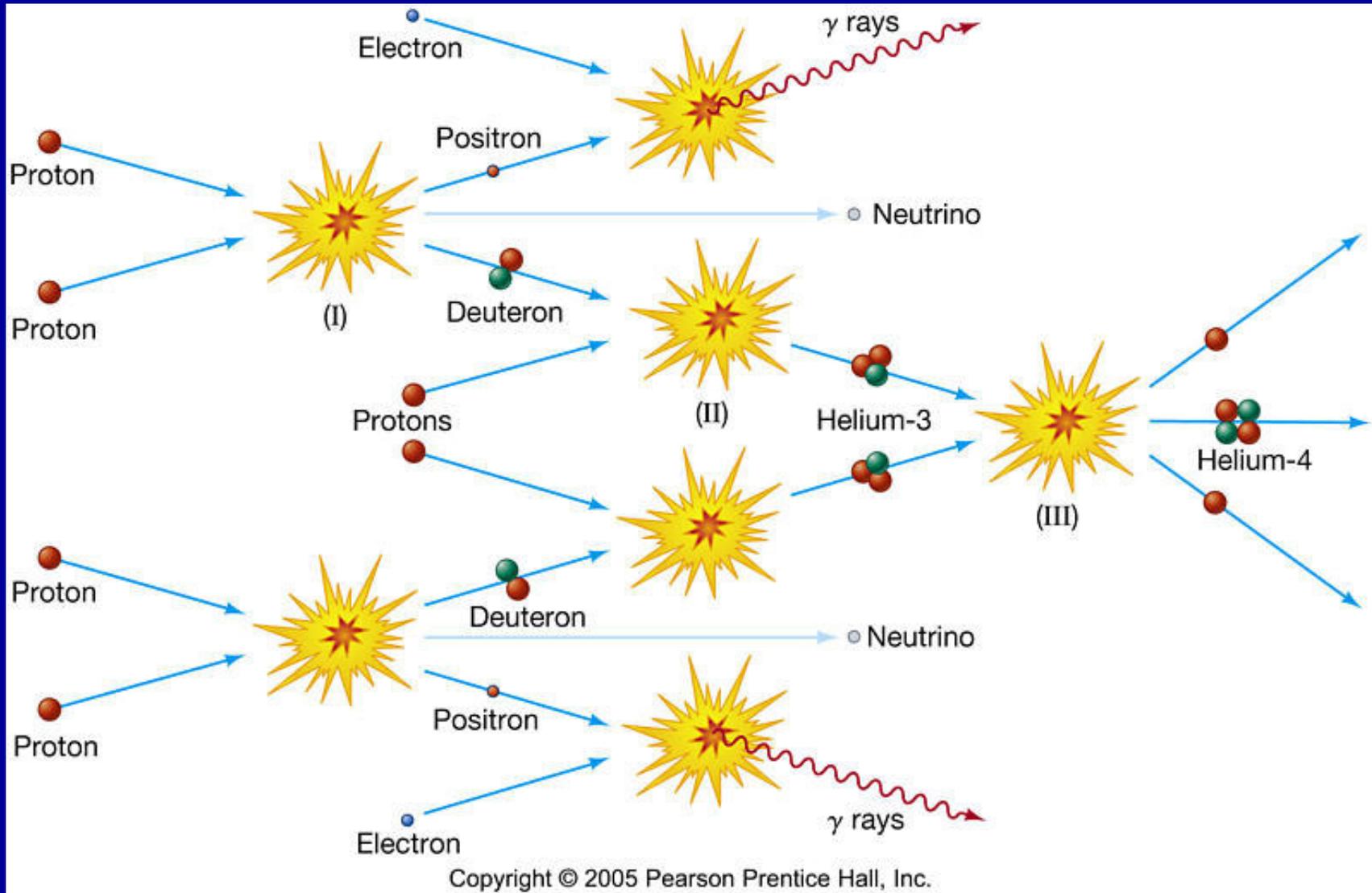


SOL:

Consideremos agora a evolução futura do nosso Sol. Actualmente o Sol é uma estrela da sequência principal e da classe espectral **G2**. Existe há cerca de 5000 milhões de anos e está sensivelmente a meio da sua vida como estrela da sequência principal.

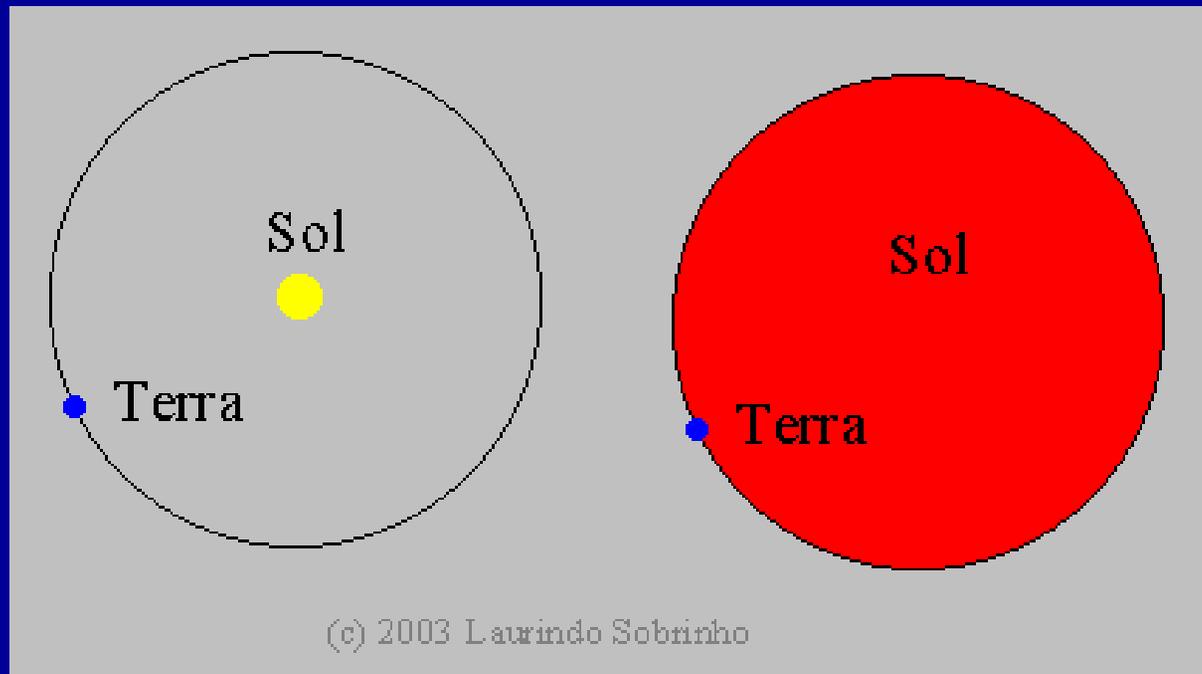
Actualmente ocorre a combustão do **Hidrogénio** e vai-se formando um núcleo de Hélio.





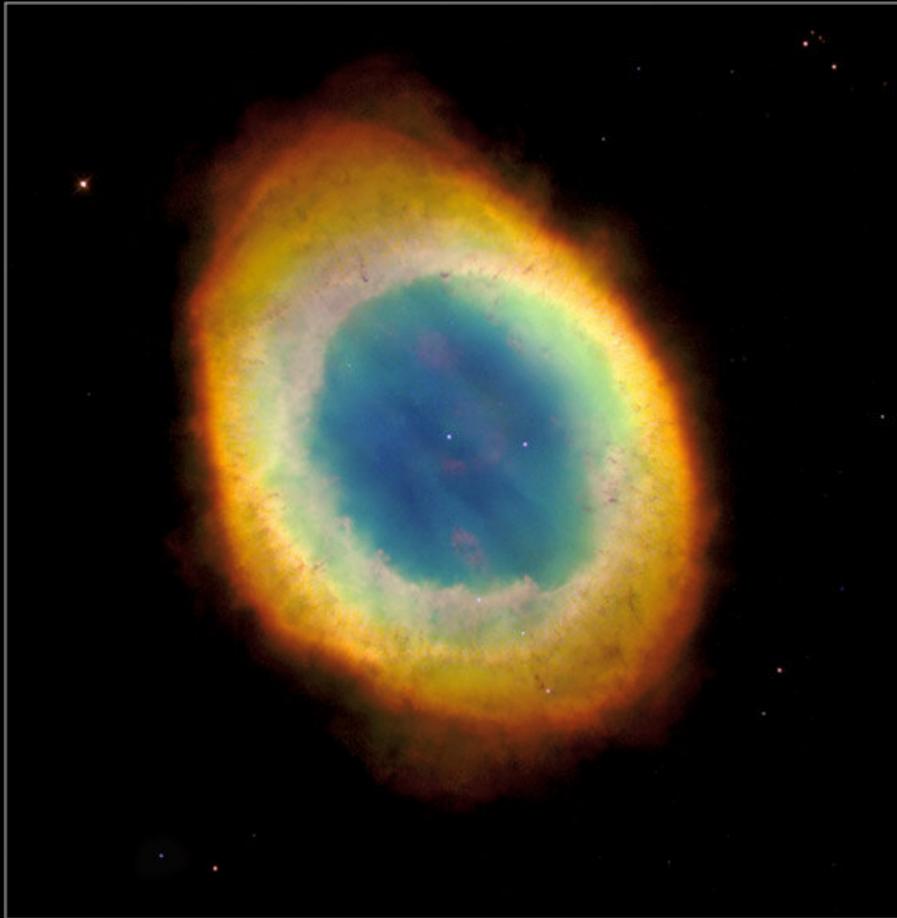


Quando o núcleo de Hélio tiver massa suficiente então dá-se a combustão do Hélio (formando o Carbono). A energia libertada fará **expandir as regiões mais externas!** Estas, ao expandirem, arrefecem e adquirem uma cor avermelhada. Forma-se assim uma **Gigante Vermelha** cujo raio será equivalente ao raio da órbita da Terra.





Ring Nebula



Hubble
Heritage

PRC99-01 • Space Telescope Science Institute • Hubble Heritage Team (AURA/STScI/NASA)

As camadas mais externas serão expulsas dando origem a uma **nebulosa planetária**. A parte mais central irá condensar-se dando origem a uma estrela **anã branca**. Como exemplo disto temos a **nebulosa do Anel** (M57) na constelação de Lira.



A densidade média de uma anã branca é aproximadamente de **$1.5 \times 10^6 \text{ g/cm}^3$** (cerca de 1 000 000 de vezes superior à densidade do Sol). A estabilidade da estrela é assegurada pela pressão exercida pelos electrões.

Tipicamente a massa de uma anã branca situa-se entre 0.5 e 1.4 massas solares e o seu raio é comparável ao da Terra. A estrela anã branca arrefece muito lentamente até se transformar numa **anã preta**. Pensa-se que o Universo ainda não existe há tempo suficiente para que se possam observar este tipo de resíduo estelar.



Anã branca Sirius B observada em raios X
NASA/SAO/CXC



Consideremos agora a evolução de uma estrela com uma massa inicial superior a 10 massas solares.

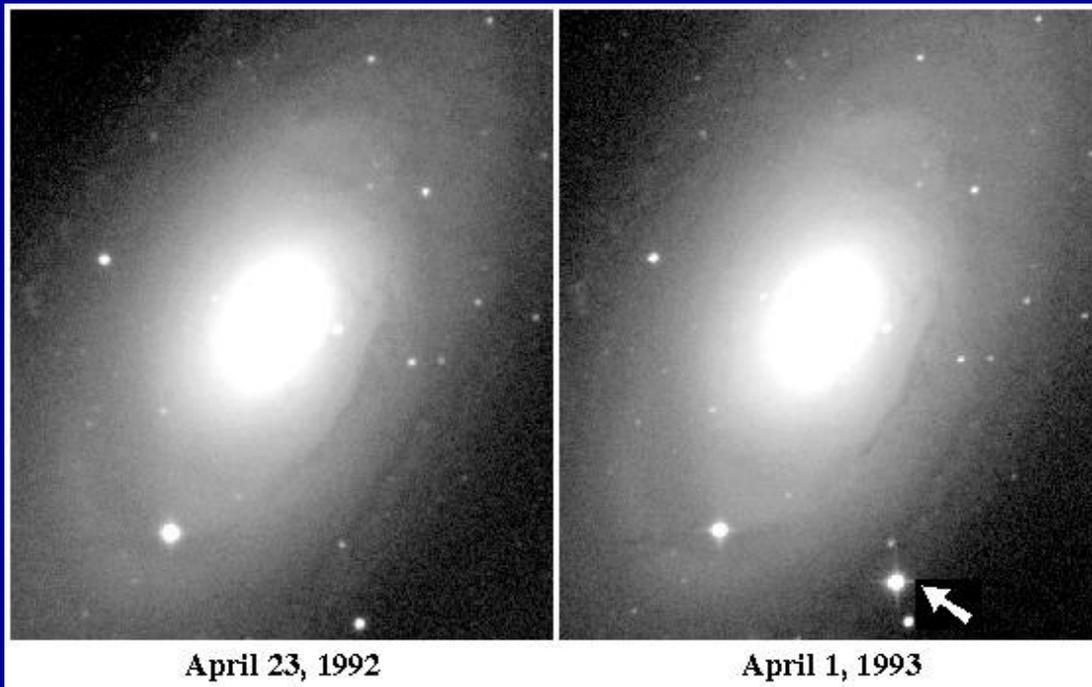
Temos como exemplo **Rigel**, uma **supergigante azul** da constelação de **Orion** cuja massa está estimada em cerca de 20 massas solares.





Universidade da Madeira

Neste caso a quando a estrela acaba a sua fase de vida principal explode naquilo a que chamamos uma **supernova**. Estas explosões são tão violentas que a luz libertada na explosão de uma supernova numa galáxia chega a ser mais intensa do que a luz emitida por todas as estrelas dessa galáxia.



Supernova observada na galáxia M81. A foto da esquerda foi tirada antes da explosão e a da direita quando a explosão estava no seu auge.

(http://science.nasa.gov/newhome/headlines/features/ast09sep98_1.htm)



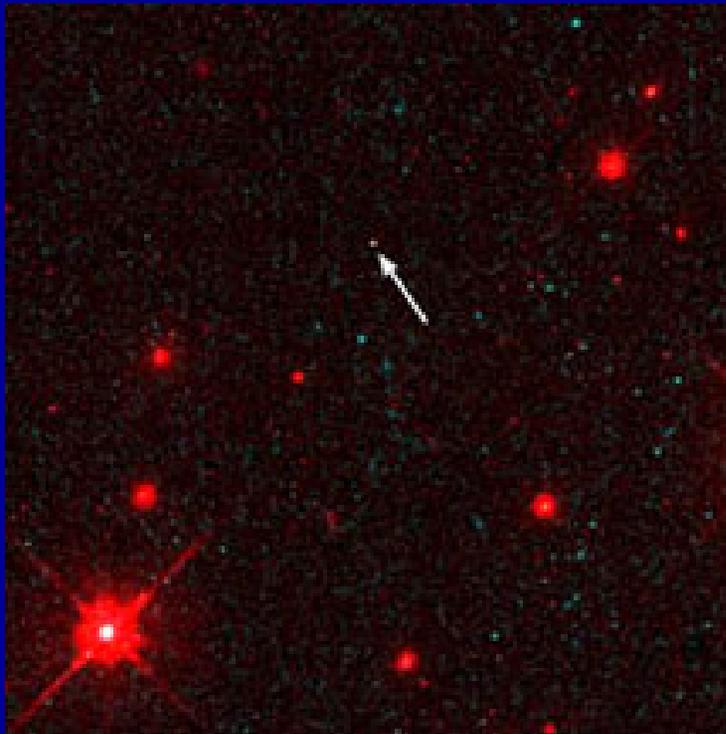
As camadas externas da estrela são expelidas para longe e irão provavelmente alimentar nuvens de gases e poeiras onde vão nascer novas estrelas. Quando se dá a explosão fica apenas para trás um núcleo com uma massa igual ou superior a 1.4 massas solares.

S U P E R N O V A

IMAGE BY SMEAGOL



Se este núcleo tiver uma massa próxima de 1.4 massas solares então forma-se uma **estrela de neutrões**. Estas estrelas têm massas a rondar 1.4 massas solares (podendo ir até as 2 massas solares) e raios entre os 10 e 20 km o que lhes confere uma densidade entre 8×10^{13} a 2×10^{15} g/cm³.

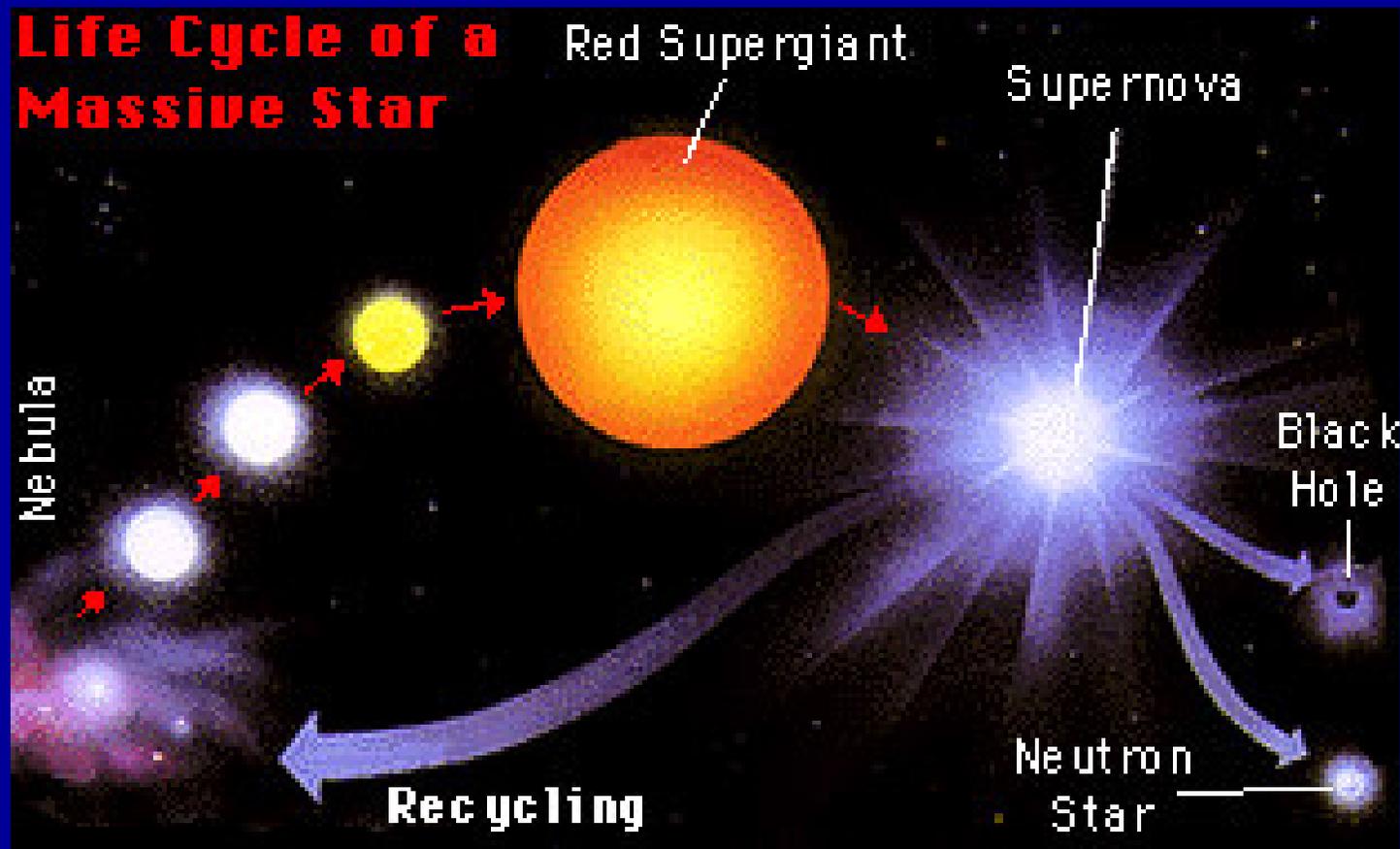


Estrela de neutrões fotografada pelo HST na constelação de Corona Australis.

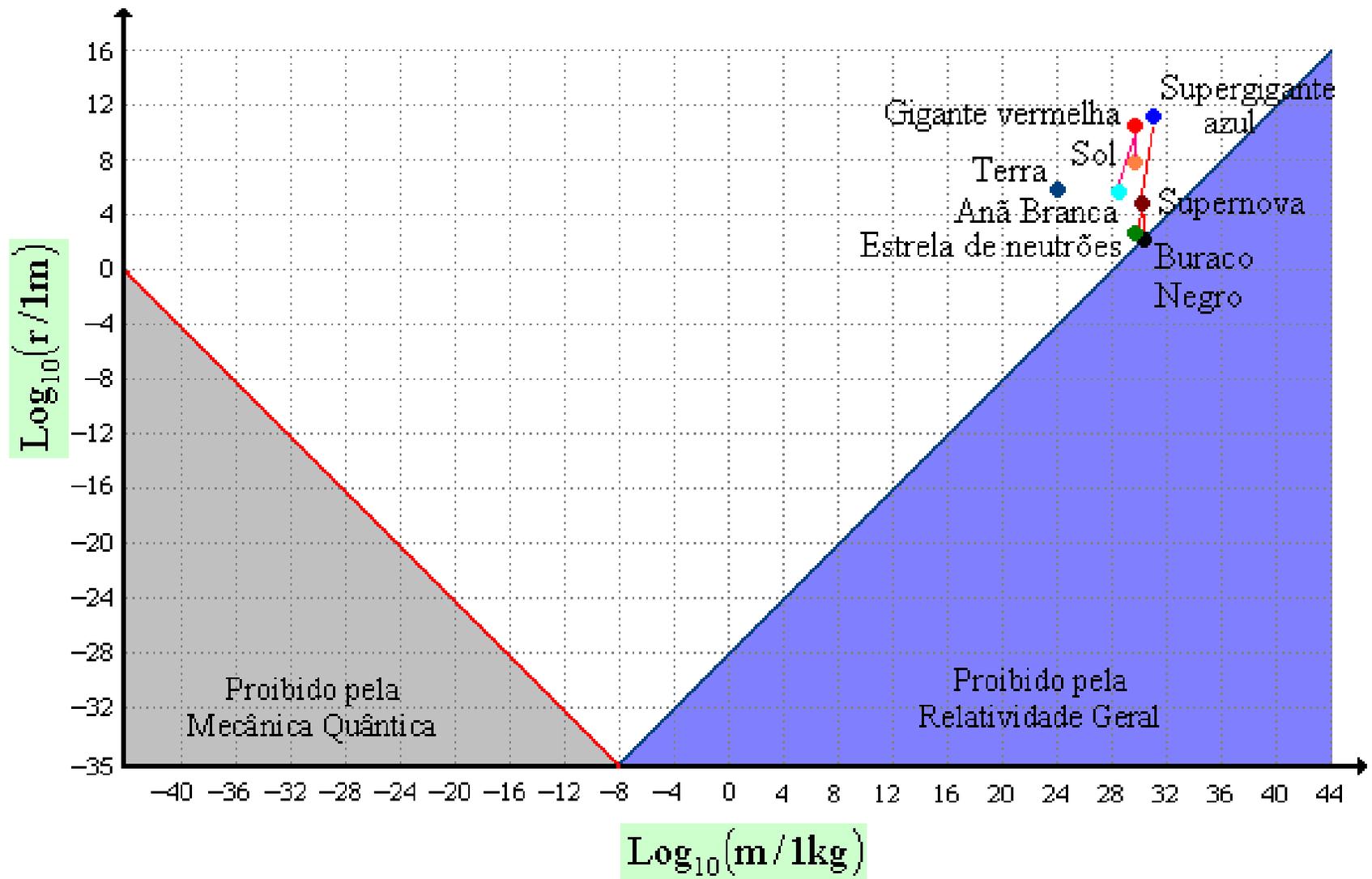
Image Credit: Frederick M. Walter (State University of New York at Stony Brook) and NASA.



Se a massa desse núcleo for ‘muito’ superior a 1.4 massas solares (este limite não é bem conhecido) então o colapso total é inevitável e forma-se mesmo um **buraco negro**.

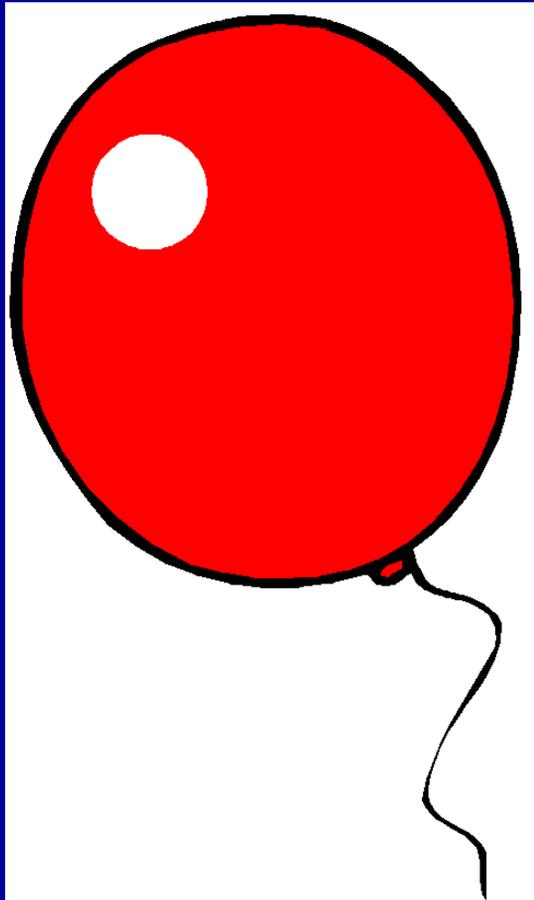


http://imagine.gsfc.nasa.gov/Images/basic/xray/supernova_cycle.gif



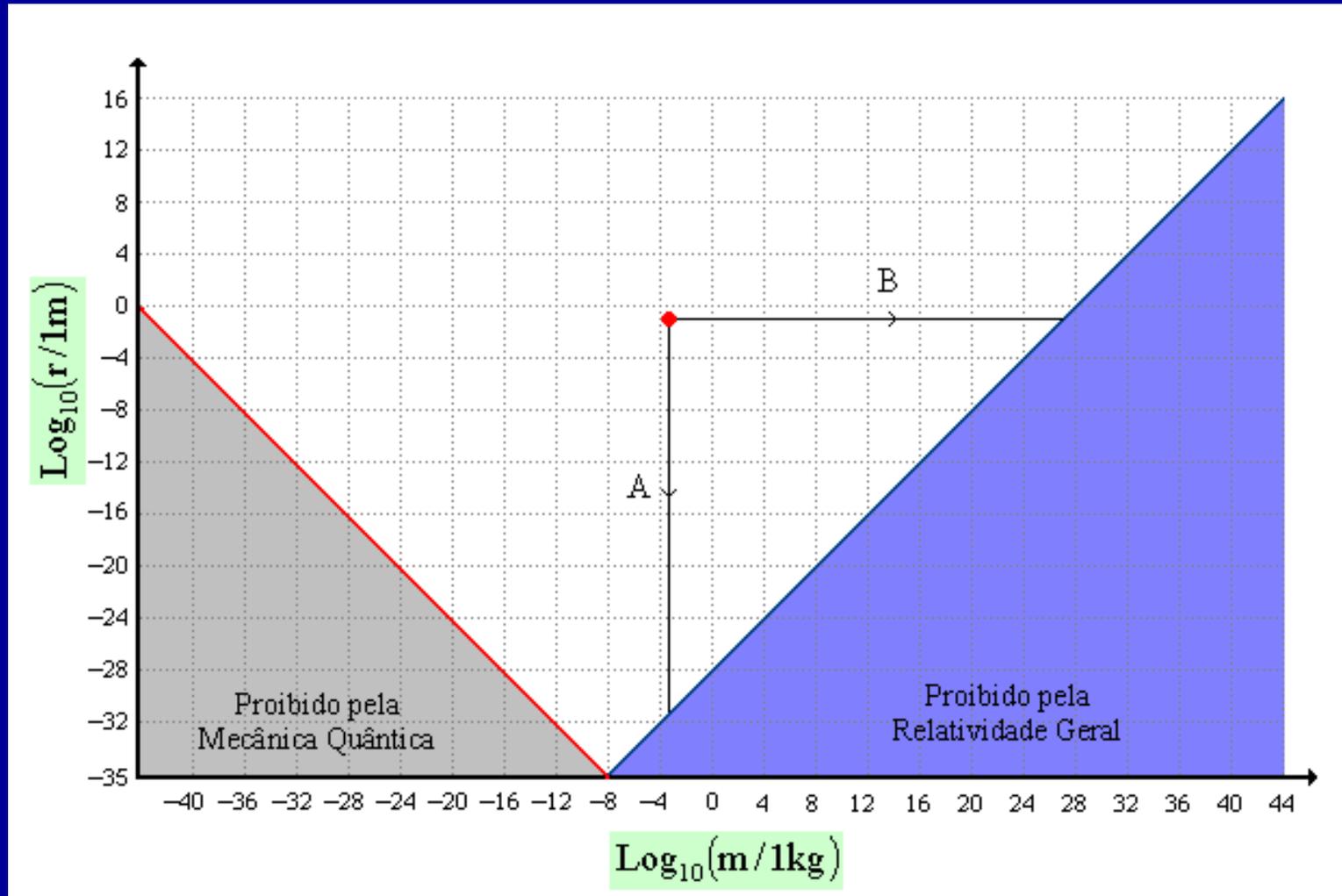


3. *Como fabricar um BN*



Consideremos um balão de raio 10 cm contendo Hidrogénio molecular. Nas condições de pressão e temperatura normais isto equivale a uma massa de aproximadamente 0.377g (vamos desprezar por simplicidade as paredes do balão).

$$\rho_h = 0.0000899 \text{ g/cm}^3$$



Dois caminhos possíveis para fabricar um buraco negro.



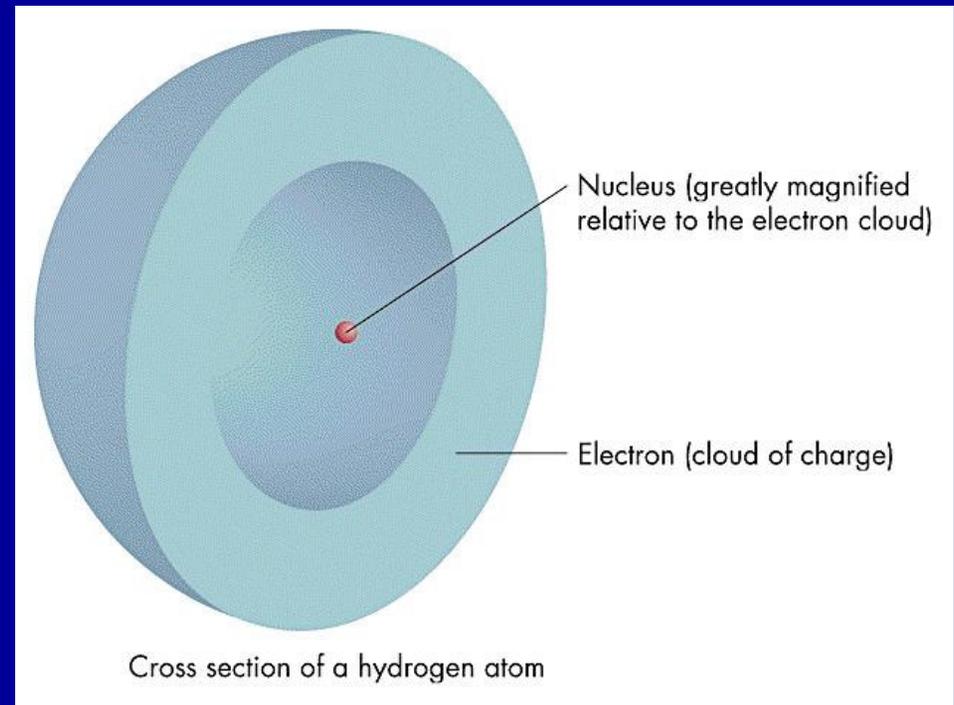
A – Reduzir o volume do balão (mantendo a massa).

Átomo de Hidrogénio:

$$m_H = 1.67 \times 10^{-27} \text{ Kg}$$

$$r_H = 5.292 \times 10^{-11} \text{ m}$$

$$V_H = 6.2 \times 10^{-31} \text{ m}^3$$





Quantidade de átomos de hidrogénio no balão:

$$\frac{m_{\text{balão}}}{m_{\text{H}}} \approx 2.26 \times 10^{23} \text{ átomos}$$

Volume efectivamente ocupado por estes átomos:

$$2.26 \times 10^{23} \times V_{\text{H}} \approx 1.4 \times 10^{-7} \text{ m}^3$$

Percentagem do volume do balão efectivamente ocupado:

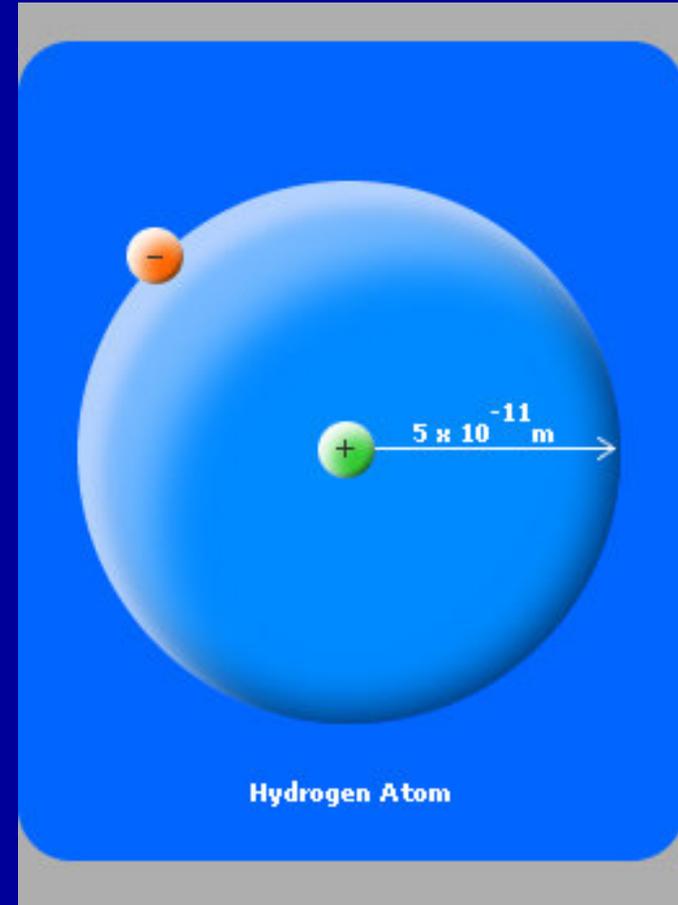
$$\frac{1.4 \times 10^{-7} \text{ m}^3}{V_{\text{balão}}} \times 100 \approx 0.0033\%$$

Existe muito espaço livre no interior do balão!!!



O raio de um átomo de hidrogénio (distância média do electrão ao núcleo) é cerca de 10000 vezes superior ao raio do núcleo (constituído por um protão).

Átomo de Hidrogénio (a dimensão do protão e do electrão estão exageradas em relação à dimensão do próprio átomo.
<http://www.stillwaterpalladium.com/images/hydrogen.jpg>



Existe muito espaço livre no interior de um átomo!!!



Se existe assim tanto espaço livre então vamos comprimir o balão. O objectivo seria reduzir o raio do balão ao respectivo raio de Schwarzschild:

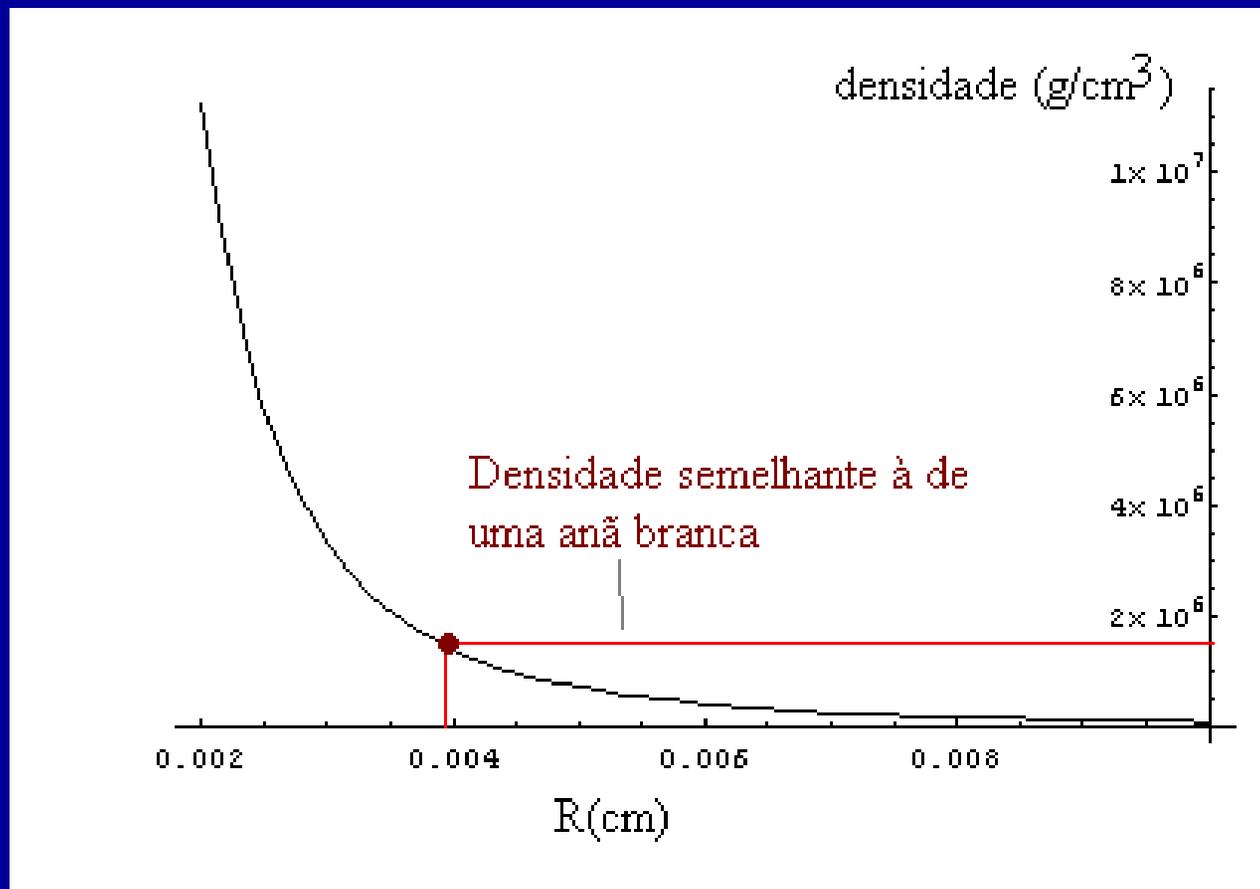
$$R = \frac{2GM_H}{c^2} \approx 5.6 \times 10^{-31} \text{ m}$$

Teríamos de comprimir o balão até este ter um raio cerca de 10^{20} vezes inferior ao de um átomo Hidrogénio! Nesse volume estariam todos os cerca de 10^{23} átomos iniciais!!!

Durante o processo de diminuição de volume ocorreriam vários problemas muito antes de atingir o valor pretendido.



Por exemplo, para um raio de aproximadamente 0.004cm teríamos já uma densidade comparável à verificada nas estrelas anãs brancas (que gozam de estabilidade embora tenham massas da ordem da massa do Sol).





B – Aumentar a massa do balão (mantendo o raio).

Neste caso não teríamos o problema de trabalhar com raios de grandeza subatômica.

Teríamos contudo que introduzir no balão uma massa mais de 10000 vezes superior à massa da Terra!!!

Embora não seja fácil de produzir um buraco negro artificialmente poderá não ser impossível mediante a utilização de equipamento adequado. Neste momento esse equipamento chama-se **Acelerador de partículas**.



4. *Aceleradores de Partículas*

Um acelerador de partículas é um aparelho que utiliza campos eléctricos e/ou magnéticos para **acelerar partículas com carga eléctrica** (electrões, positrões, prótons, ...) até velocidades relativistas (ou seja velocidades próximas da velocidade da luz).

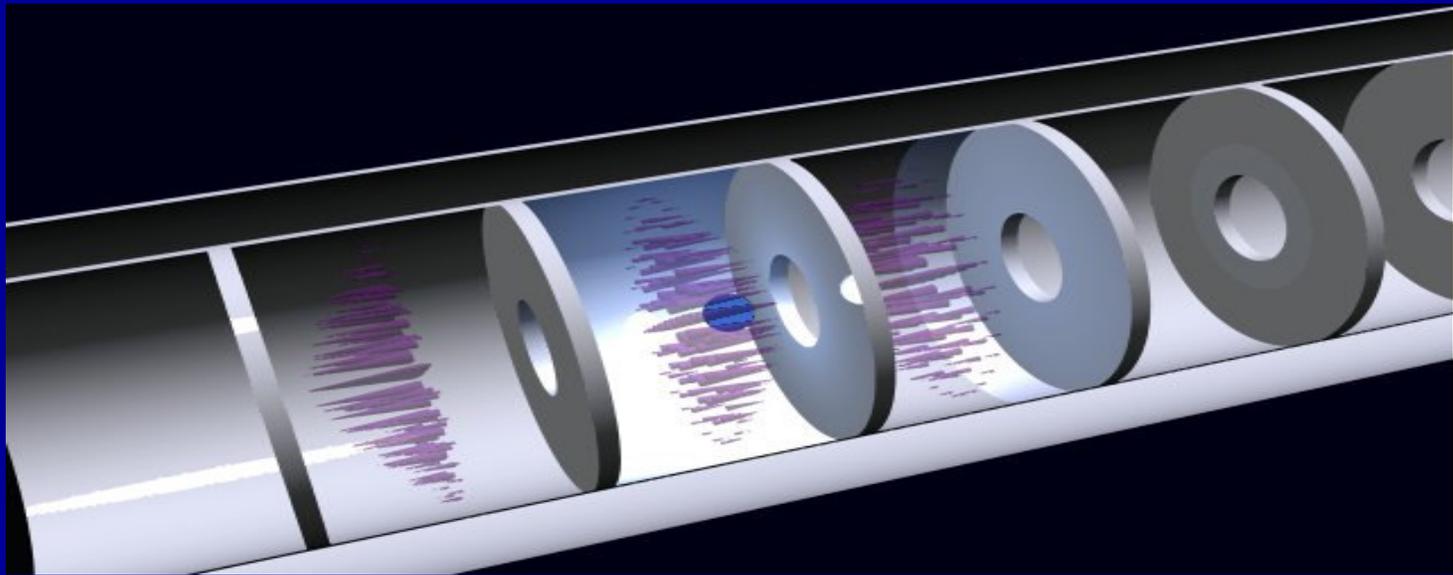
Acelerador de partículas construído em 1937 pela Philips. Foi utilizado no desenvolvimento da bomba atómica (http://en.wikipedia.org/wiki/Particle_accelerator).





Universidade da Madeira

Num acelerador de alta energia existe uma sequência de placas às quais é aplicado um campo de energia bastante elevado, de tal forma que as partículas ao serem atraídas são aceleradas.

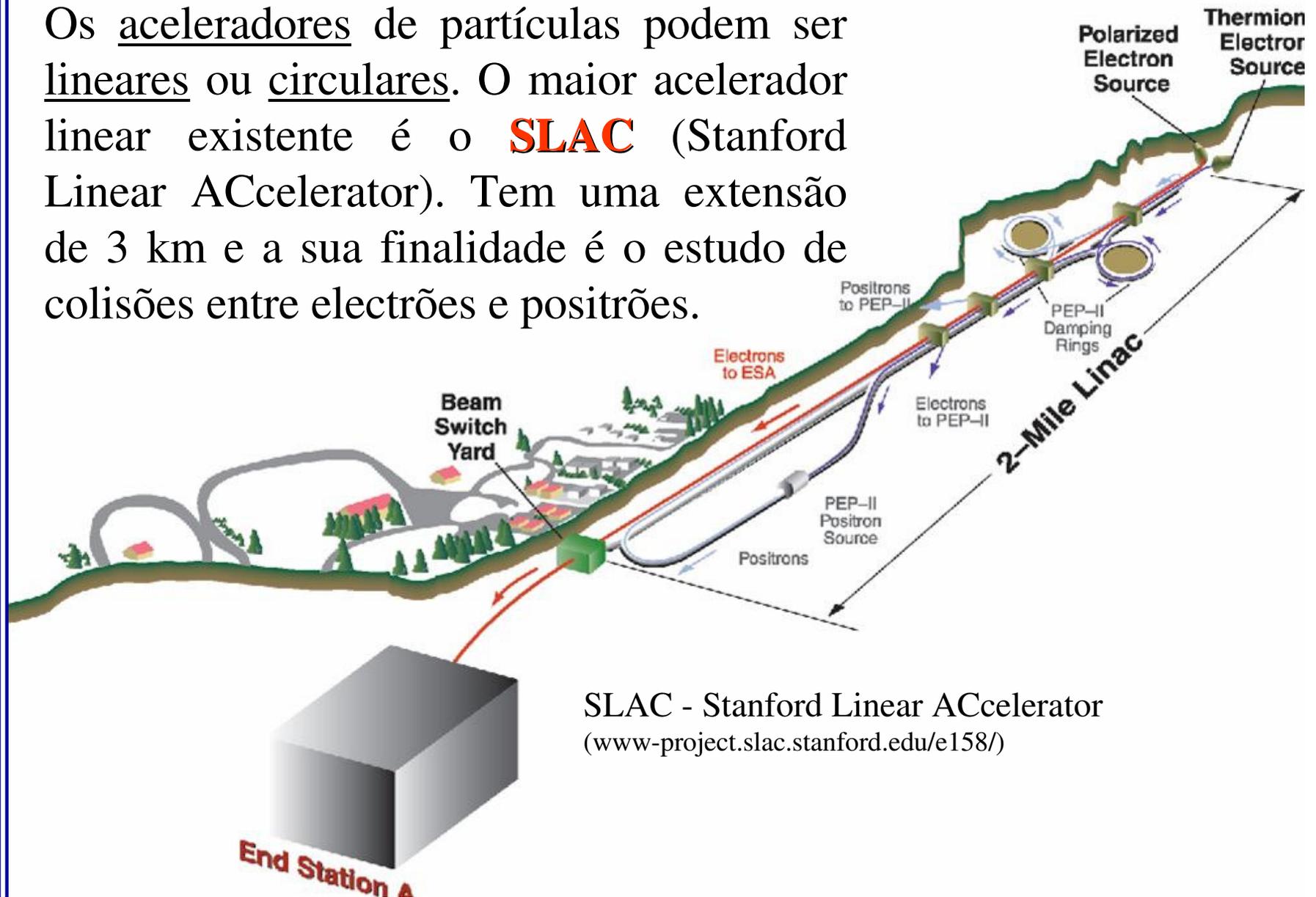


No momento em que as partículas atravessam o orifício existente no centro da placa a polaridade do campo é invertida de modo a repelir as partículas conferindo-lhes assim mais velocidade. As partículas são catapultadas para a placa seguinte onde se repete o processo. (<http://w4.lns.cornell.edu/~cdj/gallery.html>)



Universidade da Madeira

Os aceleradores de partículas podem ser lineares ou circulares. O maior acelerador linear existente é o **SLAC** (Stanford Linear ACcelerator). Tem uma extensão de 3 km e a sua finalidade é o estudo de colisões entre electrões e positrões.



SLAC - Stanford Linear ACcelerator
(www-project.slac.stanford.edu/e158/)

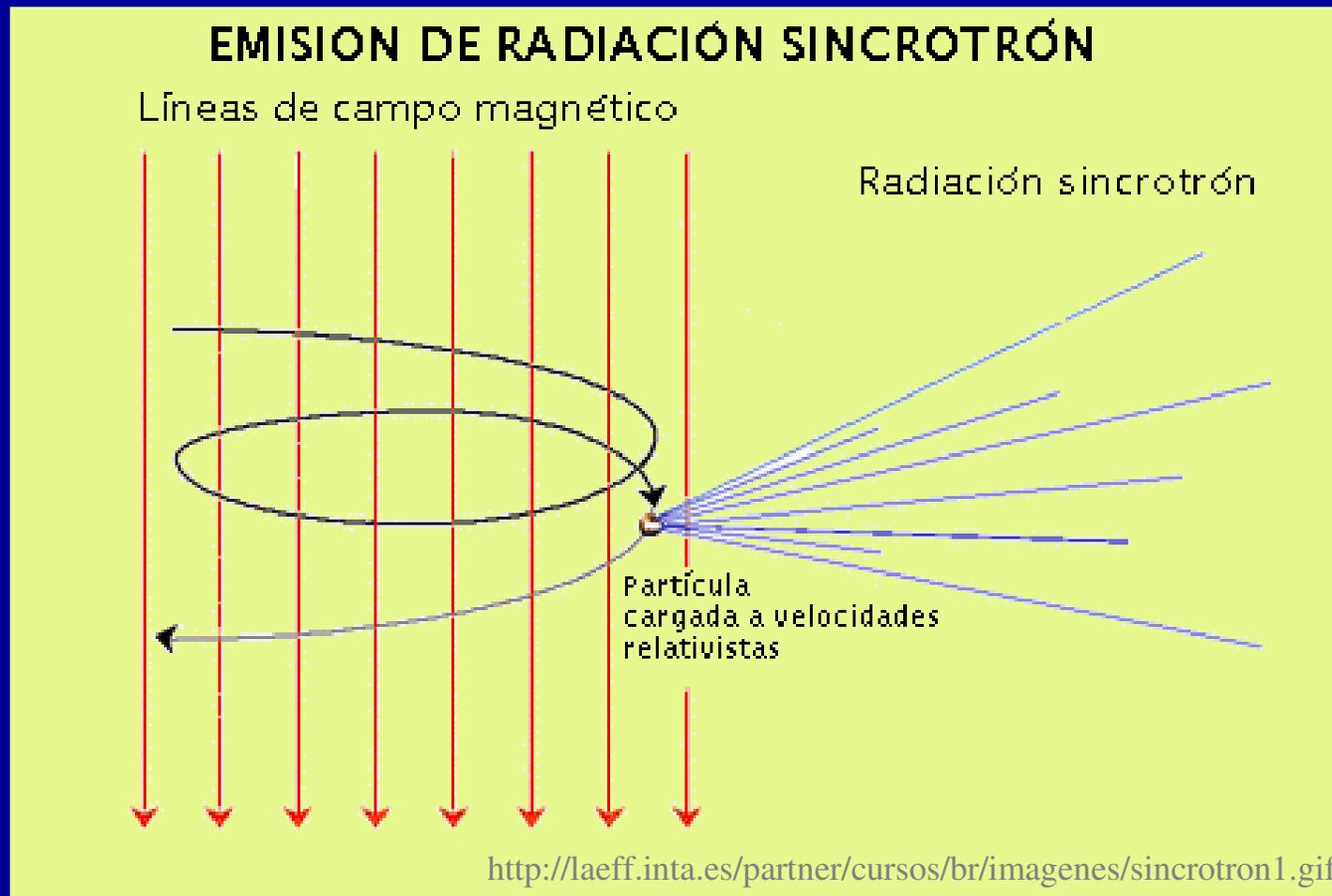


Num acelerador circular as partículas são forçadas a seguirem trajetórias circulares sob a acção de electroímans. Uma grande vantagem sobre os aceleradores lineares é que as partículas podem ser levadas a completar várias voltas até que se coloque o alvo no seu caminho.

A grande desvantagem reside no facto de que **num acelerador circular as partículas emitem sempre radiação de sincrotrão** a qual deve ser compensada na interpretação dos resultados obtidos.



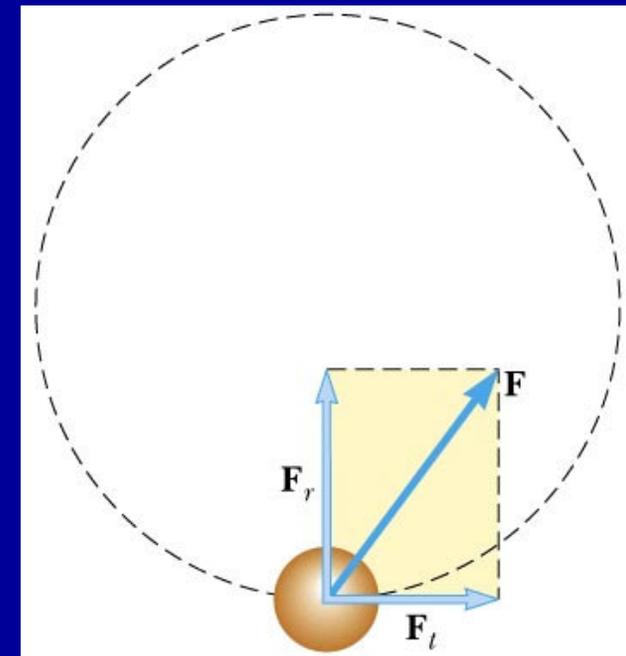
Qualquer partícula com carga eléctrica e com movimento acelerado emite radiação. Essa radiação é designada por **radiação de sincrotrão**.





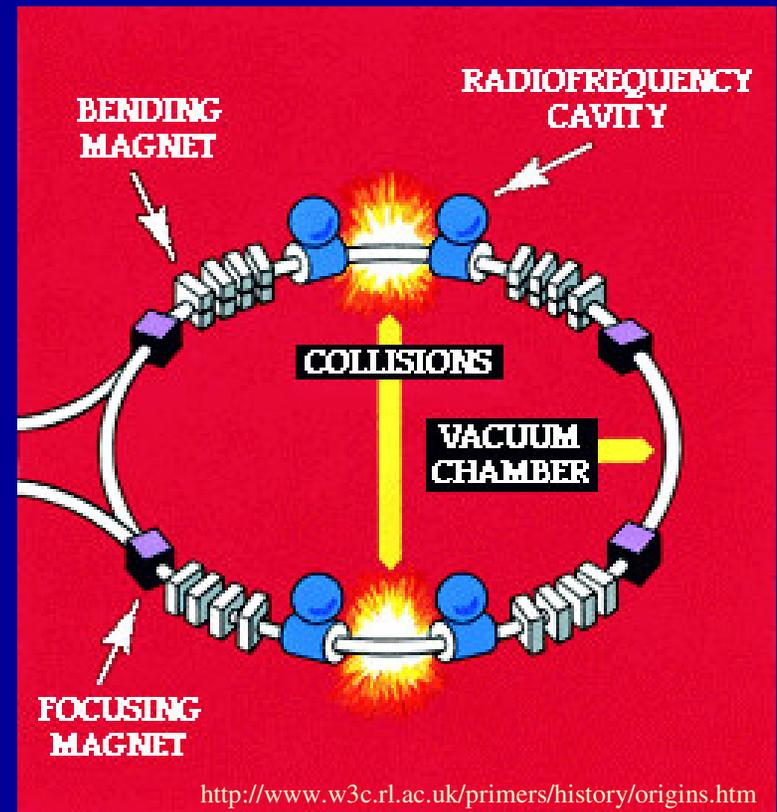
Num acelerador linear assim que é atingida a velocidade pretendida podemos parar o processo de aceleração continuando as partículas, a partir desse ponto, com movimento retilíneo e uniforme deixando de ser emitida, nesse caso, **radiação de sincrotrão**.

No caso de um acelerador circular mesmo que deixe de haver aceleração tangencial existe sempre uma componente de aceleração centrípeta, o que significa que irá existir sempre **radiação de sincrotrão**.





Um dos maiores aceleradores de partículas construído foi o **LEP** (Large Electron-Positron collider). Situa-se no **CERN** (Centro Europeu para a Pesquisa Nuclear). Tem uma circunferência de 27 km e esteve operacional entre 1989 e 2000.

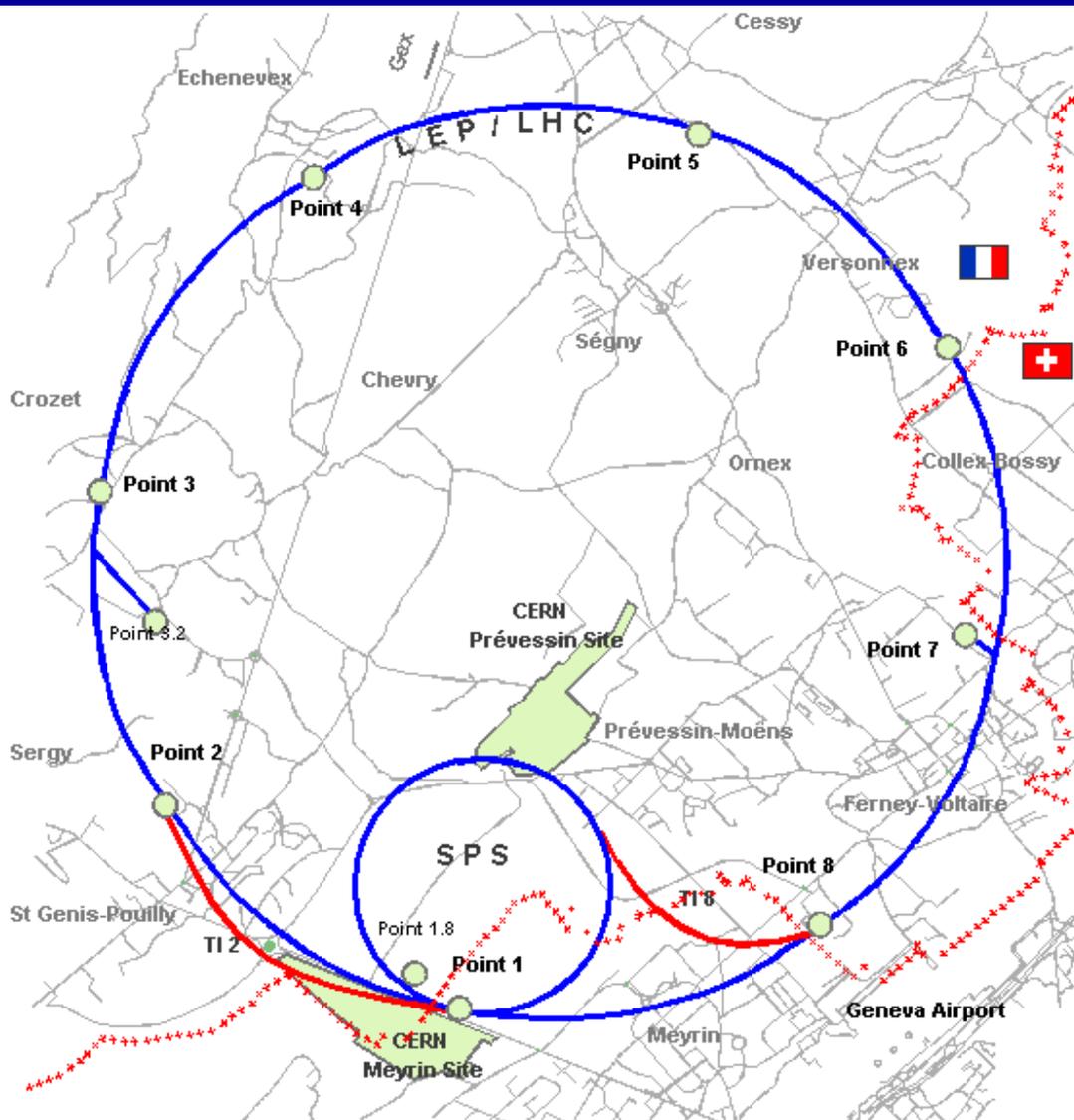


O LEP era capaz de acelerar um electrão até este ter uma energia de **104 GeV**, (cerca de 200 000 vezes superior à energia do electrão em repouso que é de 511 KeV).



Universidade da Madeira

UMAstronomia



Map of CERN sites and LHC access points

LEP / LHC:

a circunferência mede cerca de 27km de perímetro tendo partes na Suíça e outras na França (lhc-proj-qawg.web.cern.ch/.../MS-TD-guide.html).



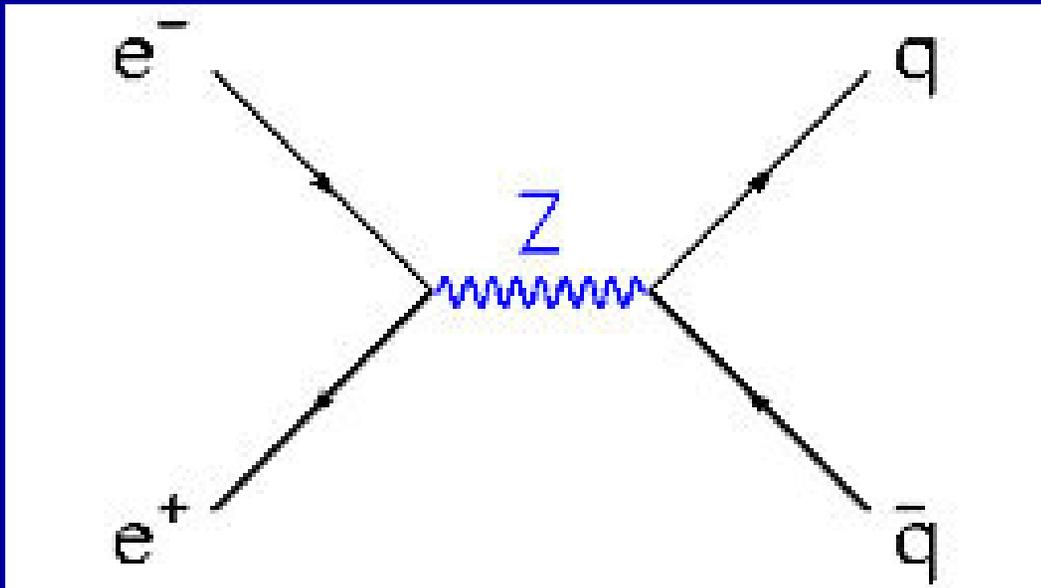


Electrões e positrões eram acelerados previamente noutra acelerador (mais antigo) até velocidades próximas da velocidade da luz e só depois eram injectados nos tubos do LEP onde continuavam a ser acelerados aumentando a respectiva energia cinética. Como a velocidade das partículas materiais não pode exceder a velocidade da luz esse aumento de energia cinética acaba por traduzir-se num aumento da massa associada a essas partículas.

$$E_c = \frac{1}{2}mv^2$$

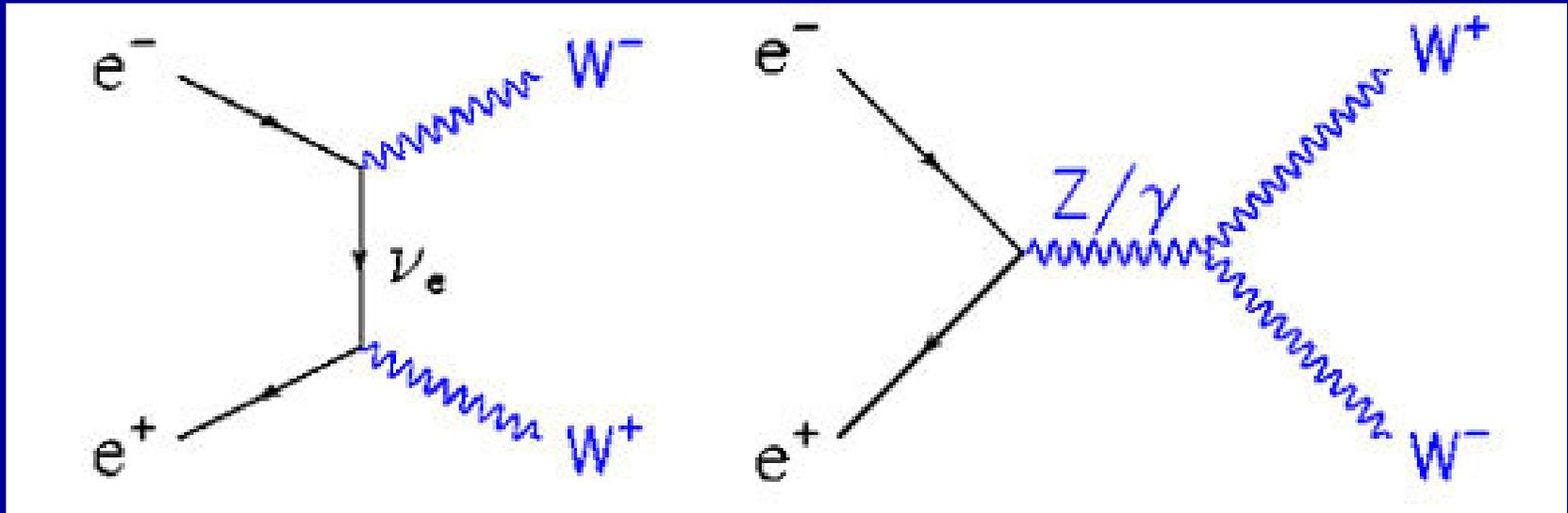


Do choque entre um **electrão** (matéria) e um **positrão** (antimatéria) resulta um **fotão** ou um **bosão Z** altamente energéticos. Estes acabam por decair quase de imediato noutras partículas elementares que são detectadas por detectores de partículas.



Choque entre um **electrão** e um **positrão** de onde resulta a produção um **bosão Z** que por sua vez se desintegra num par **quark - antiquark**

(www.futura-sciences.com/.../d/dossier596-3.php)



Choque entre um electrão e um positrão. Quando estes se aniquilam mutuamente também podem ser libertado um par de **bosões W^+-W^-** por dois processos distintos como se mostra na figura.

(www.futura-sciences.com/.../d/dossier596-3.php)



“Rasto” da desintegração das partículas criadas no choque entre um electrão e um positrão.

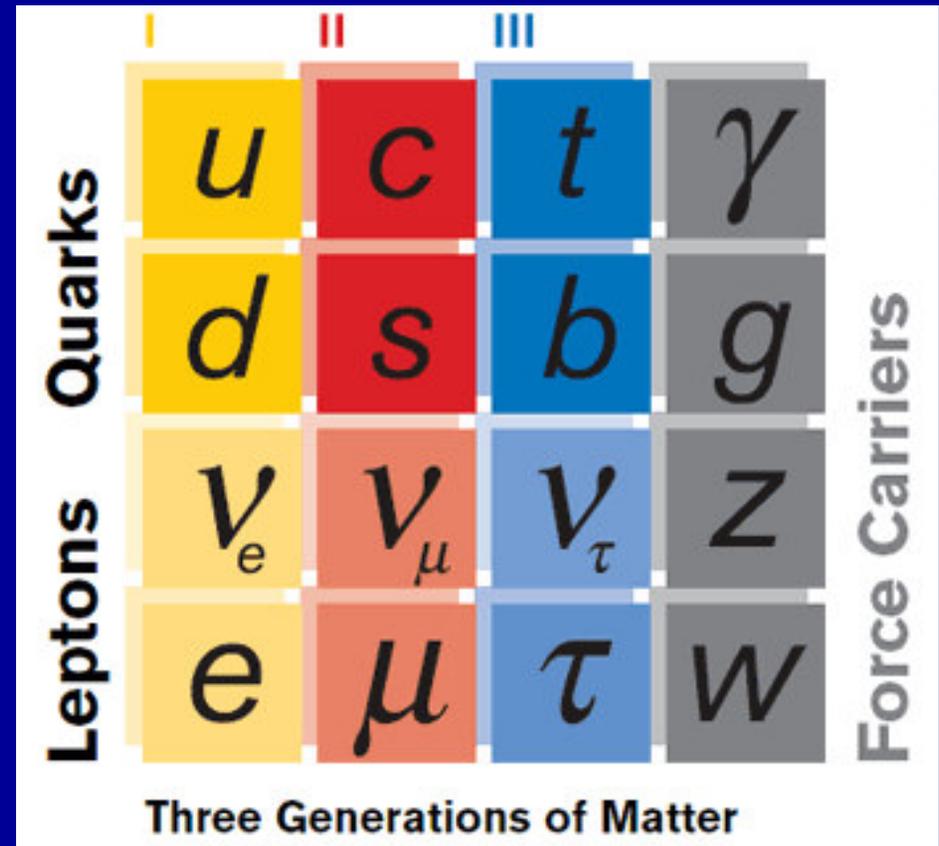
UMAstronomia





Resultados mais importantes obtidos com o LEP:

- valores precisos das massas dos bosões Z e W
- restringiu-se a três o número de neutrinos existentes no Modelo Padrão de partículas elementares.
- provavelmente foi detectado o bosão de Higgs (embora não exista consenso quanto a isso).



Modelo Padrão de partículas

(<http://www.symmetrymagazine.org/images/200502/standard3.gif>).



Universidade da Madeira

O **LHC** (Large Hadron Collider) é um acelerador de partículas que está a ser montado no **CERN** e que deverá estar operacional já em 2007. A montagem está a ser feita nos túneis anteriormente utilizados pelo **LEP**.

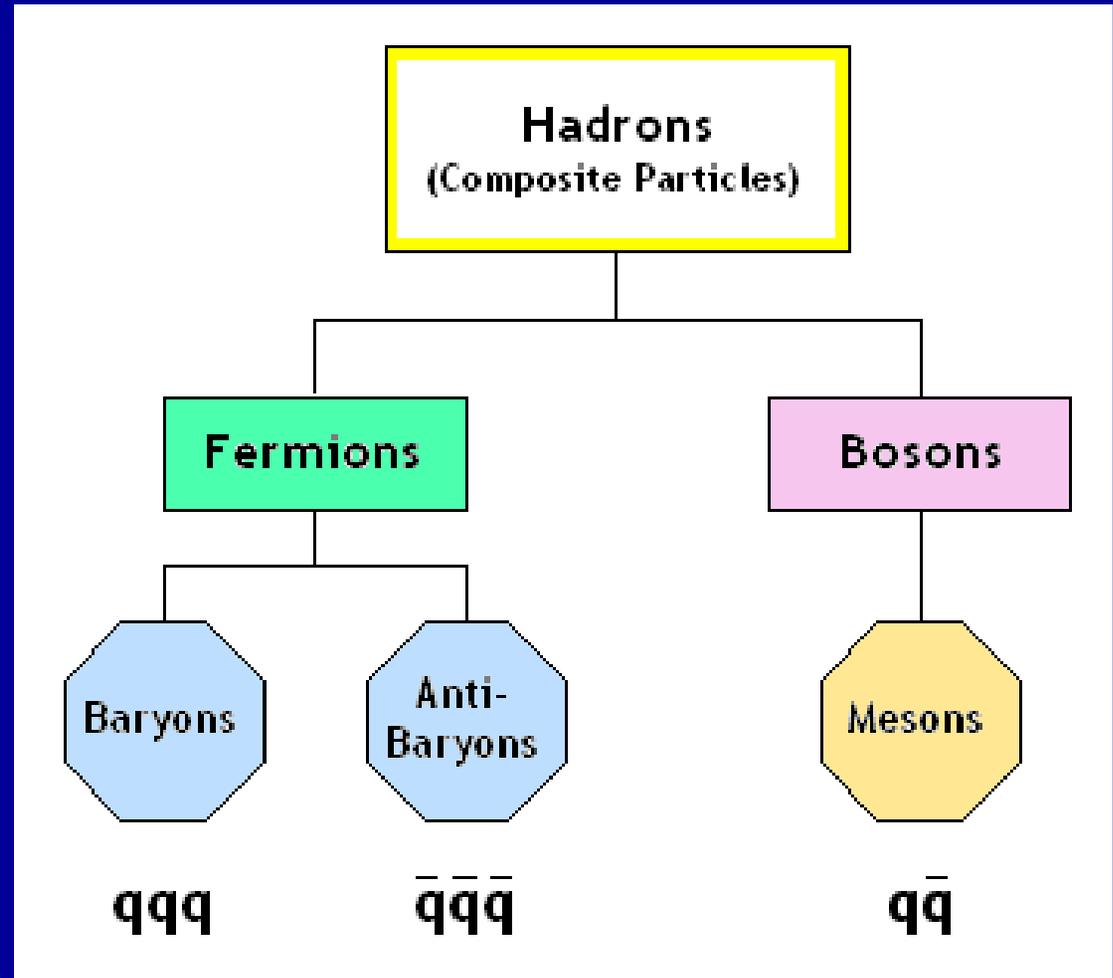
UMAstronomia



(<http://en.wikipedia.org/wiki/LHC>)



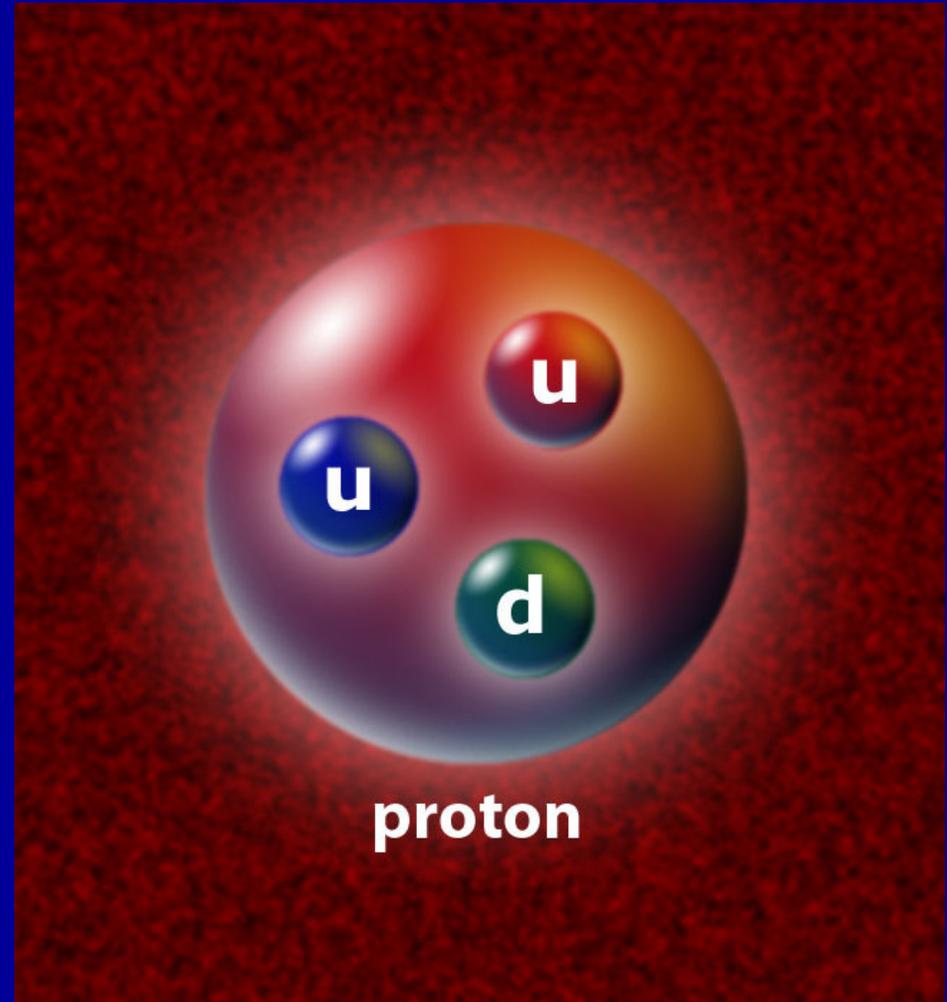
No LEP eram provocadas colisões entre electrões e positrões. No LHC as colisões serão entre protões que são **hadrões**. Os **hadrões** são partículas subatómicas que reagem à força nuclear forte. São compostos por **quarks** e/ou antiquarks ligados entre si por **gluões**.



<http://www2.slac.stanford.edu/vvc/theory/bldgblocks.html>



Os **protões** são os **hadrons** mais estáveis que se conhecem (apesar das inúmeras tentativas nunca foi observada uma reacção de decaimento de um protão e especula-se muito se os protões são ou não partículas estáveis).



O protão é constituído por dois quark up e um quark down ligados entre si por glúões.



Os prótons, cuja energia em repouso é de **938 MeV**, serão acelerados até energias da ordem dos **7 TeV** (cerca de 7000 vezes superior). Numa colisão entre dois prótons teremos em jogo uma energia de 14 TeV.

$$938 \text{ MeV} = 938 \times 10^6 \text{ eV} \approx 1.5 \times 10^{-10} \text{ J}$$

$$7 \text{ TeV} = 7 \times 10^{12} \text{ eV} \approx 10^{-6} \text{ J}$$

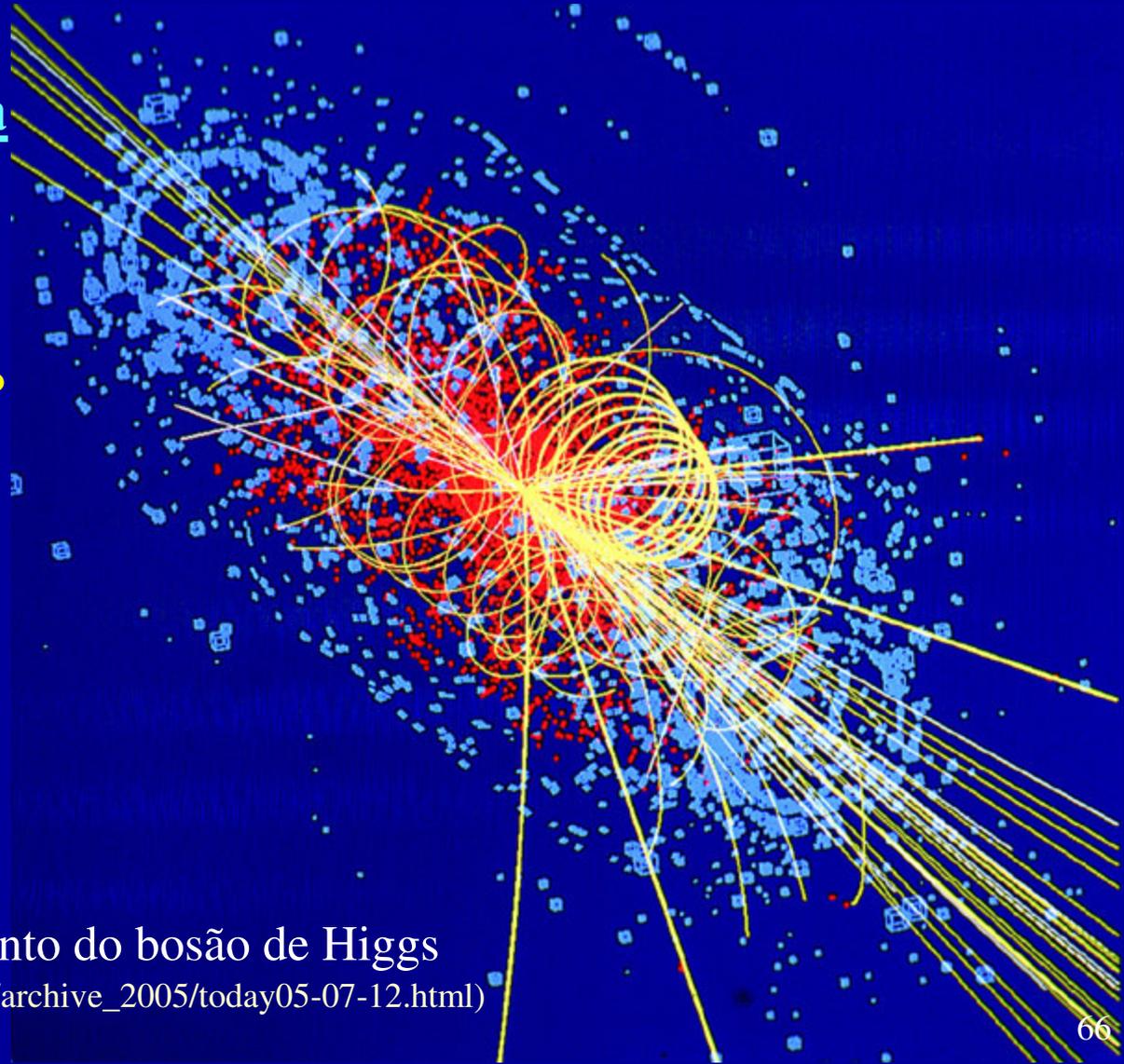
$$\frac{7 \text{ TeV}}{938 \text{ MeV}} \approx 7000$$



Com o LHC pretende-se responder a questões como:

O que é a massa
e qual a sua
origem?

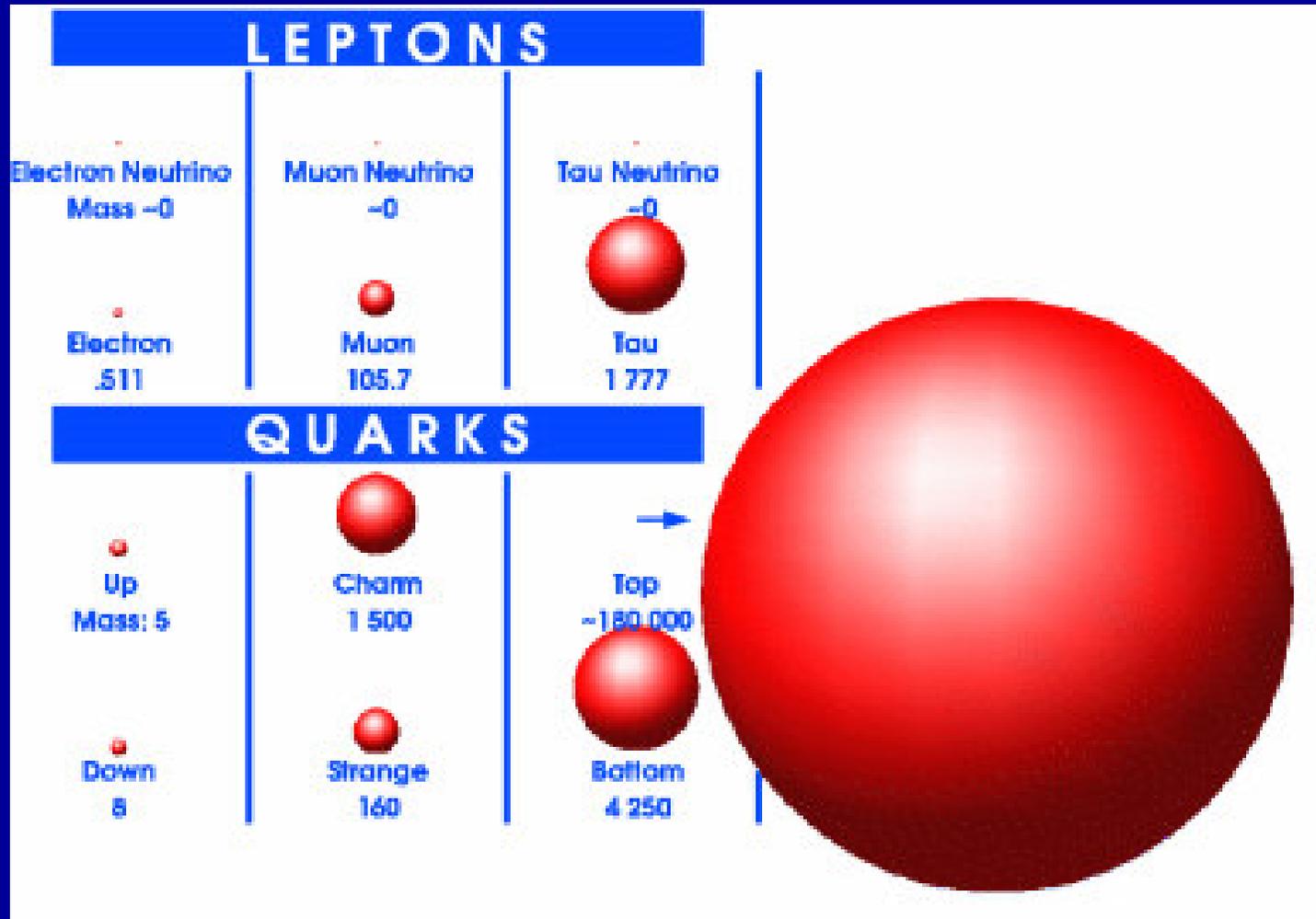
Existe ou não o
bosão de Higgs?



Simulação do decaimento do bosão de Higgs
(http://www.fnal.gov/pub/today/archive_2005/today05-07-12.html)

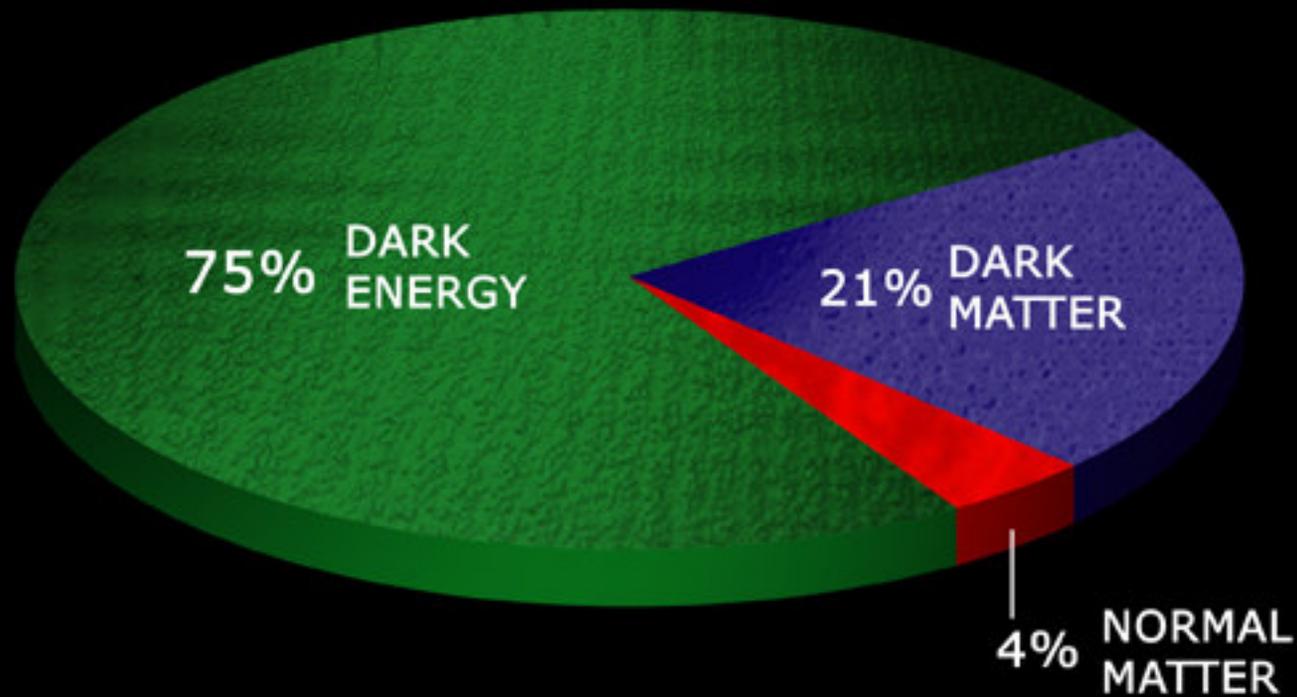


Por que é que as partículas elementares têm massas diferentes?



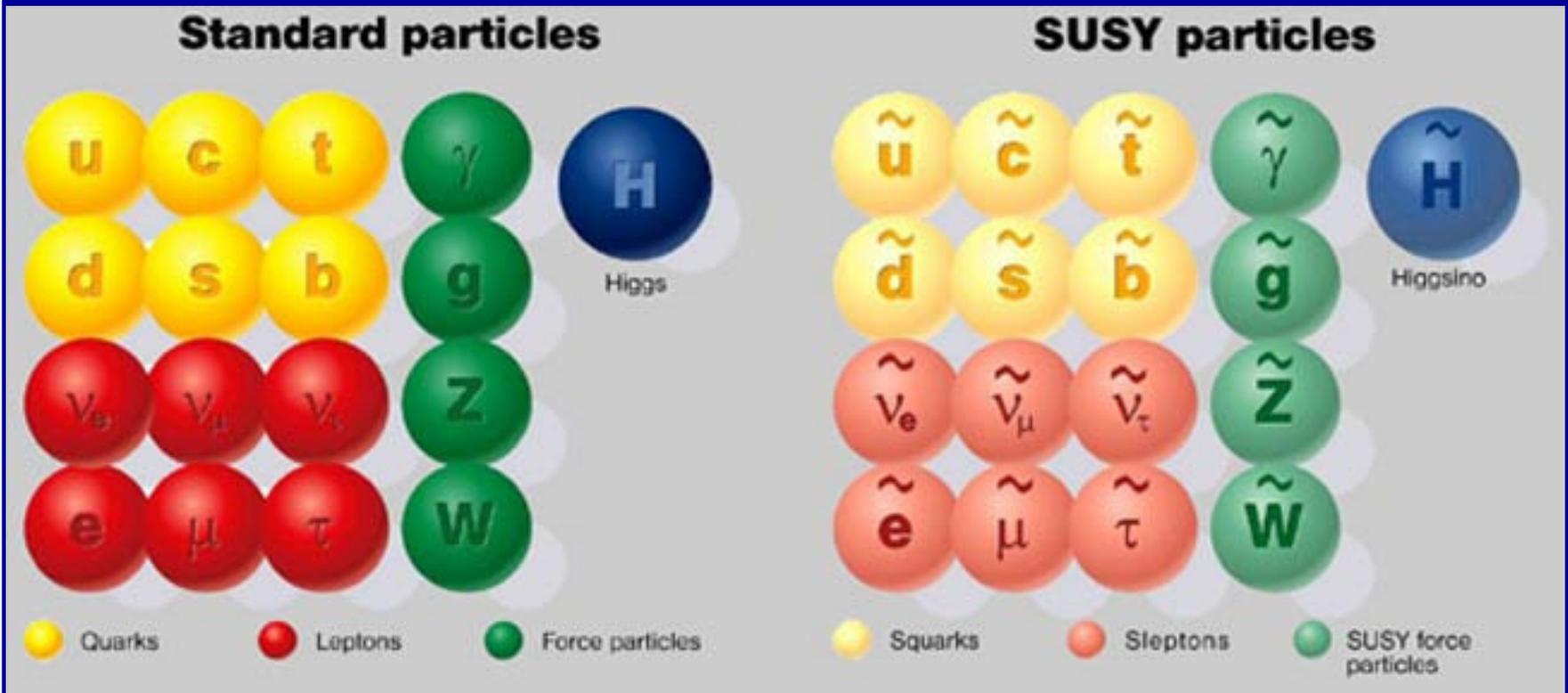


O que são a matéria escura e a energia escura?





Existem as partículas SUSY previstas pela supersimetria?



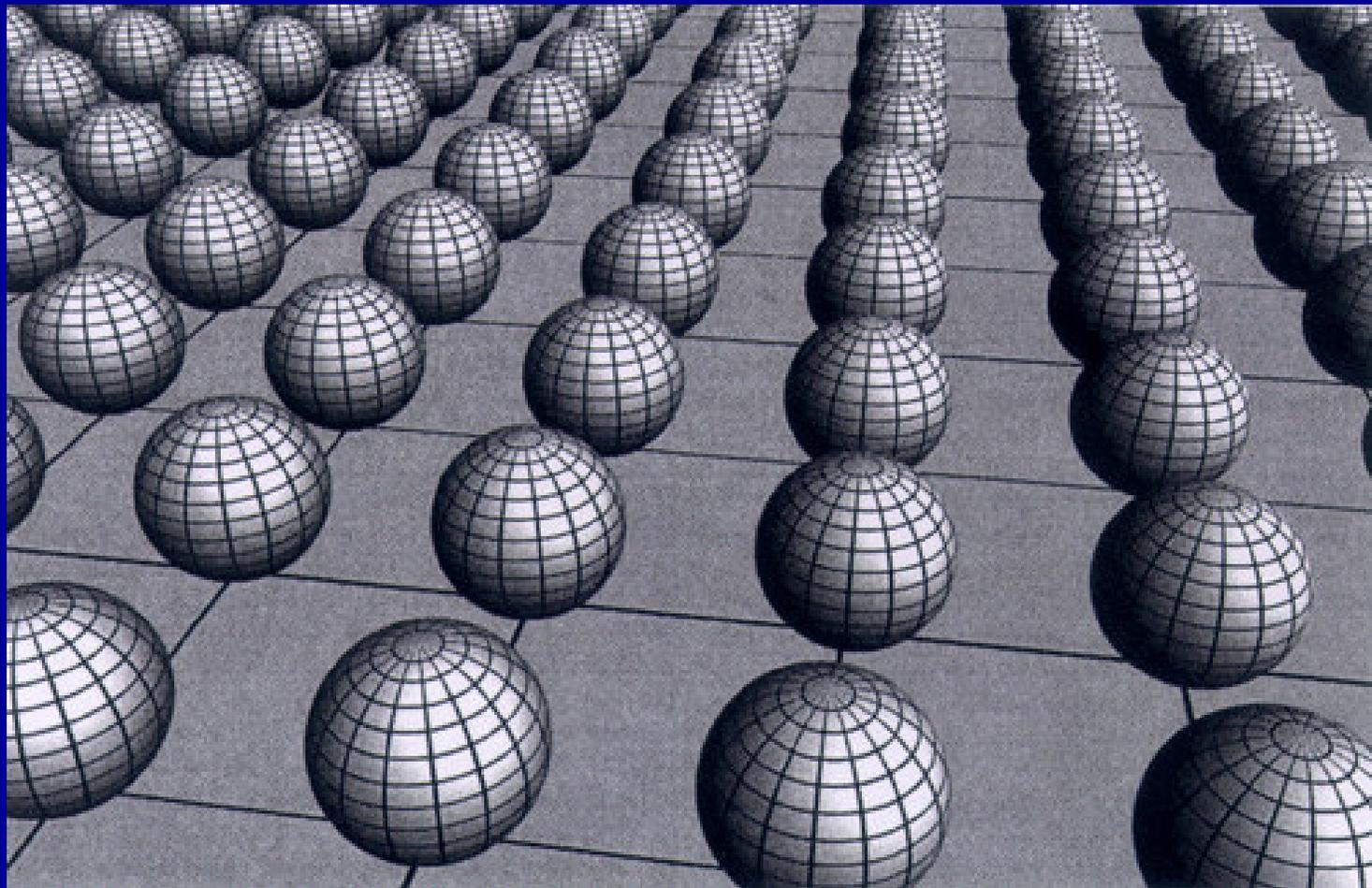
Partículas do Modelo padrão e partículas SUSY previstas pela supersimetria (que nunca foram observadas)

(<http://homepage.mac.com/huntington.c/susy.html>).

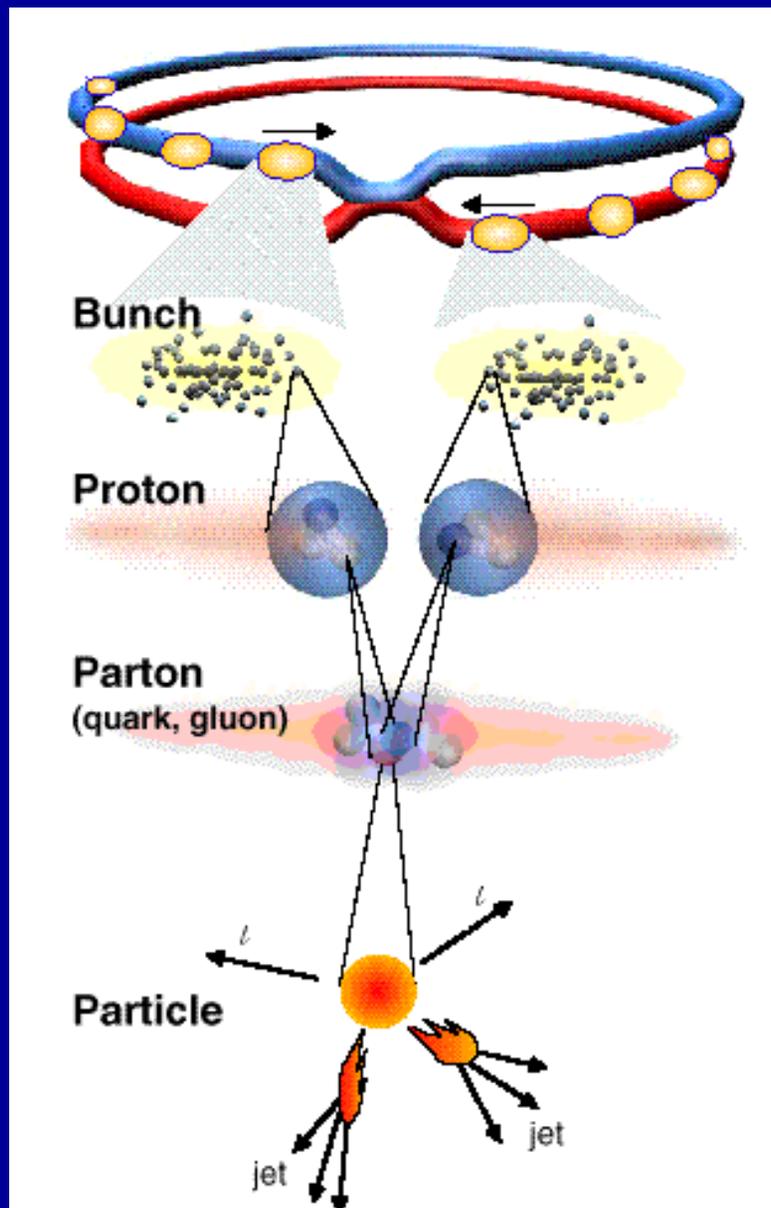


Existem mais do que três dimensões espaciais como apontam algumas teorias?

UMAstronomia



<http://www.columbia.edu/cu/record/23/18/11c.gif>



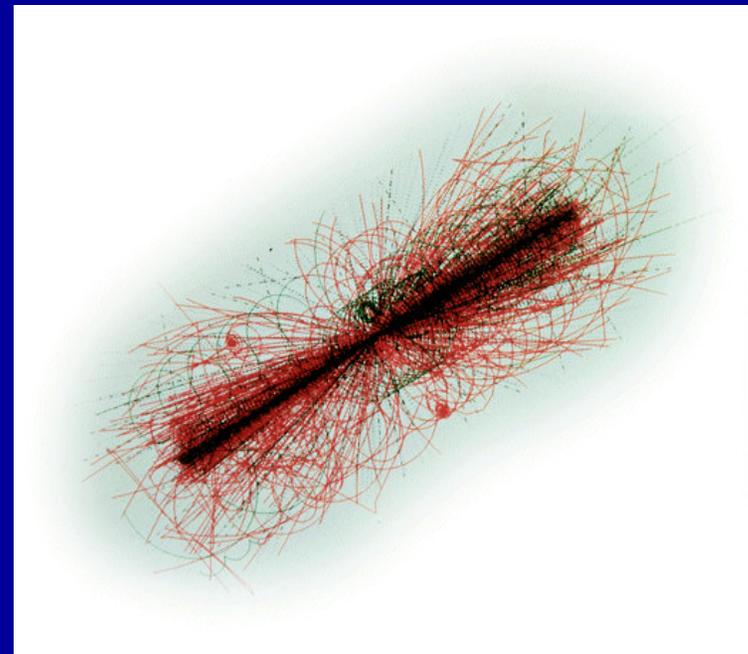
Uma questão interessante no caso do **LHC** é se da colisão entre dois prótons poderá resultar a formação de um **buraco negro**.



Uma energia de 7 TeV equivale a uma massa de 10^{-23} kg. Embora tenhamos uma energia de 14 TeV concentrada numa região extremamente pequena a massa correspondente é de apenas duas vezes 10^{-23} kg o que está muito aquém da **massa de Planck (10^{-8} kg)** necessária para produzir o buraco negro mais pequeno que se pode conceber de acordo com as Leis da Física.

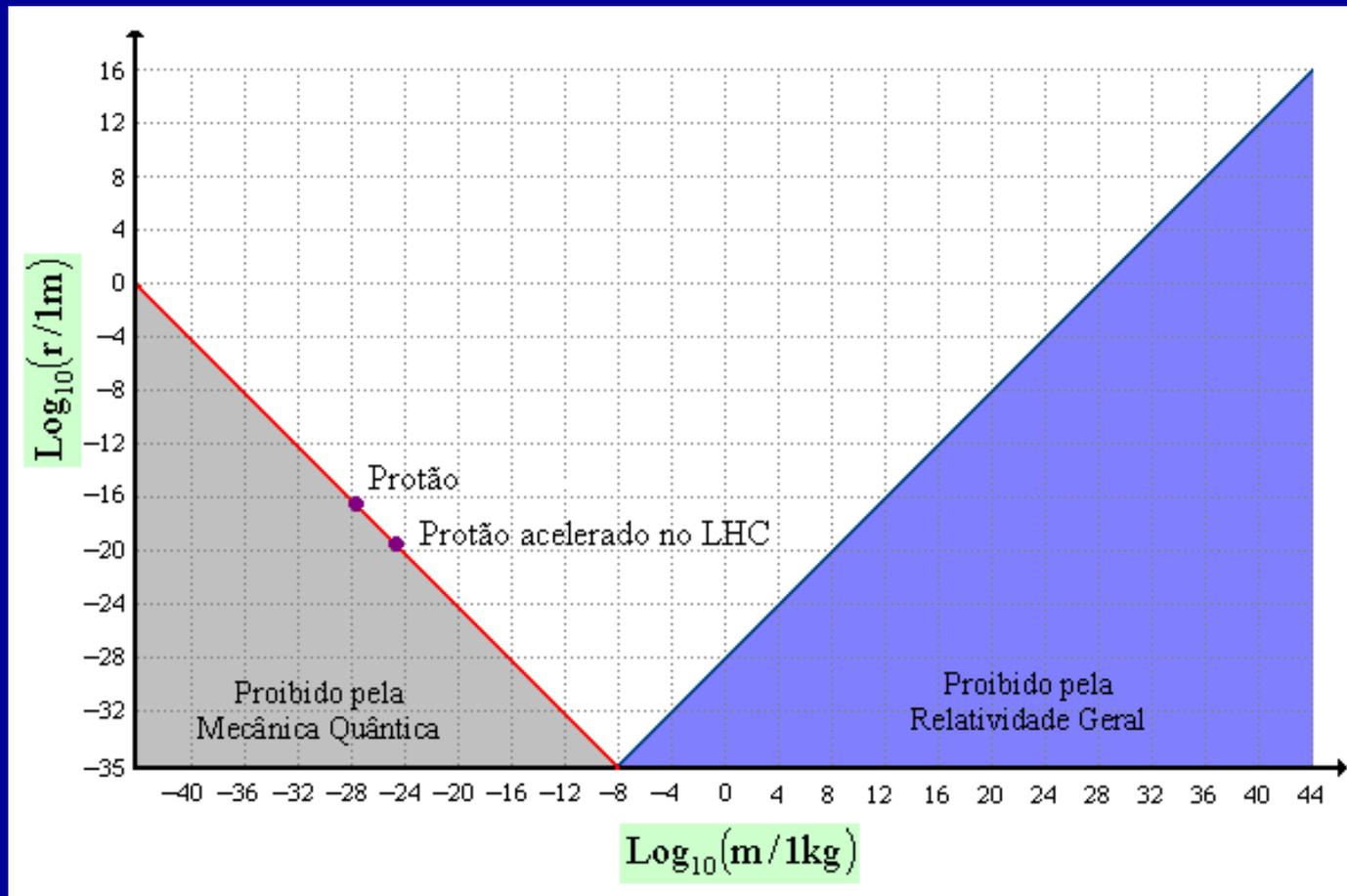
Simulação da colisão entre
protões no LHC.

<http://hepwww.rl.ac.uk/pub/bigbang/file13.html>



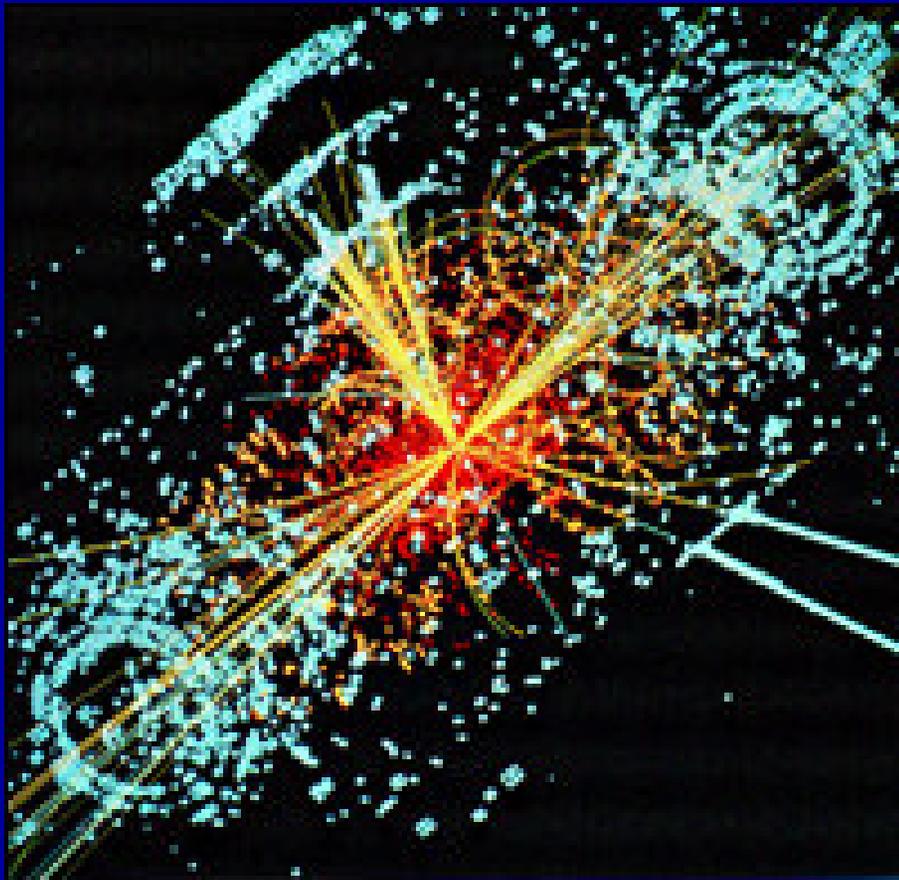


Além disso o comprimento de onda característico do próton nessas circunstâncias será de 10^{-19} m o que é muito superior ao **comprimento de Planck** (10^{-35} m).





Para produzir uma partícula suficientemente energética e compacta para que se forme um buraco negro teríamos de utilizar energias cerca de 10^{15} vezes superiores às utilizadas no LHC.



Embora a produção de buracos negros esteja fora do alcance de aceleradores como o LHC, isto não exclui a possibilidade de que sejam produzidos objectos matematicamente relacionados com buracos negros.

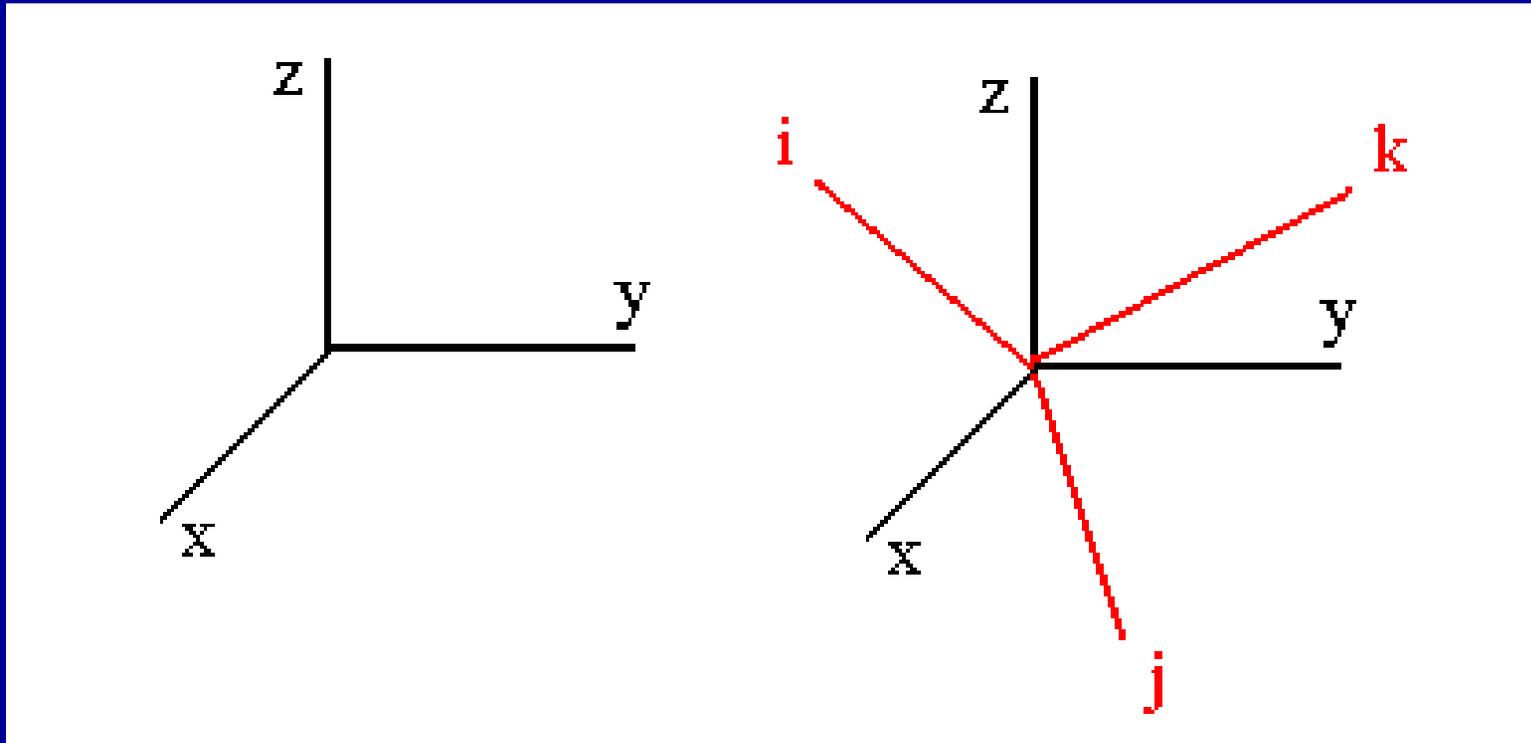


5. *Outras Dimensões*

Um dos problemas por resolver na Física prende-se com o estabelecimento de uma teoria da *Gravidade Quântica*, isto é, uma teoria capaz de conciliar a *Relatividade Geral* com a *Mecânica Quântica*.

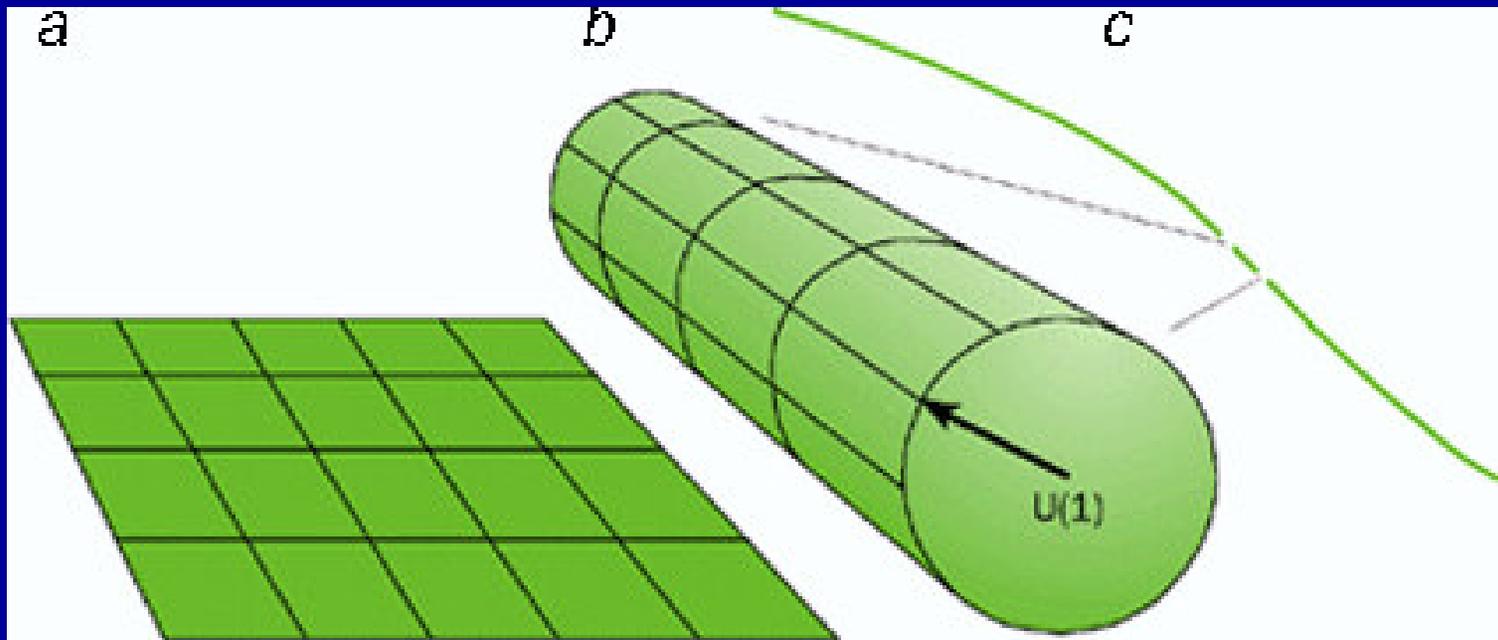


A *Teoria das Cordas* é uma das possíveis soluções para o problema. No entanto esta teoria prevê a existência de mais dimensões espaciais, para além das três dimensões perceptíveis pelos nossos sentidos. Fala-se, por exemplo, em 9 dimensões espaciais (6 para além das 3 usuais).





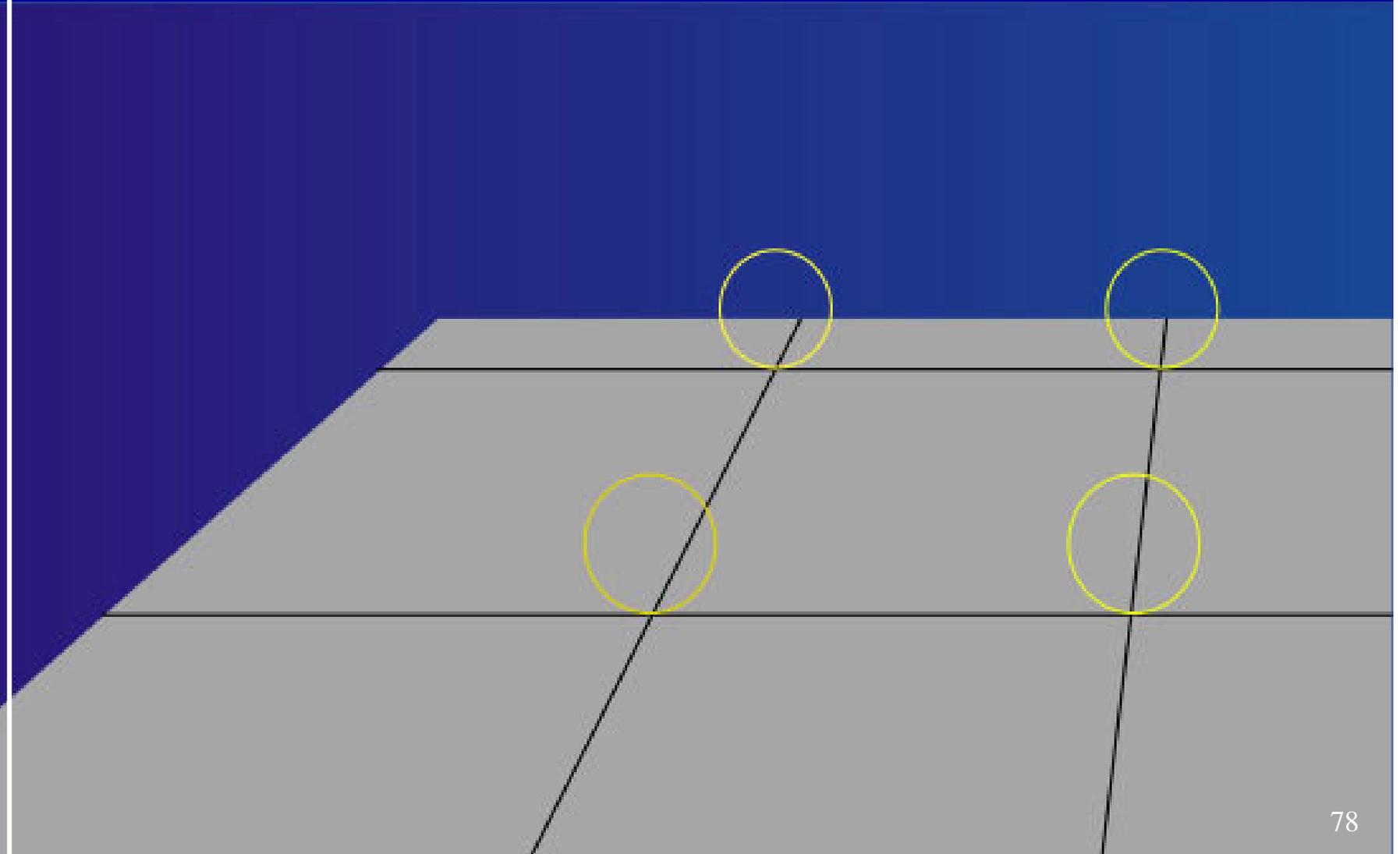
O recurso a dimensões extra remonta a 1920 quando **Theodor Kaluza** introduziu uma quarta dimensão espacial na tentativa de unificar a relatividade com o electromagnetismo. Com vista a esconder essa dimensão extra Kaluza sugeriu que a mesma deveria estar **compactada (enrolada)**.





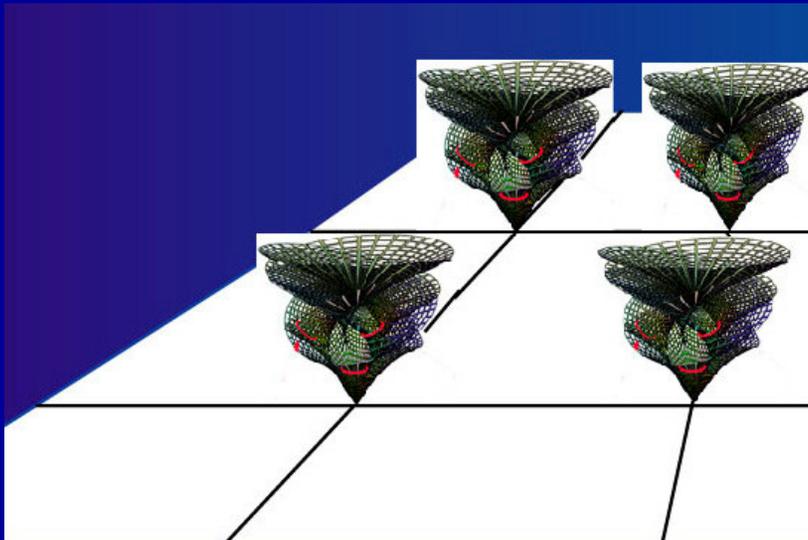
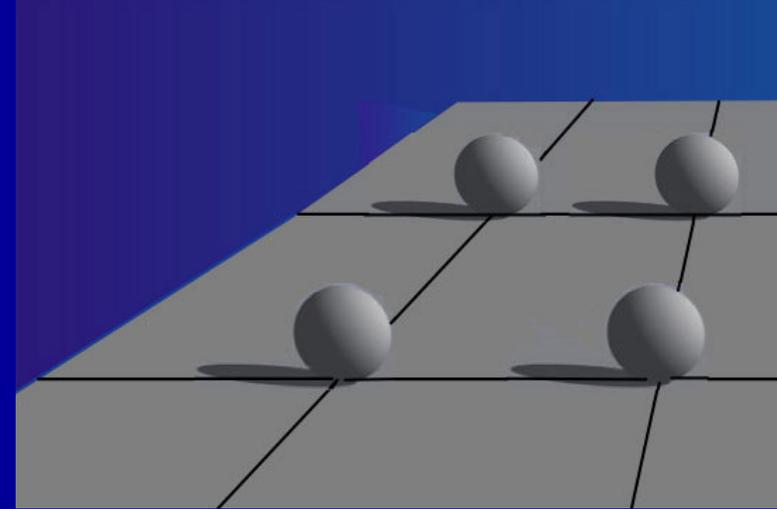
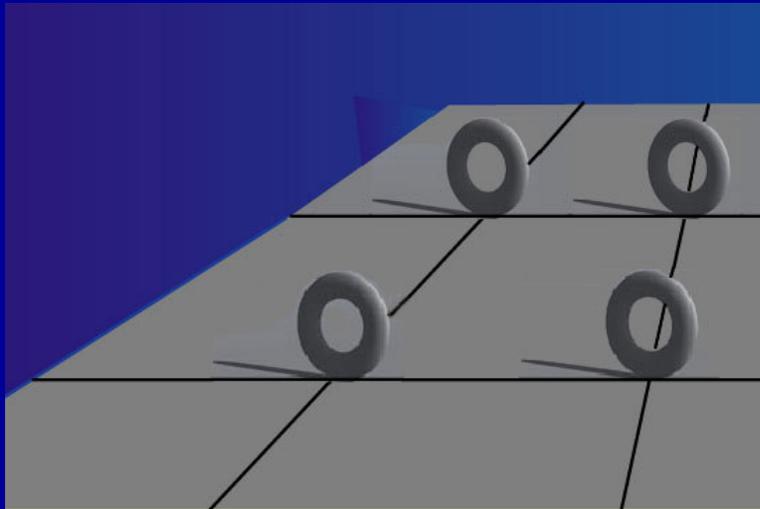
Universo com 3 dimensões espaciais - uma delas 'enrolada'.

UMAstronomia





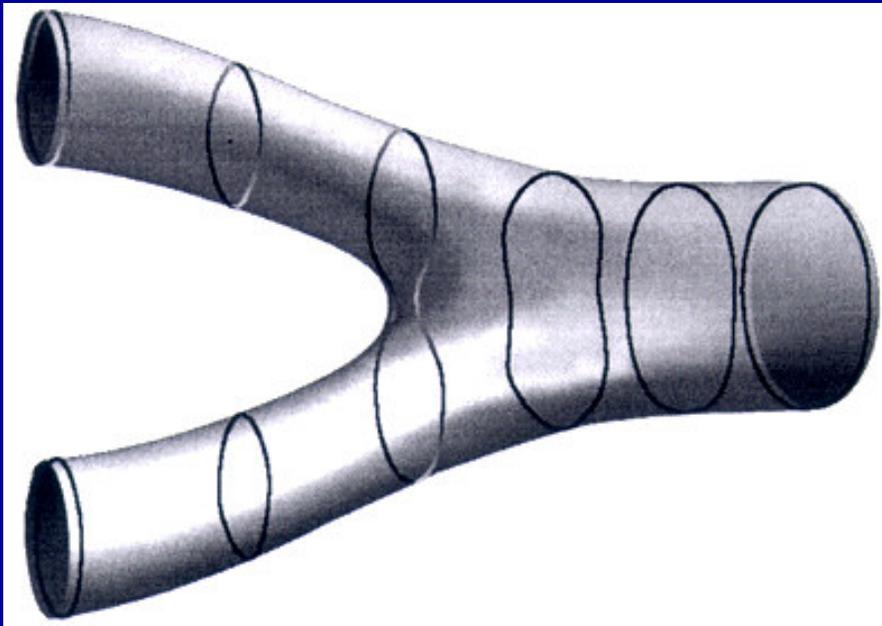
Universo com 4 dimensões espaciais - duas delas ‘enroladas’.
(exemplo de duas topologias possíveis)



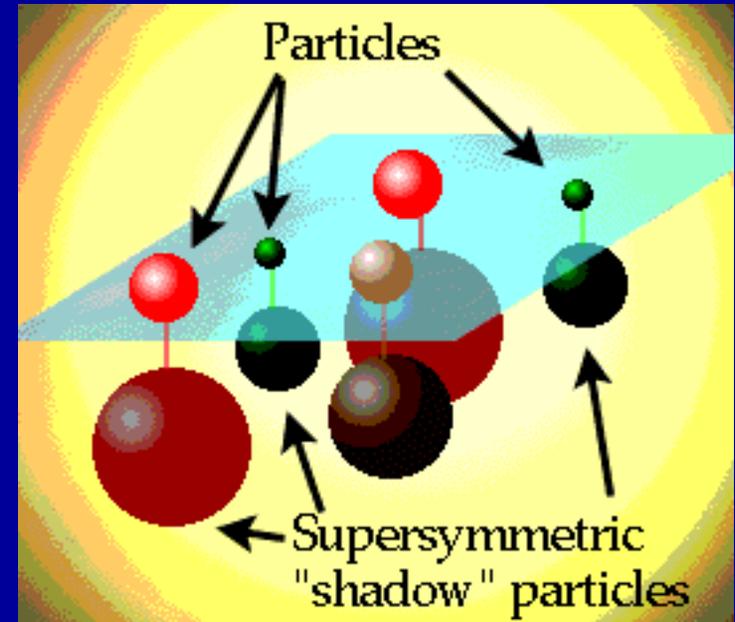
Seis dimensões enroladas
(Topologia Calabi - Yau)



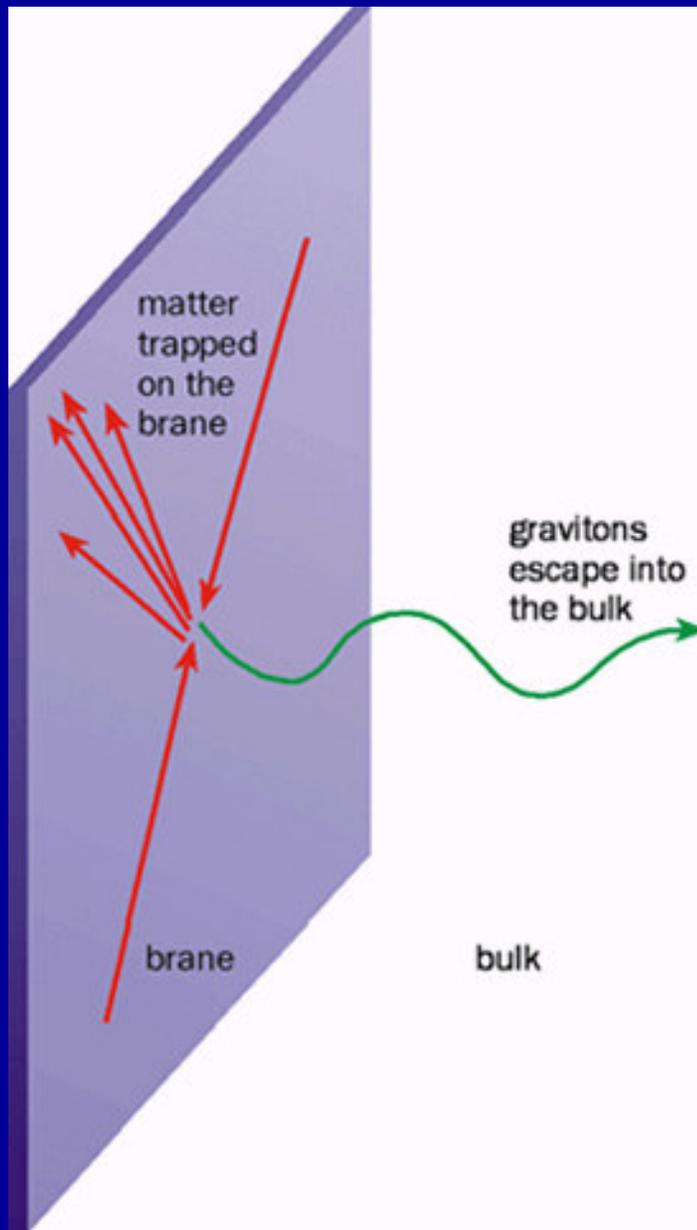
Nos anos 70 e 80 do século passado a introdução de dimensões extra tornou-se prática corrente com o desenvolvimento da **Teoria das Cordas** e da **Supersimetria**.



~Cordas em acção



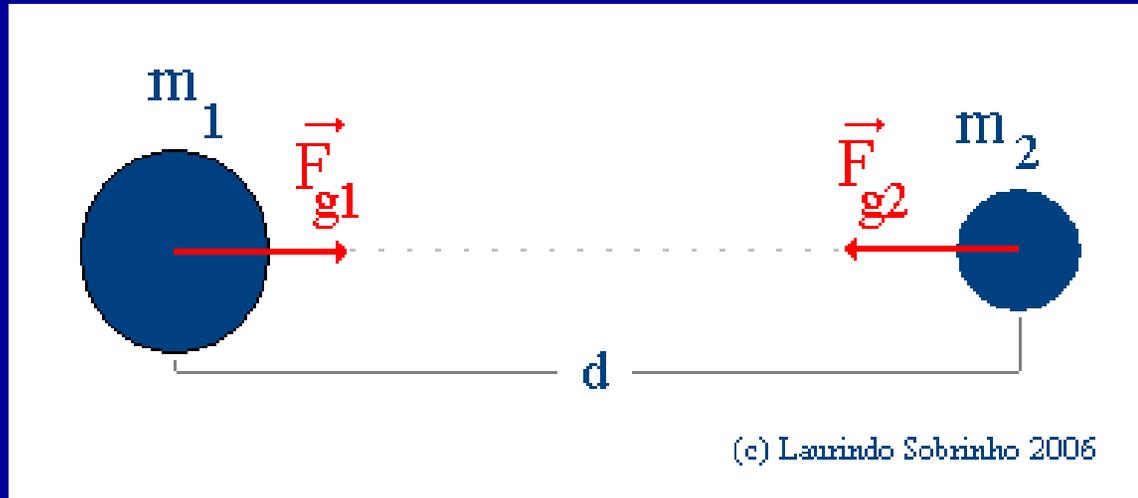
Partículas *sombra* previstas pela Teoria da Supersimetria



Actualmente existem vários modelos propostos para o universo que recorrem a estas dimensões adicionais. De uma forma geral é admitido que nós vivemos num espaço $(3+1)D$, ou seja, numa **3-brane**. Esta brane está mergulhada num espaço-tempo $(3+d+1)D$ chamado de **bulk** o qual tem d dimensões espaciais extra. A matéria que conhecemos está presa na **3-brane** e apenas os gravitões se podem propagar no bulk.



A **força de atracção gravítica** entre dois corpos de massas m_1 e m_2 é directamente proporcional aos valores de m_1 e m_2 e inversamente proporcional ao quadrado da distância d entre as duas massas.



$$F_g = |\vec{F}_{g1}| = |\vec{F}_{g12}|$$

$$F_g = G \frac{m_1 m_2}{d^2}$$

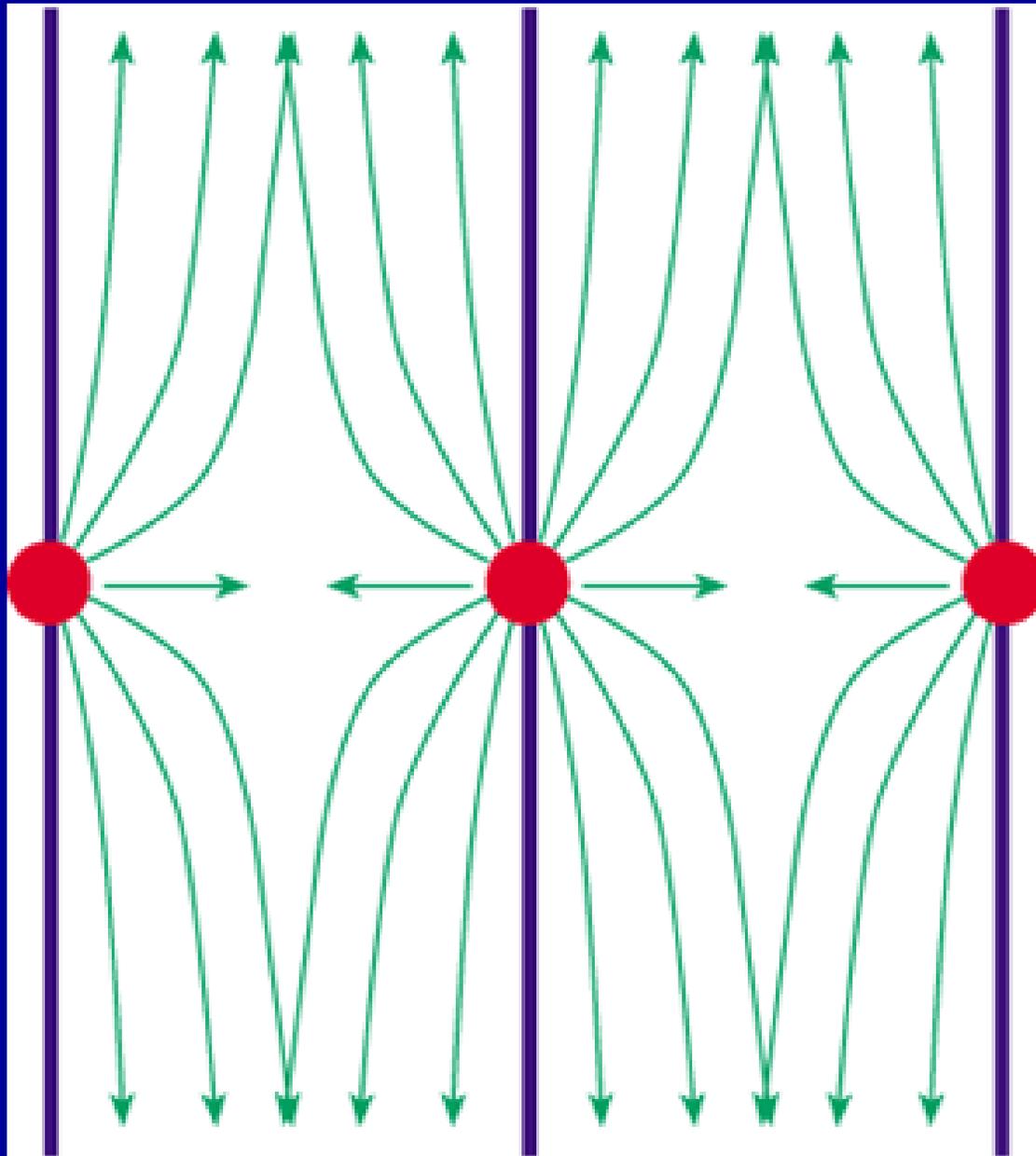
Se a distância d for reduzida para metade então o valor de F_g será 4 vezes maior.



Consideremos agora o caso em que temos $n = 9$ dimensões espaciais. Neste caso é:

$$F_g = G \frac{m_1 m_2}{d^{n-1}}$$

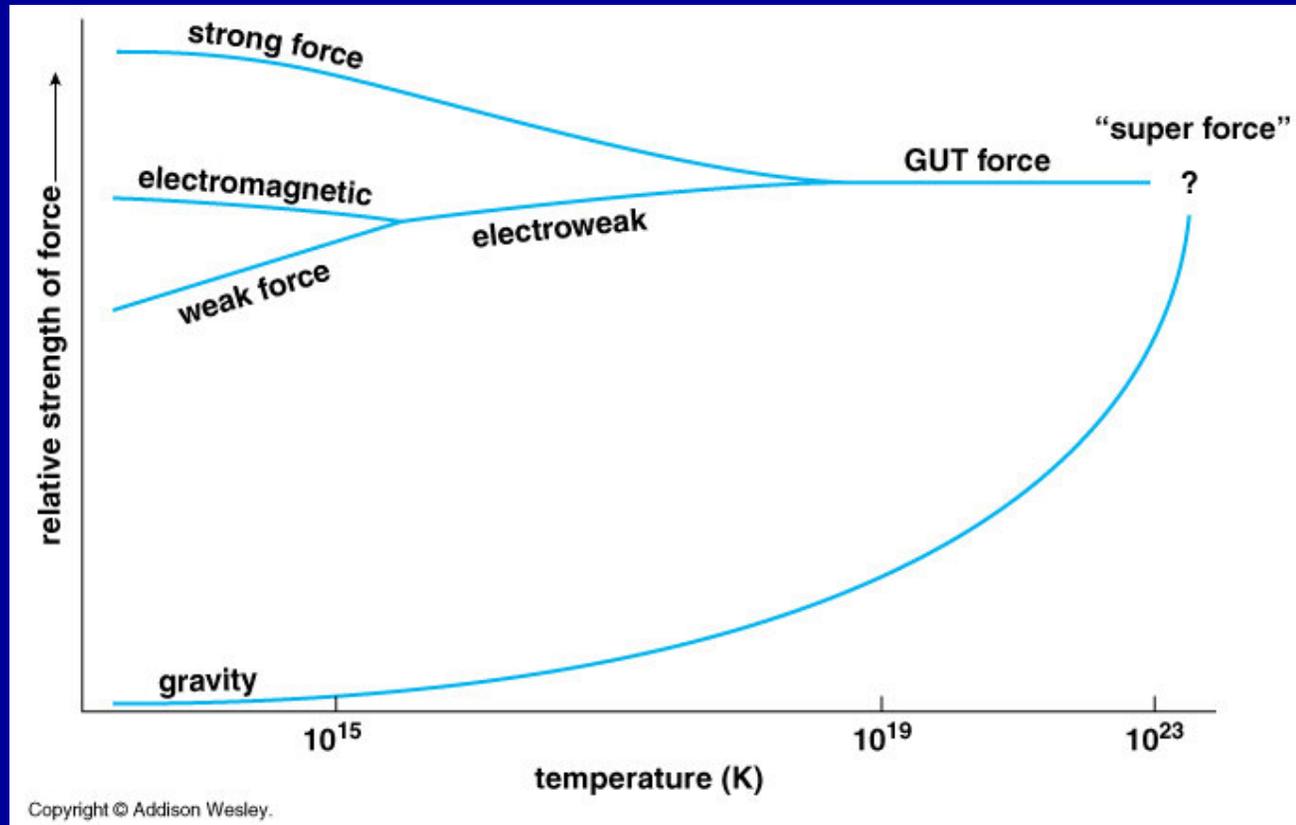
o que significa que se a distância entre as duas massas for reduzida para metade então o valor de F_g aumenta não 4 mas sim **256 vezes**. Este efeito poderá ser mais ou menos relevante consoante a amplitude das dimensões extra (ou seja consoante o grau de compactificação das dimensões extra).



Contrariamente ao que acontece com as outras forças, a **gravidade** propaga-se a estas novas dimensões espaciais.



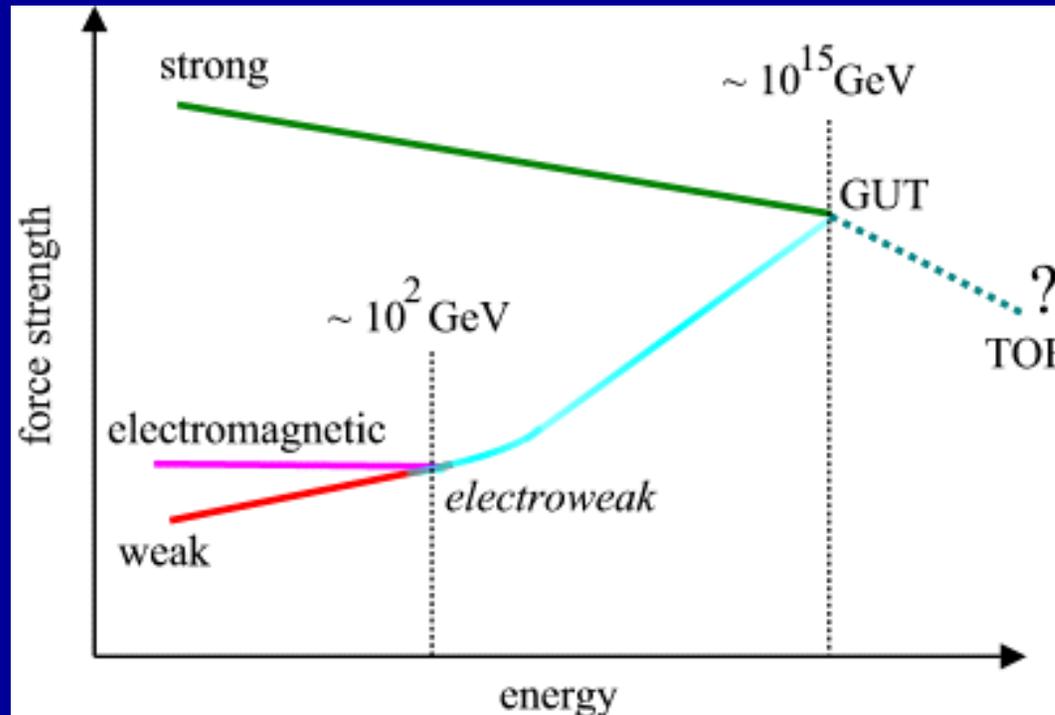
A extensão da gravidade a outras dimensões espaciais pode ajudar a solucionar o chamado **Problema da Hierarquia**: *Por que é que a gravidade é muito mais fraca do que as outras três forças fundamentais da natureza?*





Universidade da Madeira

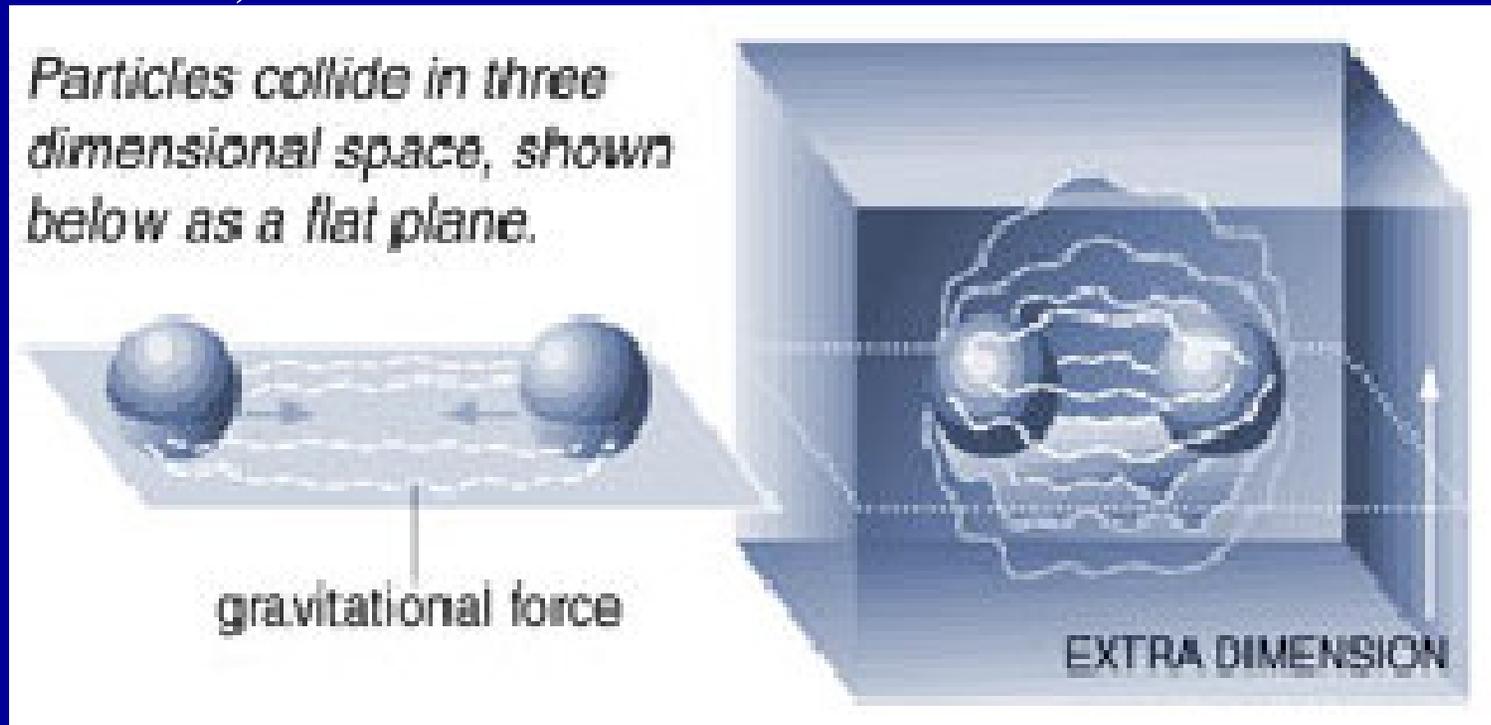
http://sciencepark.etacude.com/particle/force_unification.gif



Por exemplo, a escala da força **electrofraca** é de **100 GeV**. Isto significa que quando a temperatura é de 100 GeV as forças **electromagnética** e **nuclear fraca** fundem-se numa única força chamada força **electrofraca**. A força gravítica só iguala as outras forças quando é atingida a escala de Planck ao que corresponde uma temperatura de **10^{19} GeV**.



Embora não exista actualmente qualquer evidência experimental, directa ou indirecta, da existência dessas dimensões espaciais extra, elas surgem naturalmente no contexto de muitas teorias. O **LHC** poderá ser o primeiro instrumento capaz de investigar a existência (ou não existência) dessas dimensões.





Seja R o tamanho característica das dimensões extra. Para distâncias maiores que R a força de gravidade continua a ser inversamente proporcional ao quadrado da distância. Nesse caso continua a ser aplicável a gravidade clássica. Sabemos isso da experiência do dia a dia (e.g. movimento da Lua em torno da Terra).

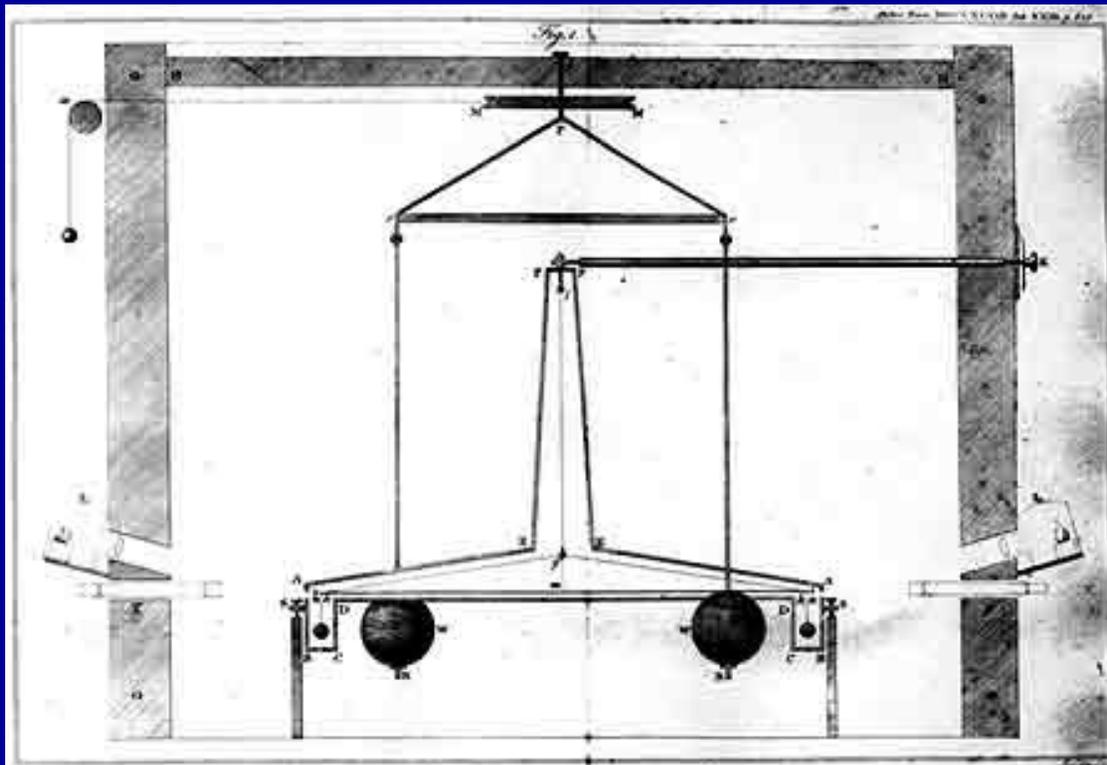


Photo credit: NASA



Universidade da Madeira

A lei da atracção universal foi verificada com sucesso até distâncias da ordem de 1mm. Até prova em contrário podemos admitir que as dimensões extra possam ter um tamanho submilimétrico e a gravidade poderá ser cerca de 10^{38} vezes superior ao que pensamos.

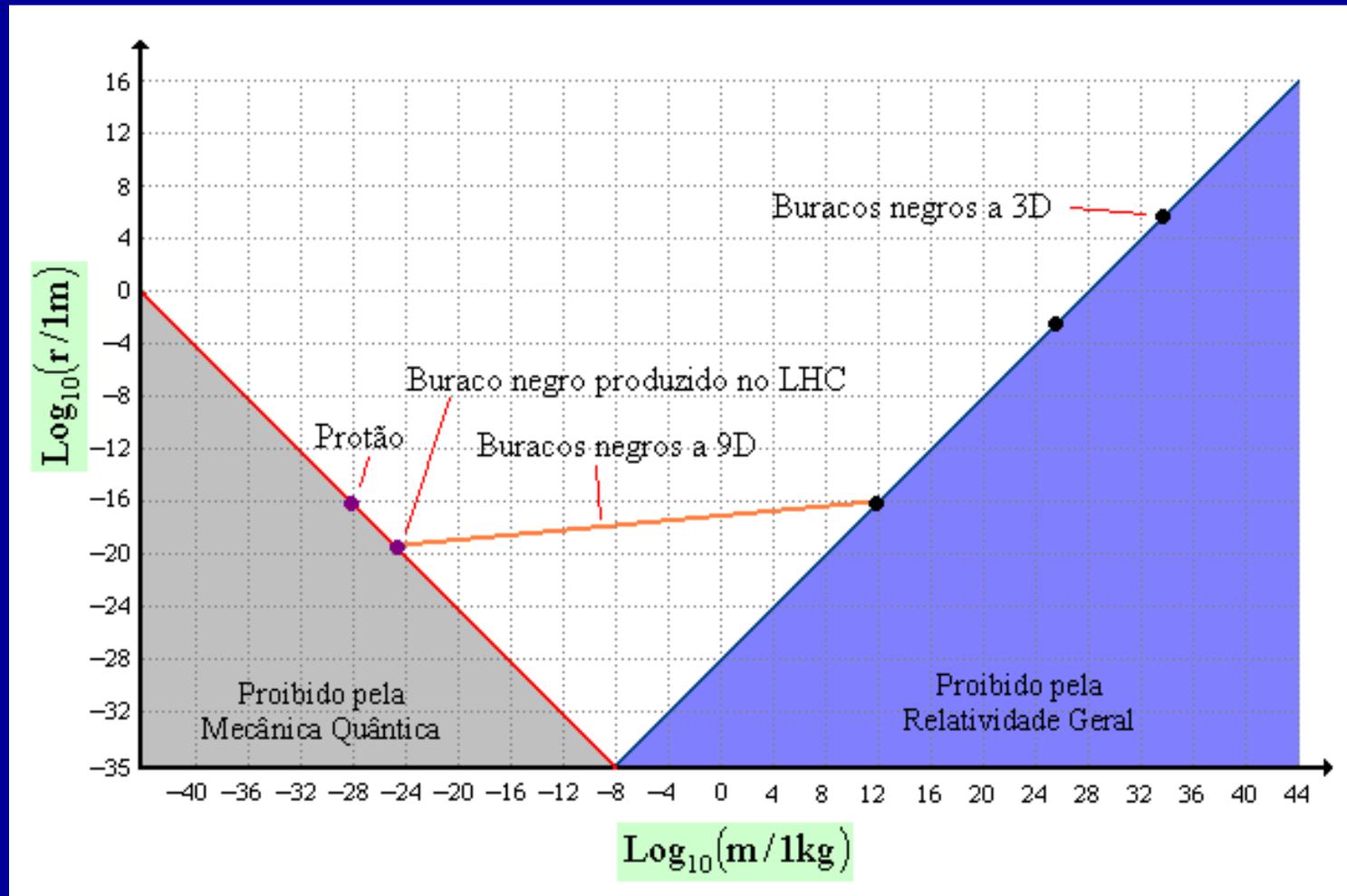


Balança de torção utilizada por Henry Cavendish em **1797** para medir a constante de gravitação universal.

<http://www.aip.org/png/html/newgrav.html>

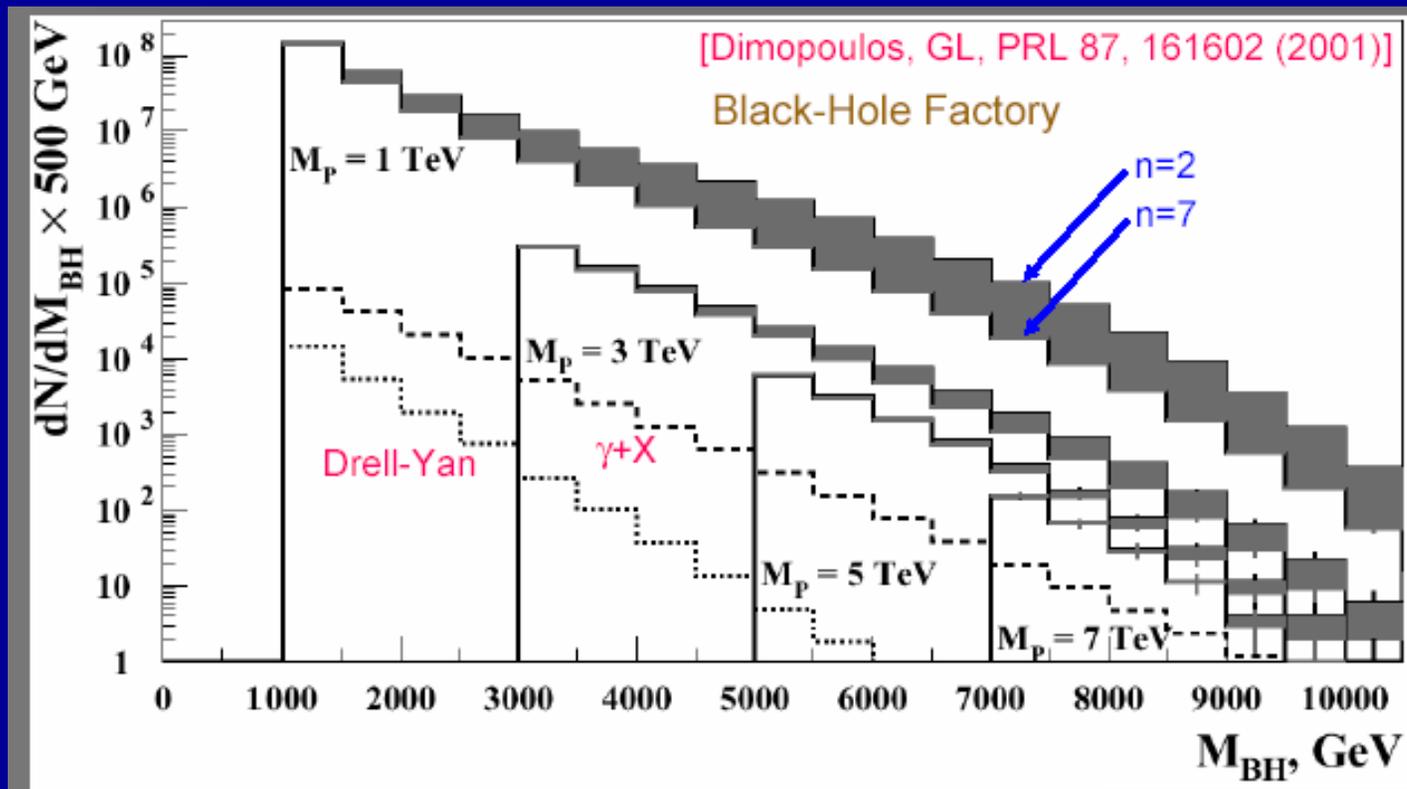


Se assim for torna-se muito mais fácil criar buracos negros no LHC.





As estimativas apontam para a possibilidade do LHC produzir buracos negros à razão de um por segundo. Uma acelerador capaz de produzir partículas a este ritmo é usualmente designado de fábrica. Assim, o LHC será uma fábrica de buracos negros.





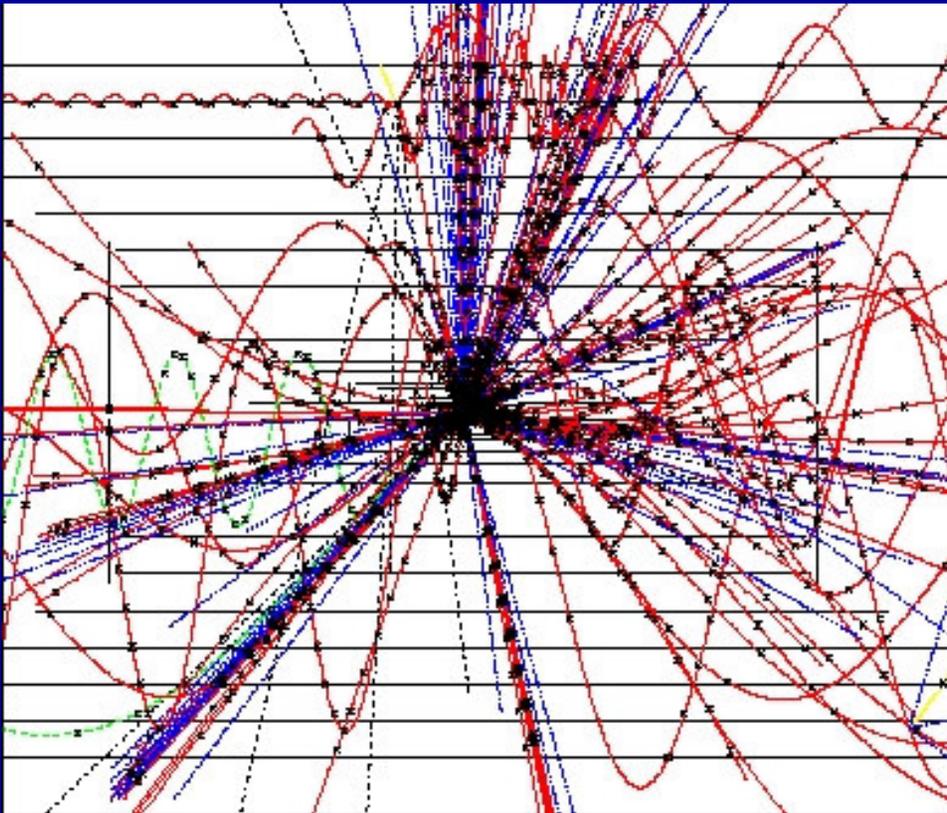
O que fazer com tantos buracos negros?

Algumas ideias:

- > Estudar a taxa de produção de buracos negros (óbvio).
- > Estudar o processo de evaporação e reconstruir o buraco negro com os dados obtidos.
- > Com os valores da massa do buraco negro e da sua temperatura sondar a existência de dimensões extra e averiguar quantas são.
- > Descobrir (na evaporação) o bóson de Higgs (130GeV).



Os buracos negros produzidos no **LHC** irão evaporar via **Radiação de Hawking** deixando um registo bem distinto nos detectores. Um buraco negro ao evaporar emite partículas em todas as direcções contrariamente ao que acontece numa colisão entre duas partículas (sem formação de buraco negro).



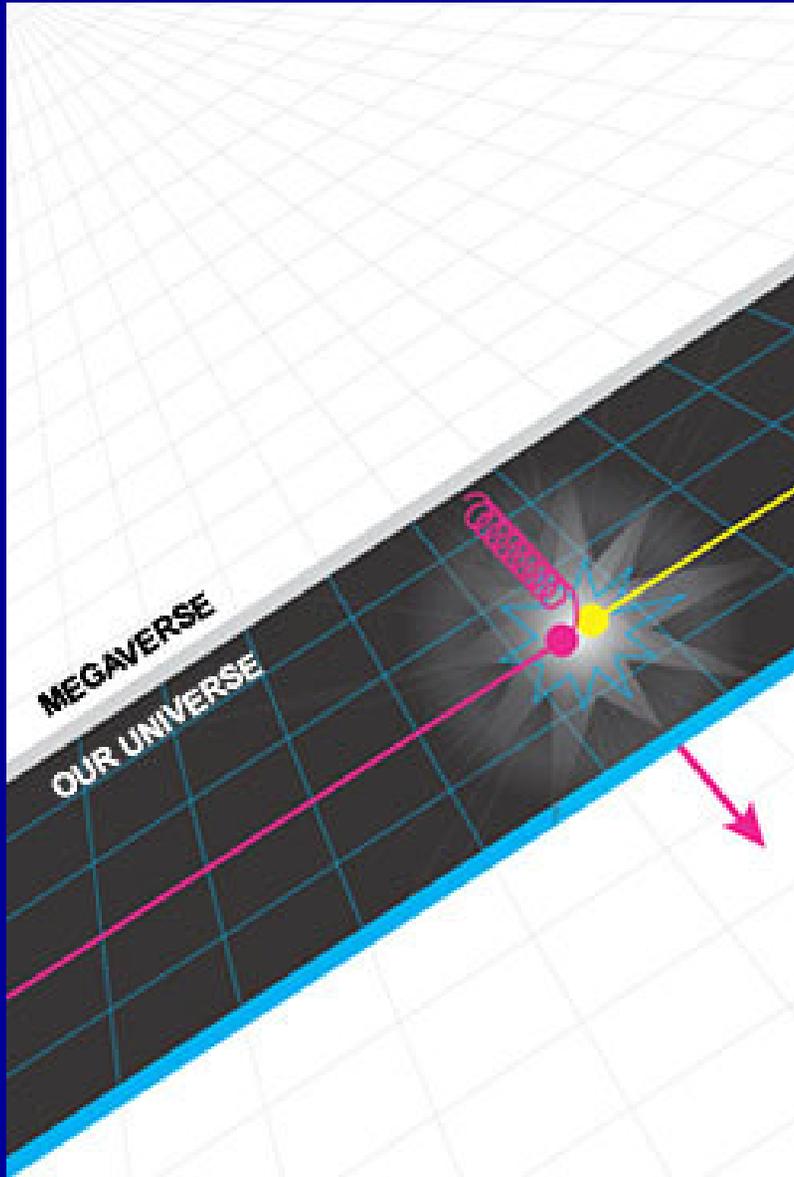
Simulação do Decaimento
de um buraco negro no
LHC

(Reported by: Dimopoulos
and Landsberg, *Physical
Review Letters*, 15 October
2001.)



Os buracos negros produzidos no LHC podem ter energias próximas dos 100GeV . Uma vez criados evaporam quase instantaneamente libertando a sua energia:

- 75% em *quarks* e *gluões*
- 10% em *leptões* (com carga eléctrica)
- 5% em *neutrinos*
- 5% em *fotões* e bosões *W/Z*
- (provavelmente) 1% em bosões de *Higgs*.

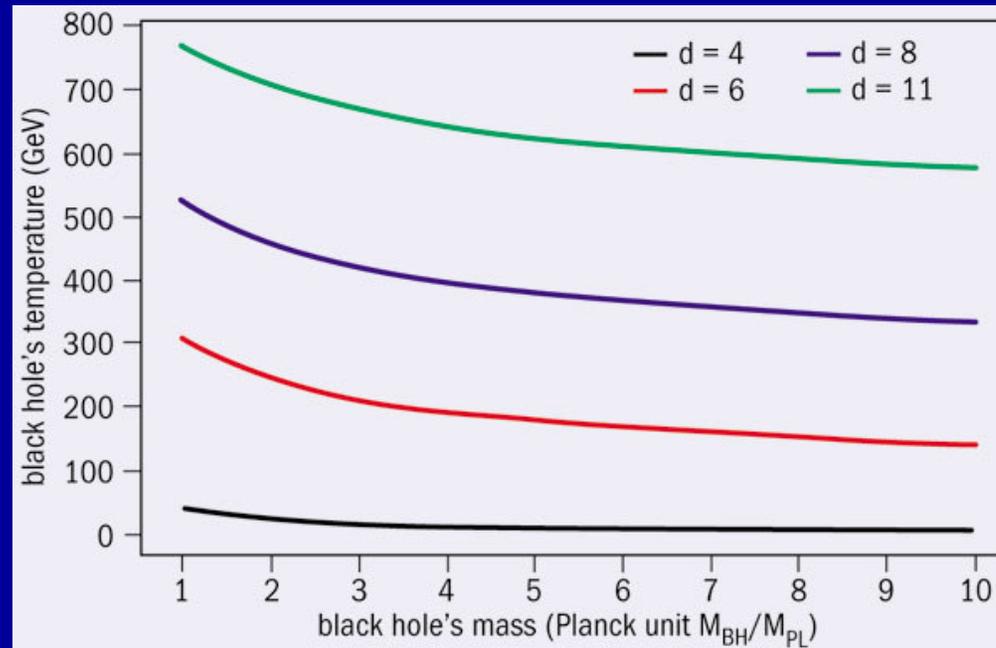


<http://www.symmetrymag.org/cms/?pid=1000237>

Produzir buracos negros no LHC (ou em qualquer outro lado) representará por um lado a última etapa da viagem em direcção ao infinitamente pequeno e, por outro lado, a abertura de uma **nova fronteira na Física**. A sua simples presença revelará a existência de dimensões espaciais extra previamente inacessíveis. Estudando esses buracos negros estaremos também a sondar a geografia dessas dimensões.



À medida que se consigam produzir buracos negros de maiores massas estaremos também a entrar cada vez mais nessas ‘novas’ dimensões. Se um dos buracos negros produzidos tiver uma dimensão superior à amplitude de uma dessas dimensões então teremos um efeito detectável no valor da temperatura do buraco negro.

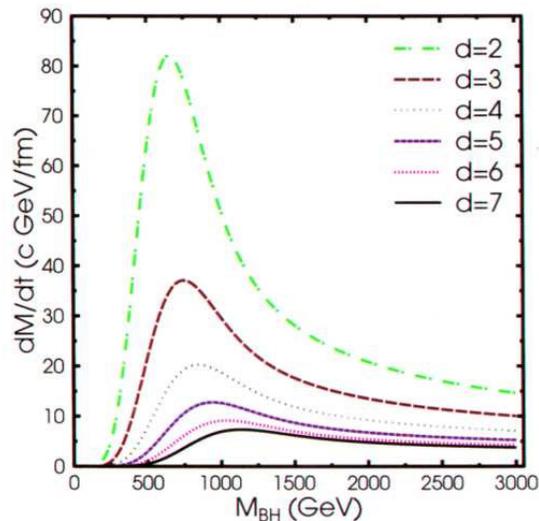


http://www.cerncourier.com/main/article/44/9/22/1/CCEhol3_11-04



Microcanonical BH Decay

- Strong effect of LXDs



- Suppression of SSBH decay
- LXDs lower evaporation rate

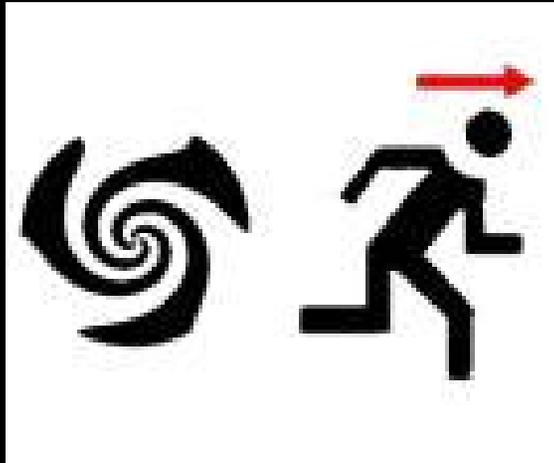
S. Hossenfelder,
S. Hofmann,
M. Bleicher

Se um buraco negro crescer o suficiente para que intersecte um universo 3D paralelo ao nosso então as suas propriedades de evaporação irão ser repentinamente alteradas. O buraco negro irá evaporar mais rápido e no entanto irá emitir menos energia porque nesse caso a energia emitida terá de ser distribuída por dois universos.



Como sabemos que um dos buracos negros produzidos no LHC não irá crescer até eventualmente engolir todo o planeta?

UM Astronomia



Isto pode ser, à primeira vista, um problema sério uma vez que no processo de emissão de Radiação de Hawking existem ainda alguns pontos obscuros como é o caso do problema da informação.



No entanto argumentos quânticos sugerem que buracos negros de dimensões microscópicas não são estáveis pois não existe qualquer **Lei de Conservação** que estabeleça a sua estabilidade pelo que devem decair rapidamente.



NOTA: O decaimento de partículas elementares é travado por leis de conservação como sejam a conservação da carga eléctrica ou do número bariónico.

