

## BURACO NEGRO

De forma muito simplista, um buraco negro pode ser explicado como uma região no espaço que contém tanta massa concentrada que nenhum objeto consegue escapar de sua atração gravitacional. Como sabemos da Teoria Universal da Gravitação de Newton, a força é diretamente proporcional à massa do corpo que a produz. A melhor teoria gravitacional aceita no momento, é a Teoria da Relatividade Geral de Einstein. Logo, seremos obrigados a compreender alguns dos resultados obtidos por essa teoria para entender certos detalhes de um buraco negro. Mas vamos começar devagar, pensando sobre a gravidade em circunstâncias relativamente simples, como à época de Newton.

Suponha que você está na superfície de um planeta, e atire uma pedra para cima. Se o lançamento for muito forte, ela subirá até uma certa altura, mas com certeza, devido à aceleração da gravidade da Terra, veremos a pedra descer de novo. Se você atirar a pedra com força suficiente, poderia fazê-la escapar inteiramente da força gravitacional do planeta. A pedra continuaria a subir para sempre. A velocidade com que é necessário atirar a pedra para que ela escape da atração gravitacional do planeta é chamada de "**velocidade de escape**". Como seria de esperar, a velocidade de escape depende da massa do planeta: se a massa do planeta for extremamente grande, sua gravidade é muito intensa, e a velocidade de escape muito elevada. Um planeta mais "leve" terá uma velocidade de escape menor. A velocidade de escape também depende da distância a que você se encontra: quanto mais perto você estiver, maior a deverá ser a velocidade de escape. Veja a comparação entre a

velocidade de escape dos diferentes planetas que pertencem a nosso sistema solar.

## Velocidade de Escape

planeta ou satélite	velocidade de escape (em metros por segundo)
<a href="#">Mercúrio</a>	4300
<a href="#">Vênus</a>	10400
<a href="#">Terra</a>	11200
<a href="#">Lua</a>	2361
<a href="#">Marte</a>	5000
<a href="#">Júpiter</a>	59500
<a href="#">Saturno</a>	35600
<a href="#">Urano</a>	21300
<a href="#">Netuno</a>	23300
<a href="#">Plutão</a>	1100

## Propriedades Físicas dos Planetas

	Mercúrio	Vênus	Terra	Marte	Júpiter	Saturno	Urano	Netuno	Plutão
Massa (unidade de massa da Terra)	0,0538	0,8150	1.0000	0,1074	317,89	95,15	14,54	17,23	0,0017
Raio Equatorial	0,382	0,949	1,00	0,53	11,19	9,44	4,10	3,88	0,15-0,21
Achatamento	0,0	0,0	0,0034	0,0059	0,0637	0,102	0,024	0,027	?
Densidade média (g / cm <sup>3</sup> )	5,42	5,25	5,52	3,94	1,314	0,69	1,19	1,70	(0,6-1,7)
Aceleração da gravidade (m/ s <sup>2</sup> )	3,78	8,6	9,78	3,72	22,88	9,05	7,7	11,0	4,3
Velocidade de escape (km/s)	4,3	10,3	11,2	5,0	59,5q	35,6	21,22	23,6	5.3
Período de rotação	d 58,65	d 243,01	h 23,934 5	h 24,6229	h 9,841	h 10,233	h 17,2	h 17,8	h (6,4)
Inclinação do Equador (graus)	0	-2°	23,44°	23,98°	3,08°	29°	97,29°	28,80°	2

Imagine agora um objeto com tamanha massa, concentrada num raio pequeno de tal forma que sua velocidade de escape seja maior que a velocidade da luz. Neste caso, uma vez que nada pode se deslocar mais rapidamente que a luz, nada poderá escapar do campo gravitacional desse objeto. Mesmo um raio de luz seria puxado de volta gravidade e não teria como escapar. A idéia de uma concentração de massa tão densa que até mesmo a luz ficasse aprisionada vai bem ao passado, até Laplace, no século XVIII.

Quase imediatamente em seguida de Einstein ter desenvolvido a Relatividade Geral, Karl Schwarzschild descobriu uma solução matemática para as equações daquela teoria que descreviam um tal objeto. Foi somente muito mais tarde, com o trabalho de cientistas como Oppenheimer (o mesmo do Projeto Manhattan, da bomba atômica americana), Volkoff e Snyder, na década de 30, que se começou a pensar seriamente na possibilidade de que tais objetos pudessem realmente existir no Universo. Esses pesquisadores mostraram que, quando uma estrela suficientemente massiva consome todo o seu combustível, ela perde a capacidade de sustentar o encolhimento devido à sua própria atração gravitacional, e então desaba sobre si própria na forma de um buraco negro.



K. Schwarzschild  
(1873-1916)

Na relatividade geral a gravidade é uma manifestação da curvatura do espaço-tempo. Objetos massivos distorcem as dimensões do espaço e tempo de tal forma que as regras normais da geometria não se aplicam mais. Perto de um buraco negro esta distorção do espaço é extremamente intensa, provocando o aparecimento de certas propriedades muito estranhas. Em particular, um buraco negro tem algo que se chama "horizonte de eventos", que é uma superfície esférica que marca

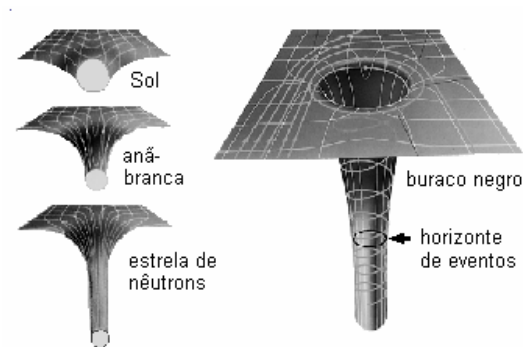
as fronteiras do buraco negro. Você pode passar através do horizonte de eventos no sentido de entrada, mas depois não pode sair mais. Na verdade, uma vez cruzado o horizonte de eventos, você está inexoravelmente fadado a se aproximar cada vez mais da "singularidade" localizada no centro do buraco negro. Você pode pensar no horizonte de eventos como um lugar em que a velocidade de escape é igual à velocidade da luz. Fora do horizonte de eventos, a velocidade de escape é menor do que a da luz, de modo que se você acionar seus foguetes com força suficiente poderá obter a energia necessária para escapar do buraco negro. Mas se você se encontrar dentro do horizonte de eventos, não importa quão potentes sejam seus foguetes, pois você não poderá escapar. O horizonte tem algumas propriedades geométricas realmente estranhas. Para um observador que esteja imóvel a alguma distância do buraco negro, o horizonte parece ser uma superfície esférica tranqüila e estática. Mas à medida que você se aproximar do horizonte, perceberá que ele está se movendo a uma velocidade espantosa. Na verdade, está se expandindo à velocidade da luz! Isto explica porque é tão fácil atravessar o horizonte na direção para dentro, mas impossível retornar. Como o horizonte está se movendo à velocidade da luz, para poder escapar de volta através dele você teria que viajar a uma velocidade superior a da luz. Como você não pode viajar a uma velocidade maior que a da luz, você não pode escapar do buraco negro. Se toda esta história estiver soando muito estranha, não se preocupe. Ela é estranha. O horizonte é estático, num certo sentido, mas noutro sentido ela está se deslocando à velocidade da luz. É um pouco como aquela estória de Alice no País das Maravilhas: ela tinha que correr tão rápido quanto possível, apenas para permanecer no mesmo lugar.

Uma vez dentro do horizonte, o espaço-tempo é tão distorcido que as coordenadas que descrevem a distância radial e tempo trocam suas posições, ou seja, a coordenada que descreve a sua distância do centro, "r", passa a ser uma coordenada do tipo tempo, e a coordenada "t" passa a ser do tipo espacial. Uma consequência disto é que você não consegue mais evitar o seu deslocamento no sentido de valores cada vez menores de "r", da mesma forma como normalmente não consegue evitar o deslocamento da coordenada de tempo na direção do futuro (ou seja, no sentido de valores maiores de "t"). Eventualmente você vai atingir a singularidade, localizada em  $r=0$ . Você pode tentar evitá-la acionando seus foguetes, mas é inútil: não importa a direção em que você tente fugir, não conseguirá evitar seu futuro. Tentar evitar o centro de um buraco-negro depois de ter atravessado seu horizonte é como tentar evitar a próxima segunda-feira. Por falar nisso, o nome "buraco-negro" foi inventado por John Archibald Wheeler, e parece ter ficado mesmo por ser muito mais atraente dos que os anteriores. Antes de Wheeler aparecer, esses objetos eram conhecidos como "estrelas congeladas".

## Você sabe como se formam os buracos negros?

As estrelas nascem, evoluem e morrem. A fase final da evolução de uma estrela vai depender da massa inicial da estrela e se elas evoluem isoladas ou em um sistema binário fechado (em que as estrelas estão próximas entre si). Estas fases são: 1. Se a massa inicial da estrela for menor que  $3M$  (onde  $M$  é a massa do sol) e depois da fase de gigante vermelha a estrela perde massa e forma uma anã branca, com  $m < 1,4M$ . Neste caso ocorre a degenerescência eletrônica (os átomos perdem os seus elétrons); 2. Se a massa inicial for maior que  $3M$ , a estrela, após a fase de gigante vermelha, explode como supernova, podendo ou não Ter um "caroço" no centro. Se a massa deste "caroço" for

menor que  $2M$  ele se transforma numa estrela de nêutrons quando teremos degenerescência nuclear (elétrons e prótons se fundem em nêutrons); 3. Se massa do "caroço" após a explosão de supernova for maior que  $2M$ , o "caroço" se colapsa a um buraco negro.



Se a estrela evolui num sistema binário fechado, há transferência de matéria entre as estrelas de forma que muitas vezes uma delas acumula uma grande massa que provoca sua explosão como supernova. O resultado mais provável é a formação de uma estrela de nêutrons a partir do "caroço" que sobra da explosão, mas existem sistemas duplos, como Cygnus X-1 em que a componente compacta parece ser um buraco negro.