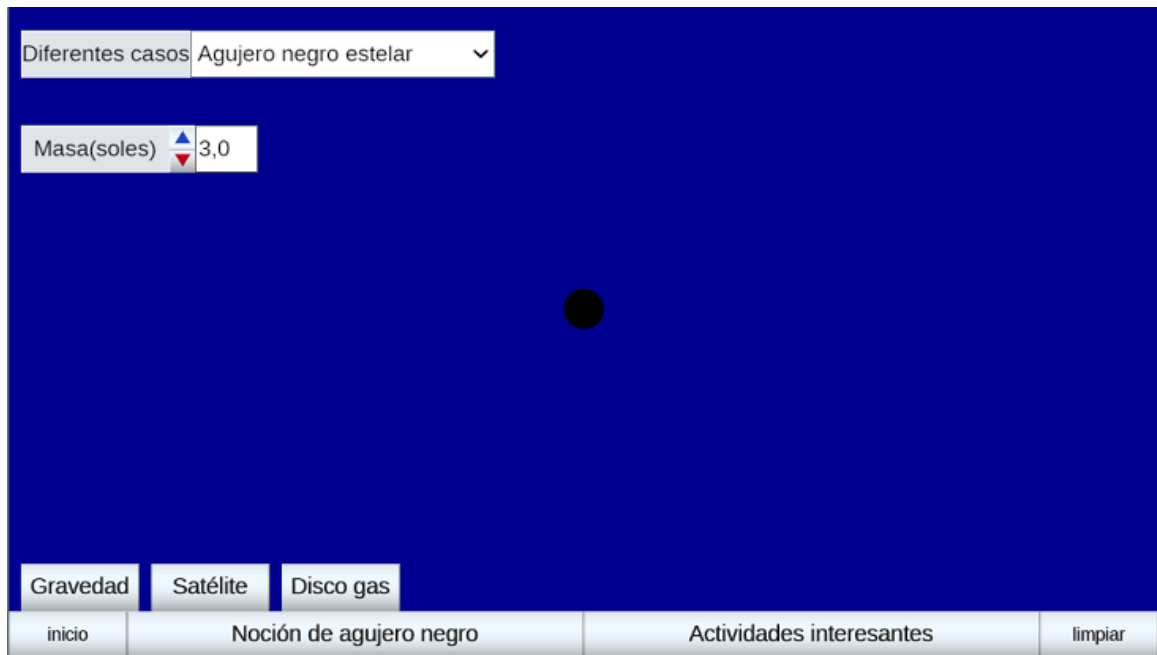


## ACTIVIDADES CON AGUJEROS NEGROS

Este es el aspecto que ofrece inicialmente nuestra escena:



El menú “Diferentes casos” nos permite elegir entre “agujero negro estelar”, correspondiente a la evolución de astros de gran masa, “agujeros negros supermasivos”, que se pueden encontrar en el centro de galaxias, y “agujeros negros rotantes”, del tipo del modelo de Kerr.

Las dos primeras opciones, que se refieren siempre a agujeros negros estáticos, nos permiten elegir la masa del agujero negro: entre 3 y 15 soles para el primer caso, entre 3 y 30 mil millones para el segundo. Señalemos que hemos escogido un tipo de agujeros negros supermasivos especialmente grande, que solo existe en el corazón de galaxias colosales como [NGC4889](#), mientras nuestra humilde Vía Láctea posee uno de tan solo unos 4 millones de soles.

El agujero, representado por un círculo negro, toma un tamaño proporcional al valor elegido, aunque con diferente escala. Nos muestra el radio del agujero negro en kilómetros o en miles de millones de kilómetros.

Después hay tres botones que nos permiten investigar aspectos específicos:

### ACTIVIDADES SOBRE LA GRAVEDAD:

Pulsando “GRAVEDAD” vemos un control gráfico en forma de punto blanco que podemos desplazar con ayuda del ratón por cualquier punto, menos dentro del agujero negro. Se nos informa de la distancia del punto hasta la singularidad en kilómetros o en miles de millones de kilómetros según el caso, el valor de la intensidad de la gravedad en el punto comparado con la terrestre ( $9,8 \text{ N/kg}$ ) y la fuerza de la marea sobre un cuerpo de 1 m de diámetro, medida también en comparación con la gravedad. Es decir la diferencia de la intensidad gravitatoria entre dos puntos cuya distancia al agujero negro se diferencia en la longitud de un metro.

Aunque la intensidad gravitatoria está calculada con la teoría de Newton, su valor es suficientemente preciso para nuestros propósitos. Al acercarnos al horizonte de sucesos la gravedad se hace millones de veces mayor que la de nuestro planeta (unos cientos en el caso de los agujeros supermasivos). La aceleración de la caída sería realmente fantástica, pero el verdadero problema lo encontraríamos con la fuerza de marea. Al acercarnos a un agujero negro estelar la fuerza de marea que actuaría sobre diferentes partes de nuestro cuerpo superaría con mucho la fuerza de cohesión molecular, lo que nos desintegraría. No es este el caso en los agujeros negros supermasivos, que en su mismo borde ofrecería unos valores despreciables de marea.

## ACTIVIDADES SOBRE SATÉLITES:

Al elegir la opción “SATELITE” aparece un nuevo menú que nos permite poner nuestra nave en órbita (suponiendo que pudiéramos soportar la marea) a una distancia 3 de veces el radio del horizonte de sucesos, 2 veces o 1,5 veces ese mismo radio. Elijamos primero el valor  $3R$  para un agujero negro estelar. El programa nos informa del radio de la órbita y la velocidad que necesitará para mantenerse en ella medida en comparación con la de la luz ( $c=300.000$  km/s). Si pulsamos el botón Volar/parar podemos ver a nuestra nave dar una vuelta al planeta. Pulsemos ese botón de nuevo para detenernos al acabar la vuelta. ¿Cuánto tiempo hemos empleado? Veremos que depende del punto de vista, desde el interior de la nave hemos tardado unos milisegundos (un viaje realmente ultrarrápido) pero un observador de la Tierra vería que hemos tardado algo más. Hay una clara diferencia de tiempo medido en la fuerte gravedad de la proximidad del agujero negro y el que se mide en un campo de gravedad tan pequeño como el terrestre. El mismo efecto lo percibiremos en un agujero supermasivo, aunque en este caso el tiempo se medirá en días.

Tomemos ahora la opción  $2R$ . Estamos ya en un punto en el cual no podemos encontrar una órbita estable en movimiento libre. Si pulsamos Volar/parar, veremos cómo nuestra nave desciende en espiral hacia el agujero negro. Pulsemos el botón “Comienzo” y empecemos de nuevo el vuelo, pero pulsando también el botón “Acelera”. Nuestra caída tiene remedio. No hay una órbita estable a esta distancia, pero podemos escapar del agujero negro.

Es diferente el caso con la opción  $1,5R$ . Todavía podremos mandar comunicaciones al exterior, pero ya nada nos librará de caer al agujero negro. Hemos rebasado la distancia mínima de escape. Aunque aceleremos la nave, acabará finalmente dentro del agujero. Esto es particularmente peligroso en el caso de agujeros supermasivos: aún a decenas de miles de millones de kilómetros de la singularidad podemos estar perdidos sin remedio, sin que tan siquiera nos hayan avisado las fuerzas de marea, muy pequeñas en este caso.

El movimiento de la nave deja siempre un rastro espacial que podemos borrar con el botón “limpiar”

## ACTIVIDADES SOBRE LA ABSORCIÓN DE UN DISCO DE GASES

Cuando un agujero negro está cerca de una gigante roja en el final de su vida estelar, es muy probable que vaya capturando el material exterior de la estrella (eventualmente puede acabar con ella por completo). Este material cae normalmente hacia el agujero formando un disco de acreción, más o menos delgado, que sigue un camino espiral hacia el horizonte de sucesos. Si pulsamos “DISCO DE GAS” veremos el espacio deformado alrededor del agujero negro, simulando su aspecto de desagüe por el que los gases se precipitan en espiral.

Hay un control gráfico, un punto rojo que podemos mover por la pantalla. Situémoslo en cada uno de los brazos de la espiral gaseosa para ver cómo cambian las propiedades del gas en su acelerada caída. Vemos información sobre la distancia en kilómetros al agujero, la temperatura que alcanza el gas, la longitud de onda de los rayos X que emite debido a esta temperatura (una de las señas de identidad que permite identificar agujeros negros) y el intervalo de tiempo terrestre que equivale a un segundo de tiempo en la posición del control.

Notemos el hecho de que en el borde del horizonte de sucesos, la temperatura puede superar fácilmente los  $15.000.000$  kelvin existentes en el centro del Sol. Esta temperatura, sin embargo, es más pequeña cuando la masa del agujero negro es mayor.

También la longitud de onda de los rayos X emitidos es más corta (radiación más energética) en los agujeros más pequeños; de este modo, esta longitud de onda nos permite vaticinar el tamaño del objeto. Teniendo en cuenta que denominamos rayos X a las ondas electromagnéticas con longitudes de onda entre  $10$  y  $0,01$  nanómetros, vemos que en todos los casos se trata de rayos X duros (de mucha energía).

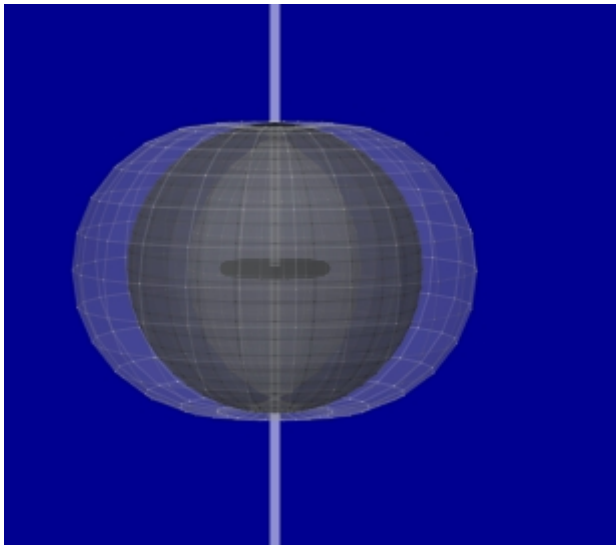
En cuanto al tiempo equivalente a un segundo en el punto de control, hay que resaltar el hecho de que si nos situáramos en el horizonte de sucesos, el tiempo en la Tierra se haría infinito, así que, en realidad, medimos la dilatación temporal cuando el control está como mínimo a  $1\text{mm}$  de distancia del horizonte de sucesos. Es fácil advertir que, a esta distancia del agujero, la dilatación

temporal se hace más importante cuanto mayor sea este. Esta diferencia en la medida del tiempo es la que utilizan en la película [Interstellar](#) donde una hora en el borde de Gargantúa (un agujero de gusano supermasivo) son siete años terrestres. Lo que no se explica en la película es cómo es posible que semejante objeto, con una masa de millones de soles, situado cerca de Saturno, no ha destruido por completo la estabilidad del sistema solar. ¡Licencias cinematográficas!

Para acabar nuestra actividad con esta sección debemos retroceder a GRAVEDAD, o SATÉLITE, o bien pulsar el botón “inicio”.

### ACTIVIDADES SOBRE UN AGUJERO NEGRO ROTANTE (DE KERR)

El agujero protagonista de esta etapa es de tres soles. Inicialmente está en reposo, así que es un agujero negro de Swarschild. Para efectos didácticos lo vemos “transparente”, mostrando su singularidad central. Si damos un valor a su momento angular por unidad de masa con el pulsador correspondiente, vemos algo así:



Apreciamos una cubierta externa, tangencial a los polos del agujero negro: la ergosfera.

En su interior se aprecia la superficie del horizonte de sucesos, que ya no es esférica sino elipsoidal, lo que se nota más aumentando el momento angular. En el centro se ve la singularidad que ya no es un punto sino un anillo circular.

Pulsando “Rotar” podemos apreciar el movimiento del conjunto

Moviendo el deslizador “Perspec.” (perspectiva) observamos el conjunto desde diferentes puntos de vista.

Si con el conjunto en movimiento pulsamos los cañones de partículas F1, F2, F3, F4, podremos hacernos idea de la trayectoria que seguirán partículas relativistas (a gran velocidad) al moverse en este entorno. La partícula F1 se acerca al agujero atraída por la gravedad, pero es suficientemente rápida para escapar rozando la ergosfera. La F2 camina hacia la ergosfera, como el espacio-tiempo en esta zona es arrastrada por la rotación del agujero, vemos que mientras la atraviesa la propia partícula se ve también arrastrada en el giro hasta que encuentra una salida. La partícula F3 apunta hacia el interior del horizonte de sucesos, de forma que desaparece para siempre al caer en su interior. El caso de la partícula F4 es diferente: al seguir el eje de rotación puede llegar a la singularidad por el entro del anillo y, quizás, aparecer en otro lugar del espacio-tiempo, que podría ser también en otro universo.