

Tesis de doctorado



Jorge Alejandro Tarango Yong

29 de noviembre de 2017



# UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA DE MÉXICO

---

## INSTITUTO DE RADIOASTRONOMÍA Y ASTROFÍSICA

“Estudio de la Interacción de Flujos Múltiples de Fuentes  
Astrofísicas, Aplicada a los Proplyds Clásicos de la Nebulosa de  
Orión”

T E S I S

PARA OBTENER EL GRADO ACADÉMICO DE  
DOCTOR EN CIENCIAS (ASTRONOMÍA)

P R E S E N T A

JORGE ALEJANDRO TARANGO YONG  
Director de Tesis: Dr. William J. Henney

Morelia, Michoacán  
2017

# Índice general

<b>1. Objetos Astrofísicos Relevantes</b>	<b>9</b>
1.1. Nubes Moleculares Gigantes . . . . .	9
1.2. La Nebulosa de Orión . . . . .	10
1.3. Discos Protoplanetarios . . . . .	12
1.3.1. Formación . . . . .	12
1.4. Proplyds . . . . .	12
1.4.1. Descubrimiento . . . . .	12
1.4.2. ¿Qué es un proplyd? Breve introducción (Johnstone et al., 1998) . . . . .	12
1.4.3. Mecanismos de fotoevaporación (Johnstone et al., 1998) . . . . .	14
1.5. Objetos LL . . . . .	16
1.5.1. Mapa de Objetos . . . . .	16
<b>2. Marco Teórico</b>	<b>17</b>
2.1. Vientos Estelares . . . . .	17
2.2. Choques . . . . .	17
2.3. Frentes de Ionización . . . . .	17
2.4. Regiones HII . . . . .	17
2.5. Modelo Genérico de los Choques de Proa . . . . .	18
2.5.1. Radios “Característicos” . . . . .	18
2.6. Proyección en el Plano del Cielo . . . . .	20
2.6.1. Vectores normal y tangente a la superficie . . . . .	22
2.6.2. Línea tangente . . . . .	23
2.6.3. Radios característicos en el plano del cielo . . . . .	24

2.7.	Cuádricas de Revolución . . . . .	25
2.7.1.	Radios Característicos . . . . .	26
2.7.2.	Proyección en el plano del cielo . . . . .	28
<b>3.</b>	<b>Interacción de dos vientos: Aproximación Hipersónica (Canto et al., 1996)</b>	<b>33</b>
3.1.	Cantidades conservadas en un flujo hipersónico de capa delgada . . . . .	33
3.2.	Problema de Interacción de Dos Vientos . . . . .	35
3.2.1.	Interacción con un viento esférico isotrópico . . . . .	36
3.2.2.	Interacción de un viento esférico isotrópico con un viento plano-paralelo . . . . .	38
3.2.3.	Radios Característicos . . . . .	39
<b>4.</b>	<b>Obtención de la Forma Aparente de los Choques en el Modelo de Aproximación Hipersónica</b>	<b>41</b>
4.1.	Ajustes a la cabeza . . . . .	41
4.2.	Ajustes a la cola . . . . .	43
4.2.1.	Ajustes a la cabeza y la cola en el caso de la interacción con un viento plano-paralelo . . . . .	44
4.3.	Proyección en el plano del cielo para el modelo de capa delgada . . . . .	45
<b>5.</b>	<b>Resultados obtenidos para los prolyds “clásicos”</b>	<b>47</b>
5.1.	Metodología para la medición de la forma aparente. . . . .	47
5.1.1.	Medición de incertidumbres . . . . .	49
5.2.	Resultados . . . . .	49
<b>6.</b>	<b>Resultados obtenidos para otros objetos</b>	<b>53</b>
<b>7.</b>	<b>Conclusiones</b>	<b>55</b>
	<b>Bibliografía</b>	<b>57</b>
<b>A.</b>	<b>Derivación Matemática del Radio de Curvatura</b>	<b>59</b>
A.1.	Radio de curvatura para un polinomio de grado $2n$ . . . . .	61

<b>B. Derivación paso a paso de los Radios Característicos en la aproximación hipersónica del modelo de interacción de dos vientos</b>	<b>63</b>
B.1. $R_0$ . . . . .	63
B.2. $\tilde{R}_{90}$ . . . . .	64
B.3. Radio de Curvatura en el caso de la interacción de dos vientos esféricos. . . . .	65
B.4. Radio de Curvatura en el caso de interacción con un viento plano-paralelo . . . . .	68
<b>C. Coeficientes de los parámetros de la hipérbola para el ajuste de la cola</b>	<b>71</b>

## **Agradecimientos**

Esta tesis se realizó para obtener el título de doctorado en ciencias (Astronomía). Deseo aprovechar esta sección para hacer agradecimientos a personas y/o instituciones que me ayudaron para que pueda completar este trabajo de manera exitosa.

## **Resumen**

Abstract en español

## **Abstract**

Abstract written in english

# Capítulo 1

## Objetos Astrofísicos Relevantes

### 1.1. Nubes Moleculares Gigantes

Las grandes “guarderías” de estrellas a lo largo de la Galaxia se localizan en nubes moleculares gigantes, compuestas principalmente por hidrógeno molecular  $H_2$ . Siendo que esta molécula solo emite radiación en ultravioleta, donde el medio interestelar tiene una alta extinción, para detectar la presencia de las nubes moleculares se recurre a otras moléculas llamadas “trazadoras”, principalmente  $CO$ , la segunda molécula más abundante en el medio interestelar, que posee líneas espectrales en el rango de las ondas de radio.

Complejos como el de Taurus-Auriga se formaron debido a la convergencia de dos flujos de material neutro (Ballesteros-Paredes et al., 1999) que se enfrió y se volvió más denso debido a inestabilidades térmicas (Hennebelle & Péault, 1999). Muchas de estas nubes moleculares tienen forma filamentaria debido a que se están colapsando gravitacionalmente en caída libre (Ballesteros-Paredes et al., 2011). Dentro de los filamentos puede haber colapsos locales que pueden dar lugar a regiones de formación estelar de baja masa o incluso asociaciones OB como es el caso de la Nebulosa de Orión (Hartmann & Burkert, 2007).

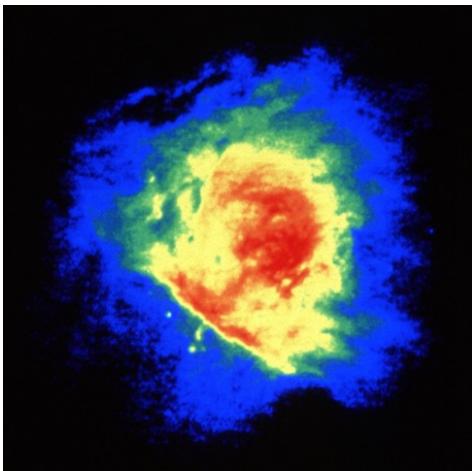


Figura 1.1: La Nebulosa de Orión observada por el VLA en la banda L ( $\lambda = 20$  cm,  $\nu = 1,4$  GHz, Yusef-Zadeh (1990)).

## 1.2. La Nebulosa de Orión

La Nebulosa de Orión (ONC por sus siglas en inglés), ubicada a  $\sim 414$  pc (Menten et al., 2007), es probablemente la región HII mejor estudiada del cielo (ver §2.4). Forma parte de la nube molecular gigante de Orión, de donde se distinguen dos sub-unidades, llamadas Orión A y Orión B. ONC forma parte de Orión A. El cúmulo de estrellas que se formó y que es responsable de la región HII se conoce como asociación OB Ori Id, cuyos miembros más prominentes son un grupo de cuatro estrellas conocidas como el “Trapecio”. La más masiva de éstas es  $\theta^1$  Ori C, de clasificaciónpectral O6 aproximadamente (ver tabla ), tiene una luminosidad de  $4 \times 10^5 L_\odot$  y una temperatura de  $4 \times 10^4$  K. Cuando la región HII se encuentra embebida en el gas molecular, la región HII no puede ser visible en el rango óptico del espectro. En el caso de ONC, que se ubica cerca del borde de la nube molecular Orion A, el gas ionizado caliente, que posee una presión mayor que el gas molecular frío, se escapa hacia el gas adyacente a la nube molecular en forma de “flujo de champaña” (figura 1.2), y de esta manera el gas ionizado puede ser visible por medio de diferentes líneas espectrales, tanto de hidrógeno como de otros elementos.



Figura 1.2: Izquierda: Representación esquemática de la Asociación Ori Id y su ubicación dentro de la nube molecular gigante Orión A. La región BN-KL es una región de formación estelar muy activa donde se observan entre otras cosas, máseres de agua y SiO y flujos moleculares (Stahler & Palla, 2004). Derecha: Línea espectral  $H\ 85\ \alpha$  de hidrógeno de ONC. El eje horizontal corresponde a la frecuencia en MHz, mientras que el eje vertical representa la temperatura de antena. El espectro muestra un corrimiento al azul que muestra que el gas se acerca a una velocidad de  $\sim 3\ km\ s^{-1}$  (Stahler & Palla, 2004; Gordon & Churchwell, 1970)

## 1.3. Discos Protoplanetarios

### 1.3.1. Formación

## 1.4. Proplyds

### 1.4.1. Descubrimiento

Observaciones en óptico de la región del trapecio en filtros de banda angosta de diferentes líneas de emisión tales como  $H\alpha$ ,  $H\beta$ , [ $OIII$ ], [ $NII$ ], [ $SII$ ] y continuo, revelaron la existencia de objetos puntuales únicamente visibles en líneas de alta ionización ( $H\alpha$ ,  $H\beta$  y [ $OIII$ ]) que fueron inicialmente denominados como “condensaciones nebulares” (Laques & Vidal, 1979).

Hasta el momento no se sabía con certeza si “condensaciones nebulares” eran en realidad condensaciones nebulares (regiones donde la densidad de la nebulosa es inusualmente alta por alguna razón o bien esferas de gas molecular cuya envolvente fue ionizada y que la radiación de la estrella central la está “erosionando”) o si se trataba de protoestrellas de baja masa cuyo disco protoplanetario estaba siendo fotoevaporado por la estrella central (Churchwell et al., 1987). No fue sino hasta que se contó con observaciones de alta resolución con el Telescopio Espacial Hubble (HST) que se pudo determinar la verdadera naturaleza de estos objetos (O’dell et al., 1993) y la razón por la que se les denominó “proplyds” (PROtoPLanetary DiskS). A su vez se encontraron por primera vez arcos delgados y otras estructuras de gran interés.

### 1.4.2. ¿Qué es un proplyd? Breve introducción (Johnstone et al., 1998)

Las imágenes del HST de la Nebulosa de Orión mostraron imágenes de discos alrededor de estrellas jóvenes de baja masa. Algunos se ven como siluetas oscuras que contrastan con la nebulosa, y otros casos son visibles en líneas de emisión de líneas de alta ionización. Un proplyd típico tiene forma cometaria, con una cabeza brillante que apunta hacia la fuente de radiación ionizante, y una cola que se extiende en dirección contraria a ésta. La explicación a esta forma es que el disco protoplanetario

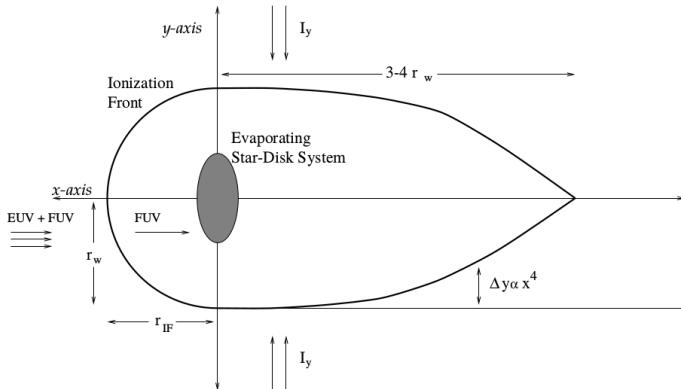


Figura 1.3: Representación esquemática de la formación de un frente de ionización hemisférico y de una cola de gas ionizado detrás del disco en proceso de fotoevaporación.  $r_{IF}$  y  $r_w$  representan el radio del frente de ionización en las direcciones de los ejes  $x$  e  $y$ , respectivamente.  $I_y$  representa el campo de radiación difusa. Por detrás del disco, la radiación difusa calienta el gas del disco provocando otro flujo fotoevaporado.  $\Delta y$  es la diferencia entre la forma actual del frente de ionización por detrás del disco y una forma cilíndrica. La forma de la colase explica como que el flujo de radiación  $I_y$  es capaz de penetrar más cerca del eje  $x$  conforme uno se aleja del disco, donde el flujo fotoevaporado es menos denso.

está siendo fotoevaporado por la radiación ionizante de una estrella masiva ( $\theta^1$  Ori C en caso de la Nebulosa de Orión), la cabeza es un frente de ionización cuyo radio escala como  $R_{IF} \propto D^{2/3}$ , donde  $D$  es la distancia a la estrella masiva. La forma de la cola se debe a radiación ionizante difusa, producto de dispersión por polvo y por recombinationes (Figura 1.3)

Churchwell et al. (1987) ya había notado que la tasa de pérdida de masa observada en el gas ionizado implicaba que la fuente de este gas debía oscurecer a la protoestrella huésped, a menos que proviniera de un disco circumestelar. De la emisión de radio observada, se estima la densidad electrónica en  $n_e \sim 10^6 \text{ cm}^{-3}$  y la tasa de pérdida de masa en  $\dot{M} \sim 10^{-7} M_\odot \text{ yr}^{-1}$ .

### 1.4.3. Mecanismos de fotoevaporación (Johnstone et al., 1998)

El principal mecanismo de fotoevaporación es el campo de radiación de la estrella central, en la parte ultravioleta del espectro electromagnético. Según la masa de la estrella central, podemos tener dos clases de flujo radiativo: Dominado por el ultravioleta lejano (FUV,  $h\nu < 13,6$  eV) o dominado por el ultravioleta extremo (EUV,  $h\nu \geq 13,6$  eV). En general, el FUV se encarga de disociar moléculas y de calentar el gas de la región de fotodisociación (PDR) hasta temperaturas de 100 - 1000 K, mientras que el EUV puede ionizar el gas y elevar su temperatura hasta  $10^4$  K. El EUV no puede atravesar el frente de ionización (IF) pero el FUV sí.

En el caso de que el flujo sea dominado por el EUV, la presión térmica del flujo fotoevaporado es determinada por la fotoionización, la PDR producida por el FUV es delgada. El gas calentado por el FUV se mueve de manera subsónica hasta llegar al IF y la tasa de pérdida de masa depende de la tasa de ionización inducida por el EUV.

Si el flujo está dominado por el FUV, la presión térmica depende del calentamiento por el FUV. El gas tibio se expande como un viento que empuja el IF lejos del disco. La tasa de pérdida de masa la determina la temperatura de la PDR, el flujo FUV y la opacidad del polvo a las longitudes de onda del FUV.

Inicialmente la forma del disco impone una geometría cilíndrica en el flujo fotoevaporado, pero eventualmente los gradientes de presión tornan esta geometría en esférica.

Las ecuaciones de continuidad de la masa y el momento restringen la velocidad del flujo neutro antes de alcanzar el IF. Mas allá de éste, la presión del gas hace que éste se expanda a velocidades del orden de una a dos veces la velocidad del sonido. Para el gas neutro dentro del IF hay dos posibles soluciones: si el gas neutro es supersónico entonces el IF será de baja densidad (Tipo R) con bajo contraste de densidad entre gas neutro y gas ionizado. O si el gas neutro es subsónico se formará un IF tipo D con un gran contraste de densidad entre el gas neutro y el gas ionizado. Sin embargo, sin importar qué tipo de radiación domina la fotoevaporación, el gas neutro permanece a velocidades subsónicas al llegar al IF, por lo que dicho frente será tipo D. En el caso de un flujo

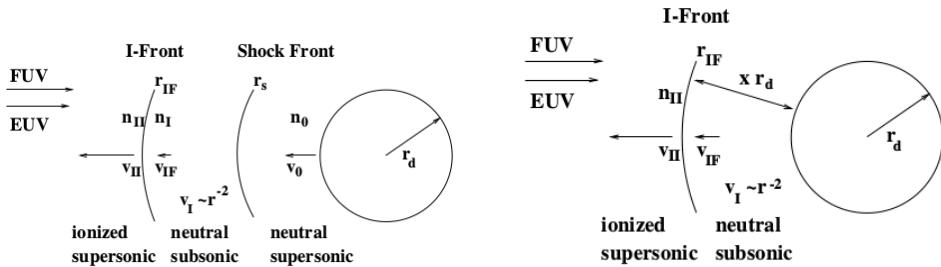


Figura 1.4: Representación esquemática de las regiones del flujo fotoevaporado de un proplyd. Izquierda: Cuando el flujo es dominado por el FUV. Derecha: Flujo dominado por EUV (Johnstone et al., 1998)

dominado por el EUV, el gas neutro permanece a velocidad subsónica, su velocidad decae como  $v_I \propto r^{-2}$  y llega a  $0,5 \text{ kms}^{-1}$  al llegar al frente de ionización. Cundo el flujo es dominado por el FUV, el gas neutro se acelera hasta llegar a velocidades supersónicas, luego atraviesa un choque isotérmico que lo desacelera y llega al frente de ionizacion a  $0,5 \text{ kms}^{-1}$ .

Sin importar el tipo de mecanismo de photoevaporación dominante, el flujo fotoevaporado solo si la presión térmica supera a la gravedad de la protoestrella. Entonces, el flujo fotoevaporado solo existe a partir de un radio crítico  $r_g$ , donde este radio se estima a partir del balance entre la energía necesaria para escapar de una órbita kepleriana y la energía térmica:

$$r_g = \frac{GM_*}{a^2} \quad (1.1)$$

Donde  $M_*$  es la masa de la protoestrella y  $a$  es la velocidad del sonido del gas. Para las protoestrellas típicas del trapecio la masa típica es de  $M_* = 0,2 M_\odot$ . Para el gas neutro la velocidad del sonido es de  $a_I \sim 3 \text{ kms}^{-1}$  y para el gas ionizado es de  $a_{II} \sim 10 \text{ kms}^{-1}$ . Por tanto, el radio gravitacional para un flujo dominado por el EUV es de  $r_{gII} \sim 2 \text{ AU}$  y para un flujo dominado por el FUV es de  $r_{gI} \sim 20 \text{ AU}$ .

## 1.5. Objetos LL

### 1.5.1. Mapa de Objetos

# **Capítulo 2**

## **Marco Teórico**

### **2.1. Vientos Estelares**

### **2.2. Choques**

### **2.3. Frentes de Ionización**

Un frente de ionización es la interfaz entre un medio gaseoso neutro y uno ionizado. Ocurren cerca de fuentes de radiación ionizante, tales como estrellas masivas, tipo B temprana o tipo O. El frente de ionización puede tratarse como una discontinuidad en el medio gaseoso.

### **2.4. Regiones HII**

Las regiones HII se forman cuando una estrella masiva, de tipo espectral O ó B temprana, ioniza el gas que se encuentra a su alrededor. El gas ionizado se encuentra en equilibrio térmico, a una temperatura del orden de  $10^4$  K. El principal proceso de calentamiento es la radiación de la estrella central, mientras que el enfriamiento se da principalmente por la recombinación de líneas prohibidas y por emisión libre-libre.

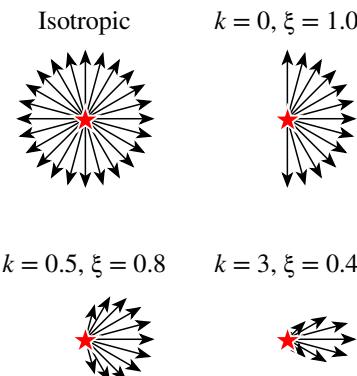


Figura 2.1: Representación esquemática de vientos con diferentes anisotropías: Arriba izquierda: Viento isotrópico esférico. Arriba derecha: viento isotrópico hemisférico. Abajo: Vientos anisotrópicos donde el parámetro  $k$  indica el grado de anisotropía (ver capítulo 3)

## 2.5. Modelo Genérico de los Choques de Proa

Para este trabajo consideramos en general dos modelos de interacción de vientos:

- Una fuente localizada en el origen que emite un viento esférico que puede ser isotrópico o anisotrópico (figura 2.1) no acelerado que interactúa con el viento esférico isotrópico de otra fuente que se encuentra a una distancia  $D$  de la primera (figura 2.2)
- Una fuente localizada en el origen que emite un viento esférico isotrópico no acelerado que interactúa con un viento plano paralelo no acelerado y densidad constante (figura )

El sistema en su conjunto tiene simetría cilíndrica.

### 2.5.1. Radios “Característicos”

Las cantidades medibles que nos ayudan a caracterizar un choque de proa las llamamos “Radios característicos” (ilustrados en la figura 2.3):

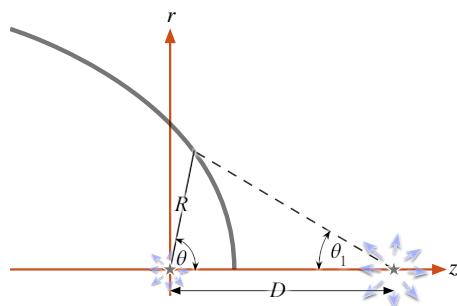


Figura 2.2: Representación esquemática del problema de interacción de dos vientos: Dos fuentes separadas por una distancia  $D$  emiten un viento radial que forma un choque de proa a una distancia  $R$  del origen. El sistema tiene geometría cilíndrica siendo el eje  $z$  el eje de simetría. La forma del choque depende únicamente del ángulo polar  $\theta$ , medido a partir del origen. Otro ángulo que es de utilidad es  $\theta_1$ , que corresponde al ángulo polar medido a partir de la posición de la otra fuente.

- Radio del choque en la dirección del eje de simetría del sistema.  
Denotado como  $R_0$
- Radio en dirección perpendicular al eje de simetría del sistema.  
Denotado como  $R_{90}$
- Radio de curvatura en la “nariz” del choque de proa. Denotado como  $R_c$ . En el apéndice A se muestra el procedimiento para obtener este radio para una curva genérica continua y derivable.

Para este trabajo resulta útil hacer una normalización de los radios característicos u otros radios, para que las mediciones que obtengamos sean adimensionales. De esta forma, podemos hacer la normalización con la distancia  $D$ , o bien con  $R_0$ , dependiendo de qué tipo de normalización resulte más conveniente. En el primer caso expresamos explícitamente el cociente (e.g  $\frac{R_0}{D}$ ,  $\frac{R_c}{D}$ ,  $\frac{R_{90}}{D}$ ), y en el segundo caso añadiremos una tilde al radio en cuestión (e.g  $\tilde{R}_c$ ,  $\tilde{R}_{90}$ ).

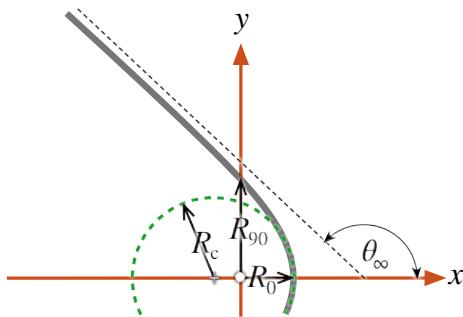


Figura 2.3: Representación esquemática de los radios característicos de un choque de proa

## 2.6. Proyección en el Plano del Cielo

Para un choque de proa que es la vez geométricamente delgado y ópticamente delgado, únicamente se observa el borde de éste por abrillantamiento al limbo, por lo tanto, su orientación respecto a la línea de visión modifica su forma respecto a la forma real del choque. Para ello, rotamos el sistema de referencia del choque de proa en coordenadas cartesianas, denotado por  $(x, y, z)$ , por un ángulo que llamamos *inclinación*, denotado por  $i$ , en el plano  $xz$ , de modo que la transformación entre el sistema de referencia del choque y el sistema de referencia del plano del cielo, denotado por  $(x', y', z')$  queda como sigue:

$$\begin{pmatrix} x' \\ y' \\ z' \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} x \cos i - z \sin i \\ y' \\ z \cos i + x \sin i \end{pmatrix} \quad (2.1)$$

Por otro lado, la forma tridimensional del choque de proa viene dado por:

$$\begin{pmatrix} x \\ y \\ z \end{pmatrix} = R(\theta) \begin{pmatrix} \cos \theta \\ \sin \theta \cos \phi \\ \sin \theta \sin \phi \end{pmatrix} \quad (2.2)$$

La relación entre ambos sistemas de referencia se ilustra en la figura ??.

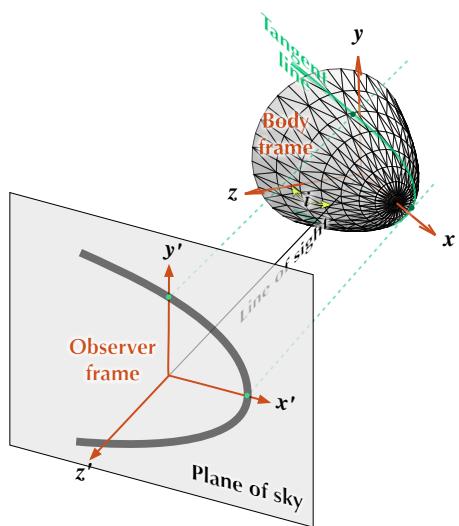


Figura 2.4: Sistema de referencia del choque vs sistema de referencia del plano del cielo. Los ejes  $x'$  y  $y'$  se encuentran en el plano del cielo, mientras el eje  $z'$  es paralelo a la línea de visión. Solo la región del choque cuya tangente sea paralela a la línea de visión será visible por abrillantamiento al limbo.

### 2.6.1. Vectores normal y tangente a la superficie

Si definimos los vectores  $\hat{n}$  y  $\hat{t}$ , como los vectores normal y tangente a la superficie, respectivamente para  $\phi$  constante. En el caso  $\phi = 0$  (figura 2.5), ambos vectores se encuentran en el plano  $xy$  y es fácil mostrar que:

$$\hat{t}_0 = \begin{pmatrix} -\cos \alpha \\ \sin \alpha \\ 0 \end{pmatrix} \quad \text{y} \quad \hat{n}_0 = \begin{pmatrix} \sin \alpha \\ \cos \alpha \\ 0 \end{pmatrix} \quad (2.3)$$

Donde:

$$\tan \alpha = -\frac{dy}{dx} = \frac{1 + \omega \tan \theta}{\tan \theta - \omega} \quad (2.4)$$

y:

$$\omega(\theta) = -\frac{1}{R} \frac{dR}{d\theta} \quad (2.5)$$

Para otros valores de  $\phi$ , basta con hacer una rotación de las ecuaciones (2.3) alrededor del eje  $x$ . Para la conversión al sistema de referencia del plano del cielo se utiliza la ecuación (2.1):

$$\begin{aligned} \hat{n}' &= \frac{1}{(1 + \omega^2)^{1/2}} \\ &\times \begin{pmatrix} (\cos \theta + \omega \sin \theta) \cos i - (\sin \theta - \omega \cos \theta) \sin i \sin \phi \\ (\sin \theta - \omega \cos \theta) \cos \phi \\ (\cos \theta + \omega \sin \theta) \sin i + (\sin \theta - \omega \cos \theta) \sin \phi \cos i \end{pmatrix} \end{aligned} \quad (2.6)$$

$$\begin{aligned} \hat{t}' &= \frac{1}{(1 + \omega^2)^{1/2}} \\ &\times \begin{pmatrix} -(\sin \theta - \omega \cos \theta) \cos i - (\cos \theta + \omega \sin \theta) \sin i \sin \phi \\ (\cos \theta + \omega \sin \theta) \cos \phi \\ -(\cos \theta + \omega \sin \theta) \sin i + (\sin \theta - \omega \cos \theta) \sin \phi \cos i \end{pmatrix} \end{aligned} \quad (2.7)$$

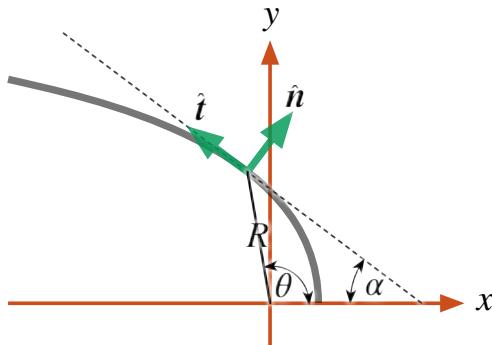


Figura 2.5: Vectores unitarios normal y tangente a la superficie  $R(\theta)$  en un plano de azimuth  $\phi$  constante.

### 2.6.2. Línea tangente

Debido a que el choque es ópticamente delgado y geométricamente delgado, solo la región del choque cuya tangente sea paralela a la línea de visión será visible. Esto corresponde a una curva que denominamos *línea tangente*, que debe cumplir con la siguiente condición:

$$\hat{n}' \cdot \hat{z}' = 0 \quad (2.8)$$

Denotamos como  $\phi_T$  al ángulo azimutal que cumple la condición anterior para una inclinación dada, en función del ángulo polar  $\theta$ :

$$\sin \phi_T = \tan i \tan \alpha = \tan i \frac{1 + \omega \tan \theta}{\omega - \tan \theta} \quad (2.9)$$

De esta manera, la forma de la línea tangente del choque de proa, a la que llamamos *forma proyectada* viene dada por:

$$\begin{pmatrix} x'_T \\ y'_T \\ z'_T \end{pmatrix} = R(\theta) \begin{pmatrix} \cos \theta \cos i - \sin \theta \sin \phi_t \sin i \\ \sin \theta (1 - \sin^2 \phi_T)^{1/2} \\ \cos \theta \sin i + \sin \theta \sin \phi_t \cos i \end{pmatrix} \quad (2.10)$$

En el caso general,  $z'_T$  no es una función lineal de  $x'_T$  y  $y'_T$ , por lo que la línea tangente no se encuentra en un plano.

La forma aparente  $(x'_T, y'_T)$  de la línea tangente también puede escribirse en coordenadas polares  $(R', \theta')$ , donde:

$$R'(\theta) = (x'^2_T + y'^2_T)^{1/2} \quad \tan \theta' = \frac{y'_T}{x'_T} \quad (2.11)$$

Es de notar a su vez que la ecuación (2.9) no tiene solución para valores arbitrarios de  $\theta$  y de la inclinación, puesto que se requiere que  $|\sin \phi_T| < 1$ . Por tanto, la línea tangente solo existe para valores de  $\theta$  tales que  $\theta < \theta_0$  donde  $\theta_0$  es el valor de  $\theta$  en el eje de simetría de la línea tangente proyectada ( $\theta'(\theta_0) = 0$ ) y que se obtiene de la siguiente ecuación implícita:

$$\tan \theta_0 = \frac{|\tan i| + \omega(\theta_0)}{1 - \omega(\theta_0)|\tan i|} \quad (2.12)$$

Esto implica que si el choque de proa es suficientemente “abierto” ( $\alpha > \alpha_{min}$ ), entonces para inclinaciones tales que  $|i| > 90^\circ - \alpha_{min}$  no existirá la línea tangente para ningún valor de  $\theta$ , es decir, el choque de proa se encontrará suficientemente “de cara” como para que ya no parezca un chouque de proa para el observador.

### 2.6.3. Radios característicos en el plano del cielo

En orden de comparar la forma  $R(\theta)$  con observaciones, es útil definir los radios característicos  $R'_0$  y  $R'_{90}$ , donde  $R'_0$  es el radio del eje de simetría aparente y  $R'_{90}$  es el radio aparente en la dirección perpendicular a  $R'_0$ . Es decir  $R'_0 = x'_T(y'_t = 0)$  y  $R'_{90} = y'_t(x'_t = 0)$ . Utilizando las ecuaciones (2.9) y (2.10) encontramos que:

$$R'_0 = R(\theta_0) \cos(\theta_0 + i) \quad (2.13)$$

Donde  $\theta_0$  es la solución de la ecuación (2.12), y

$$R'_{90} = R(\theta_{90}) \sin \theta_{90} (1 - \sin^2 \phi_T(\theta_{90}))^{1/2} \quad (2.14)$$

donde  $\theta_{90}$  es la solución de la siguiente ecuación implícita:

$$\cot \theta_{90} = \frac{1 - (1 + \omega(\theta_{90})^2 \sin^2 2i)^{1/2}}{2\omega(\theta_{90}) \cos^2 i} \quad (2.15)$$

## 2.7. Cuádricas de Revolución

En el caso general es difícil encontrar la forma aparente para un choque de proa siguiendo el formalismo desarrollado en la sección anterior, por lo que optamos por aproximar la forma éstos con una de las superficies más simples: las *cuádricas de revolución*, que son superficies de revolución de las curvas cónicas. Dado el modelo general descrito en la §2.5, haremos algunas restricciones para las superficies cuádricas que utilizaremos en este trabajo:

- El eje focal se encuentra alineado con el eje  $x$
- La posición del foco de la superficie cuádrica no necesariamente coincide con la posición de la fuente
- En el caso de las hipérbolas, solo tomamos una de las ramas de ésta.

Implementando dichas restricciones, utilizamos la representación paramétrica de las curvas cónicas en términos de un parámetro adimensional denotado con la letra  $t$ :

$$x = a\mathcal{C}(t) + x_0 \quad (2.16)$$

$$y = b\mathcal{S}(t) \quad (2.17)$$

Donde:

$$\mathcal{C}(t) = \begin{cases} \cos t & \theta_c > 0 \\ -\cosh t & \theta_c < 0 \end{cases} \quad (2.18)$$

$$\mathcal{S}(t) = \begin{cases} \sin t & \theta_c > 0 \\ \sinh t & \theta_c < 0 \end{cases} \quad (2.19)$$

$$x_0 = R_0 \mp a \quad (2.20)$$

Donde  $a$  y  $b$  representan la longitud del semi-eje mayor y menor, respectivamente (Figura 2.6).  $x_0$  representa la distancia entre el centro de la cónica y el origen.  $\theta_c$  es un parámetro que está relacionado con la excentricidad y que en este trabajo sustituye a ésta y que están relacionadas por la siguiente expresión:

$$\tan \theta_c = \pm \sqrt{|1 - e^2|} \quad (2.21)$$

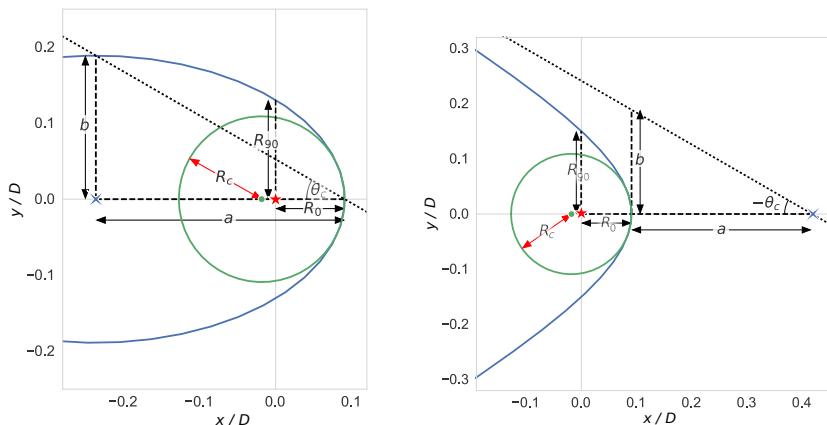


Figura 2.6: Representación esquemática de: Izquierda: Elipse. Y, derecha: Hipérbola. En ambos casos se ilustran los parámetros relevantes de éstas y los radios característicos

Tomamos el signo positivo cuando la cantidad dentro de las barras de valor absoluto es positiva y viceversa (Figura 2.7). También podemos definirlo en términos de los parámetros de las cónicas:

$$\tan \theta_c = \pm \frac{b}{a} \quad (2.22)$$

Siguiendo la convención de que el signo positivo corresponde a elipses, negativo a hipérbolas y cero para las parábolas.

La relación entre el parámetro  $t$  y el ángulo polar  $\theta$  está dado por:

$$\tan \theta = \frac{b\mathcal{S}(t)}{a\mathcal{C}(t) + x_0} \quad (2.23)$$

### 2.7.1. Radios Característicos

Para que las curvas cónicas den una buena aproximación a la forma de un choque de proa dado, necesitamos saber calcular los radios característicos para éstas. A partir de la descripción de éstos en la §2.5.1 pode-

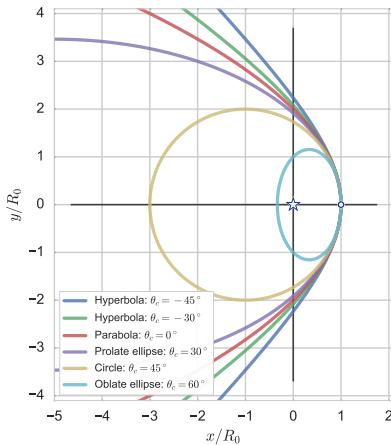


Figura 2.7: Familia de curvas cónicas, donde el valor del parámetro  $\theta_c$  varía desde  $\theta_c < 0$  (hipérbolas) hasta  $\theta_c > 0$  (elipses). Casos especiales son  $\theta_c = 0$  (parábola) y  $\theta_c = 45^\circ$  (círculo). Este parámetro sustituye en este trabajo a la excentricidad.

mos encontrar expresiones para cada uno de éstos en términos de los parámetros de las cónicas:

$$R_c = \frac{b^2}{a} \quad (2.24)$$

$$R_{90} = b \left[ \pm \left( 1 - \frac{(R_0 - a)^2}{a^2} \right) \right]^{1/2} \quad (2.25)$$

$R_0$  es independiente de los parámetros de las cónicas, por tanto, en esta sección nos será útil normalizar con este radio. De esta forma, podemos invertir las siguientes ecuaciones:

$$\tilde{a} = \pm \frac{\tilde{R}_c}{2\tilde{R}_c - \tilde{R}_{90}^2} \quad (2.26)$$

$$\tilde{b} = \frac{\tilde{R}_c}{\left|2\tilde{R}_c - \tilde{R}_{90}^2\right|^{1/2}} \quad (2.27)$$

$$\tan \theta_c = \pm \left|2\tilde{R}_c - \tilde{R}_{90}^2\right|^{1/2} \quad (2.28)$$

Nótese que la cantidad  $T_c \equiv 2\tilde{R}_c - \tilde{R}_{90}^2$  nos sirve como discriminante para distinguir el tipo de curva cónica que mejor ajusta a un choque de proa dado.

### 2.7.2. Proyección en el plano del cielo

El objetivo de esta sección es obtener la forma proyectada de las cuádricas de revolución, puesto que son una aproximación buena y mucho más sencilla a la forma real de un choque de proa. La forma tridimensional de las cuádricas de revolución viene dada por:

$$x = a\mathcal{C}(t) + x_0 \quad (2.29)$$

$$y = b\mathcal{S}(t) \cos \phi \quad (2.30)$$

$$z = b\mathcal{S}(t) \sin \phi \quad (2.31)$$

Siguiendo el procedimiento mostrado en la §2.6 calculamos el ángulo azimutal  $\phi$  que cumple con el criterio de ser tangente al la línea de visión:

$$\sin \phi_T = \frac{b}{a} \tan i\mathcal{T}(t) \quad (2.32)$$

Donde:

$$\mathcal{T}(t) = \begin{cases} \cot t & \text{si } \theta_c > 0 \\ \coth t & \text{si } \theta_c < 0 \end{cases} \quad (2.33)$$

Ahora utilizamos la ecuación (2.1) para obtener la forma aparente de una cuádrica dada:

$$x'_T = \frac{\mathcal{C}(t)}{a \cos i} (a^2 \cos^2 i \pm b^2 \sin^2 i) + x_0 \cos i \quad (2.34)$$

$$y'_T = b\mathcal{S}(t) \left( 1 - \frac{b^2}{a^2} \tan^2 i \mathcal{T}^2(t) \right)^{1/2} \quad (2.35)$$

Se espera que la forma proyectada de una cuádrica dada sea otra cuádrica del mismo tipo, por lo que es posible escribir las ecuaciones (2.34) y (2.35) de la siguiente manera:

$$x'_T = a'\mathcal{C}(t') + x'_0 \quad (2.36)$$

$$y'_T = b'\mathcal{S}(t') \quad (2.37)$$

Donde:

$$x'_0 = x_0 \cos i \quad (2.38)$$

$$a' = (a^2 \cos^2 i \pm b^2 \sin^2 i)^{1/2} \quad (2.39)$$

$$b' = b \quad (2.40)$$

$$\mathcal{C}(t') = \frac{a'\mathcal{C}(t)}{a \cos i} \quad (2.41)$$

$$\mathcal{S}(t') = (1 - \mathcal{C}^2(t'))^{1/2} \quad (2.42)$$

Dos cantidades que nos van a ser de utilidad son los valores del parámetro  $t$  que denominaremos  $t_0$  y  $t_{90}$  y son tales que  $t'(t_0) = 0$  y  $t'(t_{90}) = \frac{\pi}{2}$  o bien  $y'_T(t_0) = 0$  y  $x'_T(t_{90}) = 0$ . De esta manera obtenemos las siguientes ecuaciones implícitas evaluando las ecuaciones (2.34) y (2.35) en  $t = t_{90}$  y  $t = t_0$  respectivamente:

$$\mathcal{T}(t_0) = \frac{a}{b} \cot i = \frac{\cot i}{|\tan \theta_c|} \quad (2.43)$$

$$\mathcal{C}(t_{90}) = -\frac{ax_0 \cos^2 i}{a^2 \cos^2 i \pm b^2 \sin^2 i} \quad (2.44)$$

Los radios característicos aparentes los podemos calcular a partir de las ecuaciones (2.36) y (2.37) como se hizo para los radios característicos en el sistema no primado:

$$R'_0 = \pm a' + x'_0 \quad (2.45)$$

$$R'_c = \frac{b'^2}{a'} \quad (2.46)$$

$$\tan \theta'_c = \pm \frac{b'}{a'} \quad (2.47)$$

$$R'_{90} = (2R'_c \mp \tan^2 \theta'_c)^{1/2} \quad (2.48)$$

Utilizando las ecuaciones (2.20), (2.39) y (2.40), utilizando la definición  $D' = D \cos i$  e introduciendo la función  $f(i; \theta_c) \equiv (1 \pm \tan^2 \theta_c \tan^2 i)^{1/2}$  obtenemos ecuaciones explícitas para los radios característicos en el sistema de referencia del plano del cielo en términos de la inclinación:

$$\frac{q'}{q} = 1 \pm \tilde{R}_c \cot^2 \theta_c (f(i; \theta_c) - 1) \quad (2.49)$$

$$\tilde{R}'_c = \frac{\tilde{R}_c}{\cos^2 i f(i; \theta_c) \frac{q'}{q}} \quad (2.50)$$

$$\tan \theta'_c = \frac{\tan \theta_c}{\cos i f(i; \theta_c)} \quad (2.51)$$

$$\tilde{R}'_{90} = \left( \frac{2\tilde{R}_c f(i; \theta_c) \mp \tan^2 \theta_c \frac{q'}{q}}{q'/q} \right)^{1/2} \frac{\sec i}{f(i; \theta_c)} \quad (2.52)$$

Cuando  $\tilde{R}'_{90}$  es medible, entonces es posible hacer diagramas de diagnóstico como el de la figura 2.8 para comparar con observaciones, independientemente de cualquier modelo de choques de proa.

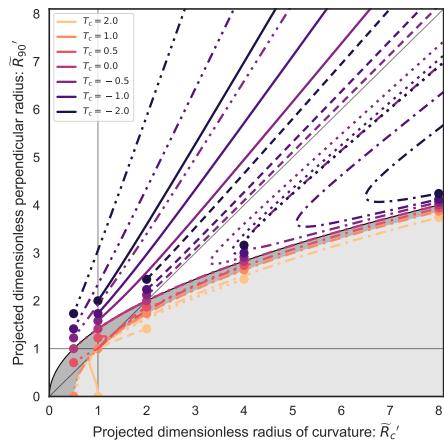


Figura 2.8: Diagrama de diagnóstico  $\tilde{R}'_{90}$  vs  $\tilde{R}'_c$  para las cuádricas de revolución. En la región sin sombrear se representan las superficies abiertas (hiperboloides,  $\theta_c < 0$ ), mientras que la región más oscura representa a elipsoides proláticos ( $0 < \theta_c < 45^\circ$ ) y la región poco sombreada a elipsoides obláticos ( $\theta_c > 45^\circ$ )



# Capítulo 3

## Interacción de dos vientos: Aproximación Hipersónica (Canto et al., 1996)

El problema de interacción de dos vientos es de gran interés en astrofísica, y ha sido estudiado en múltiples ocasiones, principalmente mediante simulaciones hidrodinámicas. Sin embargo, cuando se toman en cuenta diversos factores, incluidos conservación de masa, momento y momento angular, el problema puede resolverse de manera algebraica.

### 3.1. Cantidades conservadas en un flujo hipersónico de capa delgada

Consideramos dos flujos hipersónicos, no acelerados que forman una capa estacionaria delgada formada por dos choques radiativos separados por una discontinuidad de contacto. El sistema tiene geometría cilíndrica y los vientos no tienen velocidad azimutal. Bajo estos términos, describimos la posición de la capa delgada como  $R(\theta)$ , donde  $R$  es el radio de la capa medida a partir de la posición del origen del viento con menor momento y  $\theta$  es el ángulo polar. Si asumimos que el gas chocado está bien mezclado, entonces tiene una sola velocidad pos choque dada por:

$$\vec{v} = v_r \hat{r} + v_z \hat{z} \quad (3.1)$$

Donde el eje de simetría del sistema es paralelo a  $\hat{z}$ , y  $\hat{r}$  es el radio cilíndrico. Definimos  $\dot{M}(\theta)$ ,  $\vec{\Pi}(\theta)$  y  $\vec{J}(\theta)$  como la tasa de pérdida de masa, la tasa de momento y la tasa de momento angular, respectivamente, de la capa delgada integradas desde  $\theta = 0$  hasta  $\theta$ . Éstas se calculan de la siguiente manera:

$$\vec{\Pi}(\theta) = \dot{\Pi}_r(\theta) \hat{r} + \dot{\Pi}_z(\theta) \hat{z} = \dot{M} (v_r \hat{r} + v_z \hat{z}) \quad (3.2)$$

$$\vec{J}(\theta) = \vec{R}(\theta) \times \vec{\Pi}(\theta) \quad (3.3)$$

$$\dot{M}(\theta) = \dot{M}_w(\theta) + \dot{M}_{w1} \quad (3.4)$$

Donde  $\vec{R}(\theta) \equiv R(\theta) \sin \theta \hat{r} + R(\theta) \cos \theta \hat{z}$ . Resolviendo el producto cruz y tomando su magnitud encontramos que:

$$\dot{J}(\theta) = \dot{M}(\theta) R(\theta) v_\theta \quad (3.5)$$

$$\text{donde : } v_\theta = v_r \cos \theta - v_z \sin \theta \quad (3.6)$$

Por otro lado, al asumir estado estacionario, necesitamos que la tasa de pérdida de masa, la tasa de momento y la tasa de momento angular de la capa delgada sean iguales a aquellas inyectadas por los dos vientos. Entonces definimos estas cantidades como  $\dot{M}_w$ ,  $\dot{\Pi}_{wr}$ ,  $\dot{\Pi}_{wz}$  y  $\dot{J}_w$  para el viento con menor momento, y para el otro viento se utiliza la misma notación solo que utilizando el subíndice “w1”. De esta forma tenemos que:

$$\dot{\Pi}_r(\theta) \hat{r} + \dot{\Pi}_z(\theta) \hat{z} = [\dot{\Pi}_{wr}(\theta) + \dot{\Pi}_{wr1}(\theta)] \hat{r} + [\dot{\Pi}_{wz}(\theta) + \dot{\Pi}_{wz1}(\theta)] \hat{z} \quad (3.7)$$

$$\dot{J} = \dot{J}_w(\theta) + \dot{J}_{w1}(\theta) \quad (3.8)$$

$$\dot{M}(\theta) = \dot{M}_w(\theta) + \dot{M}_{w1}(\theta) \quad (3.9)$$

Combinando las ecuaciones (3.2), (3.5), (3.4), (3.7), (3.8) y (3.9) encontramos que:

$$\dot{M}(\theta) [v_r \hat{r} + v_z \hat{z}] = (\dot{\Pi}_{wr}(\theta) + \dot{\Pi}_{wr1}(\theta)) \hat{r} + (\dot{\Pi}_{wz}(\theta) + \dot{\Pi}_{wz1}(\theta)) \hat{z} \quad (3.10)$$

$$\dot{M}(\theta) v_\theta R(\theta) = \dot{J}_w(\theta) + \dot{(J)}_{w1}(\theta) \quad (3.11)$$

Y finalmente combinando con la ecuación (3.6) resolvemos para  $R(\theta)$ :

$$R(\theta) = \frac{\dot{J}_w(\theta) + \dot{(J)}_{w1}(\theta)}{(\dot{\Pi}_{wr}(\theta) + \dot{\Pi}_{wr1}(\theta)) \cos \theta - (\dot{\Pi}_{wz}(\theta) + \dot{\Pi}_{wz1}(\theta)) \sin \theta} \quad (3.12)$$

## 3.2. Problema de Interacción de Dos Vientos

Aplicamos el formalismo ya mencionado para la interacción de dos vientos radiales. El viento con menor momento se localiza en el origen, y su densidad a radio fijo varía con el ángulo polar como una ley de potencias (figura 2.1):

$$n(\theta) = n_0 \cos^k \theta \quad (3.13)$$

Donde el índice  $k$  indica el grado de anisotropía del viento “interno”. Algunos casos particularmente interesantes son el viento para un proplyd (Henney & Arthur, 1998), donde ( $k = 1/2$ ) y el caso “isotrópico” (Canto et al., 1996) donde  $k = 0$ . Por el momento restringimos al viento “externo” como isotrópico. El problema se muestra de manera esquemática en la figura 2.2.

Utilizando la ecuación (3.13) encontramos que la tasa de pérdida de masa está dada por:

$$\dot{M}_w = \int_0^\theta \int_0^{2\pi} \rho_w v_w \, d\theta \, d\phi = \frac{M_w^0}{2(k+1)} (1 - \cos^{k+1} \theta) \quad (3.14)$$

Donde  $v_w$  es la velocidad del viento intenso,  $\rho_w = n \bar{m}$  es su densidad,  $n$  se obtiene de la ecuación (3.13),  $M_w^0 = 4\pi r_0^2 v_w n_0 \bar{m}$  es la tasa de pérdida de masa integrada hasta  $\theta = \pi$  para el caso isotrópico,  $\bar{m}$  es la masa promedio de las partículas del viento y  $r_0$  es el radio del viento al cual

se alcanza la velocidad terminal  $v_w$ . Para un proplyd consideramos que dicho radio es el del frente de ionización.

Con esto, obtenemos las tasas de momento y momento angular:

$$\dot{\Pi}_{wz} = \int_0^\theta v_w \cos \theta \, d\dot{M}_w = \frac{v_w \dot{M}_w^0}{2(k+2)} (1 - \cos^{k+2} \theta) \quad (3.15)$$

$$\dot{\Pi}_{wr} = \int_0^\theta v_w \sin \theta \, d\dot{M}_w = \frac{1}{2} \dot{M}_w^0 v_w I_k(\theta) \quad (3.16)$$

$$\dot{J}_w = \int_0^\theta |\vec{R} \times \vec{v}_w| d\dot{M}_w = 0 \quad (3.17)$$

Donde la integral  $I_k(\theta) = \int_0^\theta \cos^k \theta \sin^2 \theta \, d\theta$  tiene solución analítica para  $k = 0$ , es una integral elíptica de segundo tipo cuando  $k = \frac{1}{2}$  y su solución es aun más compleja para el resto de los casos. Las tasa de momento angular para el viento interior es cero debido a que éste se mide respecto al origen, donde se localiza la fuente con menor momento. En este punto los vectores de posición y velocidad para un valor de  $\theta$  dado son paralelos.

Para el viento exterior consideramos dos casos principales: un viento esférico e isotrópico y un viento plano-paralelo de densidad y velocidad constante.

### 3.2.1. Interacción con un viento esférico isotrópico

En este caso tomamos como variable independiente al ángulo polar medido a partir de la posición de la fuente del viento externo, denotado por  $\theta_1$ . De esta forma las tasas de pérdida de masa, momento y momento angular quedan como sigue:

$$\dot{M}_{w1} = \frac{M_{w1}^0}{2} (1 - \cos \theta_1) \quad (3.18)$$

$$\dot{\Pi}_{wz1} = -\frac{v_{w1} \dot{M}_{w1}^0}{4} \sin^2 \theta_1 \quad (3.19)$$

$$\dot{\Pi}_{wr1} = \frac{v_{w1} \dot{M}_{w1}^0}{4} (\theta_1 - \sin \theta_1 \cos \theta_1) \quad (3.20)$$

$$\dot{J}_{w1} = \int_0^{\theta_1} R(\theta) v_{w1} \sin(\pi - \theta - \theta_1) d\dot{M}_{w1} \quad (3.21)$$

Utilizando la ley de los senos (ver figura 2.2), la ecuación (3.21) queda como sigue:

$$\dot{J}_{w1} = D v_{w1} \int_0^{\theta_1} \sin \theta_1 d\dot{M}_{w1} = \frac{v_{w1} \dot{M}_{w1}^0}{4} (\theta_1 - \sin \theta_1 \cos \theta_1) D \quad (3.22)$$

Por otro lado, de la figura 2.2, podemos deducir la siguiente relación geométrica entre  $R(\theta)$ ,  $\theta$  y  $\theta_1$ :

$$\frac{R(\theta)}{D} = \frac{\sin \theta_1}{\sin(\theta + \theta_1)} \quad (3.23)$$

Combinando las ecuaciones (3.12), (3.15) - (3.22) y (3.23) obtenemos una ecuación implícita que nos indica la dependencia de  $\theta_1$  con  $\theta$ :

$$\theta_1 \cot \theta_1 - 1 = 2\beta I_k(\theta) \cot \theta - \frac{2\beta}{k+2} (1 - \cos^{k+2} \theta) \quad (3.24)$$

Donde  $\beta = \frac{\dot{M}_w^0 v_w}{\dot{M}_{w1}^0 v_{w1}}$  es el cociente del momentos entre los vientos. Este parámetro, junto con el índice de anisotropía  $k$  son los que determinan la forma del choque de proa.

Los radios característicos en este caso se muestran a continuación. El procedimiento detallado se puede consultar en el apéndice B:

$$\frac{R_0}{D} = \frac{\beta^{1/2}}{1 + \beta^{1/2}} \quad (3.25)$$

$$\tilde{R}_{90} = \frac{(3\xi)^{1/2} (1 + \beta^{1/2})}{(1 + \frac{1}{5}\xi\beta)^{1/2} (1 - \xi\beta)} \quad (3.26)$$

$$\tilde{R}_c = |1 - 2\gamma|^{-1} \quad (3.27)$$

$$\text{Donde : } \gamma = \frac{C_{k\beta}}{1 + \beta^{1/2}} + \frac{1 + 2\beta^{1/2}}{6} \quad (3.28)$$

### 3.2.2. Interacción de un viento esférico isotrópico con un viento plano-paralelo

En este caso las tasas de pérdida de masa, de momento y momento angular del viento plano-paralelo con velocidad  $v_a$  y densidad uniforme  $\rho_a$  quedan como sigue:

$$\dot{M}_{w1} = \pi \rho_a v_a R^2 \sin^2 \theta \quad (3.29)$$

$$\dot{\Pi}_{wz1} = -\pi \rho_a v_a^2 R^2 \sin^2 \theta \quad (3.30)$$

$$\dot{\Pi}_{wr1} = 0 \quad (3.31)$$

$$\dot{J}_{w1} = \int_0^r r' v_a \sin \theta \, d\dot{M}_{w1} = \frac{2}{3} \pi \rho_a v_a^2 R^3 \sin^3 \theta \quad (3.32)$$

Sustituyendo estas ecuaciones en (3.12) junto con (3.14) - (3.17) para el caso isotrópico ( $k = 0$ ) obtenemos lo siguiente:

$$R = \frac{\frac{2}{3} \pi \rho_a v_a R^3 \sin^3 \theta}{\frac{\dot{M}_w^0 v_w}{4} (\theta - \sin \theta \cos \theta) \cos \theta - \left( \frac{\dot{M}_w^0 v_w}{4} \sin^2 \theta - \pi \rho_a v_a^2 R^2 \sin^2 \theta \right) \sin \theta} \quad (3.33)$$

La condición de equilibrio de presión en este caso nos lleva a la siguiente relación:

$$\frac{\dot{M}_w^0 v_w}{4\pi R_0^2} = \rho_a v_a^2 \quad (3.34)$$

Por tanto:

$$\tilde{R} = \frac{\frac{2}{3}\tilde{R}^3 \sin^3 \theta}{(\theta - \sin \theta \cos \theta) \cos \theta - (\sin^2 \theta - \tilde{R}^2 \sin^2 \theta) \sin \theta} \quad (3.35)$$

Resolviendo para  $\tilde{R}$  encontramos que:

$$\tilde{R} = [\csc^2 \theta (1 - \theta \cot \theta)]^{1/2} \quad (3.36)$$

### 3.2.3. Radios Característicos

En este caso los radios característicos se calculan de la siguiente manera:  $R_0$  se obtiene directamente de la ecuación (3.34) como

$$R_0 = \left( \frac{\dot{M}_w^0 v_w}{4\pi \rho_a v_a^2} \right)^{1/2} \quad (3.37)$$

$R_{90}$  se calcula evaluando la ecuación (3.36) en  $\theta = \frac{\pi}{2}$ :

$$\tilde{R}_{90} = \sqrt{3} \quad (3.38)$$

Por último, el radio de curvatura se obtiene haciendo una expansión de la ecuación (3.36) y encontrando el coeficiente de segundo orden. El procedimiento detallado se muestra en el apéndice B.4:

$$\tilde{R}_c = \frac{5}{3} \quad (3.39)$$



## Capítulo 4

# Obtención de la Forma Aparente de los Choques en el Modelo de Aproximación Hipersónica

La obtención de la forma aparente de los Radios Característicos de los choques de Proa no se obtiene de manera analítica de forma sencilla, por lo que recurrimos a hacer aproximaciones a la forma de un choque dado, utilizando las cuádricas de revolución. Éstas cuádricas dan un buen ajuste pero no son capaces de reproducir la forma completa de un choque de proa dado, por lo que recurrimos al uso de dos cuádricas que en conjunto ajustan a la forma completa del choque: una para la “cabeza” del choque, y otro para la cola. Y como ya vimos en la sección , los radios característicos aparentes se pueden obtener de manera sencilla para estas superficies.

### 4.1. Ajustes a la cabeza

Utilizando las ecuación (2.28) de la §2.7.1 y las ecuaciones (3.27) y (3.26) de la §3.2 podemos calcular el parámetro  $\theta_c$  que nos indicará el tipo de cónica que ajusta mejor a cada solución del modelo de capa delgada en

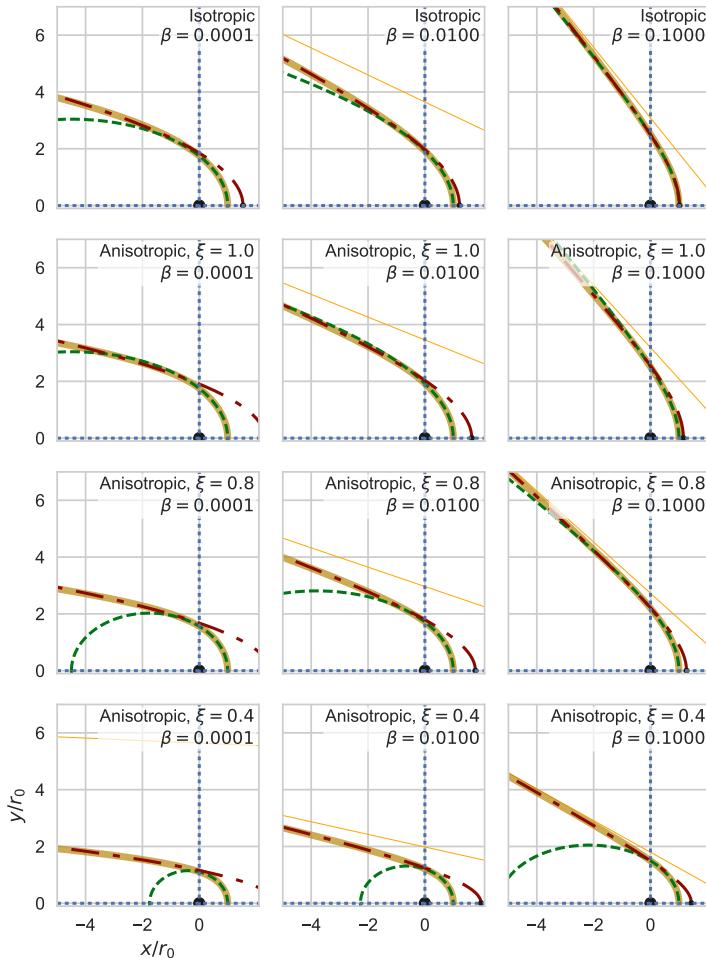


Figura 4.1: Ajuste de dos cuádricas a las soluciones de capa delgada. La línea gruesa continua representa la forma de un choque bajo la aproximación de capa delgada (capítulo 3) para los parámetros enlistados en cada pánel. La línea verde es el ajuste obtenido para la cabeza, mientras que la roja corresponde al ajuste para la cola.

función de los parámetros  $\beta$  y  $\xi$ :

$$\tan \theta_c = \pm \left| \frac{3\xi(1+\beta^{1/2})^2}{(1-\xi\beta)^2(1+\frac{1}{5}\xi\beta)} - \frac{2}{|1-2\gamma|} \right|^{1/2} \quad (4.1)$$

En la figura se ilustra la dependencia de  $\theta_c$  con los parámetros  $\beta$  y  $\xi$ , así como al tipo de cónica que ajusta mejor tanto la cabeza como la cola de cada solución a la forma de los choques de proa.

## 4.2. Ajustes a la cola

En el caso general del problema de capa delgada, el comportamiento de la cola tiende a ser hiperbólico, dado que el ángulo polar  $\theta$  tiende a un valor asintótico denominado como  $\theta_\infty$ . Este ángulo es tal que  $\theta_\infty + \theta_{1\infty} = \pi$  y se calcula resolviendo la siguiente ecuación explícita:

El ajuste a la hipérbola se logra ajustando tres parámetros fundamentales:  $\theta_c = \theta_\infty - \pi$ , la distancia entre la hipérbola y el centro de ésta a lo largo del eje focal  $a_t$  y la distancia entre el origen y el centro de la hipérbola  $x_{0,t}$ .  $a_t$  y  $x_{0,t}$  se obtienen inicialmente con un ajuste numérico para una malla de valores de  $\beta$  y  $\xi$ . Posteriormente hacemos tres ajustes anidados en tres niveles para determinar de manera analítica los parámetros de la hipérbola en función de  $\beta$  y  $\xi$ . A continuación mostramos las funciones y los parámetros que mejor ajustan a la cola para cada solución a la forma de los choques de proa:

$$x_{0,t} = 0,7\beta^{-0,55} \left[ C_3 (\log_{10} \beta)^3 + C_2 (\log_{10} \beta)^2 + C_1 (\log_{10} \beta) + C_0 \right] \quad (4.2)$$

$$(x_{0,t} - a_t) = D_2 (\log_{10} \beta)^2 + D_1 (\log_{10} \beta) + D_0 \quad (4.3)$$

Donde:

Cuadro 4.1: Coeficientes del ajuste hiperbólico a la cola de los choques de Proa

Ecuación (4.2)	Ecuación (4.4) .....
$C_0^{\text{iso}} = +1,3195$	$c_{0,0} = +2,0758 \quad c_{1,0} = -0,2309 \quad c_{2,0} = -0,2532$
$C_1^{\text{iso}} = +0,4229$	$c_{0,1} = +0,9571 \quad c_{1,1} = -0,1530 \quad c_{2,1} = -0,2487$
$C_2^{\text{iso}} = +0,1092$	$c_{0,2} = +0,2528 \quad c_{1,2} = -0,0360 \quad c_{2,2} = -0,0794$
$C_3^{\text{iso}} = +0,0051$	$c_{0,3} = +0,0171 \quad c_{1,3} = -0,0010 \quad c_{2,3} = -0,0095$
Ecuación (4.3)	Ecuación (4.5) .....
$D_0^{\text{iso}} = +0,7962$	$d_{0,0} = +0,8516 \quad d_{1,0} = -0,0907 \quad d_{2,0} = -0,2002$
$D_1^{\text{iso}} = -0,2363$	$d_{0,1} = -0,7620 \quad d_{1,1} = +0,1411 \quad d_{2,1} = -0,0295$
$D_2^{\text{iso}} = -0,0126$	$d_{0,2} = -0,0683 \quad d_{1,2} = +0,0390 \quad d_{2,2} = -0,0236$

$$C_k = c_{2,k}\xi^2 + c_{1,k}\xi + c_{0,k} \text{ para } k = [0, 1, 2, 3] \quad (4.4)$$

$$D_k = d_{2,k}\xi^2 + d_{1,k}\xi + d_{0,k} \text{ para } k = [0, 1, 2] \quad (4.5)$$

Los coeficientes de los ajustes para la cola se muestran en la tabla 4.1: En el apéndice se muestran los detalles de cómo se obtuvieron los coeficientes de la tabla 4.1.

### 4.2.1. Ajustes a la cabeza y la cola en el caso de la interacción con un viento plano-paralelo

En este caso el ajuste a la cabeza es muy simple, utilizando los resultados para sus radios característicos (ecuaciones (3.38) y (3.39)) encontramos que el ajuste a la cabeza corresponde con una elipse tal que  $\tan \theta_c = \frac{1}{3}$ .

Para el ajuste a la cola encontramos que ninguna de las cuádricas da una buena aproximación a la forma de la cola, pero contamos con la forma explícita del choque de proa (ecuación (3.36)) así que ningún ajuste fue necesario.

### 4.3. Proyección en el plano del cielo para el modelo de capa delgada

La proyección en el plano del cielo se realizó utilizando las ecuaciones (2.50), (2.51) y (2.52) para los ajuste de la cabeza y de la cola, respectivamente.

En la figura 4.2 se muestra el residuo del ajuste de diferentes soluciones contra el ángulo polar  $\theta$ . Se puede apreciar que para cierto valor de  $\theta$ , que podemos denominar como  $\theta_{tran}$ , ocurre la transición donde el mejor ajuste deja de ser el de la cabeza y el ajuste de la cola empieza a ser más efectivo. Debido a esto, tenemos que tener cuidado qué ajuste elegir para calcular los radios característicos aparentes. Si  $\theta_0 < \theta_{tran}$  entonces podemos utilizar el ajuste a la cabeza para calcular el radio de curvatura aparente, en caso contrario se tiene que utilizar el ajuste a la cola, lo que ocurre a inclinaciones altas. Para calcular  $R'_{90}$  hay que vigilar si  $\theta_{90}$  es mayor o menor a  $\theta_{tran}$  para decidir qué ajuste utilizar. En este último caso será el de la cola para la mayoría de las inclinaciones.

Utilizando las ecuaciones (2.23), (2.43) y (2.44) calculamos los valores para  $\theta_0$  y  $\theta_{90}$  para las cuádricas:

$$\cot \theta_0 = \cot \theta_c \cot i + \frac{x_0}{b} \sqrt{\cot^2 \theta_c \cot^2 i \pm 1} \quad (4.6)$$

Utilizando las ecuaciones (2.20), (2.27) y (2.28) encontramos que:

$$\frac{x_0}{b} = \frac{|\tan \theta_c|}{\tilde{R}_c} - |\cot \theta_c| \quad (4.7)$$

Por otro lado:

$$\mathcal{T}(\theta_{90}) = f_2(i; \theta_c) \left[ \frac{x_0}{b} - \frac{x_0}{a} \frac{|\cot \theta_c|}{f^2(i; \theta_c)} \right] \quad (4.8)$$

Donde  $f(i; \theta_c)$  fue definido en la sección 2.7 y:

$$f_2(i; \theta_c) \equiv \left( 1 \mp \frac{x_0^2}{a^2 f^4(i; \theta_c)} \right)^{-1/2} \quad (4.9)$$

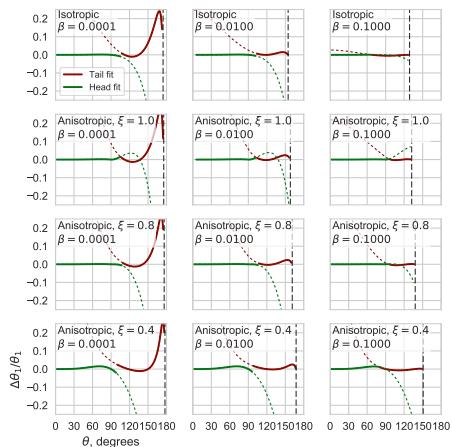


Figura 4.2: Residuo del ajuste de las cónicas a la forma del choque. La línea verde muestra el residuo del ajuste a la cabeza y la roja el ajuste a la cola. En todos los casos existe un valor de  $\theta_{tran}$  donde para  $\theta < \theta_{tran}$  el mejor ajuste es el de la cabeza y para  $\theta \geq \theta_{tran}$  el mejor ajuste es el de la cola

# Capítulo 5

## Resultados obtenidos para los prolyds “clásicos”

Probamos nuestro modelo descrito en los capítulos anteriores en una muestra de prolyds pertenecientes a la Nebulosa de Orión (ONC) que presentan un choque de proa. En la figura se muestran los prolyds que pertenecen a nuestra muestra.

En todos los casos no fue posible medir el radio característico  $R_{90}$  debido a que el brillo de la cáscara decae con el ángulo polar  $\theta$  y no es detectable para ángulos del orden de  $60^\circ$ . Sin embargo, a continuación mostraremos la metodología para obtener la inclinación más probable de cada choque, así como los parámetros del modelo de cada uno de éstos que nos indican su forma intrínseca.

### 5.1. Metodología para la medición de la forma aparente.

Se utilizaron imágenes en el filtro de [OIII] de la cámara WPC2 del Telescopio Espacial Hubble (HST). Se utilizaron las herramientas del programa DS9 para análisis de imágenes astronómicas para trazar la posición de  $\theta^1$  Ori C y de cada uno de los prolyds de la muestra. La posición y la forma de los choques de proa fue trazada con una serie de marcas a lo largo del choque. Las coordenadas de las marcas fueron guardadas

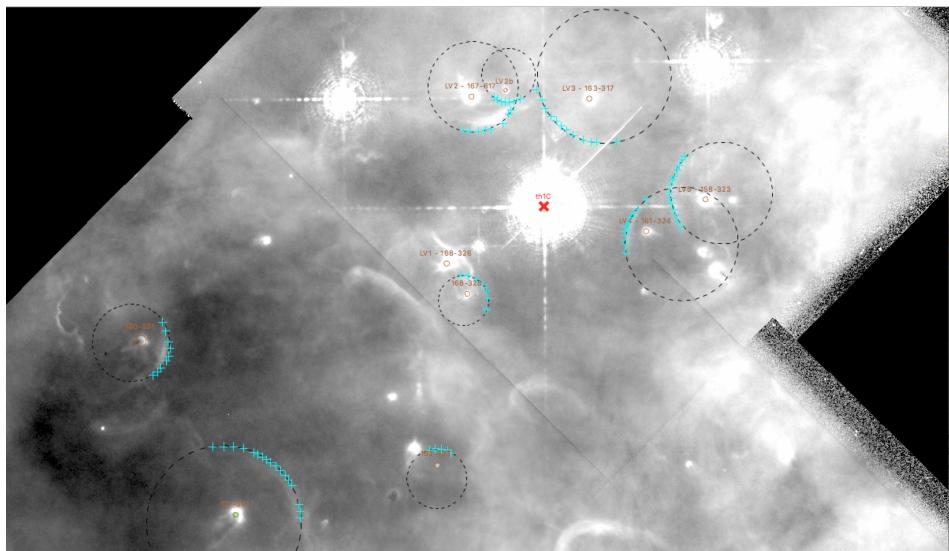


Figura 5.1: Imagen de la parte central de la Nebulosa de Orión donde se ubican los proplyds de nuestra muestra. Las cruces color cyan corresponden a las mediciones de la forma aparente para cada choque de proa. Los círculos amarillos marcan la posición de cada proplyd y la “x” roja corresponde a la posición de la estrella ionizante  $\theta^1$  Ori C. Los círculos negros ilustran de manera esquemática el radio de curvatura de cada choque.

en un archivo y luego procesadas para tener las coordenadas del choque en el sistema de referencia del prolyd (Figura 5.1). El radio de curvatura aparente se obtiene haciendo un ajuste de mínimos cuadrados de la forma de un círculo de las mediciones obtenidas.  $R_0$  se obtiene como la distancia mínima entre el prolyd y el ajuste circular dentro del rango de las coordenadas de las mediciones.

### 5.1.1. Medición de incertidumbres

Para saber qué tan confiables son las coordenadas de las mediciones, se realizó el procedimiento siguiente: Del total de mediciones realizadas para cada prolyd, se crearon varias sub-muestras donde se utilizamos aproximadamente las dos terceras partes de las mediciones, pero dejando un mínimo de cuatro puntos, y se procedió a calcular los radios característicos para cada submuestra, y comprobar qué tanto se desvían estas mediciones de la original. En la figura 5.2 se muestran ejemplos de dichas sub-muestras para algunos prolyds.

## 5.2. Resultados

Los radios característicos obtenidos para la muestra original y para las submuestras se muestran en la figura 5.3. En cada pánel se utiliza un valor fijo para el parámetro de anisotropía  $\xi$ . Las mediciones para el prolyd LV4 son consistentes con un viento isotrópico, mientras que para los prolyds LV2b, 169-338, 180-331, 168-328, 177-341, LV3 y LV5 sus mediciones son consistentes para vientos con un grado de anisotropía bajo ( $\xi \gtrsim 0,8$ ). Finalmente para LV2 sus mediciones son consistentes con un viento con un grado de anisotropía alto ( $\xi \lesssim 0,4$ ).

Con base a este análisis, se resume en la tabla 5.1 los ajustes a los parámetros de los prolyds: inclinación, distancia a  $\theta^1$  Ori C intrínseca  $D$  y radio del choque en el eje de simetría  $R_0/D$ .

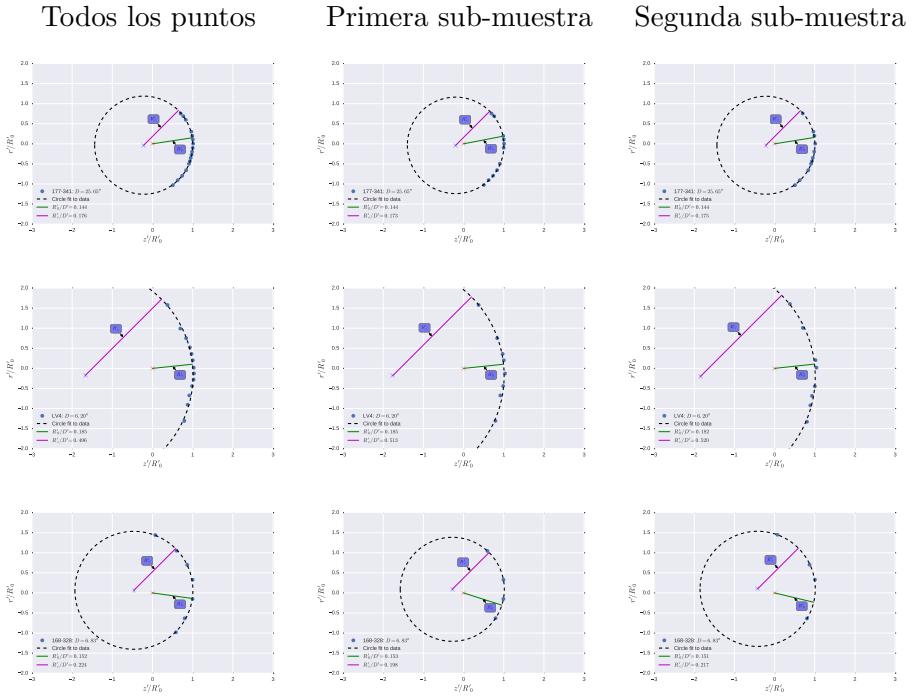


Figura 5.2: Ejemplos de incertidumbres sistemáticas en los ajustes circulares a la forma de los choques para tres fuentes (desde la línea superior hasta la inferior): 177-341, LV4 y 168-328. La columna de la izquierda muestra el ajuste a todos los puntos identificados en el borde de la cáscara, donde el número y el espaciamiento de los puntos es una medida subjetiva de nuestra confianza al trazar el borde de cada cáscara. Las dos columnas restantes muestran ajustes a sub-muestras seleccionadas aleatoriamente que contienen 2/3 partes de los puntos de la muestra original para cada cáscara.

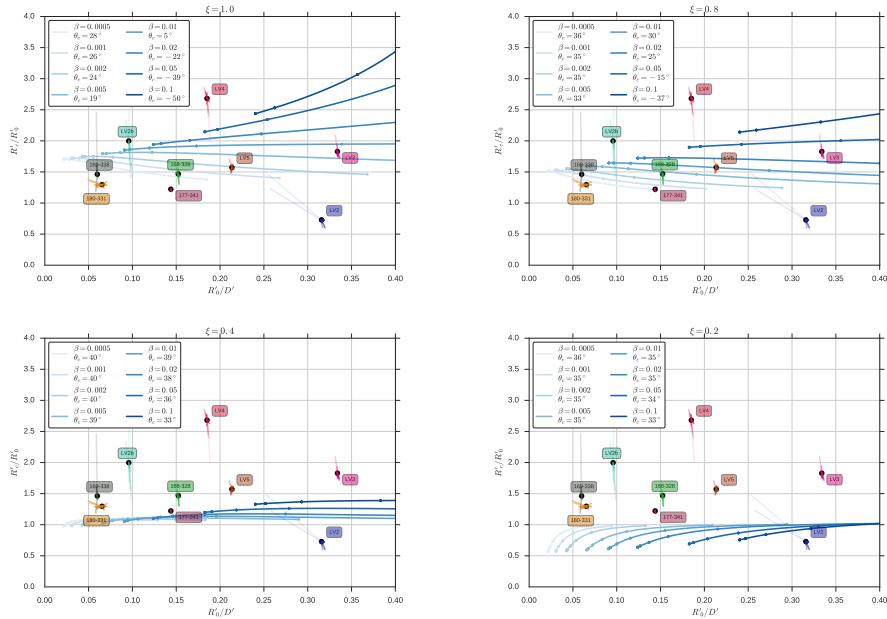


Figura 5.3: Mediciones de los radios característicos de los prolyds  $R_c$  y  $R_0$ . Las curvas representan el ajuste de una cuádratica para un choque de proa con un cociente de momentos  $\beta$  fijo, además se muestra su respectivo valor de  $\theta_c$ . Los puntos a lo largo de cada curva representan una separación en inclinación de  $15^\circ$ . Las mediciones para cada prolyd vienen acompañadas con el set de sub-muestras representadas como líneas radiales de colores. En cada gráfica se utiliza un valor diferente para el parámetro de anisotropía  $\xi$ , iniciando con un viento isotrópico ( $\xi = 1$ ), hasta el viento con mayor anisotropía ( $\xi = 0,2$ ).

Cuadro 5.1: Ajuste a los parámetros de los arcos para los choques de proa de los proplyds

OW (1)	Nombre (2)	$D'$ (3)	$R'_0/D'$ (4)	Obsetvado $(R'_c/R'_0)_{\text{shape}}$ (5)	$(R'_c/R'_0)_{\text{flux}}$ (6)	$\beta$ (7)
168-328		6.8	$0,152 \pm 0,001$	$1,42 \pm 0,09$	$1,45 \pm 0,05$	$0,018 \pm 0,003$
169-338		16.4	$0,059 \pm 0,001$	$1,76 \pm 0,48$	$1,50 \pm 0,05$	$0,002 \pm 0,001$
177-341	HST1	25.6	$0,144 \pm 0,001$	$1,21 \pm 0,02$	$1,25 \pm 0,02$	$0,018 \pm 0,003$
180-331		25.1	$0,061 \pm 0,007$	$1,30 \pm 0,05$	$1,27 \pm 0,05$	$0,003 \pm 0,001$
167-317	LV2	7.8	$0,305 \pm 0,025$	$0,81 \pm 0,28$	$1,50 \pm 0,1$	$0,085 \pm 0,015$
	LV2b	7.2	$0,097 \pm 0,002$	$2,00 \pm 0,62$	$1,63 \pm 0,08$	$0,008 \pm 0,003$
163-317	LV3	6.9	$0,334 \pm 0,002$	$1,81 \pm 0,12$	$1,85 \pm 0,15$	$0,075 \pm 0,025$
161-324	LV4	6.2	$0,186 \pm 0,002$	$2,59 \pm 0,24$	$2,05 \pm 0,07$	$0,040 \pm 0,014$
168-323	LV5	9.6	$0,213 \pm 0,002$	$1,57 \pm 0,07$	$1,60 \pm 0,07$	$0,055 \pm 0,005$

Notes – Col. (1): ID de la fuente (O'Dell & Wen, 1994). Col. (2): Nombre alternativo de la fuente. Col. (3): Distancia proyectada desde  $\theta^1$  Ori C, segundos de arco. Col. (4): Radio exterior aparente a lo largo del eje, normalizado con la distancia proyectada, con una incertidumbre de  $\pm 1\sigma$ , determinado con el ajuste circular descrito en § 5.1. Col. (5): Radio de curvatura aparente, normalizado con el radio a lo largo del eje, con incertidumbres de  $\pm 1\sigma$ , determinado con el ajuste circular descrito en § 5.1. Col. (6): Igual que Col. (5) pero aplicando el criterio adicional de que el brillo superficial del proplyd obtenido debe coincidir con la predicción teórica. Col. (7): Cociente de momentos entre el viento del proplyd y la estrella O (ver capítulo 3). Col. (8): Parámetro de anisotropía del viento del proplyd. Col. (9): Inclinación respecto al plano del cielo, en grados. Col. (10): Distancia real desde  $\theta^1$  Ori C, parsecs. Col. (11): Radio real de la cáscara a lo largo del eje, normalizado con distancia.

## Capítulo 6

# Resultados obtenidos para otros objetos

This is chapter 6

## CAPÍTULO 6. RESULTADOS . . .

---

# Capítulo 7

# Conclusiones

## CAPÍTULO 7. CONCLUSIONES

---

# Bibliografía

Ballesteros-Paredes J., Hartmann L., Vázquez-Semadeni E., 1999, , 527, 285

Ballesteros-Paredes J., Hartmann L. W., Vázquez-Semadeni E., Heitsch F., Zamora-Avilés M. A., 2011, , 411, 65

Canto J., Raga A. C., Wilkin F. P., 1996, , 469, 729

Churchwell E., Felli M., Wood D. O. S., Massi M., 1987, , 321, 516

Gordon M. A., Churchwell E., 1970, , 9, 307

Hartmann L., Burkert A., 2007, , 654, 988

Hennebelle P., Pérault M., 1999, , 351, 309

Henney W. J., Arthur S. J., 1998, , 116, 322

Johnstone D., Hollenbach D., Bally J., 1998, , 499, 758

Laques P., Vidal J. L., 1979, , 73, 97

Menten K. M., Reid M. J., Forbrich J., Brunthaler A., 2007, , 474, 515

O'Dell C. R., Wen Z., 1994, , 436, 194

O'dell C. R., Wen Z., Hu X., 1993, , 410, 696

Stahler S. W., Palla F., 2004, The Formation of Stars. Wiley-VCH

Yusef-Zadeh F., 1990, , 361, L19



## Apéndice A

# Derivación Matemática del Radio de Curvatura

Tomamos una curva genérica  $\vec{\sigma}(t) \equiv x(t)\hat{x} + y(t)\hat{y}$  continua y suave para todo valor de  $t$  real y finito. Sus derivadas se denotan como  $\vec{\sigma}'(t)$  y  $\vec{\sigma}''(t)$ . Su longitud de arco está dada por:

$$s(t) = \int_0^t \|\vec{\sigma}'(t')\| dt' \quad (\text{A.1})$$

Reparametrizamos la trayectoria  $\vec{\sigma}(t)$  con la longitud de arco y diferenciando respecto a ésta obtenemos lo siguiente:

$$\frac{d\vec{\sigma}}{ds} = \frac{\vec{\sigma}'(t)}{\|\vec{\sigma}'(t)\|} \equiv \vec{T}(s) \quad (\text{A.2})$$

Esta última expresión se logró diferenciando la ecuación (A.1) y aplicando la regla de la cadena al diferenciar  $\frac{d\vec{\sigma}}{ds}$ .  $\vec{T}(s)$  es el vector tangente a la trayectoria  $\vec{\sigma}(s)$ .

La curvatura  $\kappa$  se define como la magnitud de la derivada del vector tangente respecto a la longitud de arco, o bien, como la segunda derivada de la trayectoria  $\vec{\sigma}(s)$ :

$$\kappa \equiv \|\vec{T}'(s)\| = \|\vec{\sigma}''(s)\| \quad (\text{A.3})$$

El radio de curvatura se define como el radio de un círculo que ajusta localmente a la trayectoria, y se calcula como el inverso multiplicativo de la curvatura:

$$R_c = \frac{1}{\kappa} \quad (\text{A.4})$$

Aplicando la regla de la cadena encontramos la siguiente expresión para la curvatura:

$$\kappa = \left\| \frac{\vec{\sigma}''(t)}{\|\vec{\sigma}'(t)\|^2} - \frac{\vec{\sigma}'(t)}{\|\vec{\sigma}'(t)\|^4} \vec{\sigma}'(t) \cdot \vec{\sigma}''(t) \right\| \quad (\text{A.5})$$

Escribimos las componentes de las derivadas de  $\vec{\sigma}(t)$  para calcular los factores que intervienen en la ecuación (A.5):

$$\vec{\sigma}'(t) = \dot{x}\hat{x} + \dot{y}\hat{y} \quad (\text{A.6})$$

$$\vec{\sigma}''(t) = \ddot{x}\hat{x} + \ddot{y}\hat{y} \quad (\text{A.7})$$

$$\implies \vec{\sigma}'(t) \cdot \vec{\sigma}''(t) = \dot{x}\ddot{x} + \dot{y}\ddot{y} \quad (\text{A.8})$$

De esta forma, calculamos la curvatura como sigue:

$$\kappa = \left[ \left( \frac{\ddot{x}}{\|\vec{\sigma}'\|^2} - \frac{\dot{x}(\dot{x}\ddot{x} + \dot{y}\ddot{y})}{\|\vec{\sigma}'\|^4} \right)^2 + \left( \frac{\ddot{y}}{\|\vec{\sigma}'\|^2} - \frac{\dot{y}(\dot{x}\ddot{x} + \dot{y}\ddot{y})}{\|\vec{\sigma}'\|^4} \right)^2 \right]^{1/2} \quad (\text{A.9})$$

$$\begin{aligned} \kappa &= \|\vec{\sigma}'\|^{-2} \left[ (\ddot{x}(\dot{x}^2 + \dot{y}^2) - \dot{x}(\dot{x}\ddot{x} + \dot{y}\ddot{y}))^2 \right. \\ &\quad \left. + (\ddot{y}(\dot{x}^2 + \dot{y}^2) - \dot{y}(\dot{x}\ddot{x} + \dot{y}\ddot{y}))^2 \right]^{1/2} \end{aligned} \quad (\text{A.10})$$

$$\kappa = \|\vec{\sigma}'\|^{-2} \left[ (\ddot{x}\dot{y}^2 - \dot{x}\dot{y}\ddot{y})^2 + (\ddot{y}\dot{x}^2 - \dot{y}\dot{x}\ddot{x})^2 \right]^{1/2} \quad (\text{A.11})$$

$$\kappa = \|\vec{\sigma}'\|^{-3} [\ddot{x}^2\dot{y}^2 + \dot{y}^2\dot{x}^2 - 2\ddot{x}\dot{y}\dot{x}\dot{y}]^{1/2} \quad (\text{A.12})$$

$$\kappa = \frac{|\ddot{x}\dot{y} - \dot{x}\ddot{y}|}{(\dot{x}^2 + \dot{y}^2)^{3/2}} \quad (\text{A.13})$$

Utilizando coordenadas polares, la expresión para el radio de curvatura queda como sigue:

$$R_c = R \frac{(1 + \omega^2)^{3/2}}{|1 + \omega^2 - \dot{\omega}|} \quad (\text{A.14})$$

Donde  $\omega \equiv \frac{1}{R} \frac{dR}{d\theta}$  (ver sección 2.6)

## A.1. Radio de curvatura para un polinomio de grado $2n$

Dado que es de nuestro interés calcular el radio de curvatura del choque en el eje de simetría ( $\theta = 0$ ), debido a que es analíticamente más fácil de calcular, y a su vez es medible observacionalmente ajustando un círculo a una serie de mediciones de la posición del choque (sección ). Entonces, hacemos una aproximación para la función  $R(\theta)$  que nos da la forma del choque mediante un polinomio par de grado  $2n$  de la siguiente forma:

$$R(\theta) \simeq R_0 (1 + \gamma\theta^2 + \Gamma\theta^4 + \cdots + \Gamma_n\theta^n) \quad (\text{A.15})$$

De esta forma calculamos las derivadas de  $R(\theta)$ :

$$\dot{R}(\theta) \simeq R_0\theta (2\gamma + 4\Gamma\theta^2 + \cdots + n\Gamma_n\theta^{n-2}) \quad (\text{A.16})$$

$$\ddot{R}(\theta) \simeq R_0 (2\gamma + 12\Gamma\theta^2 + \cdots + n(n-1)\Gamma_n\theta^{n-2}) \quad (\text{A.17})$$

Evaluando en  $\theta = 0$  obtenemos los siguientes:

$$R(0) = R_0 \quad (\text{A.18})$$

$$\dot{R}(0) = 0 \quad (\text{A.19})$$

$$\ddot{R}(0) = 2\gamma R_0 \quad (\text{A.20})$$

$$\implies \omega(0) = 0 \quad (\text{A.21})$$

$$\dot{\omega}(0) \equiv \frac{\ddot{R}(0)}{R(0)} - \left( \frac{\dot{R}(0)}{R(0)} \right)^2 = 2\gamma \quad (\text{A.22})$$

Sustituyendo en la ecuación (A.14) obtenemos el radio de curvatura en  $\theta = 0$ :

$$R_c = \frac{R_0}{|1 - 2\gamma|} \quad (\text{A.23})$$

Por esto en el apéndice B para encontrar el radio de curvatura nos enfocamos en encontrar el coeficiente de segundo orden en la expansión en serie de  $R(\theta)$ .

## Apéndice B

# Derivación paso a paso de los Radios Característicos en la aproximación hipersónica del modelo de interacción de dos vientos

### B.1. $R_0$

Podemos determinar el radio característico  $R_0$  a partir de la condición de que el choque es estacionario. En este caso, los momentos de los dos vientos son iguales en la posición del choque. Por tanto, utilizando la ecuación de momento en  $\theta = 0$  obtenemos lo siguiente:

$$\rho_{ws}v_w^2 = \rho_{ws1}v_{w1}^2 \quad (\text{B.1})$$

Donde  $\rho_{ws}$  y  $\rho_{ws1}$  son las densidades de los dos vientos en la posición del choque. Por otro lado, como la tasa de pérdida de masa es constante para un ángulo  $\theta$  dado, entonces podemos hacer lo siguiente:

$$\frac{\dot{M}_w^0}{4\pi R^2 v_w} v_w^2 = \frac{\dot{M}_{w1}^0}{4\pi (D-R)^2 v_{w1}} v_{w1}^2 \quad (\text{B.2})$$

En esta última ecuación hemos sustituído  $\dot{M}_w^0 = 4\pi R_0^2 v_w \rho_{ws}$  y  $\dot{M}_{w1}^0 = 4\pi (D-R_0)^2 v_{w1} \rho_{ws1}$  aprovechando que dichas cantidades deben conservarse.

Reduciendo la ecuación (B.2) encontramos una expresión para  $R_0$ :

$$\frac{R_0}{D} = \frac{\beta^{1/2}}{1 + \beta^{1/2}} \quad (\text{B.3})$$

## B.2. $\tilde{R}_{90}$

$R_{90}$  puede determinarse a partir de evaluar las ecuaciones (3.23) y (3.24) en  $\theta = \frac{\pi}{2}$  como sigue:

$$\frac{R_{90}}{D} = \tan \theta_{1,90} \quad (\text{B.4})$$

$$\theta_{1,90} \cot \theta_{1,90} - 1 = -\frac{2\beta}{k+2} \quad (\text{B.5})$$

Donde  $\theta_{1,90} = \theta_1(\frac{\pi}{2})$ . Introducimos un nuevo parámetro  $\xi \equiv \frac{2}{k+2}$  de modo que combinando las dos ecuaciones anteriores obtenemos lo siguiente:

$$\frac{R_{90}}{D} = \tan \theta_{1,90} = \frac{\theta_{1,90}}{1 - \xi \beta} \quad (\text{B.6})$$

Hacemos una expansión en serie para el lado izquierdo de la ecuación y reducimos:

$$\theta_{1,90}^2 \left( 1 + \frac{\theta_{1,90}^2}{15} \right) \simeq 3\beta\xi \quad (\text{B.7})$$

Tomamos la solución a primer orden  $\theta_{1,90} = 3\beta\xi$ , sustituímos este valor en el término correctivo y resolvemos para  $\theta_{1,90}$ :

$$\theta_{1,90} = \left( \frac{3\xi\beta}{1 + \frac{1}{5}\xi\beta} \right)^{1/2} \quad (\text{B.8})$$

Finalmente sustituímos (B.8) en (B.6) para obtener  $R_{90}$ :

$$\frac{R_{90}}{D} = \frac{(3\xi\beta)^{1/2}}{\left(1 + \frac{1}{5}\xi\beta\right)^{1/2}(1 - \xi\beta)} \quad (\text{B.9})$$

$$\tilde{R}_{90} = \frac{(3\xi)^{1/2}(1 + \beta^{1/2})}{\left(1 + \frac{1}{5}\xi\beta\right)^{1/2}(1 - \xi\beta)} \quad (\text{B.10})$$

### B.3. Radio de Curvatura en el caso de la interacción de dos vientos esféricos.

Siendo que el choque de proa en nuestro modelo genérico es simétrico, entonces la forma  $R(\theta)$  debe ser una función par, por tanto podemos hacer la siguiente expansión en serie:

$$R(\theta) \simeq R_0 (1 + \gamma\theta^2 + \Gamma\theta^4 + \cdots + \cdots) \quad (\text{B.11})$$

De esta forma el radio de curvatura para  $\theta = 0$  queda como sigue (ver apéndice A):

$$\tilde{R}_c = (1 - 2\gamma)^{-1} \quad (\text{B.12})$$

Para encontrar el coeficiente de segundo orden  $\gamma$  hacemos una expansión en serie de las ecuaciones (3.24) y (3.23) para ángulos pequeños, mostrando a continuación la expansión de cada término para al final hacer la reducción algebraica:

$$\theta_1 \cot \theta_1 - 1 \simeq -\frac{\theta_1^2}{3} \left( 1 + \frac{\theta_1^2}{15} \right) \quad (\text{B.13})$$

$$\cos^k \theta \simeq \left( 1 - \frac{\theta^2}{2} \right)^k \simeq \left( 1 - \frac{k\theta^2}{2} \right) \quad (\text{B.14})$$

$$\sin^2 \theta \simeq \theta^2 \left( 1 - \frac{\theta^2}{6} \right)^2 \simeq \theta^2 \left( 1 - \frac{\theta^2}{3} \right) \quad (\text{B.15})$$

$$\implies \cos^k \theta \sin^2 \theta \simeq \theta^2 \left[ 1 - \left( \frac{1}{3} + \frac{k}{2} \right) \theta^2 \right] \quad (\text{B.16})$$

$$\implies I_k(\theta) \simeq \frac{\theta^3}{3} \left[ 1 - \frac{1}{10} (3k+2) \theta^2 \right] \quad (\text{B.17})$$

$$\cot \theta \simeq \theta^{-1} \left( 1 - \frac{\theta^2}{3} \right) \quad (\text{B.18})$$

$$\implies 2\beta I_k(\theta) \cot \theta \simeq \frac{2}{3} \beta \theta^2 \left[ 1 - \frac{1}{30} (9k+16) \theta^2 \right] \quad (\text{B.19})$$

$$-\frac{2\beta}{k+2} \left( 1 - \cos^{k+2} \theta \right) \simeq \beta \theta^2 \left[ 1 - \frac{1}{12} (3k+4) \right] \quad (\text{B.20})$$

Sustituyendo las expansiones anteriores en (3.24) obtenemos lo siguiente:

$$\theta_1^2 \left( 1 + \frac{\theta_1^2}{15} \right) \simeq \beta \theta^2 \left[ 1 + \frac{1}{60} (4 - 9k) \theta^2 \right] \quad (\text{B.21})$$

La solución a primer orden (ignorando el término cuártico) es  $\theta_1^2 \simeq \beta \theta^2$ . Sustituímos esta solución en el término correctivo y resolvemos para  $\theta_1^2$ :

$$\theta_1^2 \simeq \beta\theta^2 \left[ 1 + \frac{1}{60} (4 - 9k) \theta^2 \right] \left( 1 + \frac{\beta\theta^2}{15} \right)^{-1} \quad (\text{B.22})$$

$$\theta_1^2 \simeq \beta\theta^2 \left[ 1 + \frac{1}{60} (4 - 9k) \theta^2 \right] \left( 1 - \frac{\beta\theta^2}{15} \right) \quad (\text{B.23})$$

$$\implies \theta_1^2 \simeq \beta\theta^2 (1 + 2C_{k\beta}\theta^2) \quad (\text{B.24})$$

$$\text{Donde : } C_{k\beta} = \frac{1}{2} \left( A_k - \frac{\beta}{15} \right) \quad (\text{B.25})$$

$$A_k = \frac{1}{15} - \frac{3k}{20} \quad (\text{B.26})$$

Utilizamos esta solución para  $\theta_1$  en la ecuación (3.23), ignorando términos de orden superior al cuártico dentro de los corchetes:

$$\theta_1 \simeq \beta^{1/2}\theta (1 + 2C_{k\beta}\theta^2)^{1/2} \quad (\text{B.27})$$

$$\implies \theta + \theta_1 \simeq \theta \left[ 1 + \beta^{1/2} (1 + C_{k\beta}\theta^2) \right] \quad (\text{B.28})$$

$$\sin \theta_1 \simeq \theta_1 \left( 1 - \frac{\theta_1^2}{6} \right) \quad (\text{B.29})$$

$$\simeq \beta^{1/2}\theta (1 + C_{k\beta}\theta^2) \left[ 1 - \frac{\beta\theta^2 (1 + 2C_{k\beta}\theta^2)}{6} \right] \quad (\text{B.30})$$

$$\implies \sin \theta_1 \simeq \beta^{1/2}\theta \left[ 1 + \left( C_{k\beta} - \frac{\beta}{6} \right) \theta^2 \right] \quad (\text{B.31})$$

$$\sin(\theta + \theta_1) \simeq (\theta + \theta_1) \left[ 1 - \frac{(\theta + \theta_1)^2}{6} \right] \quad (B.32)$$

$$\simeq \theta \left[ 1 + \beta^{1/2} (1 + C_{k\beta} \theta^2) \right] \left[ 1 - \frac{\theta^2 (1 + \beta^{1/2} (1 + C_{k\beta} \theta^2))^2}{6} \right] \quad (B.33)$$

$$\simeq \theta \left( 1 + \beta^{1/2} \right) \left[ 1 + \left( \frac{\beta^{1/2} C_{k\beta}}{1 + \beta^{1/2}} - \frac{1}{6} (1 + \beta^{1/2})^2 \theta^2 \right) \right] \quad (B.34)$$

$$\implies \frac{R}{D} \simeq \frac{\beta^{1/2}}{1 + \beta^{1/2}} \left[ 1 + \left( C_{k\beta} - \frac{\beta}{6} \right) \theta^2 \right] \\ \left[ 1 + \left( \frac{\beta^{1/2} C_{k\beta}}{1 + \beta^{1/2}} - \frac{(1 + \beta^{1/2})^2}{6} \right) \right]^{-1} \quad (B.35)$$

$$\simeq R_0 \left[ 1 + \left( \frac{C_{k\beta}}{1 + \beta^{1/2}} + \frac{1 + 2\beta^{1/2}}{6} \right) \theta^2 \right] \quad (B.36)$$

## B.4. Radio de Curvatura en el caso de interacción con un viento plano-paralelo

Hacemos expansión Taylor hasta cuarto orden de cada uno de los términos de la ecuación (3.36)

$$\csc^2 \theta \simeq \theta^{-2} \left( 1 - \frac{\theta^2}{6} + \frac{\theta^4}{120} \right)^{-2} \simeq \theta^{-2} \left( 1 + \frac{\theta^2}{3} + \frac{\theta^4}{15} \right) \quad (B.37)$$

$$\theta \cot \theta \simeq 1 - \frac{\theta^2}{3} \left( 1 + \frac{\theta^2}{15} + \frac{2\theta^4}{315} \right) \quad (B.38)$$

$$\implies 1 - \theta \cot \theta \simeq \frac{\theta^2}{3} \left( 1 + \frac{\theta^2}{15} + \frac{2\theta^4}{315} \right) \quad (B.39)$$

Sustituímos en la ecuación (3.36):

$$\tilde{R}(\theta) \simeq \left[ 3\theta^{-2} \left( 1 + \frac{\theta^2}{3} - \frac{\theta^4}{10} \right) \frac{\theta^2}{15} \left( 1 + \frac{\theta^2}{15} \right) \right]^{1/2} \quad (\text{B.40})$$

$$\implies \tilde{R}(\theta) \simeq \left[ 1 + \frac{2\theta^2}{5} + \frac{2\theta^4}{21} \right]^{1/2} \quad (\text{B.41})$$

$$\implies \tilde{R}(\theta) \simeq 1 + \frac{\theta^2}{5} + \frac{29\theta^4}{1050} \quad (\text{B.42})$$

De esta forma mostramos que el coeficiente de segundo orden en este caso es  $\gamma = \frac{1}{5}$ . Por lo tanto, sustituyendo este valor en la ecuación (A.23) encontramos que

$$R_c = \frac{5}{3} \quad (\text{B.43})$$



## Apéndice C

# Coeficientes de los parámetros de la hipérbola para el ajuste de la cola

