



Reconstruction d'images en interférométrie : Application à des données réelles d'étoiles jeunes

Stéphanie Renard Thèse (2^{ème} année) au LAOG & CRAL

Dir. : Fabien Malbet (Grenoble) & Eric Thiébaut (Lyon) Coll. : Jean-Philippe Berger & Myriam Benisty



Ecole d'été TSI Peyresq 25 juillet 2009











Ecole d'été Peyresq 2009 25 juillet 2009









Etoiles jeunes : pourquoi et comment ?



- Caractéristiques et phénomènes
 - Etoile de 4000 à 10000K
 - Disque d'accrétion (Képlérien ou non) : gaz+poussière
 - Vents d'éjection
 - Compagnon stellaire
 - Accrétion magnétosphérique
 - Protoplanètes

- Etude des conditions physiques de l'environnement proche des étoiles jeunes
 - Rayon de 0.1 à 10 UA (1UA = distance entre la Terre et le Soleil)
 - Température de 150 à 4000 K
- \Rightarrow Conditions sur l'instrument
 - 1 μm ≤ λ ≤ 10 μm
 - Echelle spatiale de 0.5 à 70 mas

⇒ Interférométrie optique/infrarouge

Technique : l'interférométrie \Rightarrow Haute résolution spatiale

 Observer avec un télescope :

 Observer avec 2 télescopes :



⇒ L'interférométrie permet d'atteindre de la haute résolution spatiale

Taille du plus petit détail vu

> Ecole d'été Peyresq 2009 25 juillet 2009

B

L'interférométrie : comment ça marche ?

Aperture 1

- Principe de l'interférométrie : Recombinaison cohérente des faisceaux provenant de plusieurs télescopes
- Observables : franges d'interférence
 - Visibilités carrées V (info sur la taille de l'objet)
 - Perte de la phase φ due a la turbulence atmosphérique ⇒ Clôtures de phase (info sur l'asymmétrie de l'objet)



$$\mathsf{CP}_{ijk} = \varphi_{ij} + \varphi_{jk} + \varphi_{ki}$$

- Analyse des données
 - Ajustement de modèles (Connaissance de l'objet + modèles simples)
 - Reconstruction d'image (indépendance vis-à-vis des modèles)



Distant Source

Incident

Phasefront

A2

x2

s * B

8

ddm

Stéphanie Renard

Interférométrie optique/infrarouge : reconstruction d'image



$$I_{
m obs}(x,y) = [PSF * I_{
m true}](x,y) + N(x,y)$$

$$V_{\rm obs}(u,v) = S(u,v) \times V_{\rm true}(u,v) + N'(u,v)$$

- But de la reconstruction d'image : retrouver *I* true
- Problème mal posé (infinité d'images qui ajustent les données dans les barres d'erreur) ⇒ contrainte additionnelle

• Méthode: Maximum a posteriori
$$z^{(MAP)} = \arg \min_{z} f(z)$$

 $f(z) = \underline{f_{data}(z)} + \underbrace{f_{prior}(z)}_{\text{Régularisation}}$
Statistique gaussienne: χ^2
 $\chi^2_{V2}(z) = \sum \{\frac{|V^{2true} - V^{2obs}|}{\sigma_{V^2}}\}^2$
Terme d'attache
 $\max \text{ données:} \text{ compatibilité de la solution avec les } \text{ données } \text{ Facteur de régularisation}$

 Utilisation de l'algorithme MiRA d'Eric (Thiébaut 2008, Proc. SPIE 7013, 701311)

Stéphanie Renard

Buts de la thèse

• Côté algorithmique :

- Utilisation de l'algorithme de reconstruction d'image MiRA
- Optimisation de l'algorithme pour des données typiques de AMBER (cube de données en longueur d'onde)
- Côté astrophysique :
 - Application à des données réelles d'étoiles jeunes
 - Comparaison des résultats de la reconstruction d'image à ceux de l'ajustement de modèles

1^{er} objet : GW Orionis – 1. Données



Stéphanie Renard

(m) /

1^{er} objet : GW Orionis – 2. Résultats MiRA



• 10% de flux hors du système triple ?

Ecole d'été Peyresq 2009 25 juillet 2009 Hour angle (hour)

0.0

0.5

-0.5

Stéphanie Renard

1^{er} objet : GW Orionis – 3. Analyse

Ajustement de modèle indépendant

- Ajustement d'un système triple : minimisation du χ^{2} par LM
- Ajustement d'une binaire (étoile double) ne fonctionne pas !



1^{er} Objet : GW Orionis – 3. Analyse



- Binaire éloignée (1-3) : bonne correspondance entre les 2 méthodes
- Binaire serrée (1-2) : pas si bon ...
 - Les composantes proches sont moins contraints dans les données (cf. dirty beam)

2^{ème} objet : HD 45677 – 1. Données



2^{ème} objet : HD 45677 – 2. Résultats MiRA



Stéphanie Renard

2^{ème} objet : HD 45677 – 3. Analyse

- o Méthode :
 - Choix d'un modèle (expl.: étoile + anneau gaussien)
 - Calculer la transformée de Fourier du modèle et déterminer les observables
 - Prendre les mesures aux mêmes points u,v
 - Conserver les mêmes barres d'erreur que les données réelles
 - Reconstruire une nouvelle image à partir des données simulées
- ⇒ Trouver le modèle dont l'image reconstruite est la plus proche de l'image reconstruite à partir des données réelles
- o 1^{er} modèle : étoile + anneau gaussien avec intensité uniforme



Problème : modèle symmétrique ⇒ clôtures de phases = 0 !

2^{ème} objet : HD 45677 – 3. Analyse

 2^{ème} modèle : étoile + anneau gaussien avec intensité non uniforme



- Problème : structures répartie non uniformément sur l'ellipse
- 3^{ème} modèle : star + anneau gaussien décentré par rapport à l'étoile



3^{ème} objet : MWC 275 – 1. Données



- Halo en bande H
- Composante compate à l'intérieur du rayon de sublimation @ 0.05-0.3 AU (Teff
 - ~ 1600K) \Rightarrow interprétation physique ?



3^{ème} objet : MWC 275 – 2. Résultats MiRA



⇒ Tests systématiques sur l'algorithme



spatial frequencies

20

Stéphanie Renard

Ο

Ο

Tests systématiques sur MiRA : les entrées

o 10 objets astrophysiques



o 3 couvertures du plan (u,v) uniforme



- Création des données en visibilités complexes
- ⇒ Problème convexe ⇒ 1 seule difficulté à la fois !

Ecole d'été Peyresq 2009 25 juillet 2009

Stéphanie Renard

Tests systématiques sur MiRA : les sorties

- o Test
 - 10 régularisations (L2, L1L2, MEM, TV, Lpnorm, etc.)
 - Variation du poids de la régularisation µ (de très régularisé à sous-régularisé)
- o Sorties
 - Différence moindre-carré entre l'image réelle et l'image reconstruite MSE
 - Terme de vraissemblance avec les données f_{data}
 - Terme de régularisation f_{prior}

Tests systématiques sur MiRA : analyse des résultats

- Meilleure régularisation (globale ou par type d'objet ?) et le poids optimum associé
- Vérification des courbes théoriques (MSE vs µ / fdata vs fprior / etc.)
- Possibilité de déterminer le meilleur μ sans connaître l'image réelle ? (χ²/courbe en L)
- Limitation de la reconstruction d'image (nombre de points dans le plan u,v ; taille de la barre d'erreur)



Tests systématiques sur MiRA : retour aux données réelles

• Méthodologie pour des données réelles:

- Ajustement de modèle sur les données => modèle simple
- Création de données simulées à partir du modèle simple
- Déterminer sur ce modèle les paramètres optimaux (régularisation + poids µ)
- Utilisation de ces paramètres optimaux sur les données réelles
- ⇒ Plus de confiance dans l'image reconstruite
- Comparaison entre le résultat sur les données réelles et sur le modèle
- De plus, connaissance de la meilleure reconstruction d'image possible sur le modèle

Conclusions

 Reconstruction d'image en interférométrie optique : nouvelle technique en progrès

- Difficultés (par rapport à l'interférométrie radio) :
 - Plan (u,v) « à trous »
 - o Absence de toute l'information de la phase
 - ⇒ Nécessité de trouver la bonne régularisation pour interpoler entre les données et pour éviter les minima locaux
- Premiers résultats démontrant la faisabilité de la reconstruction d'image et son intêret (aide pour trouver de nouveaux modèles)
- Méthodologie pour augmenter la confiance en l'image reconstruite et détermination d'un "niveau de bruit sur l'image"

Merci de votre attention



