

POLARIMETRI UNTUK PENGAMATAN ASTRONOMI (POLARIMETRY FOR ASTRONOMICAL OBSERVATION)

Manoressy Tobias Bumbungan

Pusat Sains Antariksa

Lembaga Penerbangan dan Antariksa Nasional

Jl. Dr. Djunjunan 133, Bandung, Jawa Barat, Indonesia 40173

surel: manoressy.tobias@lapan.go.id

ABSTRACT

This paper provides a brief description of polarimetry as a potential technique to acquire information about characteristics of astronomical objects otherwise unobtainable solely from photometric and spectroscopic observations. Polarization in astronomical contexts, its formalism in the optical domain, polarization mechanism through scattering, and polarimetric optics are described in this paper. Polarimetry implementation in astronomical observation is also discussed by taking polarimetric imaging of the young star LkCa 15 with the SPHERE ZIMPOL instrument on the European Southern Observatory's VLT (Very Large Telescope) as an example.

Keywords: *polarimetry, polarization, scattering, exoplanet, protoplanetary disk*

ABSTRAK

Makalah ini menyajikan ulasan singkat mengenai polarimetri sebagai teknik yang potensial untuk memperoleh informasi karakteristik suatu objek astronomi yang tidak dapat diperoleh hanya dari pengamatan fotometri dan spektroskopi. Polarisasi dalam konteks astronomi, formalisme polarisasi dalam domain optik, mekanisme polarisasi melalui hamburan, dan optika polarisasi diuraikan pada makalah ini. Implementasi polarimetri dalam pengamatan astronomi dijelaskan dengan mengambil contoh pencitraan polarimetrik bintang muda LkCa 15 dengan instrumen SPHERE ZIMPOL pada VLT (*Very Large Telescope*) milik European Southern Observatory.

Kata Kunci: *polarimetri, polarisasi, hamburan, eksoplanet, piringan proplanet*

1 PENDAHULUAN

Polarisasi merupakan karakteristik dasar cahaya terkait sifatnya sebagai gelombang elektromagnetik transversal. Karakteristik ini mendeskripsikan evolusi vektor medan listrik seiring propagasinya melalui suatu medium. Pengukuran polarisasi dapat memberikan informasi tambahan terkait suatu objek astronomi yang tidak dapat diperoleh apabila hanya meninjau karakteristik skalarnya saja (Bumbungan, 2016).

Pada umumnya, polarisasi diakibatkan oleh pemecahan simetri pada arah propagasi cahaya. Asimetri tersebut dapat disebabkan oleh berbagai mekanisme fisika, seperti medan magnet

atau optik anisotropik, sebagaimana polarisator atau plat gelombang (*wave plate/retarder*). Beberapa fenomena atau lingkungan antariksa yang berpotensi dipelajari dengan polarimetri mencakup medan magnet bintang yang tidak terpisahkan (*unresolved*), gumpalan (*clump*) dalam angin bintang (*stellar wind*), struktur piringan/cakram akresi, serta atmosfer eksoplanet.

Dari aspek instrumentasi, polarimetri kerap dipandang sebagai teknik yang rumit. Implementasi optik polarisasi mengurangi transmisi dan performa optik sistem secara keseluruhan; ini jelas berlawanan dengan kebutuhan *imager* dan spektrograf. Sebaliknya,

banyaknya komponen optik dalam sistem optik adaptif atau pencitraan dapat menciptakan polarisasi instrumen yang mengurangi kinerja polarimetrik. Sebagai teknik diferensial, polarimetri juga sensitif terhadap berbagai kesalahan sistematis. Faktor pembatas lain adalah sinyal polarisasi palsu yang dihasilkan dari variasi karakteristik atmosfer dan ketidaksempurnaan pada sistem optik dan/atau detektor. Untuk meminimalkannya, dibutuhkan teleskop dengan bukaan (*aperture*) besar dan sistem optik yang efisien. Selain itu, implementasi polarimetri pada instrumen harus diperhitungkan sejak tahap awal proses perancangan.

2 DATA DAN METODOLOGI

Makalah ini menguraikan kajian teoretis mengenai polarimetri dalam konteks astronomi berdasarkan berbagai sumber yang tercantum dalam daftar rujukan. Bab 3 menguraikan kerangka matematis polarimetri dalam domain optik, metode pengukurannya, mekanisme polarisasi melalui hamburan, dan berbagai komponen optika dalam polarimeter. Aplikasi polarimetri untuk pengamatan eksoplanet dan piringan protoplanet dijelaskan dalam bab 4.

3 TEORI

3.1 Formalisme Stokes

Cahaya dari berbagai sumber astronomi memiliki derajat polarisasi dalam jumlah kecil. Dalam hal jumlah foton, seperti yang biasa diukur dengan detektor optik, polarisasi parsial didefinisikan dengan formalisme Stokes-Mueller. Vektor Stokes *S* dinyatakan sebagai berikut:

$$S = \begin{pmatrix} I \\ Q \\ U \\ V \end{pmatrix} \tag{3-1}$$

di mana tiap parameternya dinyatakan sebagai:

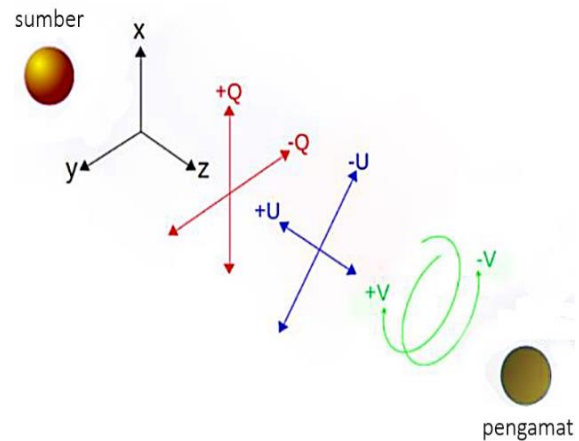
$$I = I'_{0^\circ} + I'_{90^\circ} \text{ atau } I'_{45^\circ} + I'_{-45^\circ} \text{ atau } I'_{RHC} + I'_{LHC} \tag{3-2}$$

$$Q = I'_{0^\circ} - I'_{90^\circ} \tag{3-3}$$

$$U = I'_{45^\circ} - I'_{-45^\circ} \tag{3-4}$$

$$V = I'_{RHC} - I'_{LHC} \tag{3-5}$$

Fluks foton diukur pada sudut atau orientasi tertentu. *I* mewakili intensitas tanpa memperhitungkan polarisasi. *Q* dan *U* menyatakan polarisasi linear dua dimensi. *V* menandakan polarisasi sirkular kanan dan kiri *Right-Handed Circular* (RHC), *Left-Handed Circular* (LHC). Berbagai keadaan polarisasi yang berbeda tersebut diilustrasikan dalam Gambar 3-1.



Gambar 3-1: Ilustrasi keadaan polarisasi. Cahaya dari sumber bergerak sepanjang arah sumbu z ke arah pengamat

Formalisme Stokes dapat digunakan untuk mendefinisikan cahaya yang terpolarisasi sebagian, tapi tidak untuk fenomena interferensi karena informasi fase tidak tersimpan. Dari persamaan (3-2) s.d (3-5) juga dapat dilihat bahwa polarimetri adalah teknik diferensial. Cahaya yang terpolarisasi horizontal (+90°, -*Q*) diukur dengan menggabungkan dua pengukuran dari polarisator vertikal dan horizontal. Dengan perhitungannya sederhana, dapat ditunjukkan bahwa intensitas keluaran bernilai setengah dari intensitas masukan.

3.2 Pengukuran Polarisasi

Untuk merepresentasikan berbagai proses fisika atau komponen optik, digunakan matriks Mueller 4x4:

$$M = \begin{pmatrix} I \rightarrow I & Q \rightarrow I & U \rightarrow I & V \rightarrow I \\ I \rightarrow Q & Q \rightarrow Q & U \rightarrow Q & V \rightarrow Q \\ I \rightarrow U & Q \rightarrow U & U \rightarrow U & V \rightarrow U \\ I \rightarrow V & Q \rightarrow V & U \rightarrow V & V \rightarrow V \end{pmatrix} \quad (3-6)$$

Elemen [1,1] menyatakan transmisi cahaya yang tidak terpolarisasi dan dapat digunakan untuk normalisasi matriks. Tiap elemen diagonal merepresentasikan transmisi setiap parameter dalam vektor Stokes. Elemen-elemen lainnya adalah transformasi antar parameter Stokes.

Interaksi suatu vektor Stokes dengan suatu medium dinyatakan dengan:

$$S_{out} = M \cdot S_{in} \quad (3-7)$$

di mana S_{in} dan S_{out} adalah vektor Stokes masukan dan keluaran. M dapat merepresentasikan satu atau gabungan beberapa komponen optik, seperti polarisator parsial, plat gelombang, pemisah berkas (*beam splitter*), atau bahkan proses refleksi pada permukaan dielektrik atau metalik. Untuk modulator dengan sejumlah n komponen, M dinyatakan dengan:

$$M = M_n \cdot M_{n-1} \cdot \dots \cdot M_2 \cdot M_1 \quad (3-8)$$

Polarisator ideal yang sumbu transmisinya paralel dengan $\pm Q$ dinyatakan dengan matriks Mueller berikut:

$$M_{pol,\pm Q} = \frac{1}{2} \begin{pmatrix} 1 & \pm 1 & 0 & 0 \\ \pm 1 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 \end{pmatrix} \quad (3-9)$$

Dengan polarisator tersebut, cahaya yang tidak terpolarisasi akan dipolarisasikan pada arah $\pm Q$ dengan sempurna dan hanya setengah dari intensitasnya yang ditransmisikan. Sebaliknya, cahaya yang terpolarisasi

pada arah $\mp Q$ akan sepenuhnya diserap/dihalangi/tidak ditransmisikan.

Suatu komponen optik dapat diputar (rotasi) untuk mensejajarkan sumbu optiknya dengan keadaan polarisasi tertentu atau sekadar mengubah orientasinya. Rotasi tersebut didefinisikan dengan matriks rotasi:

$$M_{rot}(\alpha) = \begin{pmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & \cos 2\alpha & \sin 2\alpha & 0 \\ 0 & -\sin 2\alpha & \cos 2\alpha & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{pmatrix} \quad (3-10)$$

α adalah sudut rotasi pada arah berlawanan dengan putaran jarum jam dilihat dari arah pengamat pada Gambar 3-1. Matriks Mueller untuk komponen yang dirotasikan adalah:

$$M'(\alpha) = M_{rot}(-\alpha) \cdot M \cdot M_{rot}(\alpha) \quad (3-11)$$

Pada praktiknya, hanya parameter I yang dapat diukur secara langsung dari vektor Stokes. Untuk mengukur keempat parameter Stokes, dibutuhkan empat pengukuran terpisah yang dilakukan dengan sistem modulator yang dapat beradaptasi dengan empat keadaan polarisasi yang berbeda. Sistem tersebut akan memodulasi keempat keadaan yang berbeda secara sekuensial dan menghasilkan intensitas keluaran yang dapat didemodulasikan untuk memperoleh vektor Stokes keluaran.

Matriks Mueller untuk modulator pada keadaan i dinyatakan dengan:

$$M_{mod,i} = \begin{pmatrix} M_{11,i} & M_{12,i} & M_{13,i} & M_{14,i} \\ M_{21,i} & M_{22,i} & M_{23,i} & M_{24,i} \\ M_{31,i} & M_{32,i} & M_{33,i} & M_{34,i} \\ M_{41,i} & M_{42,i} & M_{43,i} & M_{44,i} \end{pmatrix} \quad (3-12)$$

Menerapkan persamaan ini pada persamaan (3-7), dapat diperoleh intensitas keluaran I_{out} pada satu keadaan:

$$I_{out,i} = M_{11,i}I_{in} + M_{12,i}Q_{in} + M_{13,i}U_{in} + M_{14,i}V_{in} \quad (3-13)$$

Setiap keadaan modulator dinyatakan dengan matriks Mueller

yang berbeda. Untuk m keadaan yang berbeda, intensitas keluarannya adalah:

$$I_{out} = O \cdot S_{in} \quad (3-14)$$

O adalah matriks modulasi $m \times 4$, dimana tiap baris mengandung elemen-elemen dari baris pertama dari matriks Mueller untuk tiap keadaan.

Untuk memperoleh vektor Stokes keluaran, invers ($m=4$) atau invers semu ($m>4$) dari O dapat dihitung untuk memperoleh matriks demodulasi D :

$$S_{out} = D \cdot I_{out} \quad (3-15)$$

Apabila vektor Stokes keluaran sama dengan masukan, maka $D \cdot O = I$, dimana I adalah matriks identitas. Perkalian matriks $D \cdot O$ juga menghasilkan matriks sistem X , yang digunakan untuk mendefinisikan akurasi polarimetrik dari sistem modulator dan kinerja sistem secara keseluruhan.

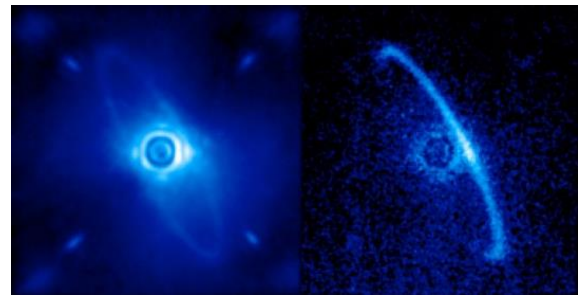
3.3 Polarisasi Melalui Hamburan

Ada berbagai macam mekanisme polarisasi dengan hasil karakteristik sinyal yang berbeda. Resolusi spektral yang dibutuhkan suatu instrumen polarimetrik bergantung pada tipe polarisasi yang akan diamati.

Hamburan (*scattering*) adalah salah satu mekanisme penyebab polarisasi yang paling umum. Cahaya hamburan dan pantulan dari objek-objek di Tata Surya telah menjadi salah satu objek studi polarimetri. Karakteristik mikrofisika butiran cairan asam sulfur pada atmosfer Venus telah dipelajari dengan teknik polarimetri fase terpisah multi panjang gelombang (*multi-wavelength phase-resolved polarimetry*, Hovenier dan Muñoz, 2009). Ukuran, bentuk, dan komposisi kimia dari butiran debu dan aerosol pada atmosfer, yang dapat mempengaruhi kesehatan dan iklim global, juga dapat dipelajari dengan teknik spektropolarimetri.

Aplikasi lain dari polarimetri adalah pada pencitraan langsung dan

karakterisasi piringan (protoplanet dan puing) dan eksoplanet. Tantangannya adalah tingkat kontras yang tinggi antara bintang induk dengan eksoplanetnya, sekitar 10^{-10} s.d. 10^{-9} . Namun, karena sebagian besar cahaya dari bintang tidak terpolarisasi, sedangkan cahaya dari piringan atau eksoplanet terpolarisasi dalam jumlah yang relatif besar akibat hamburan, maka cahaya dari bintang dapat “diredam” dan struktur piringan atau eksoplanet dapat dicitrakan, seperti yang ditunjukkan dalam Gambar 3-2. Spektrum polarisasi yang diperoleh dapat memberikan informasi mengenai karakteristik medium penghambur ($1/\lambda^4$ untuk hamburan Rayleigh dan $1/\lambda^2$ untuk hamburan Mie).



Gambar 3-2: Citra *first light* dari Gemini Planet Imager untuk bintang HR4796A. Kiri: cahaya “normal”. Kanan: cahaya yang terpolarisasi (Perrin, 2014)

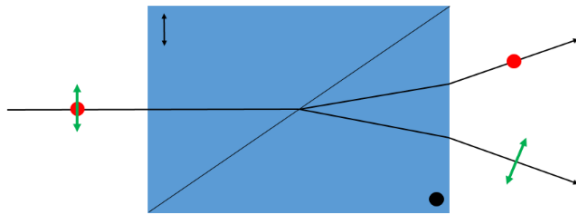
3.4 Optik Polarisasi

Pengukuran polarisasi dilakukan dengan memfilter fluks foton menurut keadaan polarisasinya dan/atau memanipulasi keadaan polarisasinya. Komponen yang lazim digunakan antara lain: polarisator linear, pemisah berkas polarisasi (*polarizing beam splitter*), dan plat gelombang.

Polarisator plat atau *lembaran (sheet)* terbuat dari material kristal atau polimer anisotropik yang dapat menyerap (“menghalangi”) cahaya pada satu orientasi dan mentransmisikan cahaya pada orientasi lain yang tegak lurus. Efek serupa dapat juga dihasilkan dengan pola kawat-kawat dengan jarak celah yang lebih kecil daripada panjang gelombang cahayanya. Material seperti

kaca juga dapat bersifat seperti polarisator pada arah jatuh (*incidence*) non-normal, seperti yang ditunjukkan dengan persamaan Fresnel.

Pemisah berkas polarisasi, seperti prisma Wollaston dalam Gambar 3-3, terbuat dari dua prisma ortogonal yang terbuat dari material *birefringent* seperti kristal uniaksial (yang lazim digunakan adalah kalsit). Pada pertemuan kedua prisma, keadaan polarisasi yang berbeda akan dibiarkan pada arah yang berbeda secara simetris. Cahaya masukan akan dipisahkan menjadi dua berkas keluaran dengan keadaan polarisasi tegak lurus.



Gambar 3-3: Ilustrasi prisma Wollaston

Retarder atau plat gelombang juga memanfaatkan prinsip *birefringence*. Vektor medan listrik yang berpropagasi pada arah satu sumbu akan memiliki kecepatan yang berbeda dengan vektor lainnya pada arah tegak lurus, mengakibatkan pelambatan fase (*phase delay*), yang dikenal sebagai *retardance*:

$$\delta = \frac{2\pi d \Delta n}{\lambda} \quad (3-16)$$

di mana d adalah ketebalan plat, Δn adalah perbedaan antara indeks bias kedua sumbu optik, dan λ adalah panjang gelombang.

Matriks Mueller untuk plat gelombang ideal dengan *retardance* δ dan sumbu paralel dengan $+Q$ adalah:

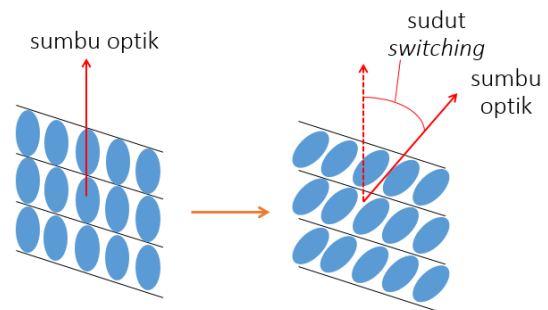
$$M_{ret}(\delta) = \begin{pmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & \cos \delta & \sin \delta \\ 0 & 0 & -\sin \delta & \cos \delta \end{pmatrix} \quad (3-17)$$

Untuk pelambatan fase sebesar 0 atau kelipatan 2π , keadaan polarisasi keluaran tidak akan berubah. Untuk $\delta =$

$\pi/2$, plat gelombang bertindak sebagai plat $1/4$ gelombang (*quarter-wave plate*), yang mengubah polarisasi linear ($\pm Q, \pm U$) menjadi polarisasi sirkular ($\pm V$), demikian juga sebaliknya. Untuk $\delta = \pi$, plat gelombang bersifat plat $1/2$ gelombang (*half-wave plate*) yang membalik tanda \pm untuk keadaan linear dan sirkular. Nama lain untuk plat ini adalah rotator polarisasi.

Mayoritas *fixed linear retarder* seperti yang disebutkan di atas terbuat dari kristal *birefringent*, seperti quartz, MgF_2 , atau safir. Material *birefringent* lain adalah kristal cair (*liquid crystal*), yang tersusun atas molekul-molekul memanjang selaras yang orientasi sumbunya dapat dimanipulasi (*switched*) dengan medan listrik eksternal tanpa perlu memutar plat secara fisik (Gambar 3-4). Sudut *switching* biasanya bernilai $\pm 45^\circ$. Namun, nilai ini pun tergantung pada temperatur.

Ferroelectric Liquid Crystal (FLC) adalah tipe plat gelombang variabel yang sering digunakan untuk mengatasi *seeing* pada atmosfer, yang terus berfluktuasi dengan waktu dan dapat menghasilkan sinyal polarisasi palsu. Modulator perlu dapat beradaptasi dengan perubahan turbulensi atmosfer yang konstan dan cepat. Karena waktu *switching* FLC sangat cepat, $\sim 100-150 \mu s$, kecepatan modulasinya dapat mencapai orde kHz, lebih cepat dari *seeing*.



Gambar 3-4: Modulasi kristal cair. Orientasi molekul dapat diubah dengan memberikan medan listrik eksternal

4 PEMBAHASAN

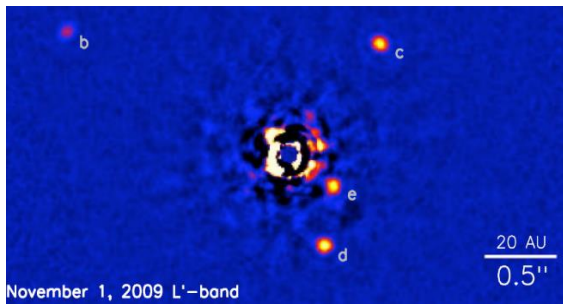
Ulasan singkat mengenai pengamatan polarimetrik eksoplanet

dan piringan protoplanet disajikan dalam bab ini.

4.1 Deteksi dan Karakterisasi Piringan dan Eksoplanet

Salah satu tantangan untuk mencitrakan piringan protoplanet dan eksoplanet secara langsung adalah cahaya yang menyilaukan dari bintang induknya. Koronagraf dapat digunakan untuk menghalangi cahaya dari bintang agar lingkungan di sekitar bintang dapat dicitrakan. Dengan demikian, cahaya hamburan dari piringan dan radiasi termal atau cahaya pantulan dari eksoplanet dapat diukur.

Gambar 4-1 menunjukkan citra pita L' (inframerah dekat) dari empat eksoplanet yang mengorbit bintang HR8799. Citra tersebut diambil dengan teleskop Keck II di Mauna Kea, Hawaii, AS, dengan teknik pencitraan diferensial sudut (*Angular Differential Imaging* [ADI]; Marois *et al.*, 2006, 2008, 2010). Planet b, c, dan d berjarak 68, 38, 24 SA (Satuan Astronomi) dari bintang induknya, dengan massa 7, 10, dan 10 M_{Jupiter} .



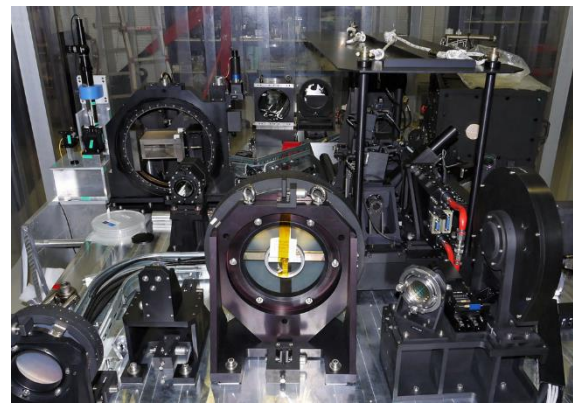
Gambar 4-1: Citra pita L' empat planet (b, c, d, e) yang mengorbit bintang HR8799 (di tengah citra) (Marois *et al.*, 2008)

Planet raksasa gas panas yang mengorbit bintang induknya pada jarak yang jauh dapat mempolarisasi radiasi inframerah dari interiornya sendiri (de Kok *et al.*, 2011). Berbagai asimetri pada atmosfer, seperti akibat awan, dapat menghasilkan sinyal polarisasi. Derajat polarisasi dapat memberikan informasi mengenai struktur atmosfer eksoplanet tersebut.

Cahaya bintang yang dipantulkan dapat terpolarisasi akibat hamburan oleh molekul gas, aerosol, dan partikel awan dalam atmosfer eksoplanet, atau akibat pemantulan pada permukaan (apabila eksoplanet tersebut memiliki permukaan). Derajat polarisasi P ditentukan oleh:

- komposisi dan struktur atmosfer,
- pemantulan dari permukaan planet,
- panjang gelombang, dan
- sudut fase planet.

Contoh penerapan pencitraan eksoplanet dengan spektropolarimetri kontras tinggi adalah pada instrumen *Spectro-Polarimetric High-contrast Exoplanets REsearch – Zurich IMaging POLarimeter* (SPHERE ZIMPOL) pada teleskop VLT milik *European Southern Observatory* (Gambar 4-2; Thalmann *et al.*, 2008). Instrumen ini menerapkan tiga tahap proses reduksi derau diferensial: pencitraan polarimetri kontras tinggi, kalibrasi pergantian sinyal, dan ADI.



Gambar 4-2: Rangkaian optik instrumen SPHERE sebelum dipasang pada VLT *Unit Telescope 3* di Cerro Paranal, Chile (Beuzit, 2014)

Pada tahap pertama, dua citra keadaan polarisasi yang komplementer dikurangi satu sama lain, sehingga menghilangkan cahaya yang tidak terpolarisasi dari citra. Pada tahap ini, masih tersisa latar belakang artifisial akibat aberasi diferensial yang terpolarisasi antara kedua citra. Latar belakang ini dihilangkan pada tahap kedua dengan menggunakan plat $1/2$ gelombang (HWP2

pada Gambar 4-3) pada bagian hulu rangkaian optik untuk membalik tanda parameter Stokes Q masukan. Untuk meredam derau lebih jauh lagi, terutama efek instrumen, teknik ADI diterapkan pada tahap ketiga. Teknik ini memanfaatkan rotasi medan langit pengamatan terhadap detektor, dimana posisi efek instrumen relatif tetap pada citra. Bagian-bagian statik ini dapat dihilangkan melalui pengurangan median, sehingga hanya sinyal dari planetnya saja yang tertinggal dan berotasi melintasi medan. Teknik ini dapat diterapkan secara alamiah atau artifisial dengan optik derotator medan, terutama untuk bintang-bintang di sekitar kutub langit atau zenit.

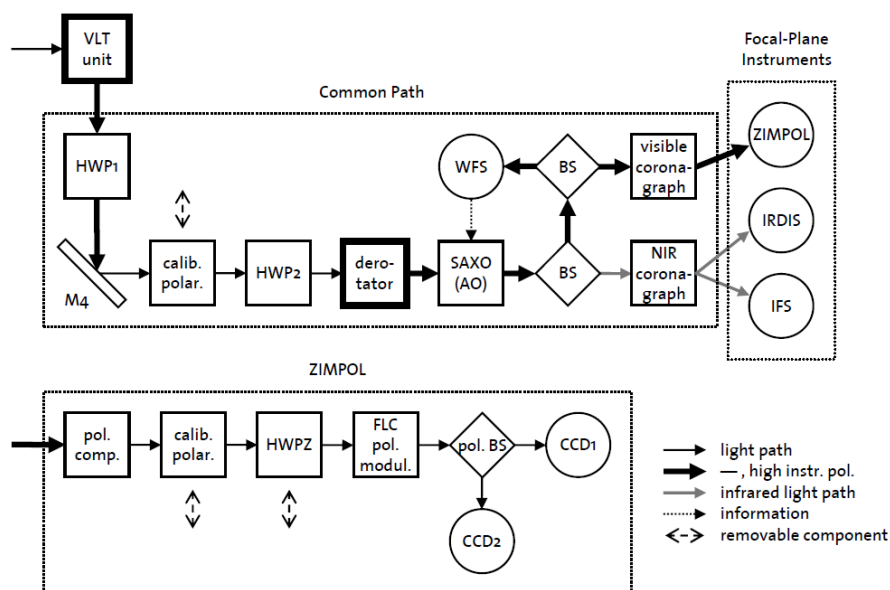
4.2 Pengamatan Piringan LkCa 15

LkCa 15 adalah bintang muda berusia 3-5 juta tahun dan bermassa $\sim 1 M_{\odot}$ (massa Matahari) pada jarak 140 parsec pada daerah konstelasi Taurus – Auriga (Simon *et al.*, 2000). Keberadaan celah pada piringan protoplanet di sekitar LkCa 15 yang membentang sampai jarak ~ 50 SA telah ditunjukkan melalui pengamatan distribusi energi spektral (Espaillat *et al.*, 2007, 2008) dan juga emisi termal pada jendela mm/sub-mm (Piétu *et al.*, 2007, Andrews *et al.*, 2011, dan Isella *et*

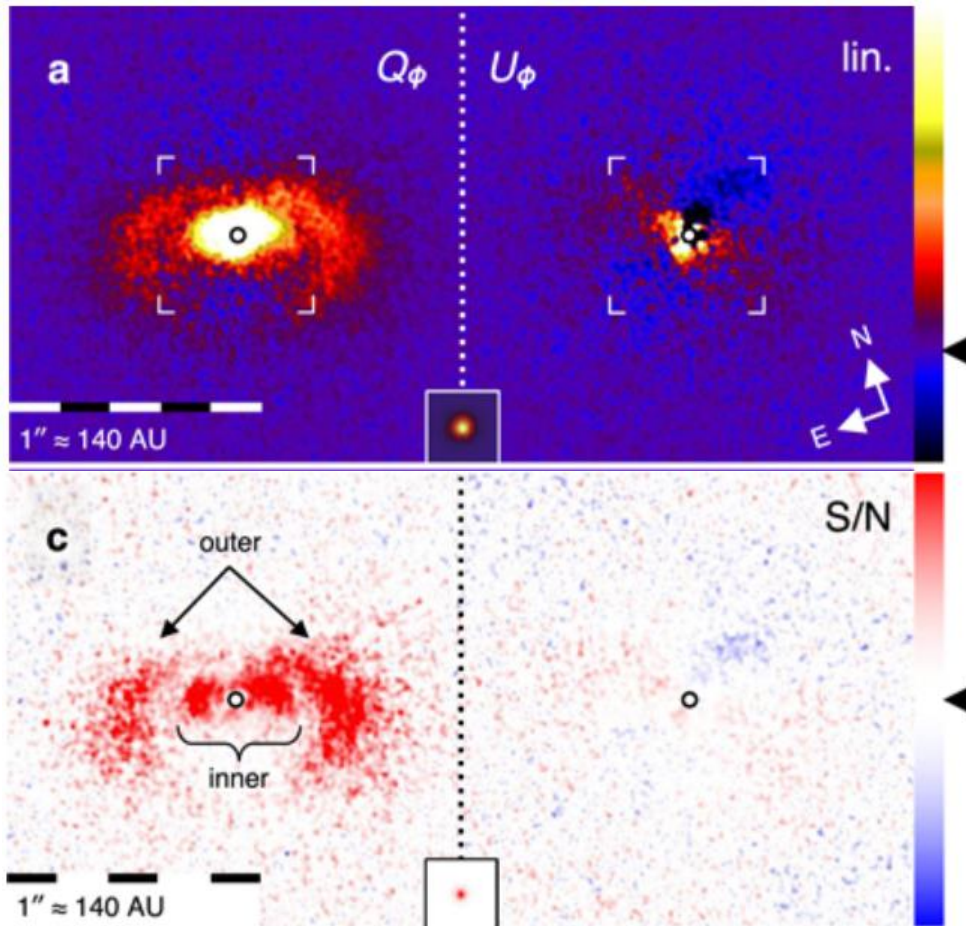
al., 2014). Thalmann *et al.* (2015) kemudian berhasil mencitrakan bagian dalam piringan dan bahkan menunjukkan kemungkinan keberadaan protoplanet LkCa 15 b melalui pengamatannya dengan SPHERE ZIMPOL.

Pengamatan LkCa 15 dengan ZIMPOL dilakukan pada malam tanggal 2 dan 12 Februari 2015. Pengamatan dilakukan pada jendela optik pita R dan I (590-890 nm) dengan tujuh siklus polarimetrik pada empat posisi plat $1/2$ gelombang (Stokes $+Q$, $-Q$, $+U$, $-U$). Masing-masing paparan Stokes dilakukan selama 8×20 detik, sehingga total waktu paparan untuk tiap malam adalah 75 menit.

Thalmann *et al.* (2015) menerapkan metode reduksi data yang berbeda, yaitu *Polarimetric Differential Imaging* (PDI), seperti yang dikemukakan oleh Avenhaus *et al.* (2014). Sistem koordinat yang digunakan untuk formalisme Stokes-nya berbasis polar (Q_{ϕ} , U_{ϕ}), dimana polarisasi Q_{ϕ} positif didefinisikan pada arah azimuthal terhadap bintang (Benisty *et al.*, 2015). Citra Q_{ϕ} akan menunjukkan cahaya hamburan tunggal, sedangkan citra U_{ϕ} tidak menunjukkan cahaya hamburan dan dapat digunakan untuk estimasi tingkat derau pada pengamatan.



Gambar 4-3: Skematik instrumen SPHERE ZIMPOL. Keterangan singkatan: HWP = *half-wave plate*, WFS = *wavefront sensor*, BS = *beam splitter*, FLC = *ferroelectric liquid crystal*. (Thalmann *et al.*, 2008)



Gambar 4-4: Citra polarimetrik dari pengamatan LkCa 15 pada jendela optik pita R dan I . Tiap panel menunjukkan citra Q_ϕ dan U_ϕ . Segitiga hitam pada skala warna menunjukkan tingkat nol (Thalmann *et al.*, 2015)

Hasil pengamatan ditunjukkan pada Gambar 4-4. Citra memiliki medan pandang 1,8 detik busur. Sudut posisi arah utara adalah sebesar 30° . Citra Q_ϕ atas menunjukkan pola sabit cahaya hamburan dari piringan bagian luar serta piringan bagian dalam dekat bintang ($< 0,25$ detik busur) yang baru tampak pada pengamatan ini. Dapat dilihat piringan bagian dalam mencapai tingkat saturasi pada skala warna. Posisi bintang sendiri direpresentasikan dengan lingkaran hitam. Citra U_ϕ atas menunjukkan estimasi derau. Panel bawah menunjukkan perbandingan sinyal terhadap derau (S/N), di mana tampak jelas perbedaan antara piringan bagian dalam dan luar. Analisis lanjutan menunjukkan bahwa piringan bagian dalam terbentang dari jarak 30 SA sampai batas dalam sekitar ~ 7 SA dari bintang.

5 KESIMPULAN

Cahaya yang terpolarisasi dapat memberikan informasi tambahan dan bahkan baru mengenai karakteristik suatu objek astronomis, seperti bintang, eksoplanet, atau piringan di sekitar bintang muda. Polarisasi itu sendiri dapat dipicu oleh berbagai mekanisme fisis. Perancangan instrumen polarimetrik untuk pengamatan perlu didasari pada pemahaman akan fenomena fisis yang akan diukur serta karakteristik polarisasi dari komponen-komponen optik yang digunakan pada teleskop dan instrumen itu sendiri.

Salah satu contoh peran polarimetri adalah dalam pencitraan kontras tinggi, seperti pada pengamatan LkCa 15 dengan SPHERE ZIMPOL. Pengamatan polarimetrik menunjukkan bagian dalam piringan protoplanet yang sebelumnya tidak terdeteksi. Dari satu

contoh ini saja, jelas prospek ilmiah dengan teknik ini tidak dapat diabaikan.

UCAPAN TERIMA KASIH

Terima kasih kepada tim redaksi *Majalah Sains dan Teknologi Dirgantara* untuk koreksi dan masukannya terhadap makalah ini.

DAFTAR RUJUKAN

- Andrews, S. M., K. A. Rosenfeld, D. J. Wilner, M. Bremer, 2011. *A Closer Look At The LkCa Protoplanetary Disk*. *Astrophysical Journal Letters*, 742(1): 5.
- Avenhaus, H., S. P. Quanz, H. M. Schmid, M. R. Meyer, A. Garufi, S. Wolf, C. Dominik, 2014. *Structures in the Protoplanetary Disk of HD142527 Seen in Polarized Scattered Light*. *Astrophysical Journal*, 781(2), 87.
- Benisty, M., A. Juhasz, A., Boccaletti, H., Avenhaus, J., Milli, C., Thalmann, C., Dominik, P., Pinilla, E., Buenzli, A., Pohl, J.-L. Beuzit, T., Birnstiel, J., de Boer, M., Bonnefoy, G., Chauvin, V., Christiaens, A., Garufi, C., Grady, T., Henning, N., Huelamo, A., Isella, M., Langlois, F., Ménard, D., Mouillet, J., Olofsson, E., Pantin, C., Pinte, L., Pueyo, 2015. *Asymmetric features in the protoplanetary disk MWC 758*. *Astronomy & Astrophysics*, 578, L6.
- Beuzit, J.-L., 2014. *The SPHERE exoplanet imager for the VLT European Southern Observatory*, <https://www.eso.org/public/images/ann14013b/>. Diakses pada tanggal 12 April 2019.
- Bumbungan, M. T., 2016. *Design and Performance Validation of an Achromatic Liquid Crystal Linear Polarization Modulation*. Master thesis Universiteit Leiden. p.12.
- de Kok, R. J., D. M. Stam, T. Karalidi, 2011. *Characterizing Exoplanetary Atmospheres Through Infrared Polarimetry*. *Astrophysical Journal*, 741(1), 59.
- Espaillet, C., N. Calvet, P. D'Alessio, J. Hernández, C. Qi, L. Hartmann, E. Furlan, D. M. Watson, 2007. *On The Diversity of The Taurus Transitional Disks: UX Tauri A and LkCa 15*. *Astrophysical Journal*, 670(2): 135-138. European Southern Observatory, 2009. "The Extremely Large Telescope" *European Southern Observatory*, https://www.eso.org/public/images/E-ELT_5000_Aug2012/. Diakses pada tanggal 12 April 2019.
- Hovenier, J.W., O. Muñoz, 2009. *Light Scattering in the Solar System: An Introductory Review*. *Journal of Quantitative Spectroscopy and Radiative Transfer*, 110(14-16): 1280-1292.
- Isella, A., C. J., Chandler, J. M., Carpenter, L. M., Pérez, L., Ricci, 2014. *Searching for Circumplanetary Disks around LkCa 15*. *Astrophysical Journal*, 788(2): 129.
- Marois, C., D. Lafrenière, R., Doyon., B., Macintosh, D., Nadeau, 2006. *Angular Differential Imaging: A Powerful High-Contrast Imaging Technique*. *Astrophysical Journal*, 641: 556-564.
- Marois C., B. Macintosh, T. Barman, B. Zuckerman, I. Song, J. Patience, D. Lafrenière, R. Doyon, 2008. *Direct Imaging of Multiple Planets Orbiting The Star HR 8799*. *Science*, 322: 1348-1352.
- Marois C., B. Zuckerman, Q. M. Konopacky, B. Macintosh, T. Barman, 2010. *Images of a Fourth Planet Orbiting HR 8799*. *Nature*, 468(7327): 1080-1083.
- Perrin, M., 2014. *Gemini Planet Imager First Light*, Gemini Observatory, www.gemini.edu/node/12113. Diakses pada tanggal 23 Januari 2019.
- Piétu, V., A. Dutrey, S., Guilloteau, 2007. *Probing The Structure of Protoplanetary Disks: A Comparative Study of DM Tau, LkCa 15, and MWC 480*. *Astronomy and Astrophysics*, 467(1): 163-178.
- Simon, M., A. Dutrey, S. Guilloteau, 2000. *Dynamical Masses of T Tauri Stars and Calibration of Pre-Main Sequence Evolution*. *Astrophysical Journal*, 545(2): 1034-1043.
- Thalmann, C., H. M. Schmid, A. Boccaletti, D. Mouillet, K. Dohlen, R. Roelfsema, M. Carillet, D. Gisler, J.-L. Beuzit, M. Feldt, R. Gratton, F. Joos, C. U. Keller, J. Kragt, J. H. Pragt, P. Puget, F. Rigal, F. Snik, R. Waters, F. Wildi, 2008. *SPHERE ZIMPOL: Overview and Performance Simulation*. *Ground-based and Airborne Instrumentation for Astronomy II*. Edited by McLean, I. S., Casali, M. M. *Proceedings of the SPIE*. Vol. 7014, article id. 70143F, 12 pp.
- Thalmann, C., G. D. Mulders, M. Janson, J. Olofsson, M. Benisty, H. Avenhaus, S. P. Quanz, H. M. Schmid, T. Henning, E. Buenzli, F. Ménard, J. C. Carson, A. Garufi, S. Messina, C. Dominik, J. Leisenring, G. Chauvin, M. R. Meyer, 2015. *Optical Imaging Polarimetry of The LkCa 15 Protoplanetary Disk With SPHERE ZIMPOL*. *The Astrophysical Journal Letters*, 808, 2.