

Ringkasan

JUMLAH terbaru eksoplanet yang telah dideteksi menunjukkan bahwa paling tidak ada satu planet mengorbit setiap bintang. Planet terbentuk di dalam cakram akresi yang menyediakan bahan bagi bintang yang baru lahir. Tema disertasi ini adalah pemahaman proses-proses fisis yang terjadi pada tahapan paling dini dari pembentukan bintang dan planet. Pembentukan dan evolusi dini cakram—yang akan menyediakan bangun dasar bagi planet-planet dan kehidupan—tidaklah begitu dipahami dengan baik.

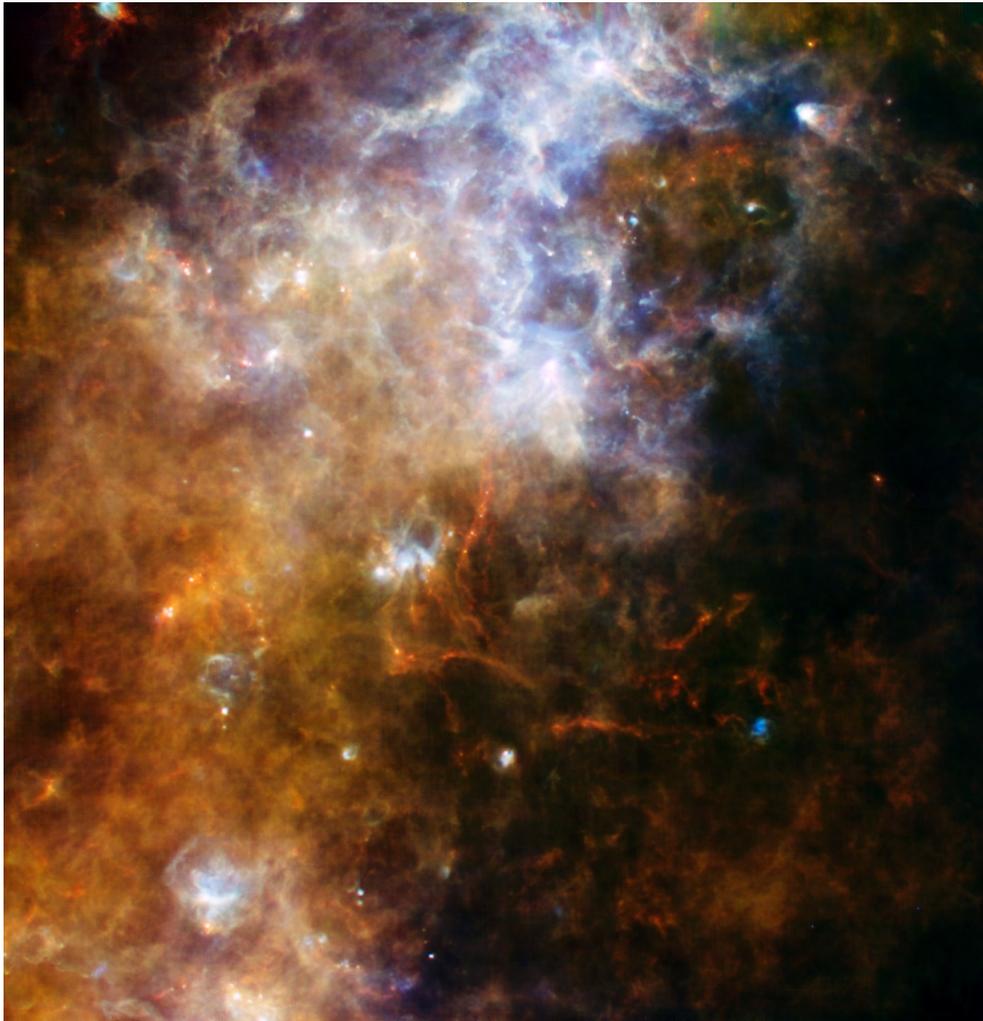
Sebagian besar unsur-unsur kimia yang penting bagi kehidupan (Belerang, Fosfor, Oksigen, Nitrogen, Karbon, dan Hidrogen, biasa disingkat SPONCH) sebagaimana kita ketahui, dibentuk di dalam bintang. Di alam semesta dini, hanya unsur-unsur ringan dari Hidrogen hingga Litium yang terbentuk. Siklus hidup bintang memperkaya medium antar bintang melalui reaksi nuklir pada inti bintang-bintang. Dalam reaksi ini terjadi fusi unsur-unsur ringan untuk menghasilkan unsur-unsur yang lebih berat, hingga terbentuknya besi (Fe). Sepanjang waktu, semakin banyak unsur-unsur berat ini terbentuk dan kemudian menjadi bagian dari proses pembentukan bintang dan planet generasi-generasi selanjutnya. Proses kimiawi lanjut akan terjadi karena adanya molekul-molekul kompleks ($> 6 \text{ atom}$) dan akan diperkuat sepanjang proses pembentukan bintang dan planet.

Pembentukan bintang dan planet terkait sangat dekat melalui cakram akresi. Teori cakram telah diusulkan oleh Kant dan Laplace pada abad ke-18, namun dibutuhkan waktu 2 abad untuk menemukan bukti pengamatan akan adanya cakram. Pembentukan dan evolusi cakram menentukan jumlah material yang disalurkan kepada bintang dan yang tersisa untuk pembentukan planet-planet.

Pembentukan bintang dan planet

Bintang terbentuk dari kontraksi gumpalan gas dan debu yang dingin dan padat ($10 \text{ K} = -263^\circ \text{C}$). Pengamatan-pengamatan terbaru dengan menggunakan Teleskop Antariksa *Herschel* menunjukkan bahwa gumpalan-gumpalan ini terletak di dalam suatu struktur berwujud filamen (lihat Gambar S.1). Di dalam filamen-filamen ini terdapat gumpalan-gumpalan padat dengan berbagai-bagai ukuran dan massa. Sepanjang untaian filamen ini terdapat inti-inti kecil yang akan membentuk bintang-bintang bermassa rendah seperti Matahari kita. Inti-inti padat ini menjadi tempat penyimpanan massa untuk pembentukan bintang dan sistem tata surya. Baru-baru ini telah dibuat kemajuan penting dalam memahami pembentukan filamen-filamen ini awan-awan molekul di dalamnya. Pergolakan supersonik di dalam materi antar bintang akan membuat gas termampatkan menjadi lembaran-lembaran dan filamen-filamen. Selagi inti menghisap massa dari awan yang melingkupinya, ia mulai memampatkan akibat gaya gravitasinya sendiri. Rincian tepat bagaimana inti ini berkontraksi bergantung pada proses-proses fisis tambahan seperti tekanan termal, medan magnetik, dan pergolakan gas.

Bintang adalah sebuah bola gas panas yang bersinar karena ditenagai oleh energi yang dilepaskan dari reaksi nuklir pada inti bintang. Tahapan-tahapan pembentukan bintang bermassa rendah ($M \leq 2M_\odot$, massa Matahari adalah $1 M_\odot$) relatif sudah dipahami dengan baik apabila dibandingkan dengan pembentukan bintang bermassa tinggi, akan tetapi beberapa aspek masih belum jelas. Bintang-bintang masif ($M \geq 8M_\odot$) sangat terang dan lebih mudah untuk diamati, namun bintang-bintang bermassa lebih lazim ditemui. Studi tentang proses-



Gambar S.1 — Citra gabungan berwarna pada lima panjang gelombang berbeda yang diambil oleh instrumen *Photodetector Array Camera and Spectrometer (PACS)* dan *Spectral and Photometric Imaging Receiver (SPIRE)* pada Teleskop Antariksa *Herschel*. Sebagian dari objek-objek dalam citra ini tidak teramati dalam panjang gelombang optik, namun bersinar terang dalam inframerah karena radiasi gas dan debu yang membentuk bintang-bintang baru. Materi-materi ini terdistribusi secara merata namun pancaran yang paling terang datang dari daerah-daerah pembentukan bintang yang saling terhubung satu sama lain melalui filamen-filamen. Warna biru menunjukkan pancaran radiasi dari debu hangat, sementara warna merah menunjukkan radiasi dari debu dingin. Sumber: ESA dan konsorsium SPIRE dan PACS.

proses fisis yang terjadi selama pembentukan bintang bermassa rendah dapat memberikan pemahaman tentang bagaimana sistem tata surya kita terbentuk dan kemunculan kehidupan di Bumi.

Sementara keruntuhan gravitasi berlanjut, beberapa material akan membentuk cakram sebagai akibat dari konservasi energi dan momentum. Studi-studi teoritis tentang sifat-sifat cakram tidak dimulai hingga tahun 1970an oleh Shakura dan Sunyaev. Bukti awal tak langsung mengenai keberadaan cakram akresi ditemukan melalui citra polarisasi optik dan garis-garis molekul. Akan tetapi, baru pada tahun 1989 dilakukan studi pertama tentang statistik cakram oleh Strom dan seawat, berkat data yang diambil oleh satelit IRAS (*Infrared Astronomical Satellite*, Satelit Astronomi Inframerah). Mereka mengamati cakram melalui pancaran radiasi dari debu hangat pada cakram. Bukti kunci keberadaan cakram adalah citra optik langsung cakram



Gambar S.2 — Sebuah citra optik sebuah cakram protoplanet, diambil oleh Teleskop *Hubble*. Debu di dalam cakram menghalangi pancaran radiasi latar gas dan debu. Citra serupa juga diambil pada tahun 1993 oleh O'Dell yang menjadi bukti kunci keberadaan piringan di sekitar bintang-bintang muda. Sumber: J. Bally (Universitas Kolorado) dan H. Throop (SWRI)

pada tahun 1994, dengan menggunakan Teleskop Antariksa *Hubble* oleh O'Dell dan sejawat (lihat Gambar S.2). Kini telah diketahui bahwa piringan cakram selalu melingkupi setiap bintang muda dan merupakan bagian penting dalam pembentukan bintang dan planet.

Di dalam cakram ini, planet pada akhirnya akan terbentuk. Pada saat ini ada sekitar 1000 planet yang sudah dikonfirmasi mengorbit bintang lain, dan lebih dari 3000 kandidat¹. Skenario yang paling digemari pada saat ini adalah bahwa planet-planet ini terbentuk melalui bulir-bulir kecil debu yang menggumpal membentuk bulir yang berukuran lebih besar. Akan tetapi, bulir-bulir yang lebih besar (radius > cm) cenderung bergerak dengan kecepatan yang lebih tinggi, namun tidak lebih cepat dari kecepatan maksimal sebuah bulir berukuran 1 meter. Bulir yang bergerak cepat ini dapat menumbuk bulir lain dan akan pecah menjadi pecahan-pecahan kecil, atau bergerak masuk menuju bintang. Masalah ini menyulitkan pembentukan batuan yang ukurannya lebih besar dari 1 meter, yang menjadi syarat pembentukan planet bebatuan seperti Bumi. Permasalahan dalam pembentukan bintang ini yang disebut rintangan ukuran meter. Satu solusi yang memungkinkan adalah keberadaan bulir-bulir es dan debu, yang diusulkan oleh Eddington pada tahun 1937 dan, akhirnya, dideteksi oleh Gillet dan Forrest pada tahun 1973. Pada tahun-tahun terakhir setelah banyaknya survey dengan menggunakan teleskop-teleskop landas Bumi maupun observatorium antariksa, nampak jelas bahwa air adalah salah satu penyusun utama es-es ini, saat molekul-molekul membeku menjadi bulir debu dingin. Es ini diduga membantu partikel-partikel debu saling menempel dan membentuk bebatuan di dalam cakram. Pada tahapan dini evolusi cakram, mereka mengandung sejumlah besar gas, yang akan menjadi penting bagi pembentukan planet-planet raksasa yang kaya akan gas seperti Jupiter.

Disertasi ini difokuskan pada proses-proses fisika yang terjadi pada tahapan paling dini pembentukan bintang, $\sim 10^{4-5}$ tahun setelah kontraksi gravitasi sebuah inti padat. Sudah banyak disepakati bahwa planet terbentuk di dalam cakram dan bahwa cakram memegang

¹Lihat <http://exoplanets.org> untuk jumlah yang lebih baru.

peran penting dalam pembentukan dan evolusi bintang. Pembentukan dan evolusi dini bintang tidak sepenuhnya dipahami. Pertanyaan-pertanyaan utama disertasi ini adalah sebagai berikut:

- Apakah cakram seperti yang mengitari bintang-bintang pra-deret utama sudah ada ketika bintang baru saja lahir?
- Apakah cakram tersebut dapat diamati dan bagaimana mereka dapat dibedakan dari selubung yang menjadi tempat kelahiran bintang?
- Apakah struktur fisis dan kimiawi cakram ini konsisten dengan model mutakhir pembentukan cakram?
- Sestabil apakah cakram yang terbenam di dalam selubung, dan dapatkah mereka menahan laju keruntuhan tinggi dari selubung?
- Seberapa besar cakram yang terbenam berkontribusi pada garis-garis molekul yang diamati?

Proses radiatif: Kontinum debu dan garis-garis molekul

Karakteristik benda-benda bintang muda secara umum disimpulkan dari radiasi kontinum yang dipancarkan oleh debu. Debu menghangat dengan cara memproses ulang pancaran radiasi bintang pada energi tinggi (gelombang pendek) menjadi foton energi rendah (gelombang panjang). Struktur temperatur debu ini dikendalikan oleh energi yang dipancarkan oleh bayi bintang seiring dengan pengumpulan material-material dari ruang lingkungannya. Debu tersebut kemudian menangkap cahaya dengan cara penyerapan atau hamburan. Debu hangat pada cakram memancarkan cahaya inframerah. Akan tetapi, pada tahapan dini pembentukan bintang, selubung yang dingin dan masif akan menghalangi radiasi yang dipancarkan cakram. Dengan demikian, sulit untuk mempelajari secara langsung pertumbuhan bintang dan cakram yang baru lahir tersebut. Model-model teoritis kemudian digunakan untuk memahami radiasi yang diamati.

Apabila emisi termal debu digunakan untuk mengamati jejak energi sistem keseluruhan yang sedang tumbuh, garis-garis emisi atom dan molekul digunakan untuk mengamati struktur gas di sekitar bintang-bintang muda. Alam semesta diisi oleh berbagai molekul yang berada pada berbagai kondisi fisis yang berbeda. Melalui pengamatan berbagai transisi molekuler, kita dapat menyelidiki berbagai kondisi fisis yang menghasilkan transisi molekuler tersebut, antara lain temperatur, kepadatan, dan struktur kecepatan. Yang paling penting, transisi-transisi ini diskret sedemikian rupa sehingga mereka dipancarkan hanya pada frekuensi tertentu. Transisi molekuler yang paling lumrah ditemui adalah yang berasal dari karbon monoksida (CO). Jejak gerakan-gerakan gas dapat diamati dari pergeseran Doppler yang terjadi pada frekuensi yang diamati. Dengan demikian, dengan mengamati frekuensi dari garis-garis yang diamati, kita dapat mempelajari kinematika dari gas-gas ini.

Perkakas pengamatan

Untuk mempelajari cakram yang terbenam di dalam selubungnya, dibutuhkan pengamatan interferometri pada panjang gelombang milimeter, sehingga kita dapat mengamati emisi debu termal dari selubung bagian dalam, di mana cakram tersebut berada. Interferometri adalah sebuah teknik yang menggabungkan dan mengkorelasikan sinyal dari berbagai teleskop, untuk dapat mencapai resolusi spasial yang tinggi, yang dibutuhkan untuk mengamati cakram. Sebagai contoh, sebuah teleskop 12 m dapat mengamati radiasi CO dari suatu wilayah sebesar 7000 AU (7000 kali jarak Bumi ke Matahari). Dua buah teleskop seperti ini yang terpisahkan sejauh 1 km dapat mengamati radiasi yang sama dari wilayah sebesar 80 AU. Pengamatan-pengamatan

gas dan debu dengan menggunakan interferometri pada panjang gelombang milimeter dan submilimeter telah menjadi kunci dalam menyibakkan cara kerja wilayah-wilayah pembentukan bintang. Teleskop-teleskop ini terpisahkan sejauh jarak tertentu sehingga dapat mencakup berbagai resolusi sudut ($0.5''$ – $20''$). Jarak antara kedua teleskop ini disebut dengan garis dasar (baseline). Sepasang teleskop yang terpisahkan sejauh garis dasar pendek akan mengamati radiasi yang dipancarkan selubung, sementara sepasang teleskop yang terpisahkan sejauh garis dasar sangat panjang akan dapat mengamati radiasi dari cakram. Dengan menggabungkan berbagai-bagai konfigurasi, kita akan dapat mengamati seluruh skala fisis secara serempak. Berbeda dengan pengamatan teleskop konvensional, citra dari sebuah pengamatan interferometri dibangun melalui transformasi Fourier dari koleksi fluks yang sudah dikorelasikan. Pasangan teleskop yang diam memanfaatkan rotasi Bumi untuk mengamati dan memperoleh fluks yang terkorelasi. Kita membutuhkan banyak fluks yang terkorelasi untuk dapat membangun citra yang terpercaya. Pengamatan yang digunakan dalam disertasi ini lazimnya memiliki lebih dari 5000 titik fluks yang terkorelasi. Fasilitas terbaru dalam interferometri milimeter adalah Rangkaian Milimeter Besar Atacama (*Atacama Large Millimeter Array* atau ALMA, terdiri atas 66 teleskop) di Chile. Dengan jumlah teleskop yang begitu besar, akan lebih mudah mengamati struktur-struktur redup suatu pembentukan bintang yang sedang berjalan.

Disertasi ini dan pandangan ke depan

Disertasi ini menjelajahi baik aspek teoritis maupun observasional dari pembentukan cakram pada tahapan dini pembentukan bintang. Model semi analitis dan model hidrodinamika numerik telah digandengkan dengan berbagai perkakas hantaran radiasi kontinum debu. Garis-garis emisi molekuler yang diprediksikan kemudian dibandingkan dengan pengamatan. Simulasi dan prediksi ini juga didampingi dengan pengamatan spasial dan spektral resolusi tinggi garis-garis emisi CO dengan ketebalan optik yang rendah dari objek-objek bintang muda yang tidak terlalu tertanam (i.e. lebih lanjut dalam tahapan evolusinya) dalam selubung. Pengamatan-pengamatan ini dilakukan dengan menggunakan Interferometer Plateau de Bure (PDBI) di Perancis. Berikut ini adalah garis-garis besar hasil disertasi ini:

- Dalam **Bab 2** garis-garis kontinum dan molekuler disimulasikan dengan menggunakan simulasi hidrodinamika tiga dimensi yang mengikutkan medan magnetik. Keberadaan medan magnetik dapat mencegah terbentuknya cakram. Ini merupakan sebuah permasalahan yang sudah diketahui dalam astrofisika. Dua dari simulasi-simulasi ini digunakan untuk meneliti persamaan dan kesamaan antara simulasi yang membentuk cakram dan yang tidak. Prediksi-prediksi simulasi tiga dimensi kemudian dibandingkan dengan model-model semi-analitis dua dimensi pembentukan bintang dan cakram. Perbandingan antara keduanya menunjukkan bahwa dibutuhkan pengamatan-pengamatan interferometris seperti yang akan dihantarkan oleh ALMA untuk dapat mempelajari proses pembentukan cakram. Dengan demikian, di masa depan akan dimungkinkan untuk menguji model-model teoritis ini.
- Pada tahapan terdini pembentukan bintang, cakram dapat dingin dan masif. Ini akan mengarah pada kontraksi gravitasi ke dalam dirinya sendiri dan, dengan demikian, menciptakan ketidakstabilan. Sebagai tambahan, ketidakstabilan terjadi saat material-material di sekitar jatuh di atas cakram tersebut. Ketidakstabilan seperti ini telah diusulkan sebagai mekanisme pembentukan planet dengan adanya pecahan-pecahan cakram. **Bab 3** menyelidiki, dengan simulasi tiga dimensi, apakah cakram dapat pecah apabila sejumlah besar materi jatuh menumpuk di atasnya. Hasilnya menunjukkan bahwa cakram tidak terpecah, tetapi mengalami penyaluran materi yang pesat menuju bintang.

- **Bab 4** menghadirkan prediksi evolusi karakteristik garis-garis molekuler dengan menggunakan model dua dimensi. Emisi garis-garis molekuler karbon monoksida disimulasikan dengan mengikutkan garis-garis yang dimati oleh *Herschel* baru-baru ini. Prediksi-prediksi pada daerah gelombang panjang (milimeter) dibandingkan dengan garis-garis pada daerah inframerah. Dua himpunan garis-garis ini berasal dari daerah yang berbeda. Pancaran pada daerah inframerah disebabkan oleh energi yang dilepaskan karena pergantian rotasi dan getaran molekul sementara pada gelombang panjang disebabkan oleh pergantian rotasi. Terjadi pergantian energi yang lebih besar pada daerah inframerah, sehingga dengan demikian kita dapat menyelidiki komponen gas yang lebih hangat.
- **Bab 2 dan 4** menunjukkan bahwa cakram yang terbenam dalam-dalam dapat dengan mudah dikuak oleh pengamatan spasial dan spektral resolusi tinggi garis-garis molekuler. Pancaran ini seharusnya dipancarkan oleh cakram jika sejumlah besar selubung telah tertiuip menjauh sebagaimana diharapkan dalam sistem-sistem yang telah berevolusi lebih lanjut. **Bab 5** menghadirkan pengamatan interferometris garis-garis ^{13}CO dan C^{18}O pada transisi rotasi $J = 2 - 1$ dari empat protobintang bintang yang telah dikenal dengan baik. Tiga dari empat benda ini mengisyaratkan keberadaan cakram yang berotasi. Ukuran cakram-cakram ini selaras dengan model dua dimensi pembentukan cakram.
- Keberadaan cakram-cakram ini dapat menjadi sumber pemanasan tambahan. Cakram melepas energi saat ia menghantarkan material ke arah dalam menuju bintang, karena cakram harus mempertahankan konservasi momentum sudut dan energi. Proses enerjik ini memanaskan cakram sedemikian rupa sehingga es hanya dapat ditemukan jauh dari bintang pusat. **Bab 6** menghadirkan studi teoritis spesies-spesies utama es (H_2O , CO , CO_2) pada sebuah cakram aktif di sekitar protobintang yang terbenam. Cakram panas ini diduga diperlukan untuk pembentukan Tata Surya kita. Dengan demikian, Bab ini menghadirkan hubungan antara tahapan-tahapan dini pembentukan bintang dan pembentukan sistem keplanetan. Prediksi-prediksi yang dibuat kemudian dibandingkan dengan emisi air yang teramati di sekitar protobintang.

Pandangan ke masa depan. Pengamatan-pengamatan pada saat ini telah menguak keberadaan cakram berotasi di dalam beberapa ratus AU dari protobintang terselubung. Disertasi ini juga membandingkan cakupan cakram terbenam yang disangga rotasi dengan model pembentukan cakram. Akan tetapi, untuk lebih lanjut mempelajari detail-detail pembentukan cakram dan proses evolusi pada tahapan-tahapan terdini pembentukan bintang, dibutuhkan resolusi spasial dan kepekaan yang akan dimiliki ALMA. Pengamatan garis-garis molekuler dengan resolusi spasial dan spektral yang lebih tinggi akan dapat membedakan antara cakram Keplerian dengan selubung yang runtuh. Untuk menyelidiki struktur temperatur suatu cakram, yang penting untuk menyelidiki proses pemanasan, dibutuhkan pengamatan dua transisi berbeda suatu molekul agar kondisi eksitasinya dapat diselidiki. Lebih lanjut, suatu pengamatan dengan kepekaan tinggi dibutuhkan untuk menyelidiki struktur kecepatan suatu cakram, karena emisi molekuler pada kecepatan tinggi lebih lemah dari pada pusat garis. Akan lebih mudah pada masa depan untuk menguak kinematika pada skala kecil. Struktur kimiawi cakram-cakram muda juga akan menjadi penting dalam memahami pembentukan sistem keplanetan.