



Forum Guru Besar
Institut Teknologi Bandung



Forum Guru Besar
Institut Teknologi Bandung

Orasi Ilmiah Guru Besar
Institut Teknologi Bandung

Profesor Taufiq Hidayat

**MENGINDERA BENDA-BENDA LANGIT
DENGAN GELOMBANG RADIO:
PROSPEK DI INDONESIA MASA DATANG**

27 Maret 2015
Balai Pertemuan Ilmiah ITB

**Orasi Ilmiah Guru Besar
Institut Teknologi Bandung**
27 Maret 2015

Profesor Taufiq Hidayat

**MENGINDERA BENDA-BENDA LANGIT
DENGAN GELOMBANG RADIO:
PROSPEK DI INDONESIA MASA DATANG**



Forum Guru Besar
Institut Teknologi Bandung

Kata pengantar

Judul: MENGINDERA BENDA-BENDA LANGIT DENGAN GELOMBANG RADIO: PROSPEK DI INDONESIA MASA DATANG
Disampaikan pada sidang terbuka Forum Guru Besar ITB,
tanggal 27 Maret 2015.

Hak Cipta dilindungi undang-undang.

Dilarang memperbanyak sebagian atau seluruh isi buku ini dalam bentuk apapun, baik secara elektronik maupun mekanik, termasuk memfotokopi, merekam atau dengan menggunakan sistem penyimpanan lainnya, tanpa izin tertulis dari Penulis.

UNDANG-UNDANG NOMOR 19 TAHUN 2002 TENTANG HAK CIPTA

1. Barang siapa dengan sengaja dan tanpa hak mengumumkan atau memperbanyak suatu ciptaan atau memberi izin untuk itu, dipidana dengan pidana penjara paling lama **7 (tujuh) tahun** dan/atau denda paling banyak **Rp 5.000.000.000,00 (lima miliar rupiah)**.
2. Barang siapa dengan sengaja menyiarkan, memamerkan, mengedarkan, atau menjual kepada umum suatu ciptaan atau barang hasil pelanggaran Hak Cipta atau Hak Terkait sebagaimana dimaksud pada ayat (1), dipidana dengan pidana penjara paling lama **5 (lima) tahun** dan/atau denda paling banyak **Rp 500.000.000,00 (lima ratus juta rupiah)**.

Hak Cipta ada pada penulis

Data katalog dalam terbitan

Taufiq Hidayat

MENGINDERA BENDA-BENDA LANGIT DENGAN GELOMBANG RADIO:
PROSPEK DI INDONESIA MASA DATANG
Disunting oleh Taufiq Hidayat

Bandung: Forum Guru Besar ITB, 2015
viii+52 h., 17,5 x 25 cm
ISBN 978-602-8468-78-7
1. Astronomi 1. Taufiq Hidayat

Segala sembah dan puji syukur kami panjatkan kepada Allah SWT atas segala rahmat dan karunia-Nya sehingga kami dapat mencapai suatu titik dari perjalanan karir kami, yang disimbolkan oleh mimbar ini. Untuk itu kami sangat mensyukurinya dan dengan rendah hati kami banggakan. Hanya dengan bimbingan dan petunjuk-Nya kami akan dapat melanjutkan cita-cita yang tak pernah pupus, untuk selalu menimba ilmu dan berupaya memahami alam semesta milik-Nya ini.

Ucapan terima kasih tak terkira dan dengan segala kerendahan hati kami tujukan kepada yang terhormat Forum Guru Besar Institut Teknologi Bandung, yang telah memberi kesempatan kepada kami untuk menyampaikan Orasi Ilmiah ini di hadapan Sidang Terbuka Forum Guru Besar ITB, dan juga sebagai pertanggungjawaban akademik kami sebagai Guru Besar baru di Institut Teknologi Bandung. Bentuk tanggung jawab itu adalah meneruskan tugas-tugas kecendekiawanan, menjaga kehormatan ilmiah Institut Teknologi Bandung, dan terus berkarya untuk bangsa dan negara.

Buku ini menceritakan sekelumit perjalanan kami dalam menempuh *scientific career*, yang panjang dan berliku, namun tetap dengan rasa cinta, kebanggaan, dan dedikasi yang mendalam. Ilmu pengetahuan teramat banyak dan yang kami miliki masih teramat sedikit. Oleh karena itu, perjalanan tentu masih sangat panjang. Namun, dengan izin-Nya, tekad kami akan tetap tinggi untuk berkarya lebih banyak lagi.

Orasi ilmiah ini kami persembahkan kepada guru-guru kami, para kerabat dan sahabat-sahabat dekat, yang telah membantu, membentuk, dan mendidik kami dalam mengarungi lautan keilmuan. Tanpa jasa mereka, sungguh sangat sulit bagi kami untuk mencapai keadaan seperti sekarang. Harapan kami, akan terus tumbuh generasi baru Indonesia yang semakin melek sains, cinta sains, dan mampu berkontribusi secara berkelanjutan di dunia internasional. Ilmu pengetahuan adalah warisan

intelektual tak ternilai; bagian dari kemanusiaan yang berkelanjutan. Dan astronomi adalah salah satu di antara sains itu; yang memberi makna bagi keberadaan kita di jagad raya ini.

Taufiq Hidayat

Sinopsis

Buku Orasi Ilmiah ini merupakan paparan singkat tentang kontribusi kami di bidang astronomi, khususnya dalam penyelidikan atmosfer benda-benda Tata Surya melalui astronomi radio milimeter dan submilimeter. Melalui kerjasama penelitian bersama kolega peneliti di luar negeri, kami menggunakan beberapa teleskop radio milimeter dan submilimeter *state-of-the-art* di dunia (IRAM dan JCMT), selama lebih dari 15 tahun. Objek yang kami teliti adalah planet raksasa di Tata Surya, dan terutama satelit terbesar Saturnus, yaitu Titan; sebuah objek misterius, satu-satunya satelit beratmosfer tebal, yang memiliki kekayaan senyawa organik. Sebagaimana diketahui, sistem Saturnian telah dikunjungi oleh misi Cassini-Huygens, yang tiba di sana tahun 2004, dan telah menyelesaikan *prime mission*-nya tahun 2009. Titan didarati oleh Huygens Probe pada bulan Januari 2005. Saat ini, wahana Cassini masih melakukan *secondary mission* sampai sekitar tahun 2017.

Beberapa temuan penting sebelum Cassini akan dipaparkan di sini yang merupakan kontribusi dari astronomi radio milimeter, dan ke depan setelah Cassini, penyelidikan terus dilakukan dengan menggunakan array radio generasi terbaru yaitu ALMA di Chile, yang memberikan komplemen penting dari Cassini. Sebagaimana diketahui, daerah mesosfer dan stratosfer bagian atas Titan masih tidak dapat diakses oleh instrumen inframerah Cassini, dan hanya dapat diakses melalui penginderaan milimeter/ submilimeter.

Dalam pengembangan keastronomian di Kelompok Keahlian Astronomi di FMIPA ITB, kami juga mengembangkan studi mengenai pembentukan dan evolusi sistem keplanetan serta merintis studi eksoplanet baik dari sisi teoretis maupun pengamatan. Terkait dengan itu, yang tak kalah pentingnya adalah pengembangan astronomi secara institusional di Indonesia. Astronomi adalah bagian dari ilmu-ilmu masa depan. Ruang angkasa sudah menjadi bagian dari kehidupan keseharian kita. Bangsa yang besar menguasai sains dan teknologi. Oleh karena itu,

bangsa ini juga harus menguasai astronomi. Pada bagian akhir buku ini, kami memaparkan beberapa upaya untuk membesarkan astronomi di Indonesia. Sebuah Observatorium Astronomi Nasional diusulkan, dan kelak harus memberikan kontribusi yang signifikan dalam sains internasional.

Daftar Isi

Kata Pengantar.....	iii
Sinopsis.....	v
1. Pendahuluan.....	1
2. Gelombang Radio Kosmik.....	2
3. Astronomi Millimeter dan Submilimeter.....	4
3.1 Pencarian Molekul di Alam Semesta; Spektroskopi Heterodyne	4
3.2 Teleskop Radio Millimeter dan Submilimeter.....	7
3.3 Interferometer Radio Millimeter.....	8
4. Titan Pre-Cassini Mission: IRAM dan JCMT.....	9
4.1 Mendeteksi Asam Sianida (HCN) di Titan.....	9
4.2 Molekul Prebiotik di Titan: CO, HC ₃ N, CH ₃ CN.....	13
4.3 Rasio Isotopik.....	15
4.4 Koefisien Difusi Eddy dan Fotokimia Atmosfer Titan.....	17
4.5 Pengamatan Interferometrik; Profil Angin Mesosfer.....	18
5. Titan Post-Cassini Mission: ALMA.....	23
5.1 Menapak ke Depan dengan ALMA.....	23
5.2 Map Titan dalam HCN.....	25
5.3 Deteksi Spesies Kompleks Minoritas.....	26
6. Prospek di Indonesia: Teleskop Radio di Observatorium Nasional	28
6.1 Perlunya Observatorium Nasional; Legacy Observatorium Bosscha.....	28
6.2 Perintisan Program Radio di Observatorium Bosscha.....	32
6.3 Program Astronomi Radio di Observatorium Nasional.....	34

6.4 Site Plan Observatorium Nasional.....	35
7. Penutup dan Harapan.....	37
Ucapan Terima Kasih.....	38
Daftar Pustaka.....	40
Curriculum Vitae.....	45

1. Pendahuluan

Astronomi adalah salah satu sains yang secara formal dikembangkan di ITB sejak tahun 1951 (pada waktu itu belum bernama ITB), ketika G. B. van Albada diangkat sebagai Guru Besar Astronomi di *Fakultet Ilmu Pasti dan Alam*, Universitas Indonesia di Bandung, tanggal 18 Oktober 1951 (lihat misalnya di Hidayat et al. 2002, *Buku Kenangan 50 Tahun Pendidikan Tinggi Astronomi di Indonesia*). Profesor van Albada pada waktu itu adalah Direktur Observatorium Bosscha di Lembang. Oleh karena itu, peristiwa ini tentu tidak terlepas dari sejarah Observatorium Bosscha, karena pada hari yang sama, secara resmi Observatorium Bosscha diserahkan kepada Pemerintah Republik Indonesia, dan sejak hari itu dikelola di bawah perguruan tinggi yang kelak bernama Institut Teknologi Bandung (1959).

Sampai hari ini telah lahir lima generasi astronom Indonesia, dan tentu saya yakin, mereka akan terus tumbuh membesar mewarnai pengembangan sains di Indonesia. Dalam Pidato Ilmiah Guru Besar tanggal 20 Mei 2010, Profesor Suhardja D. Wiramihardja telah memaparkan rekam jejak astronomi Indonesia dari beberapa generasi tersebut dan kontribusinya pada sebuah *world class university* (Wiramihardja, 2010). Oleh karena itu, saya tidak akan mengulangi kisah itu, namun perkenankan saya menyampaikan sedikit ‘napak tilas’ pada perjalanan saya menelusuri garda ilmiah ini, berbagai upaya yang dilakukan, serta harapan pada masa depan astronomi di Indonesia.

Astronomi adalah sains yang universal, dan di masa lalu bahkan dipandang sebagai simbol penguasaan negara terhadap ilmu pengetahuan. Kerajaan-kerajaan besar mendirikan observatorium kerajaan dan mengangkat para *royal astronomer*, sebuah tradisi yang masih dipertahankan di Kerajaan Inggris Raya sampai sekarang. Banyak yang tidak menyadari bahwa peradaban kita dewasa ini adalah peradaban berbasis pada sains dan teknologi ruang angkasa. Teknologi komunikasi, navigasi, pemantauan atmosfer bumi dan aktivitas matahari, dan sebagainya, semuanya berbasis kepada teknologi satelit, yang

notabene merupakan salah satu aplikasi dari astronomi–mekanika benda langit. Dalam waktu yang tidak terlalu lama lagi, sumber daya alam dari Tata Surya akan dimanfaatkan oleh manusia. Pengembangan industri dalam orbit sudah bukan khayalan lagi, dan perjalanan ke ruang angkasa juga semakin mudah dan murah, dan mendekati pelayanan massal, seperti penerbangan komersial biasa. Oleh karena itu, bangsa mana pun sudah sepatutnya berpartisipasi mengembangkan astronomi.

Di ranah akademik, hampir semua perguruan tinggi besar di dunia mengoperasikan observatorium astronomi; sebagai contoh, Haystack Observatory di bawah MIT, SubMillimeter Array di bawah Harvard dan beberapa observatorium lain, Caltech juga mengoperasikan beberapa observatorium optik dan radio sekaligus.

Dalam kerangka semacam inilah sungguh sangat strategis mengupayakan bagaimana pengembangan keastronomian ini turut dibentuk di Indonesia. Generasi baru yang partisipatif dan kontributif ini harus dibentuk dan diberi tempat yang baik di Indonesia. Merekalah yang akan meneruskan tradisi ilmu pengetahuan di Indonesia.

2. Gelombang Radio Kosmik

Belum seabad usia gelombang radio secara khusus dieksploitasi dalam astronomi. Adalah Karl G. Jansky, seorang insinyur elektro, yang pertama kalinya menemukan gelombang radio di tahun 1931 dari sumber-sumber di luar Bumi, ketika melakukan kalibrasi dari peralatan yang dia rancang untuk keperluan telekomunikasi. Terdapat sinyal kuat yang muncul setiap harinya maju 4 menit, dari arah tertentu di langit. Jansky menginterpretasikan bahwa sinyal yang diamati pada frekuensi 20 MHz tersebut berasal dari pusat Galaksi Bima Sakti.

Hasil yang diperoleh Jansky ini tidak serta merta menarik perhatian komunitas astronomi. Grote Reber, seorang insinyur yang sangat antusias, meneruskan penemuan Jansky dan membuat sendiri teleskop-teleskop radio pertama di akhir tahun 1930-an. Jan H. Oort lah yang kemudian,

bersama muridnya H. C. van der Hulst di tahun 1945, membawa penemuan gelombang radio ini menjadi bagian dari astronomi baru, yaitu astronomi radio, menjadi suatu disiplin yang kelak berkembang sangat pesat (Wilson et al. 2009). Hingga kini, setidaknya telah ada empat Hadiah Nobel Fisika dianugerahkan kepada penemuan dari astronomi radio untuk astrofisika dan kosmologi.

Gelombang radio dalam komunitas astronomi dibagi dalam empat bagian: gelombang meter (*low frequency*), dekameter, centimeter, dan millimeter/submilimeter, masing-masing membawa informasi dari berbagai fenomena astrofisika yang berbeda-beda. Dalam terminologi teknik komunikasi, rentang centimeter sampai ke submilimeter biasanya masuk kategori *microwave*. Emisi gelombang panjang (meter dan dekameter) biasanya terkait dengan fenomena radiasi nontermal, misalnya radiasi sinkrotron dari partikel-partikel bermuatan atau plasma, semburan dari magnetosfer planet raksasa, aktivitas di kromosfer Matahari, dan sebagainya. Panjang gelombang centimeter mengungkap antara lain penemuan pulsar, benda astrofisika sangat eksotik, yang pada awalnya para astronom pun sulit membayangkan bahwa benda semacam itu betul-betul ada, penemuan struktur Galaksi Bima Sakti melalui emisi hidrogen netral, dan penemuan maser OH dan methanol. Kontinum radio di panjang gelombang centimeter ini juga digunakan untuk memetakan beberapa daerah langit, yang mengantarkan pada penemuan berbagai fenomena energi tinggi, misalnya fenomena jet energetik, keberadaan lubang hitam supermasif dan kuasar. Oleh karena itu, gelombang radio dalam astronomi memperkenalkan para astronom melihat sisi ‘dahsyat’ dari alam semesta. Dan yang tak kalah pentingnya adalah penemuan radiasi kosmik latar belakang (CMB) yang memberikan bukti sangat tegas bahwa alam semesta dimulai dari keadaan yang lebih mampat (*big bang*) dan kemudian terus mengembang seperti kita alami sekarang.

Panjang gelombang millimeter dan submilimeter merupakan jendela terakhir dalam astronomi radio yang baru dibuka besar-besaran pada akhir

tahun 1980-an (pertama kali dirintis di Kitt Peak tahun 1968 oleh Teleskop Radio 12m NRAO; lihat Gordon 2005) dengan hadirnya beberapa teleskop besar generasi baru di beberapa lokasi di dunia; IRAM di Eropa, JCMT di Hawaii, dan Nobeyama di Jepang.

3. Astronomi Radio Milimeter dan Submilimeter

3.1 Pencarian Molekul di Alam Semesta; Spektroskopi Heterodyne

Berbeda dengan pengamatan radio pada gelombang panjang, atmosfer bumi menjadi pengganggu utama bagi pengamatan di rentang milimeter, terutama pada frekuensi di atas 100 GHz. Terlebih lagi pada rentang submilimeter mulai dari frekuensi 300 GHz, sebagian besar wilayah di Bumi praktis kedap bagi transmisi rentang submilimeter akibat serapan uap air. Jendela tersebut hanya dapat dijangkau di beberapa *site* yang cukup tinggi (umumnya di atas 4000 m) dan sangat kering di dunia, misalnya di Gurun Atacama, Chile, Pegunungan Mauna Kea di Hawaii, atau di Dome C, di Kutub Selatan.

Dalam rentang milimeter terdapat garis-garis rotasional dari molekul-molekul, dan umumnya muncul sebagai garis-garis individual. Oleh karena itu, rentang milimeter/submilimeter merupakan domain yang sangat kaya untuk memburu pendeteksian molekul-molekul, terutama molekul-molekul organik, mulai dari yang sederhana (diatomik) sampai yang cukup kompleks. Astrokimia ekstragalaksi, struktur galaksi, medium antarbintang, daerah pembentukan bintang, atmosfer planet, dan sebagainya, menjadi sangat diuntungkan oleh perkembangan dalam astronomi radio milimeter. Demikian pula, pencarian *biomarker* pada berbagai eksoplanet yang telah banyak ditemukan dewasa ini akan sangat bertumpu pada pengamatan di rentang milimeter/submilimeter, selain di inframerah. Sebagaimana diketahui, telah ada beberapa rencana pencarian *biomarker* melalui misi-misi ruang angkasa.

Dalam pengamatan astronomi radio milimeter/submilimeter, teknik *heterodyne* yang dikembangkan dapat memberikan *resolving power* lebih

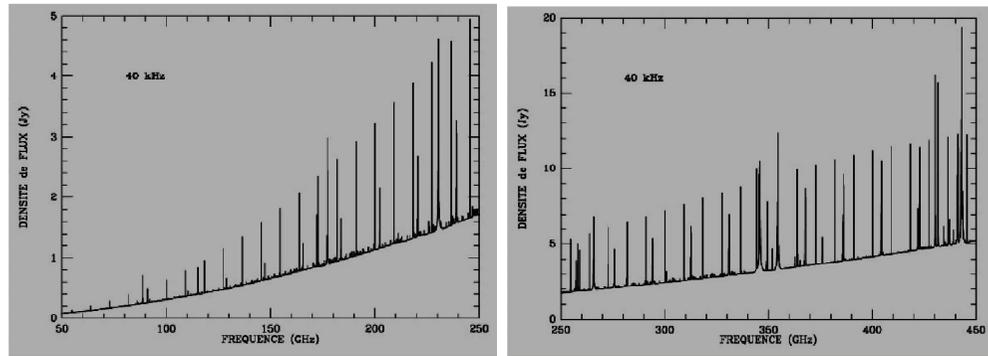
dari 10^5 , sehingga dapat memberikan resolusi spektral sangat tinggi. *Instantaneous bandwidth* yang dapat disediakan pun telah berkembang dari 128 MHz sampai dengan 2 GHz dengan resolusi spektral bervariasi dari 1 MHz sampai dengan yang sangat tinggi sekitar 20 kHz. Hal ini dimungkinkan berkat pengembangan instrumen autokorelator digital. Oleh karena itu, spektroskopi *heterodyne* menemukan aplikasi sangat penting untuk pendeteksian molekul-molekul.

Sebagai contoh, semenjak diamati oleh wahana antariksa Voyager 1, ketika melakukan *fly by* di Titan (satelit terbesar Saturnus) pada bulan November 1980, Titan diketahui memiliki atmosfer dengan kandungan molekul-molekul organik yang cukup beragam. Atmosfernya yang tebal, mengandung kabut organik berwarna kuning, selalu menyelimuti benda tersebut, sehingga permukaannya pun tidak berhasil diamati. Satelit dengan atmosfer yang unik ini segera memotivasi para ilmuwan untuk mengirimkan kembali suatu wahana yang secara khusus ditujukan untuk mempelajari sistem Saturnus dengan Titan sebagai salah satu target utama. Tujuh belas tahun setelah Voyager 1 melintasi Titan, akhirnya sebuah misi khusus didedikasikan ke sistem Saturnus ini berhasil diluncurkan di akhir tahun 1997 dan melakukan penerbangan menuju Saturnus selama tujuh tahun.

Dengan mulai beroperasinya teleskop-teleskop radio milimeter pada akhir tahun 1980-an, Titan merupakan salah satu target utama dalam pencarian molekul-molekul 'eksotik' karena kompleksitas atmosfernya memberikan dugaan bahwa melalui proses fotokimia dapat dihasilkan berbagai molekul-molekul organik dan aerosol yang cukup kompleks.

Pada Gambar 1 ditunjukkan suatu model spektrum atmosfer Titan yang dihitung menggunakan model transfer radiatif garis-demi-garis multi-lapisan dengan memperhitungkan geometri sferis (Hidayat 1997, Hidayat et al. 1997) mengingat ekstensi atmosfer Titan dapat mencapai sekitar setengah radiusnya. Tampak bahwa rentang millimeter dan submilimeter Titan mengandung garis-garis transisi rotasional berbagai molekul yang

potensial untuk dideteksi oleh teleskop-teleskop radio milimeter. Dalam pemodelan ini, basis data molekul diambil dari Katalog JPL untuk molekul di gelombang mikro (Picket et al. 2008) dan katalog Cologne (Müller et al. 2005). Berdasarkan pemodelan inilah penulis bersama beberapa kolega di luar negeri membuat program penelitian tentang Titan sebagai program jangka panjang, dan kini telah mencapai lebih dari 20 tahun.



Gambar 1. Spektrum Titan di rentang millimeter (kiri) dan submilimeter (kanan) dihitung dengan menggunakan model transfer radiatif sferis (Hidayat et al. 1997, Hidayat 1997).

Salah satu keuntungan dari spektroskopi *heterodyne*, seperti telah disebutkan, adalah kemampuannya dalam memberikan resolusi spektral sangat tinggi. Dari persamaan transfer radiatif, yang dapat dinyatakan dalam bentuk diskrit untuk perhitungan numerik:

$$I_\nu = \varepsilon B_\nu(T_0) e^{-\sum_{j=i+1}^N \Delta\tau_j/\mu_j} + \sum_{i=1}^N B_\nu(T_i) (1 - e^{-\frac{\Delta\tau_i}{\mu_i}}) e^{-\sum_{j=i+1}^N \Delta\tau_j/\mu_j}$$

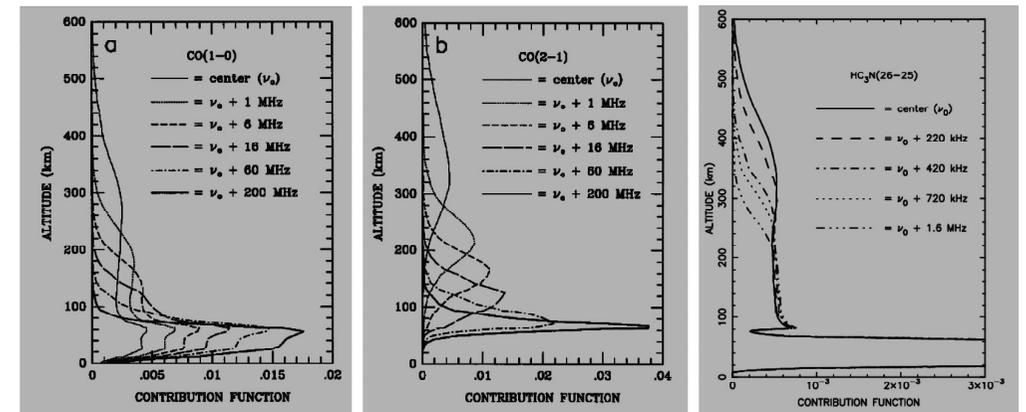
kita dapat menghitung fungsi kontribusi,:

$$W_i = (1 - e^{-\frac{\Delta\tau_i}{\mu_i}}) e^{-\sum_{j=i+1}^N \Delta\tau_j/\mu_j}$$

sedemikian rupa sehingga intensitas atmosfer dapat dinyatakan oleh:

$$I_\nu = \sum_{i=1}^N B_\nu(T_i) W_i$$

dengan B_ν adalah fungsi Planck. Gambar 2 memberikan contoh hasil perhitungan tersebut yang menunjukkan bahwa kontribusi emisi dari suatu spektrum dengan resolusi tinggi dapat berasal dari berbagai ketinggian di atmosfer (dalam hal ini dihitung untuk molekul CO dan HC_3N). Oleh karena itu, jika kita dapat memperoleh bentuk spektrum yang akurat, maka kita dapat menentukan distribusi kelimpahan suatu senyawa di atmosfer. Jelas bahwa pengamatan di beberapa frekuensi transisi rotasional akan memberikan informasi yang makin lengkap.



Gambar 2. Fungsi Kontribusi untuk CO(1-0) (kiri), CO(2-1) (tengah) (Hidayat et al. 1998) dan $\text{HC}_3\text{N}(26-25)$ (kanan) (Marten et al. 2002).

3.2 Teleskop Radio Milimeter dan Submilimeter

Dalam penelitian yang dilakukan semenjak penulis mengikuti program doktoral di Université Paris Diderot, Observatoire de Paris ini, penulis menggunakan beberapa teleskop radio. Yang pertama adalah teleskop radio yang dioperasikan oleh IRAM (*Institut de Radio Astronomie Millimétrique*), yaitu Teleskop *single dish* IRAM 30m (Gambar 3), beroperasi mulai 1986, yang berlokasi di Pico Veleta, Pegunungan Sierra Nevada, Spanyol. Institut ini merupakan kerjasama antara Prancis, Jerman, dan Spanyol.

Teleskop IRAM 30m dirancang untuk bekerja di rentang milimeter dan sedikit di submilimeter (80 – 345 GHz). Di rentang submilimeter, penulis menggunakan Teleskop JCMT (*James Clerk Maxwell Telescope*) berdiameter

15 m (dengan frekuensi antara 300 – 550 GHz) yang berlokasi di Mauna Kea, Hawaii. Teleskop ini dioperasikan oleh UK, Belanda, Canada, dan University of Hawaii, mulai tahun 1988. Di kelasnya, teleskop ini merupakan teleskop submilimeter terbesar di dunia dilengkapi dengan beberapa receiver dan kamera submilimeter (SCUBA) yang sangat unik.



Gambar 3. Teleskop radio milimeter antenna tunggal, IRAM 30m (kiri) yang terletak di Pico Veleta, Sierra Nevada, Spanyol, di ketinggian 2900 m, dan *close up* antenna teleskop radio submilimeter JCMT 15m (kanan) yang terletak di Mauna Kea, Hawaii, di ketinggian 4200 m.

3.3 Interferometer Radio Milimeter

Interferometer radio memiliki kapabilitas yang tidak dapat diberikan oleh teleskop antenna tunggal terutama dari segi resolusi sudut dan kalibrasi absolut. Dalam program kami, interferometer IRAM Plateau de Bure merupakan instrumen penting untuk penelitian kami, untuk pengamatan objek Tata Surya. Semenjak beroperasi penuh tahun 1990, Titan juga diamati mulai dari penggunaan hanya 3 antenna sampai dengan 5 antenna di tahun 2000-an.

Interferometer IRAM Plateau de Bure (PdBI) merupakan interferometer millimeter terbesar di dunia yang berlokasi di Alpen Prancis, dekat Grenoble. Mulai tahun 2014 yang lalu, interferometer ini memiliki 7 antenna dan sekarang bernama NOEMA (*NORthern Extended Millimeter Array*).

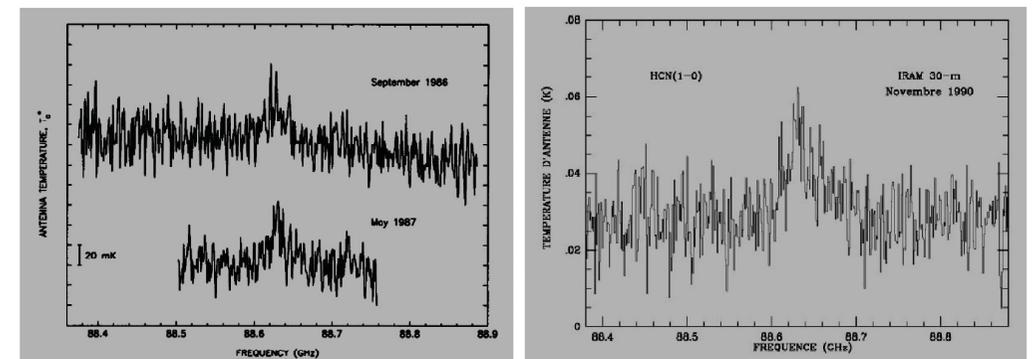


Gambar 4. Interferometer radio milimeter IRAM Plateau de Bure yang terletak di Pegunungan Alpen Prancis pada ketinggian 2550 m. Saat ini telah bekerja dengan 7 buah antenna berdiameter 15 m.

4. Titan Pre-Cassini Mission: IRAM dan JCMT

4.1 Mendeteksi Asam Sianida (HCN) di Titan

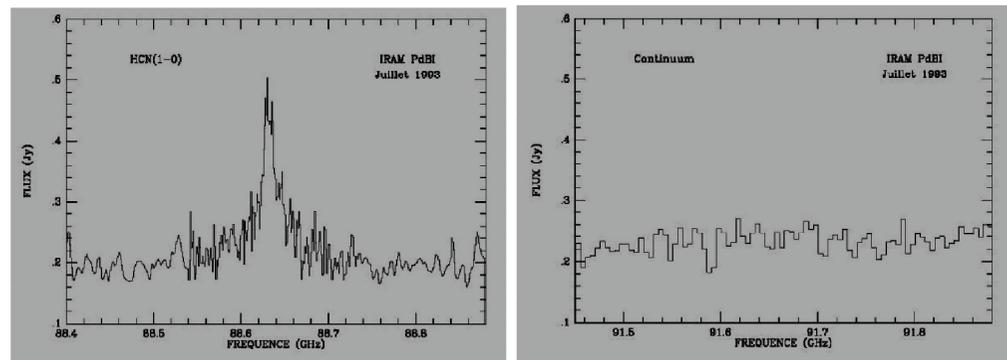
Proposal pengamatan secara rutin diajukan setiap semester (dengan satu sampai dua proposal) ke kedua institusi tersebut (IRAM dan JCMT). Berikut ini penulis ingin menggarisbawahi sulitnya pengamatan di rentang gelombang pendek ini, walaupun menggunakan teleskop yang sangat sensitif. Hal ini diakibatkan terutama oleh lemahnya sumber-sumber astronomis di rentang tersebut.



Gambar 5. Deteksi HCN(1-0) di atmosfer Titan menggunakan teleskop radio IRAM 30m (Tanguy et al. 1990) dengan resolusi spektral 1 MHz dan bandwidth 512 MHz. Pengamatan di gambar kiri merupakan deteksi *ground based* pertama. Upaya pengamatan berikutnya dilakukan pada November 1990 (kanan). Nisbah sinyal terhadap derau hanya sekitar $S/N \approx 3$.

Sebagai contoh, di Titan pada frekuensi 90 GHz, fluks energi yang harus dikumpulkan oleh teleskop radio adalah $\sim 0,2$ Jy (jansky); dengan $1 \text{ Jy} = 10^{-26} \text{ W/m}^2/\text{Hz}$. Hal ini kira-kira 100 miliar kali lebih lemah daripada sinyal terlemah yang masih bisa ditangkap oleh perangkat radio (antenna dan receiver) untuk keperluan telekomunikasi.

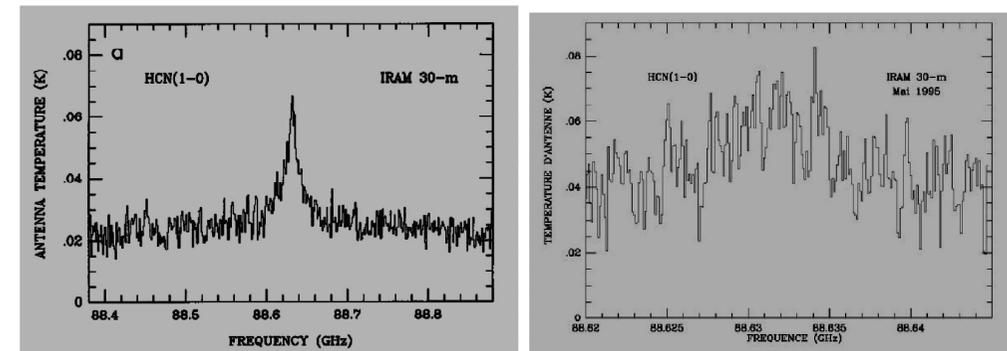
Asam sianida (HCN) di Titan telah dideteksi keberadaannya oleh Voyager 1 namun karena resolusi instrumen inframerah Voyager (IRIS) yang beresolusi rendah, hanya kelimpahan rata-rata saja yang dapat diperoleh. Ketika IRAM 30m mulai beroperasi, deteksi landas bumi pertama akhirnya berhasil dilakukan (Tanguy et al. 1990) namun dengan nisbah sinyal terhadap derau yang relatif rendah ($S/N \approx 3$), ditunjukkan pada Gambar 5.



Gambar 6. Pengamatan HCN(1-0) menggunakan Interferometer IRAM Plateau de Bure. Pengamatan ini merupakan deteksi interferometrik pertama (Hidayat 1997). Pengamatan dengan interferometer memungkinkan diperoleh kalibrasi absolut dalam kerapatan fluks.

Pengamatan interferometrik pertama juga akhirnya berhasil dilakukan menggunakan interferometer IRAM PdBI (lihat Gambar 6). Pada waktu itu, pengamatan dilakukan dengan menggunakan konfigurasi kompak agar piringan Titan tidak mengalami *resolved* (hal itu belum menjadi target utama pada waktu itu). Tampak bahwa *dual band* yang diberikan oleh sistem receiver IRAM memberikan pengukuran kontinum (pada 91,5 GHz) juga dapat dilakukan secara simultan, bersama spektrum HCN(1-0) di frekuensi 88,63 GHz (Hidayat 1997). Dibandingkan dengan pengamatan

single dish sebelumnya, maka *line shape* dari HCN kali ini telah terekam dengan baik setelah integrasi sekitar 5 jam pengamatan.

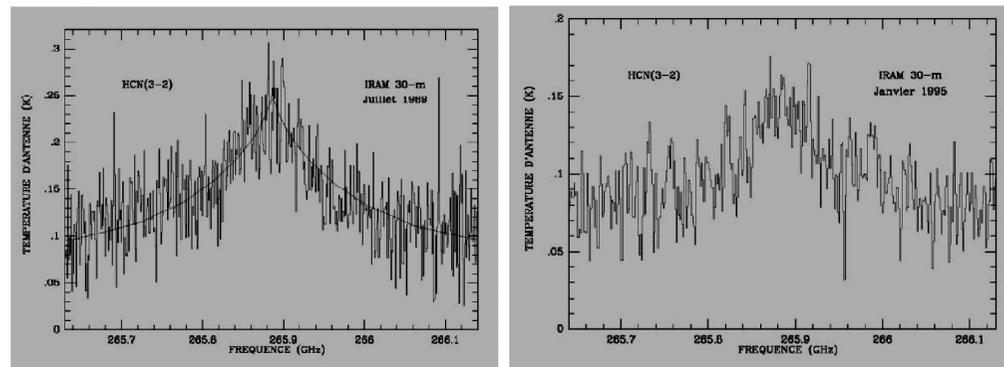


Gambar 7. Upaya pengamatan HCN(1-0) untuk memperoleh spektrum dengan nisbah sinyal terhadap derau yang lebih tinggi ($S/N \approx 14$) akhirnya berhasil diperoleh menggunakan teleskop radio IRAM 30m (Hidayat et al. 1997). Namun pada resolusi yang lebih tinggi (312 kHz) nisbah sinyal terhadap derau hanya sekitar $S/N \approx 4$ (Hidayat et al. 1995).

Agar didapat informasi kelimpahan sebagai fungsi ketinggian yang akurat, maka perlu diperoleh S/N yang cukup tinggi (>10) dan pada resolusi spektral setinggi mungkin yang dapat dicapai. Akhirnya tujuan memperoleh nisbah sinyal terhadap rasio yang cukup tinggi didapat, seperti ditunjukkan pada Gambar 7, dengan $S/N \approx 14$ untuk resolusi 1 MHz (Hidayat et al. 1997), namun pada resolusi yang lebih tinggi (312 kHz), S/N masih belum mencapai angka sekitar 5. Sebagaimana dapat dihitung melalui fungsi kontribusi, resolusi spektral yang lebih tinggi akan memberikan informasi kelimpahan pada level atmosfer yang lebih tinggi dengan asumsi profil termal tertentu.

Pada transisi rotasional yang lebih tinggi, HCN dapat diamati pada $J=3 \rightarrow 2$ di frekuensi 265,88 GHz. Menurut perhitungan fungsi kontribusi, *probing* dari garis ini dapat mencapai ketinggian di atas 400 km apabila nilai S/N cukup tinggi. Spektrum HCN(3-2) yang didapat cukup lebar, tidak dapat dicakup oleh *bandwidth* dari spektrometer filterbank, yang pada waktu itu hanya dapat menjangkau sebesar 512 MHz untuk resolusi 1 MHz (lihat Gambar 8). Dengan JCMT, HCN(4-3) juga berhasil diamati pada frekuensi 354 GHz, namun spektrumnya jauh lebih lebar, sehingga tidak

dapat memberikan kendala yang lebih baik bagi penentuan profil kelimpahan HCN.

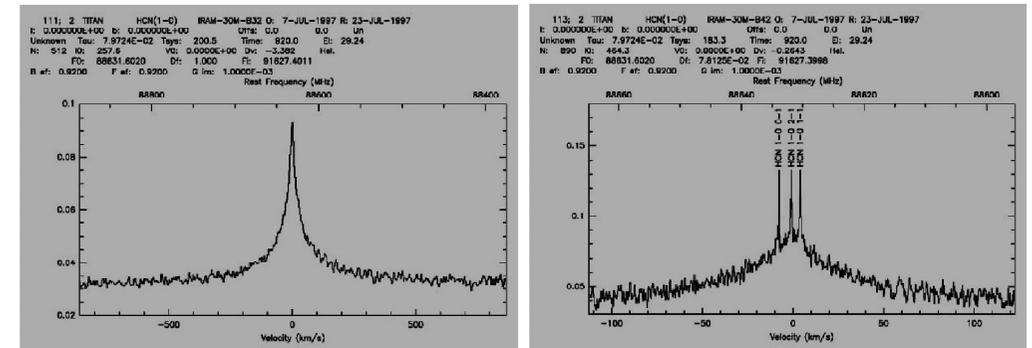


Gambar 8. Pengamatan HCN juga dilakukan pada transisi rotasional yang lebih tinggi $J=3 \rightarrow 2$ pada frekuensi 265,88 GHz. Spektrum HCN tampak lebih lebar (Hidayat 1997).

HCN merupakan molekul precursor dari berbagai jenis senyawa nitril dan diperlukan untuk pembentukan asam amino yang jauh lebih kompleks. Di Titan, kelimpahan HCN di stratosfer bagian atas dapat mencapai sekitar 8 ppm, namun kelimpahannya diketahui bergantung pada musim di Titan. HCN mengalami kondensasi di stratosfer bagian bawah (ketinggian sekitar 80 km) pada temperatur sekitar 150 K. Oleh karena itu, pemantauan distribusi HCN di Titan dapat membantu memahami mekanisme pembentukan berbagai senyawa lain melalui pemodelan fotokimia. Model fotokimia pertama untuk atmosfer Titan diberikan dalam paper seminal dari Yung et al. (1984) yang menjadi dasar dari berbagai model selanjutnya (Toublanc et al. 1995, Lara et al. 1996), termasuk model-model yang lebih baru (misalnya, Wilson & Atreya 2004, Krasnopolsky 2009, Dobrijevic et al. 2014). Dengan demikian, jika distribusi komposisi kimia sebagai fungsi lintang dan ketinggian dapat diperoleh dan terus dipantau, maka kesempatan memahami atmosfer Titan makin terbuka.

Pengamatan HCN dengan kualitas yang lebih tinggi akhirnya dapat diperoleh setelah integrasi lebih dari 20 jam dengan teleskop IRAM 30m (lihat Gambar 9) pada bulan Juli 1997. Pengamatan ini juga berhasil

mendeteksi untuk pertama kalinya *triplet* HCN(1-0) pada resolusi 78 kHz, sehingga *probing* di atmosfer menjadi semakin tinggi (Hidayat 1997, Hidayat & Marten, 1998).



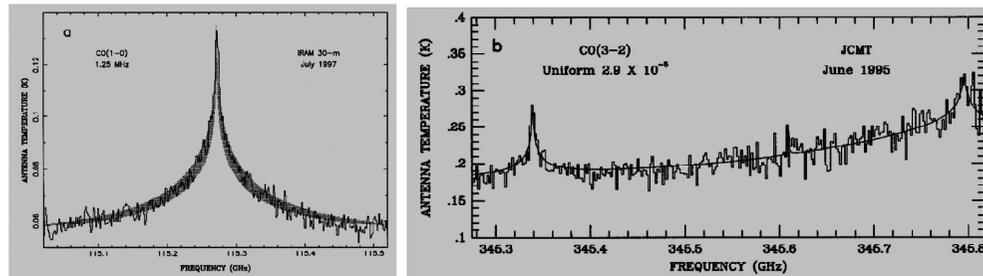
Gambar 9. Pengamatan HCN(1-0) dengan S/N yang sangat tinggi akhirnya berhasil diperoleh pada tahun 1997 (kiri). Pengamatan ini juga berhasil untuk pertama kalinya mendeteksi *triplet* HCN(1-0) pada resolusi 78 kHz (kanan) (Hidayat 1997, Hidayat & Marten 1998).

4.2 Molekul Pre-biotik di Titan: CO, HC₃N, dan CH₃CN

Kekayaan komposisi kimia atmosfer Titan memotivasi pencarian molekul-molekul lain di Titan. *Line survey* secara khusus tidak dapat dilakukan karena memerlukan waktu penggunaan teleskop yang sangat panjang yang biasanya tidak mungkin dialokasikan. Untuk mengatasi hal ini, penulis memanfaatkan fleksibilitas dari *digital autocorrelation spectrometer* di IRAM, yang dapat diatur ke frekuensi pusat tertentu, tanpa ‘mengorbankan’ program utama pengamatan HCN dan CO. IRAM 30m memiliki keunggulan pada ketersediaan 3 sampai 4 receiver secara simultan, sehingga tantangannya adalah bagaimana mengatur konfigurasi receiver untuk mendapatkan *outcomes* yang optimal, sesuai dengan *observing proposal* yang diajukan.

Karbon monoksida (CO) merupakan salah satu molekul yang paling awal ditemukan di Titan (Lutz et al. 1976). Penulis melakukan pengamatan dan analisis data CO secara intensif, pada beberapa transisi (lihat contoh Gambar 10), terkait dengan perdebatan apakah CO terdistribusi secara uniform di atmosfer Titan atau tidak (Hidayat et al. 1998). Hal itu tidak kita

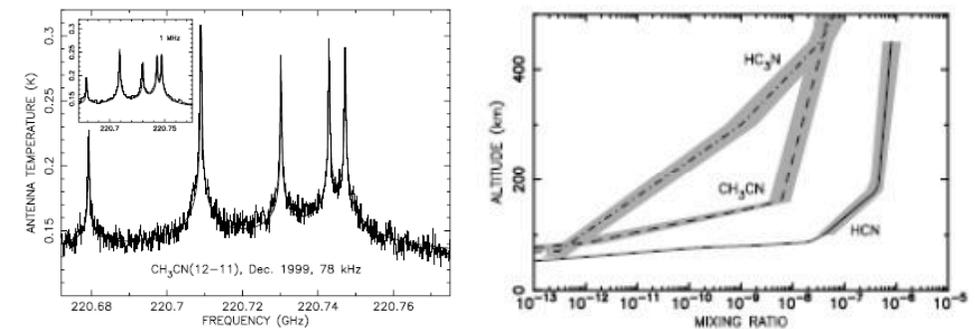
bahas secara terperinci di sini, namun merupakan program yang harus dilanjutkan kelak dengan ALMA. Pengamatan oleh CIRS dari Cassini masih memerlukan konfirmasi lanjutan dengan pengamatan Titan yang bersifat *disk resolved*.



Gambar 10. Pengamatan CO telah dilakukan pada beberapa frekuensi di IRAM 30m maupun di JCMT, dan awalnya menjadi subjek kontroversi apakah CO konstan atau tidak di atmosfer Titan (Hidayat et al. 1998).

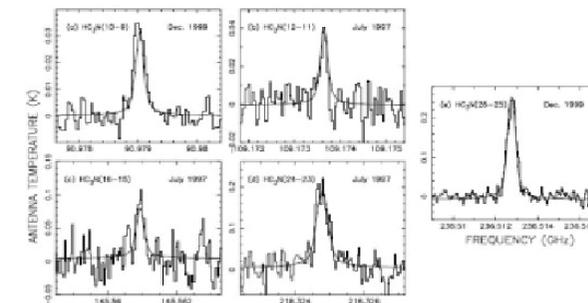
Pengamatan senyawa nitril berikutnya adalah cyanoacetylene (HC_3N) dan acetonitrile (CH_3CN) terutama menggunakan teleskop IRAM 30m. Senyawa CH_3CN sampai sejauh ini hanya bisa dideteksi oleh pengamatan landas bumi milimetrik (dan submilimetrik). Cassini dengan CIRS tidak dapat mendeteksi CH_3CN di stratosfer Titan, namun melalui INMS di ionosfer Titan. Gambar 11 memberikan contoh pendeteksian CH_3CN melalui multiplet $J=12 \rightarrow 11$ dengan S/N lebih dari 50 pada resolusi 78 kHz (Marten et al. 2012).

Cyanoacetylene dideteksi oleh Voyager 1 namun hanya di daerah kutub utara Titan ketika pengamatan dilakukan pada November 1980. Teleskop IRAM 30m digunakan untuk mendeteksi HC_3N pada berbagai transisi seperti ditunjukkan pada Gambar 12. Tampak bahwa garis-garis HC_3N sangat sempit dengan lebar spektrum tidak lebih dari 1 MHz. Pengamatan berhasil dilakukan pada resolusi spektral sangat tinggi, 39 kHz, namun tetap memberikan nilai S/N yang tinggi (Marten et al. 2002). Seluruh pengamatan ini didapat setelah waktu integrasi tidak kurang dari 20 jam, terbagi dalam lima hari pengamatan.



Gambar 11. Senyawa CH_3CN di atmosfer Titan (kiri) berhasil dideteksi untuk pertama kalinya oleh teleskop IRAM 30m (Bézard et al. 1993, Marten et al. 2002). Distribusi vertikal tiga buah senyawa nitril yang didapat dari pengamatan di IRAM 30m (kanan).

Garis-garis multiplet CH_3CN dan beberapa transisi HC_3N memperkenankan perolehan distribusi vertikal *disk-averaged* sampai ketinggian sekitar 600 km. Seperti dapat dilihat pada Gambar 11 (kanan), kedua senyawa ini memiliki kelimpahan yang menurun dengan ketinggian, terutama cyanoacetylene, dan mengalami kondensasi di stratosfer bagian bawah. Hal ini memastikan bahwa kedua senyawa tersebut terbentuk di atmosfer bagian atas, terutama di mesosfer (Marten et al. 2002, Wilson & Atreya 2004).

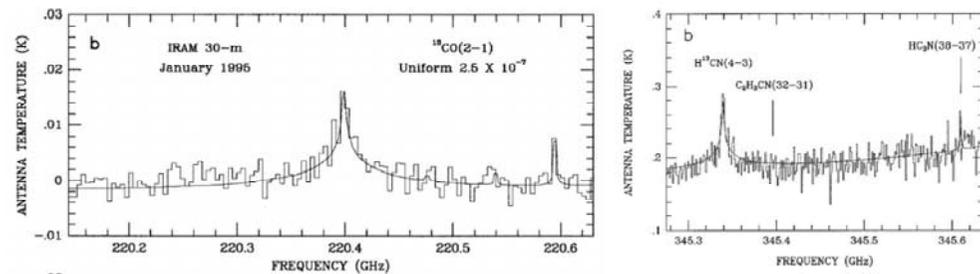


Gambar 12. HC_3N berhasil dideteksi pada beberapa transisi rotasional dengan teleskop IRAM 30m (Marten et al. 2002).

4.3 Rasio Isotopik

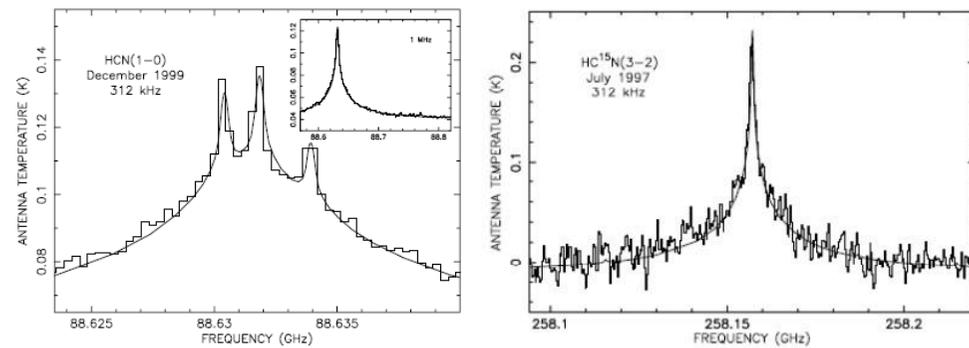
Dengan diperolehnya kelimpahan vertikal dari beberapa senyawa utama ini, maka hal ini membukakan kesempatan untuk melakukan

pengukuran rasio isotopik dari beberapa unsur penting. Sebagaimana diketahui dari studi geokimia, nilai rasio isotopik merupakan informasi penting untuk menelusuri jejak evolusi dari objek tersebut, setelah kita melakukan perbandingan dengan nilai referensi di Tata Surya (biasanya diambil nilai di Matahari dan di Bumi).



Gambar 13. Pengukuran rasio isotopik $^{12}\text{C}/^{13}\text{C}$ dilakukan dengan pengamatan $^{13}\text{CO}(2-1)$ di IRAM 30m dan $\text{H}^{13}\text{CN}(4-3)$ di JCMT (Hidayat et al. 1997, Hidayat et al. 1998).

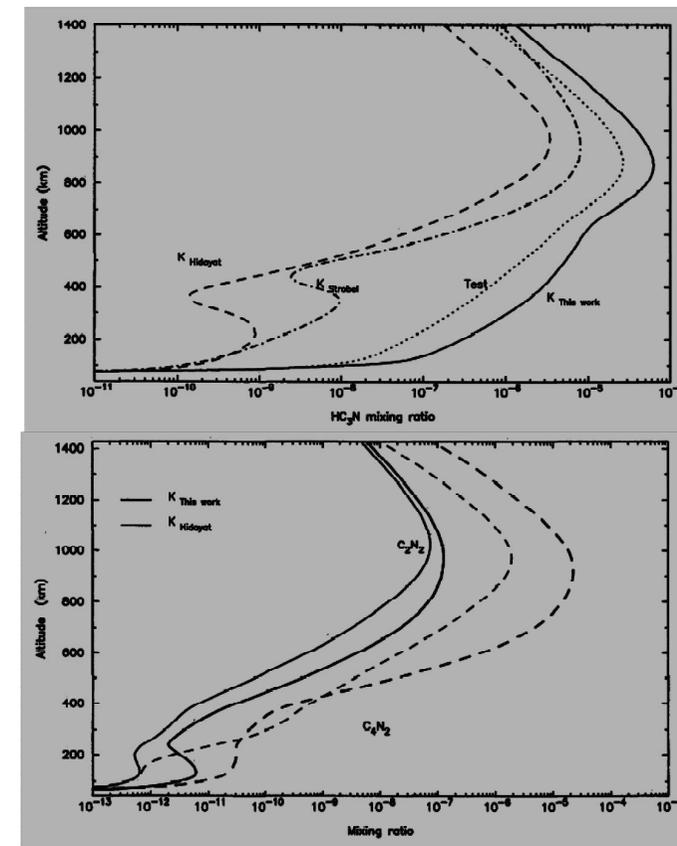
Pengukuran nilai rasio $^{12}\text{C}/^{13}\text{C}$ dilakukan melalui pengamatan $^{13}\text{CO}(3-2)$ dengan teleskop IRAM 30m dan $\text{H}^{13}\text{CN}(3-2)$ dengan teleskop JCMT (lihat Gambar 13). Hasil yang diperoleh untuk nilai $^{12}\text{C}/^{13}\text{C}$ adalah dalam rentang 70 dan 120, yang konsisten dengan nilai terestrial (Hidayat et al. 1997).



Gambar 14. Pengukuran rasio isotopik $^{14}\text{N}/^{15}\text{N}$ dilakukan dengan pengamatan $\text{HC}^{15}\text{N}(3-2)$ di IRAM 30m dan untuk pertama kalinya berhasil menemukan adanya pemerikayaan isotop ^{15}N dalam HCN di atmosfer Titan (Hidayat 1997, Hidayat & Marten 1998).

Sementara itu, pengukuran rasio isotopik $^{14}\text{N}/^{15}\text{N}$ dilakukan melalui pengamatan $\text{HC}^{15}\text{N}(3-2)$ dengan teleskop IRAM 30m (lihat Gambar 14). Hasilnya

merupakan temuan penting bahwa nilai rasio $^{14}\text{N}/^{15}\text{N} = 65$ berbeda sebesar 4,5 kali dibandingkan dengan nilai terestrial. Hal ini berarti bahwa nilai rasio tersebut mengalami pemerikayaan relatif terhadap HCN di Titan (Marten et al. 2002). Pengukuran oleh Cassini mengkonfirmasi hal ini (Vinatier et al. 2007). Dengan demikian, Titan merupakan objek kedua di Tata Surya setelah Mars yang diketahui mengalami pemerikayaan dalam ^{15}N (Fox & Aleksander 1997).



Gambar 15. Profil difusi eddy atmosfer Titan yang digunakan untuk pemodelan fotokimia atmosfer Titan (Lara et al. 1996). Profil K yang diperoleh Hidayat et al. merupakan rujukan untuk pemecahan persamaan kontinuitas di stratosfer dan mesosfer bagian bawah.

4.4 Koefisien Difusi Eddy dan Fotokimia Atmosfer Titan

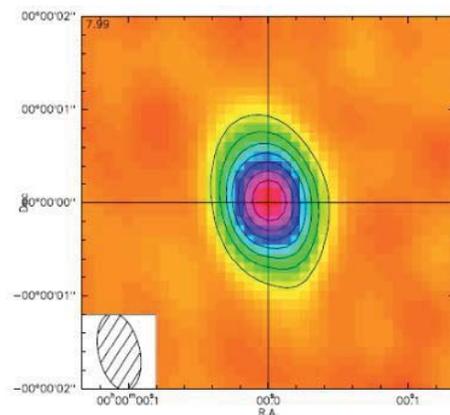
Pemodelan fotokimia atmosfer memerlukan pengetahuan tentang koefisien difusi molekul di bagian atas dan koefisien difusi eddy di

atmosfer bagian bawah. Pengamatan Voyager memberikan informasi koefisien tersebut di atmosfer bagian atas dan hasil pengamatan penulis memberikan informasi profil difusi eddy (K-profile) terutama di stratosfer. Hasil ini memprediksi bahwa stratosfer bagian atas memiliki tingkat turbulensi yang tinggi.

Hasil ini digunakan oleh Lara et al. (1996) dalam pemodelan fotokimia atmosfer Titan untuk mereproduksi hasil-hasil pengamatan serta memprediksi kelimpahan berbagai molekul lain. Gambar 15 memberikan ilustrasi peran profil K yang harus diketahui dengan baik untuk dapat memprediksi kelimpahan berbagai senyawa yang terlibat dalam kimia di atmosfer Titan.

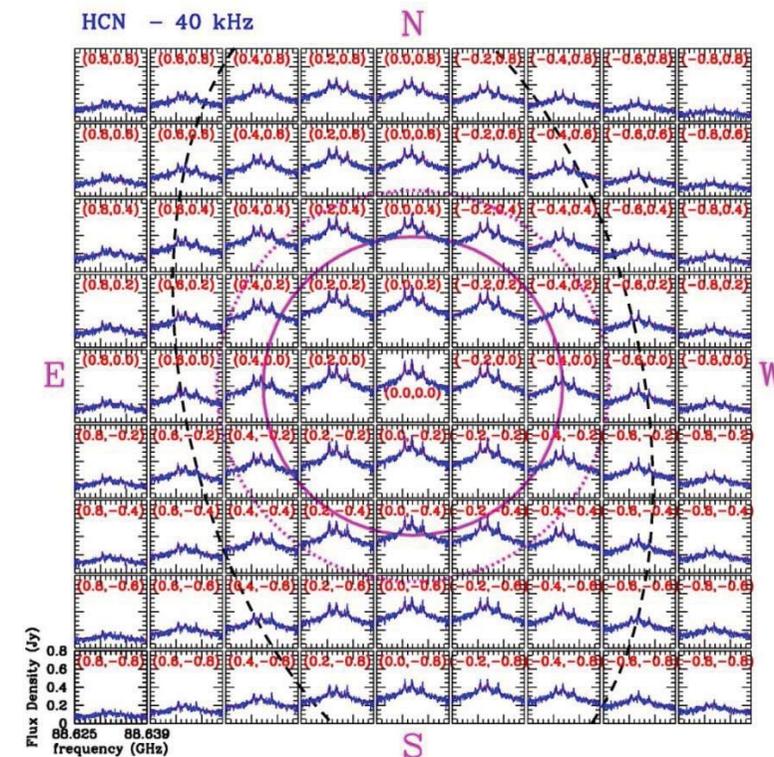
4.5 Pengamatan Interferometrik; Profil Angin Mesosfer

Hasil-hasil yang telah diperoleh dari program *single dish* memotivasi penulis bersama kolega di Observatoire de Paris untuk melanjutkan ke program pengamatan interferometrik menggunakan interferometer IRAM PdBI. Pengamatan dilakukan pada kurun 2001 hingga 2007, dan tidak semuanya berhasil akibat gangguan cuaca. Dengan kata lain, kami mencoba mendapatkan citra Titan dalam panjang gelombang milimeter.



Gambar 16. Pengamatan landas-bumi yang untuk pertama kalinya berhasil *resolved* piringan Titan dilakukan dengan Interferometer IRAM Plateau de Bure (Moreno et al. 2005) sebelum wahana Cassini-Huygens tiba di sistem Saturnian.

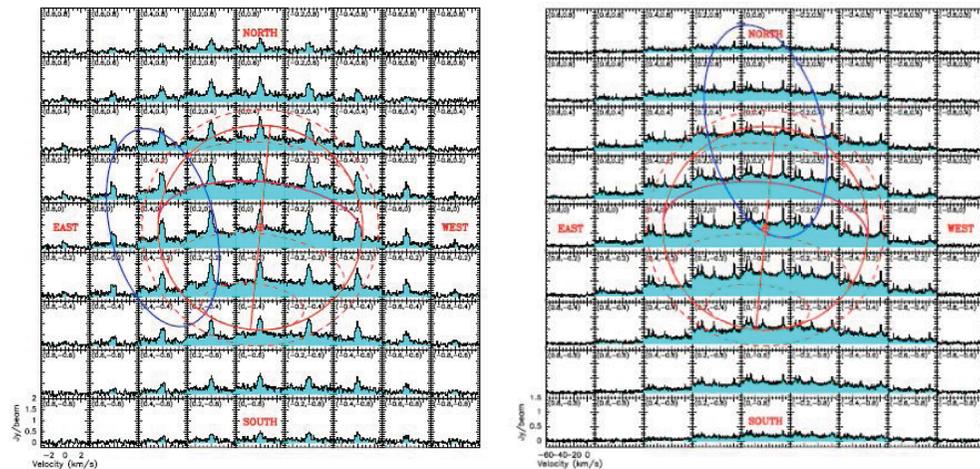
Gambar 16 menunjukkan citra Titan *disk-resolved* pertama yang berhasil diperoleh dari suatu pengamatan radio landas-bumi (sebelumnya VLT melakukan pengamatan di inframerah dengan adaptive optics dan juga dilakukan oleh wahana landas layang Hubble Space Telescope, dan tentu pengamatan *in situ* oleh Voyager, dan kemudian Cassini-Huygens). Citra tersebut diperoleh dari kontinum di frekuensi 227,4 GHz dengan kontur sebesar 0,1 Jy (Moreno et al. 2005).



Gambar 17. *Image cubes* yang berhasil diperoleh untuk HCN(1-0) di sini merupakan langkah lanjutan pengamatan HCN selama lebih dari satu dasawarsa (Moreno et al. 2005). Triplet HCN tampak terdeteksi dengan jelas walaupun piringan Titan tidak *resolved* pada frekuensi ini.

Seri pengamatan yang dilakukan dalam kurun 2001-2004 juga berhasil memperoleh beberapa *image cubes* pada berbagai frekuensi menggunakan interferometer IRAM PdBI tersebut. Gambar 17 menunjukkan *image cubes*

dari HCN(1-0) dengan resolusi spektral 78 kHz, namun piringan Titan tidak ter-resolved pada observing frequency 88,6 GHz ini. Oleh karena itu, strategi pengamatan perlu dapat menjangkau frekuensi yang lebih tinggi, namun biasanya temperatur sistem meningkat akibat gangguan dari uap air di atmosfer, terutama pada frekuensi di atas 260 GHz. Jelas bahwa strategi pengamatan yang tepat harus direncanakan dengan tepat agar didapat hasil yang optimal.



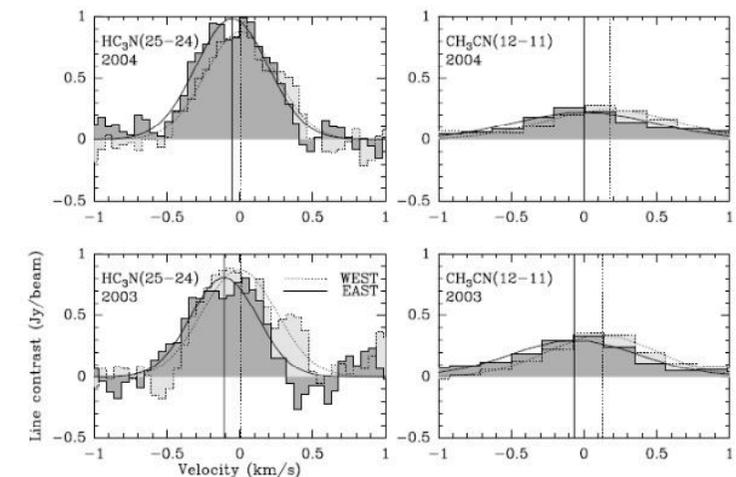
Gambar 18. *Image cubes* juga berhasil diperoleh untuk HC₃N(25-24) dan CH₃CN(12-11) pada frekuensi yang lebih tinggi (Moreno et al. 2005). Piringan Titan tampak ter-resolved dengan baik pada frekuensi ini.

Hasil pengamatan dari *single dish* untuk HC₃N dan CH₃CN yang menunjukkan profil spektrum yang sempit mengilhami pengamatan interferometrik dari garis-garis tersebut, dan dipilih pada frekuensi yang lebih tinggi. Spektrum HC₃N(25-24) pada frekuensi 227,42 GHz dan CH₃CN(12-11) pada frekuensi 220,71 GHz berhasil untuk pertama kalinya memberikan *image cubes* Titan dari suatu pengamatan radio landas bumi (lihat Gambar 18), menggunakan receiver 1.3mm IRAM. Piringan Titan jelas ter-resolved dan pada frekuensi tersebut *synthesized beam* yang diperoleh adalah $\sim 0,84'' \times 0,45''$ yang lebih kecil daripada diameter sudut Titan $\sim 1''$ (dengan ekstensi atmosfer yang diambil adalah 600 km dari permukaan Titan). Teknik *phase self-calibration* digunakan dalam reduksi

data untuk mendapatkan kualitas citra yang lebih baik. Hal ini sangat membantu mengoreksi kesalahan fase atmosferik. Kecepatan relatif Saturnus terhadap Bumi dikoreksi menggunakan efemeris JPL.

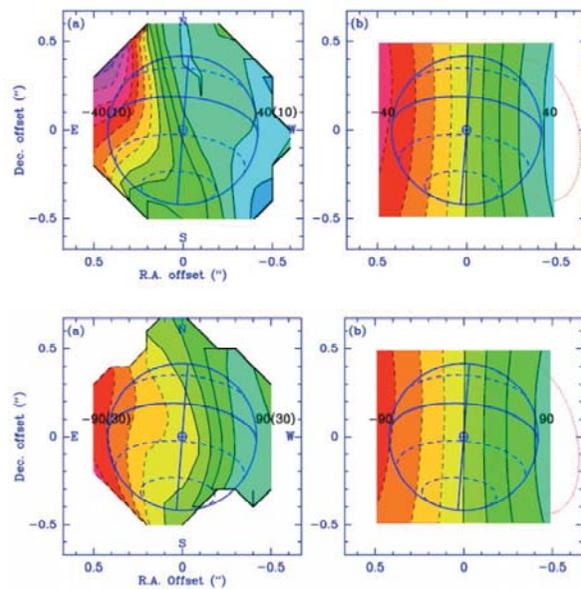
Waktu integrasi untuk kedua pengamatan ini mencapai masing-masing 7,5 jam. Resolusi spektral yang dipilih adalah 40, 160, dan 2500 kHz. Spektrum CO(2-1) juga diamati, namun tidak secara khusus ditunjukkan di sini. Dalam kedua periode pengamatan ini, *leading* dan *trailing hemisphere* Titan berhasil diamati untuk mendeteksi kemungkinan terjadinya perubahan.

Baik resolusi spasial maupun angular yang diperoleh dari pengamatan ini memberikan kemungkinan untuk mempelajari angin zonal di Titan melalui analisis Doppler. Profil dari garis-garis spektrum yang terisolasi difit dengan suatu profil gaussian mengingat bahwa sebagian besar garis-garis tersebut berasal dari pelebaran kolisional yang dapat dimodelkan secara akurat dengan profil Voigt. Gambar 19 memberikan ilustrasi dari analisis ini. Spektrum HC₃N(25-24) memiliki resolusi spektral 40 kHz dan spektrum CH₃CN(12-11) memiliki resolusi 160 kHz, dengan keempat garis multiplet dijumlahkan.



Gambar 19. Analisis Doppler dilakukan pada kedua *image cubes* sehingga dapat digunakan untuk menentukan profil angin di atmosfer Titan (Moreno et al. 2005).

Peta dari kecepatan Doppler (profil angin) akhirnya dapat diperoleh (lihat Gambar 20). Kecepatan positif ditunjukkan oleh garis solid sedangkan kecepatan negatif ditunjukkan oleh garis putus-putus. Selisih nilai kecepatan yang positif menunjukkan bahwa aliran angin zonal di Titan bersifat *prograde*. Dari analisis ini didapatkan bahwa pengamatan ini menghasilkan penginderaan pada dua daerah ketinggian di atmosfer dan didapatkan perbedaan kecepatan angin yang cukup signifikan. Pada ketinggian 300 km di stratosfer kecepatan angin mencapai 160 m/s, sedangkan di mesosfer bagian bawah (450 km) didapatkan kecepatan angin sebesar 60 m/s. Hal ini merupakan pengukuran langsung untuk pertama kalinya bagi kecepatan angin di mesosfer Titan (Moreno et al. 2005), dan diperoleh bahwa Titan mengalami superrotasi seperti Venus (kecepatan rotasi Titan adalah 11,7 m/s).



Gambar 20. Pengamatan profil angin stratosfer dan mesosfer dan untuk pertama kalinya profil mesosferik dapat ditentukan (Moreno et al. 2005). Hal ini mengkonfirmasi bahwa Titan mengalami superrotasi seperti Venus.

Pengamatan sebelumnya oleh Voyager 1 memberikan informasi adanya angin siklostropik pada ketinggian antara 190-230 km sebesar 100 m/s (Flasar 1998). Angin ekuatorial adalah sekitar 110 m/s sedangkan di lintang

tinggi ditemui adanya jet dengan kecepatan mencapai 230 m/s di utara dan 160 m/s di selatan (Bouchez et al. 2003). Studi transpor dinamik menunjukkan bahwa kecepatan angin di termosfer juga sebanding dengan kecepatan di mesosfer yaitu sekitar 60 m/s di ketinggian sekitar 1000 km (Müller-Wodarg et al. 2000).

Program pengamatan dengan Interferometer IRAM PdBI yang dilanjutkan pada kurun 2006-2007 banyak terkendala oleh cuaca, sehingga tidak menghasilkan data dengan akurasi yang baik.

5. Titan Post-Cassini Mission: ALMA

5.1 Menapak ke Depan dengan ALMA

Sebagaimana diketahui, astronomi radio milimeter/submilimeter telah memberikan revolusi substansial dari astronomi di berbagai bidang, mulai dari kosmologi sampai dengan skala benda kecil Tata Surya. Dengan potensinya yang masih terus berkembang, sejak pertengahan tahun 1990-an, rencana pembangunan array submilimeter yang lebih besar mulai dicanangkan, baik di Amerika Utara (NRAO), Eropa (ESO), dan Jepang (NAOJ).

Survey secara independen oleh ketiga lembaga tersebut mengarah pada pemilihan *site* yang sama yaitu di Gurun Atacama, tepatnya di Plateau de Chajnantor, Distrik San Pedro de Atacama, Chile. Kawasan ini merupakan rangkaian dari Pegunungan Andes dengan ketinggian mencapai 5000 m, dicirikan oleh atmosfer yang sangat kering dengan tingkat uap air rata-rata kurang dari 2 mm per bulan. Gurun Atacama kini menjadi *host* dari berbagai fasilitas besar di dunia, termasuk VLT (*Very Large Telescope*), GMT (*Giant Magellan Telescope*), dan E-ELT (*European- Extremely Large Telescope*). Dua teleskop yang terakhir ini sedang dalam tahap konstruksi.

Oleh karena budget yang sangat tinggi, akhirnya ketiga lembaga tersebut bergabung membentuk konsorsium bernama ALMA (*Atacama Large Millimeter/submillimeter Array*) tahun 2002. Kemudian Canada,

Taiwan, Chile, Korea, dan Brazil juga turut bergabung sehingga proyek ini merepresentasikan proyek global terbesar di dunia.

Konstruksi dimulai tahun 2003 dan perlu waktu sampai dengan 10 tahun untuk menyelesaikan mega proyek ini. Dengan 66 buah antenna yang terdiri dari 54 antenna berdiameter 12 m dan 12 antenna berdiameter 6 m untuk pengukuran *total power*, maka array ini menghasilkan *unprecedented sensitivity* dan merepresentasikan seluruh teknologi mutakhir dari antenna, receiver, korelator, pengolahan sinyal, transport antenna, dan sebagainya. *Baseline* terpanjang yang dapat dicapai dalam konfigurasi ALMA adalah sekitar 20 km. Sejak akhir 2011, ALMA telah memulai program *transformational science* dan memulai revolusi baru dalam astronomi.



Gambar 21. Penulis berkesempatan mengunjungi *Operation and Support Facility* ALMA di Chajnantor, Atacama, Chile, Mei-Juni 2011 ketika teleskop-teleskop ALMA masih dalam tahap konstruksi dan *commissioning*. Tampak teleskop submilimeter generasi terbaru (kiri) dan transporter teleskop (kanan) untuk meletakkan antenna dengan konfigurasi tertentu di *Array Operation Site* ALMA.

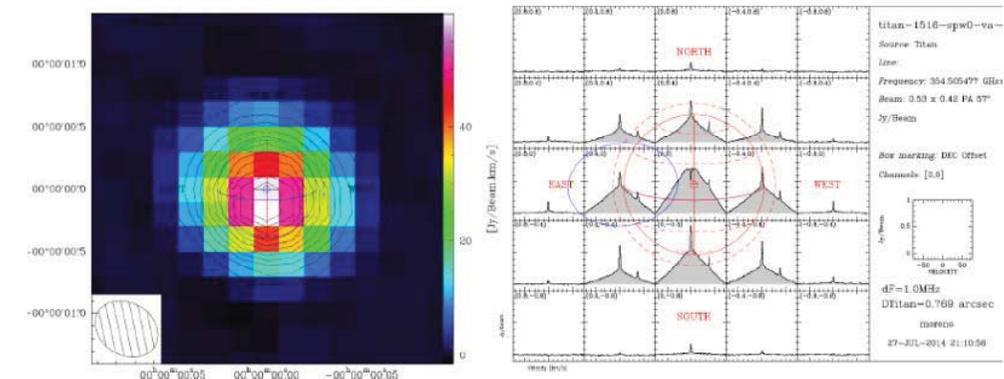
Penulis berkesempatan mengunjungi ALMA di pertengahan 2011 untuk menjalin kerjasama penelitian, ketika ALMA masih dalam tahap penyelesaian dan *commissioning*. Program *Early Science (Cycle-0)* dibuka tahun 2011, dan penulis beruntung karena proposal pengamatan yang diajukan bersama kolega di Observatoire de Paris dan Joint ALMA Observatory (JAO) diterima dalam *the Highest Priority Proposal*.



Gambar 22. Sebagian dari antenna-antenna ALMA di Chajnantor. ALMA merupakan array milimeter/submilimeter terbesar di dunia.

5.2 Map Titan dalam HCN

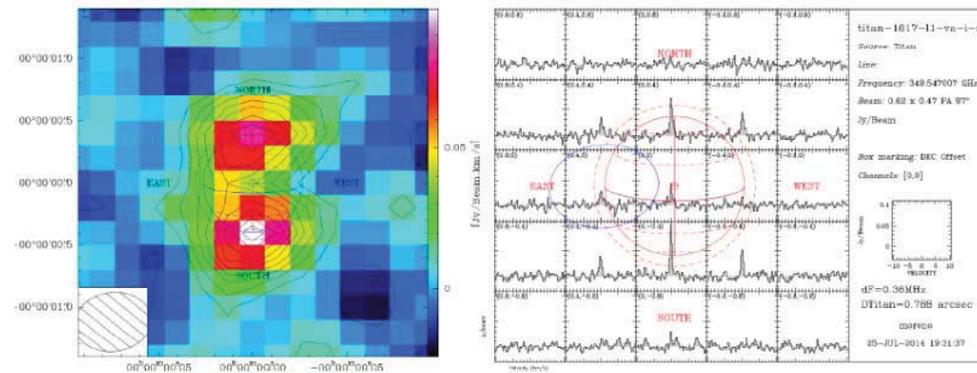
Program yang diusulkan ini berfokus pada pemetaan nitril di Band 6 dan 7 dari ALMA, termasuk HCN, HC₃N, dan CH₃CN. Contoh pengamatan Titan oleh ALMA ditunjukkan pada Gambar 23 untuk molekul HCN yang diamati pada frekuensi 354 GHz (dari transisi $J=4 \rightarrow 3$). Gambar tersebut menunjukkan dengan jelas piringan Titan yang *resolved* dan kualitas *image cubes* dari ALMA, dengan integrasi total yang tidak lebih dari satu jam (Moreno et al. 2014). Namun terlihat bahwa HCN terdistribusi relatif seragam di kedua hemisfer Titan, pada saat pengamatan dilakukan (2012). Berbeda halnya untuk HC₃N dan CH₃CN yang menunjukkan distribusi asimetris antara belahan utara dan selatan, dan dengan kelimpahan yang meningkat terhadap ketinggian di atmosfer.



Gambar 23. Piringan Titan diamati oleh ALMA dan menghasilkan *image cube* untuk HCN(4-3) (Moreno et al. 2014).

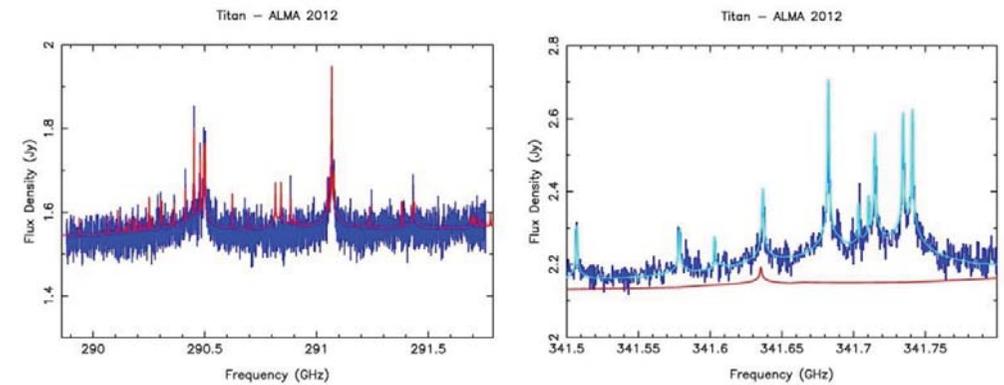
5.3 Deteksi Spesies Kompleks Minoritas

Pencarian senyawa-senyawa kompleks minoritas (yang memiliki kelimpahan dalam orde ppb) merupakan program yang sangat menantang yang dilakukan sejak dini di IRAM maupun JCMT. Deteksi CH₃CN di Titan (Bézard et al. 1993) oleh teleskop IRAM 30m dan deteksi CO dan HCN di Neptunus (Marten et al. 1993) oleh JCMT merupakan contoh sukses yang signifikan. Model termokimia Neptunus harus direvisi total oleh penemuan tersebut. Methanol, formaldehida, HC₅N, C₂H₅CN, dan C₂H₃CN telah dicari, namun belum berhasil, dan hanya diperoleh *upper limit* dari molekul-molekul tersebut (Hidayat 1997). Uap air (H₂O) berhasil dideteksi oleh satelit ISO (Coustenis et al. 1998). Senyawa baru HNC, isomer dari HCN, berhasil ditemukan oleh Herschel (Moreno et al. 2011).

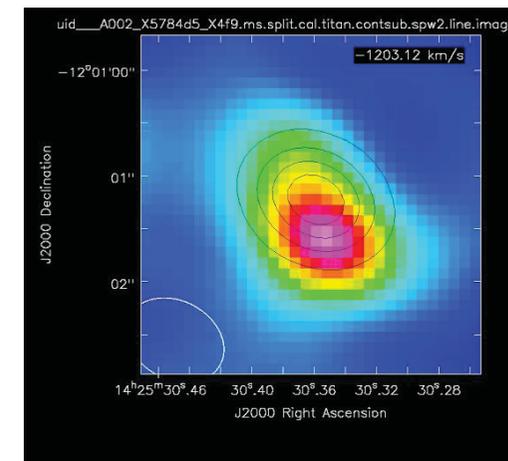


Gambar 24. Senyawa C₂H₅CN untuk pertama kalinya berhasil dideteksi secara spektroskopik oleh ALMA. Distribusinya tampak asimetris (Moreno et al. 2014).

ALMA merupakan sarana yang sangat memadai untuk pencarian spesies baru setelah misi Cassini-Huygens dan misi Herschel (ESA). Pada Gambar 24 ditunjukkan contoh deteksi dari C₂H₅CN yang merupakan deteksi spektroskopik pertama di stratosfer Titan. Senyawa ini dideteksi keberadaannya di ionosfer Titan melalui pengamatan menggunakan spectrometer massa (INMS) dari Cassini (Vuitton et al. 2007). Terlihat jelas bahwa senyawa ini terdistribusi secara asimetris dengan konsentrasi berpusat pada kedua kutub (Moreno et al. 2014).



Gambar 25. Molekul CH₃CCH juga berhasil dideteksi secara spektroskopik oleh ALMA (Hidayat et al. 2015) di Band 6 dan 7.



Gambar 26. Map dari HC₃N dari transisi vibrasional di Titan hasil pengamatan ALMA (Hidayat et al. 2015) di Band 6 dan 7.

Demikian pula molekul CH₃CCH yang pernah dicari dengan Teleskop IRAM 30m akhirnya berhasil dideteksi pada Band 6 dan 7 ALMA. Spektrum yang ditunjukkan pada Gambar 25 berasal dari data kalibrasi untuk pengamatan lain, dan hanya dengan integrasi selama ~5-10 menit saja bisa diperoleh S/N yang cukup baik, yang sekali lagi menunjukkan sensitifitas ALMA yang sangat tinggi (Hidayat et al. 2015). Spektrum HC₃N juga dideteksi pada transisi vibrasional dan pada Gambar 26 ditunjukkan map Titan untuk senyawa tersebut yang menunjukkan asimetri dari

kelimpahannya di atmosfer Titan. Beberapa proyek hasil pengamatan ALMA tersebut saat ini sedang dalam proses analisis data.

Penulis saat ini sedang melanjutkan kerjasama dengan JAO-ALMA untuk beberapa proyek saintifik yang lain, tidak hanya pada pengamatan Titan. Program yang akan melibatkan penelitian mahasiswa program doktor saat ini juga sedang dirintis.

6. Prospek di Indonesia: Teleskop Radio di Observatorium Nasional

6.1 Perlunya Observatorium Nasional; Legacy Observatorium Bosscha

Sebagaimana telah kita lihat, fasilitas penelitian kelas dunia menjamin hasil-hasil penelitian yang sangat baik dan tentu dapat menstimulasi atmosfer penelitian yang produktif. Dalam konteks inilah merupakan *concern* yang sangat besar bahwa fasilitas yang sangat memadai tersebut dapat disediakan di Indonesia.

Terkait dengan hal itu, sejak tahun 2006, selain melakukan program penelitian dengan topik 'personal', penulis bersama beberapa kolega di KK Astronomi dan di fakultas lain di ITB mencoba merintis program-program penelitian yang terkait dengan subjek riset untuk pengembangan institusi yang diproyeksikan sebagai program jangka panjang.

Observatorium Bosscha merupakan fasilitas utama untuk astronomi Indonesia. Modernisasi pada berbagai instrumen dan menghadirkan peralatan baru merupakan suatu keharusan. Namun setelah lebih dari delapan dasawarsa memberikan pelayanan astronomi itu, kondisi situs Lembang telah mengalami urbanisasi yang cukup signifikan. Polusi cahaya, seperti banyak dialami oleh berbagai observatorium besar di dunia, menjadi ancaman yang sangat serius bagi kelangsungan suatu pengamatan astronomi tingkat lanjut.

Selain itu, dengan perkembangan penelitian tingkat lanjut di astronomi itu sendiri, jumlah astronom aktif untuk penelitian astronomi perlu

ditambah agar dapat dicapai suatu *critical mass* yang dapat menjamin kelangsungan sains astronomi di Indonesia.

Dalam konteks inilah dirasakan perlunya 'memperluas' Observatorium Bosscha di tingkat nasional, yaitu mempersiapkan suatu fasilitas baru di tempat lain di Indonesia yang berstatus sebagai Observatorium Astronomi Nasional. Karena berstatus nasional, berarti fasilitas tersebut bersifat terbuka bagi peneliti di Indonesia, baik dari perguruan tinggi maupun lembaga-lembaga penelitian nasional (LAPAN, LIPI, BPPT, BMKG, BIG, dan sebagainya). Hal itu sangat lazim ditemui di negara-negara maju di dunia. Perlu pula dicatat bahwa sebuah observatorium astronomi juga dapat berfungsi sebagai fasilitas multi-disiplin yang dapat memfasilitasi penelitian di bidang-bidang terkait astronomi, misalnya sains atmosfer, instrumentasi, pengolahan sinyal dan citra digital, geodinamika dan geodesi, planetologi, cuaca antariksa, astrodinamika dan mekanika orbital, tracking satelit, dan sebagainya.

Di Indonesia, astronomi juga memiliki peran yang unik, yaitu memiliki **fungsi sosial**. Pengamatan *lunar crescent* (atau disebut dengan sabit hilal) merupakan bagian dari ritual suci umat muslim, khususnya untuk menyambut bulan Ramadhan, Syawal, dan Zulhijjah. Sebagian berpendapat untuk menentukan hal itu cukup dihitung (hisab) dan sebagian lain mengatakan tidak hanya dihitung tapi juga harus dilihat (rukyat). Dalam hal ini, astronomi *bisa* dan dapat melakukan keduanya (hisab dan rukyat) dengan metodologi saintifik standar yang tentu dapat dipertanggungjawabkan.

Astronomi dalam hal ini tidak 'berwenang' mengambil preferensi kepada salah satu metode saja, namun keduanya harus dilakukan secara *proper* saintifik. Dapat dikatakan bahwa pengalaman Observatorium Bosscha dalam turut melakukan pengamatan hilal ini telah berhasil memperkenalkan *modern astronomical observations* bagi masyarakat luas, khususnya dalam penggunaan teleskop modern dan detektor digital, serta meneruskan hasil pengamatan melalui media internet (website) (lihat

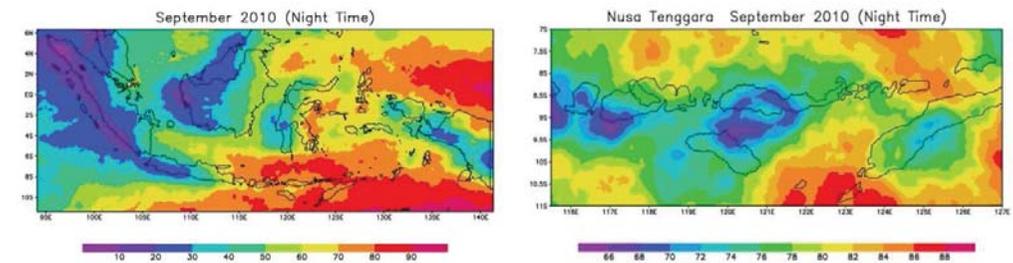
Hidayat et al. 2010a). Sebelumnya, pengamatan lebih bersifat *sighting* tanpa alat bantu optis yang sangat rentan terhadap kesalahan. Teleskop modern sekarang semakin diakrabi oleh masyarakat di pesantren, mesjid-mesjid, maupun Kanwil Kementerian Agama di daerah-daerah. Dalam kenyataannya, sains hilal masih perlu terus dikembangkan baik secara komputasi maupun observasional.

Telah tiba waktunya untuk merintis berdirinya sebuah observatorium nasional yang murni merupakan karya bangsa Indonesia. Untuk itu perlu dilakukan langkah-langkah persiapan dan tidak harus terkendala oleh kondisi pendanaan yang biasanya selalu “dikeluhkan” sangat minim. Dana penelitian dicari melalui berbagai hibah penelitian yang bersumber dari Kementerian Ristek dan Ditjen Dikti Depdikbud (pada waktu itu merupakan kementerian yang berbeda), termasuk dengan Kementerian Kominfo melalui program informasi hisab dan rukyat untuk membantu memberi data bagi Kementerian Agama.

Pada tahap awal 2007-2009, penelitian berfokus pada pencarian situs astronomi baru yang memiliki kondisi atmosfer yang cocok bagi sebuah observatorium modern. Hal ini dilakukan dengan menggunakan data satelit meteorologi, dengan rentang data yang mencakup pengamatan lebih dari satu dasawarsa agar dapat memiliki arti statistik yang *reliable* (Hidayat et al. 2010b). Hasil perhitungan dari data satelit ini kemudian dijadikan dasar untuk melakukan *site survey* pada kawasan yang dianggap menjanjikan (Dermawan et al. 2010). Penggunaan data satelit meteorologi untuk kebutuhan ini jelas sangat layak karena data tersebut mencakup kawasan yang cukup luas, sehingga menjamin kehomogenan data. Selain itu, resolusi spasial maupun temporal juga cukup tinggi untuk memberikan estimasi yang cukup akurat secara statistik.

Hasil analisis ini menunjukkan bahwa kawasan Nusa Tenggara Timur merupakan wilayah yang cukup baik untuk menjadi *host* dari suatu observatorium modern. Gambar 27 menunjukkan contoh data fraksi

kecerahan untuk wilayah Indonesia keseluruhan dan Nusa Tenggara Timur untuk bulan September 2010 (Hidayat et al. 2012).



Gambar 27. Kondisi kecerahan langit Indonesia (terhadap awan) dipelajari menggunakan data satelit meteorologi guna mencari lokasi terbaik bagi observatorium nasional (Hidayat et al. 2012).

Dari hasil analisis tersebut, *site survey* kemudian dilakukan, terutama di Timor Barat, selama kurun 2007 sampai 2012. Beberapa lokasi di Kabupaten Kupang dan Kabupaten Timor Tengah Selatan telah beberapa kali dikunjungi untuk menemukan kandidat situs yang cocok untuk Observatorium Nasional.



Gambar 28. Kawasan Gunung Timau di Kabupaten Kupang merupakan kandidat situs observatorium nasional (Hidayat et al. 2014).

Pemilihan akhirnya jatuh di kawasan Gunung Timau di Kabupaten Kupang (lihat Gambar 28), yang menurut data satelit dapat memiliki kecerahan rata-rata mencapai 65-70% per tahun. *Site testing* akhirnya dilakukan mulai tahun 2013 dengan ekspedisi besar yang melibatkan

keahlian multi-disiplin (astronomi, geologi, ekologi, arsitektur, dan peneliti LAPAN). Proses ini masih berlanjut sampai sekarang. Proses sosialisasi juga telah dilakukan secara intensif termasuk berkomunikasi dengan Pemerintah Daerah setempat serta bermitra dengan perguruan tinggi setempat (Universitas Nusa Cendana).

Dengan usulan Observatorium Nasional ini, bukan berarti kemudian Observatorium Bosscha akan ditutup dan dijadikan museum. Karena peran dan sejarahnya, Observatorium Bosscha tetap berperan sebagai *homebase* dari astronomi Indonesia, tempat calon-calon astronom dididik, program-program dirancang, instrumen didesain, dan sebagainya. Observatorium Bosscha tetap ideal sebagai fasilitator pendidikan yang berkualitas. Dengan membangun Observatorium Nasional kita justru meneruskan *legacy* dari Observatorium Bosscha.

6.2 Perintisan Program Radio di Observatorium Bosscha

Sejak awal dipikirkan bahwa Observatorium Nasional ini harus merupakan suatu observatorium multi panjang gelombang (tidak hanya mencakup panjang gelombang visual). Gelombang radio jelas merupakan pilihan logis yang sangat potensial. Panjang gelombang inframerah juga dapat dipertimbangkan namun sangat terbatas pada inframerah dekat mengingat kondisi atmosfer tropis yang sangat lembab, menjadikannya kedap bagi rentang panjang gelombang tersebut.

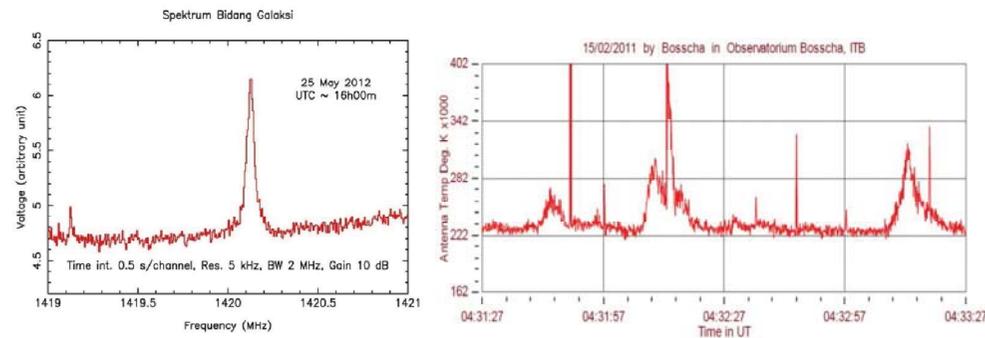
Konsorsium internasional untuk membangun teleskop radio dalam skala besar di Indonesia sudah pernah diusulkan (Swarup 1984, Swarup et al. 1984), namun belum berhasil direalisasikan. Terkait dengan konsep multi-panjang gelombang tersebut, program radio kemudian diputuskan mulai dilaksanakan di Observatorium Bosscha dengan teleskop-teleskop skala kecil, merentang pada berbagai frekuensi (mulai dari 20 MHz sampai dengan 1660 MHz). Teleskop semacam ini tentu tidak memerlukan dana skala besar, namun tetap berguna untuk program *'prototyping'* dan mempersiapkan SDM, terutama mahasiswa di program sarjana dan

pascasarjana. Intinya program tidak harus berhenti semata-mata karena keterbatasan dana. Bukankah yang besar selalu dapat dimulai dari yang kecil?



Gambar 29. Beberapa teleskop radio ukuran kecil yang dikembangkan di Observatorium Bosscha (terbesar berdiameter 6 m) sebagai bagian persiapan observatorium nasional. Terdapat empat antenna parabolik, tiga array dipol, dan satu antenna LPDA, yang telah diinstalasi beserta receiver dan LNA, termasuk untuk testing sistem interferometri.

Program radio ini bekerjasama erat dengan Laboratorium Teknik Telekomunikasi dan Gelombang Mikro, STEI, dan KK Teknik Produksi, FTMD, ITB. Gambar 29 memberikan contoh-contoh instrumen yang sudah berhasil dibuat dan Gambar 30 memberikan contoh data yang berhasil diperoleh (Hidayat et al. 2013). Program ini memberikan pelatihan yang baik untuk menuju pada program teleskop besar kelas dunia.



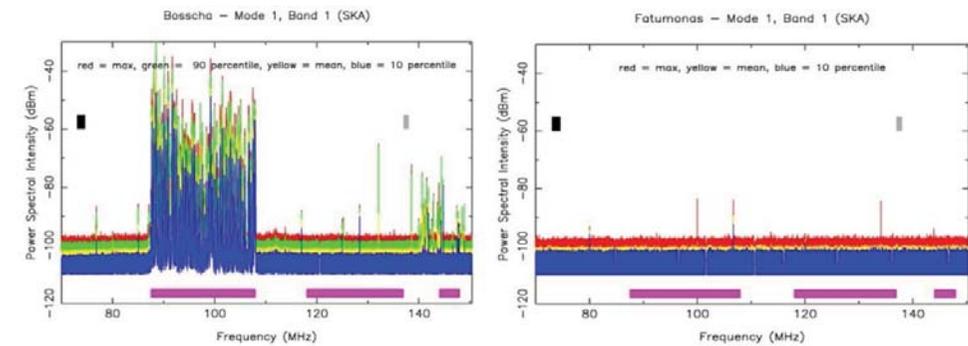
Gambar 30. Contoh data hasil pengamatan teleskop radio di Observatorium Bosscha.

6.3 Program Astronomi Radio di Observatorium Nasional

Program astronomi radio yang diusulkan untuk Observatorium Nasional haruslah suatu program yang segera terkait dengan kerjasama internasional. Dalam hal ini, bergabung dengan jejaring pengamatan VLBI (*Very Long Baseline Interferometry*) merupakan sebuah program yang sangat layak untuk dipertimbangkan. Pemilihan frekuensi dapat ditentukan berdasarkan *science case* yang dituju. Selain itu, program VLBI juga dapat memberikan *service* multi-disiplin yang cukup beragam, terutama untuk studi geodesi, geodinamika dan atmosfer.

Selain itu, perlu dipertimbangkan bahwa Australia telah dipilih untuk menjadi *host* dari array SKA (*Square Kilometre Array*) untuk frekuensi rendah (kurang dari 350 MHz). SKA merupakan mega proyek internasional berikutnya, yang telah direncanakan sejak pertengahan 1990-an, dan kini telah mulai dalam proses perencanaan. Konstruksi baru akan selesai pada dasawarsa mendatang. Oleh karena itu, untuk tahap

selanjutnya dalam program radio nasional, pembangunan array frekuensi rendah bertipe teleskop LOFAR (*Low Frequency Array*) yang saat ini sudah beroperasi di Eropa (berpusat di Belanda) sangat layak pula untuk dipertimbangkan.



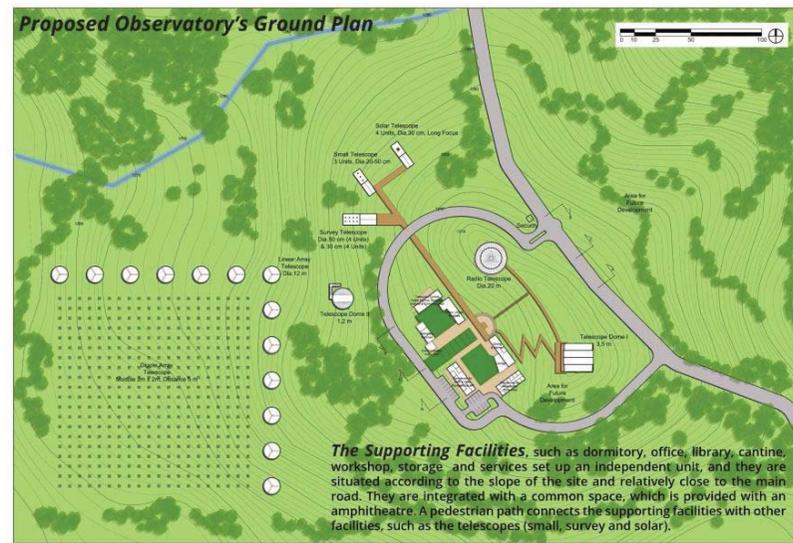
Gambar 31. Pengamatan interferensi frekuensi radio di Observatorium Bosscha dan di Timau sebagai bagian dari persiapan Observatorium Nasional (Hidayat et al. 2014).

Sebagai persiapan program radio, pengukuran RFI (*Radio Frequency Interference*) sudah dilakukan di situs Observatorium Bosscha maupun di Kawasan Timau (Hidayat et al. 2014). Program ini terus dilanjutkan dengan sensitivitas yang lebih tinggi. Dalam penelitian ini, standar penentuan tingkat RFI yang digunakan adalah dengan mengadopsi Mode 1 dan 2 dari SKA (Hidayat et al. 2014).

6.4 Site Plan Observatorium Nasional

Rancangan awal untuk *site plan* dari Observatorium Nasional telah dibuat (Martokusumo et al. 2014) dan akan terus diperbaharui sesuai dengan rekomendasi dari tim ahli multi-disiplin serta perkembangan dalam realisasi Observatorium Nasional. Gambar 32 dan 33 menunjukkan rancangan skematis tersebut. Berdasarkan beberapa kali diskusi dalam lokakarya di KK Astronomi, terdapat beberapa usulan sistem teleskop dan instrumen yang dibutuhkan serta program-program sains yang ingin dituju. Set teleskop optik berkelas 3m dan 1,2m beserta teleskop-teleskop kecil untuk program-program *follow up* telah diusulkan termasuk untuk

program spesifik, misalnya pemantau benda-benda kecil, yang tergabung dalam jejaring internasional. Teleskop-teleskop radio ada di antaranya.



Gambar 32. Rancangan awal kawasan Observatorium Nasional dengan beberapa fasilitas pendukungnya (Martokusumo et al. 2014).



Gambar 33. Gambaran skematis kawasan Observatorium Nasional di Gunung Timau (Martokusumo et al. 2014).

Satu hal yang tak kalah pentingnya dalam perencanaan Observatorium Nasional ini adalah persiapan terhadap program *public outreach* yang sejak dini harus turut dipikirkan secara terstruktur dan profesional termasuk penyediaan tenaga ahli yang akan khusus mengerjakan program ini (Wulandari et al. 2014). Sebuah program nasional dalam bidang sains tidak akan berhasil tanpa dukungan publik dan selanjutnya program itu juga harus memberikan manfaat bagi publik, khususnya dalam pendidikan

sains yang mencerahkan, dan pada gilirannya menghasilkan generasi muda Indonesia yang lebih cerdas.

7. Penutup dan Harapan

Indonesia sedang menapak menjadi bangsa besar, yang tidak hanya memiliki kekuatan ekonomi besar di dunia, tapi kelak juga harus memiliki kontribusi besar dalam peradaban sains dan teknologi. Kita dapat melihat banyak contoh negara makmur namun tidak memiliki program-program sains yang signifikan. Bangsa semacam itu pada akhirnya tidak pernah dicatat dalam sejarah.

Sangat berbeda dengan bangsa yang menemukan hukum gravitasi, teori elektromagnet, hukum termodinamika, mekanika kuantum, planet-planet di bintang lain, mekanisme pembentukan bintang dan planet-planet, struktur galaksi, struktur skala besar alam semesta, ekspansi alam semesta, dan berbagai penemuan besar dalam sains yang telah mengubah dan menentukan masa depan kita. Astronomi radio hanyalah salah satu dari *enterprise* saintifik itu, yang akan terus memberikan kejutan-kejutan terhadap pemahaman kita pada alam semesta, dan pada gilirannya memberi makna akan posisi kita di alam semesta ini.

Penulis *bermimpi*, bersama beberapa kolega yang *concern* dengan kemajuan astronomi Indonesia, untuk dapat merealisasikan suatu fasilitas penelitian astronomi nasional berkelas dunia, yang kelak mampu memberi kesempatan pada generasi muda Indonesia agar dapat berkontribusi pada sains di tingkat internasional. Lebih dari generasi-generasi sebelumnya. Mereka harus punya tempat yang lebih baik.

Proposal Observatorium Nasional kini sedang diajukan ke Pemerintah atas kerjasama Institut Teknologi Bandung dan Lembaga Penerbangan dan Antariksa Nasional (LAPAN). Payung hukum dari proposal ini adalah UU No. 21/2013 tentang Keantariksaan yang mengamankan penguasaan sains antariksa (termasuk astrofisika) bagi Bangsa Indonesia.

Ucapan Terima Kasih

Justru menyampaikan terima kasih selalu menjadi hal paling sulit untuk dilakukan. Saya tahu semua jasa mereka yang turut mengantarkan saya sampai ke sini tidak pernah cukup dibalas hanya dengan ucapan terima kasih. Tentu saya maksudkan jauh lebih dari itu, di luar apa yang bisa disampaikan oleh kata-kata. Hati saya ingin menyampaikan lebih dari yang dapat saya katakan. Pertama-tama perkenalkan kami menyampaikan penghargaan yang setinggi-tingginya kepada Forum Guru Besar Institut Teknologi Bandung yang telah memberi kesempatan kepada kami untuk menyampaikan orasi ilmiah di Sidang Terbuka FGB yang terhormat ini.

Lebih dari terima kasih aku sampaikan untuk Rita dan Tombayu, kedua Matahariku yang tak pernah terbenam. Mereka berdua selalu mewarnai kehidupanku dengan warna-warni yang mencerahkan dan menyenangkan hatiku. Merekalah alasan utamaku untuk selalu bekerja keras. Terima kasih Rita atas kesabaran, pengertian, dan kesetiaan dalam mendampingi dan menemaniku meniti karir sebagai *scientist* (sebenarnya “kutu buku yang membosankan”). Terima kasih untuk masakan dan kue-kue yang lezat.

Ucapan terima kasih tak terhingga kepada keluarga saya. Pertama saya sampaikan untuk kedua orangtua saya, Soenardjo dan Nihajah (yang keduanya tidak dapat menyaksikan salah satu event paling penting dalam hidup saya ini, karena telah lama meninggalkan kami); dan juga kepada kedua orangtua saya selanjutnya, Almarhum Salamoen Soegita, dan Ibunda Kiemah. Saya beruntung Ibunda Mertua dapat hadir di sini. Juga kepada almarhum Nenek saya, Yaminah; almarhum paman saya, Chusnan; serta paman dan bibi saya yang hadir di sini, Saifoel dan Suciati, Nachrowi dan Nurchasanah. *Matur sembah nuwun* untuk bantuan, dukungan, dan kebebasan yang selalu diberikan kepada saya untuk memilih karir yang saya cintai. Terima kasih juga kepada kakak-kakak dan adik saya, mbak Nurul dan mas Imron, Zuhroh dan Roni, kak Anna dan mas Erwin, mas Joni, mas Endi dan mbak Tri, mbak Yuli dan mas Yan. Terima kasih selalu mendukung dan mendoakan kami.

Jasa guru-guru dan senior kami tak kalah pentingnya dalam mendidik dan menempe kami. Perkenalkan seterusnya saya menyampaikan terima kasih kepada Dr. Jorga Ibrahim, Prof. Bambang Hidayat, Prof. Winardi Sutantyo (alm), Dr. Iratius Radiman, Prof. Suhardja Wiramihardja, Prof. Djoni N. Dawanas (alm), Prof. Suryadi Siregar, dan Dr. Moedji Raharto. Juga kepada Seno, Nana, Dhani, Budi, para sahabat yang selalu membantu menghadapi dan mengatasi hari-hari paling sulit dan selalu membantu menemukan optimisme yang tak pernah surut. Terima kasih selalu mengingatkan saya bahwa ada banyak hal yang *lebih patut disyukuri ketimbang dikeluhkan*. Perbaiki saja, cuma ‘komplen’ dan ‘ngomel’ tidak berguna. “*Keluarga Piknik Astronomi++*” juga selalu membantu menemukan kebahagiaan dan kegembiraan: Hesti, Ageng, Enciel, Lina, Yeni Stania, Jalina, Yudi, Tante Tjipto, Ibu Premadi, Aprilia, Waryaman, Kiki, Kunjaya... Rekan-rekan di KK Astronomi yang tak bisa saya sebut per satu, perkenalkan saya menyampaikan terima kasih saya untuk selalu bersama-sama berjuang bagi astronomi Indonesia. Demikian pula kepada para pegawai dan asisten di Program Studi Astronomi dan Observatorium Bosscha, FMIPA-ITB, serta para alumni dan mahasiswa bimbingan saya, yang selalu membuat saya terus belajar dan belajar lagi...

Terima kasih secara khusus saya sampaikan kepada Prof. Umar Fauzi, Prof. Intan Ahmad, Prof. Andriyan Bayu Suksmono, Prof. Toto Winata, Prof. Triyanta atas support yang diberikan kepada saya. Terima kasih sangat istimewa saya tujukan kepada Dr. Kusmayanto Kadiman, Dr. Achmad Sjarmidi, Prof. Widjaja Martokusumo, Dr. Denny Zulkaidi, dan Prof. Deni Juanda Puradimaja yang telah banyak membantu program-program astronomi, mulai dari upaya ‘penyelamatan’ Observatorium Bosscha ketika dirundung masalah lingkungan sangat akut (2003-2009), sampai pada perencanaan dan pengembangan astronomi Indonesia (sejak 2006 sampai sekarang).

Finalemment, l’un des plus importants, mes transformations réelles sont dûes à André Marten avec qui je voudrais partager un très grand bonheur.

En fait, c'est grâce à lui que j'ai découverte et appris des vrais travaux scientifiques. Il m'a appris comment se mettre à valeur et se perfectionner. En suite, Stéphane Léon est mon copain depuis mes jours meudonais, les jours à l'IRAM de Grenade, et aujourd'hui à l'ALMA de Santiago, toujours avec le même rêve, l'onde millimétrique/sousmillimétrique! En effet, c'est lui mon copain depuis toujours! Je n'oublie pas non plus le défunt Yvon Biraud, Annick Fayet, Françoise Marten, Raphaël Moréno, Rosa Frappoli, Lucienne La Baronne, et Khalil Hammal. Merci infiniment à vous tous. Sans vous, je ne serais pas capable de dire que, effectivement, la vie est tellement belle. Merci!

Daftar Pustaka

- Bézard, B., A. Marten, G. Paubert, Detection of Acetonitrile on Titan, *Bull. Amer. Astron. Soc.*, 25, 1100 (1993)
- Bouchez, A. H., M. Brown, M. Troy, R. S. Burruss, R. G. Dekany, R. West, Titan's Stratospheric Zonal Winds, *Bull. Amer. Astron. Soc.*, 35, 928 (1995)
- Coustenis, A., A. Salama, E. Lellouch, Th. Encrenaz, G. L. Bjoraker, R. E. Samuelson, Th. de Graauw, H. Feuchtgruber, M. F. Kessler, Evidence for water vapor in Titan's atmosphere from ISO/SWS data, *Astronomy & Astrophysics*, 336, L85 (1998)
- Dermawan, B., P. Mahasena, T. Hidayat, M. Irfan, Search for New Astronomical Site in Indonesia: III. Astronomical Seeing Condition in West Timor, *Jurnal Matematika dan Sains*, 15, 29 (2010)
- Dobrijevic, M., E. Hébrard, J. C. Loison, K. M. Hickson, Coupling of oxygen, nitrogen, and hydrocarbon species in the photochemistry of Titan's atmosphere, *Icarus*, 228, 324 (2014)
- Flasar, F. M., The dynamic meteorology of Titan, *Planet. Space Science*, 46, 1125 (1998)
- Fox, J. L., H. Aleksander, The $^{15}\text{N}/^{14}\text{N}$ isotope fractionation in dissociative recombination of N_2^+ , *Journal Geophys. Res.*, 102, 9191 (1997)

- Gordon, M. A., *Recollection of "Tucson Operations" – The Millimeter Wave Observatory of the National Radio Astronomy Observatory*, Springer (2005)
- Hidayat, T., A. Marten, H.E. Matthews, G. Paubert, T. Owen, M. Senay, B. Bézard, D. Gautier, Millimeter and Submillimeter Heterodyne Observations of Titan: Retrieval of the Vertical Profiles of HCN and CO, *Bull. Amer. Astron. Soc.*, 27, 1106 (1995)
- Hidayat, T., *Observations millimétriques et sousmillimétriques de Titan: Etude de la composition chimique de son atmosphere*, Ph.D Thesis, Université Paris Diderot (Paris 7) (1997)
- Hidayat, T., A. Marten, B. Bezard, D. Gautier, T. Owen, H.E. Matthews, G. Paubert, Millimeter and Submillimeter Heterodyne Observations of Titan: Retrieval of the Vertical Profile of HCN and the $^{12}\text{C}/^{13}\text{C}$ Ratio, *Icarus*, 126, 170 (1997)
- Hidayat, T., A. Marten, Evidence for a strong $^{15}\text{N}/^{14}\text{N}$ enrichment in Titan's atmosphere from millimetre observations, *Annales Geophysicae*, 16 (Suppl. III), C998 (1998)
- Hidayat, T., A. Marten, B. Bezard, D. Gautier, T. Owen, H.E. Matthews, G. Paubert, Millimeter and Submillimeter Heterodyne Observations of Titan: The Vertical Profile of Carbon Monoxide in Its Stratosphere, *Icarus*, 133, 109 (1998)
- Hidayat, T., D. Herdiwijaya, I. Radiman, M. Raharto, P. W. Premadi, S. D. Wiramihardja, *Buku Kenangan 50 Tahun Pendidikan Tinggi Astronomi di Indonesia*, Departemen Astronomi, FMIPA, ITB (2002)
- Hidayat, T., P. Mahasena, B. Dermawan, D. Herdiwijaya, H. Setyanto, M. Irfan, B. Suhardiman, A. Santoso, Developing Information System on Lunar Crescent Observations, *Journal Math. & Fund. Sci.* 42 A, 67 (2010a)
- Hidayat, T., P. Mahasena, B. Dermawan, Search for New Astronomical Site in Indonesia: I. Global Atmospheric Parameters, *Jurnal Matematika dan Sains*, 15, 16 (2010b)

Hidayat, T., P. Mahasena, B. Dermawan, T.W. Hadi, P.W. Premadi, D. Herdiwijaya, Clear sky fraction above Indonesia: an analysis for astronomical site selection, *Monthly Notices Roy. Astron. Soc.*, 427, 1903 (2012)

Hidayat, T., S. Leon-Tanne, A. B. Suksmono, P. Mahasena, M. Irfan, Indrawanto, 2013, Recent Development of Radio Astronomy at the Bosscha Observatory, *Proceedings of the 11th Asian-Pacific Regional IAU Meeting (APRIM 2011)*, Chiang Mai, Thailand (2013)

Hidayat, T., A. Munir, B. Dermawan, A.T. Jaelani, S. Leon, D.H. Nugroho, A.B. Suksmono, P. Mahasena, P.W. Premadi, D. Herdiwijaya, C. Kunjaya, Z.L. Dupe, B. Brahmantyo, D. Mandey, M. Yusuf, H.R.T. Wulandari, F. Arief, M. Irfan, A.T.P. Jatmiko, E.I. Akbar, H.L. Sianturi, J.L. Tanesib, A. Warsito, J.A. Utama, Radio frequency interference measurements in Indonesia. A survey to establish a radio astronomy observatory, *Experimental Astron.*, 37, 85–108 (2014)

Hidayat, T., S. Léon, R. Moreno, E. Lellouch, L. M. Lara, M. A. Gurwell, E. Villard, in preparation (2015)

Kostiuk, T., K. E. Fast, A. T. Livengood, T. Hewagama, J. Goldstein, F. Espenak, D. Buhl, Direct measurement of winds on Titan, *Geophys. Res. Lett.*, 28, 2361 (2001)

Krasnopolsky, V., A photochemical model of Titan's atmosphere and ionosphere, *Icarus*, 201, 226 (2009)

Lara, L. M., E. Lellouch, J.J. Lopez-Moreno, R. Rodrigo, Vertical Distribution of Titan's Neutral Constituents, *Journal Geophys. Res.*, 101, 23,261 (1996)

Lutz, B. L., C. de Bergh, T. Owen, Titan: Discovery of carbon monoxide in its atmosphere, *Science*, 220, 1374 (1983)

Marten, A., D. Gautier, T. Owen, D. B. Sanders, H. E. Matthews, S. K. Atreya, R. P. J. Tilanus, J. R. Deane, First observations of CO and HCN

on Neptune and Uranus at millimeter wavelengths and the implications for atmospheric chemistry, *Astrophys. Journal*, 406, 285 (1993)

Marten, A., T. Hidayat, Y. Biraud, R. Moreno, New Millimeter Heterodyne Observations of Titan: Vertical Distributions of Nitriles HCN, HC₃N, CH₃CN, and the Isotopic Ratio ¹⁵N/¹⁴N in Its Atmosphere, *Icarus*, 158, 532 (2002)

Martokusumo, W., T. Hidayat, P. Mahasena, B. Dermawan, P. W. Premadi, D. Herdiwijaya, A. Sjarmidi, T. Djamaluddin, C. Y. Yatini, and Z. L. Dupe, A Preliminary Site Plan of National Astronomical Observatory in Timor, *paper presented in the 5th ICMNS* (2014)

Moreno, R., A. Marten, T. Hidayat, Interferometric measurement of zonal winds on Titan, *Astronomy & Astrophysics*, 437, 319 (2005)

Moreno, R., E. Lellouch, L. M. Lara, R. Courtin, D. Bockelée-Morvan, P. Hartogh, M. Rengel, N. Biver, M. Banaszkiewicz, A. González, First detection of hydrogen isocyanide (HNC) in Titan's atmosphere, *Astronomy & Astrophysics*, 536, L12 (2011)

Moreno, R., E. Lellouch, S. Vinatier, M. Gurwell, A. Moullet, L.M. Lara, T. Hidayat, ALMA observations of Titan, *Division of Planetary Science Meeting, AAS*, 46, 211.19 (2014)

Müller, H. S. P., F. Schlöder, J. Stutzki, G. Winnewisser, The Cologne Database for Molecular Spectroscopy, CDMS: A Useful Tool for Astronomers and Spectroscopist, *J. Mol. Struct.* 742, 215–227 (2005)

Müller-Wodarg, I. C. F., R. V. Yelle, M. Mendillo, L. A. Young, A. D. Aylward, *Journal Geophys. Res.*, 105, 20833 (2000)

Pickett, H. M., R. L. Poynter, E. A. Cohen, M. L. Delitsky, J. C. Pearson, and H. S. P. Muller, Submillimeter, Millimeter, and Microwave Spectral Line Catalog, *J. Quant. Spectrosc. & Rad. Transfer* 60, 883-890 (1998)

Swarup, G., Proposal for an International Institute of Space Sciences and a Giant Equatorial Radio Telescope as a Collaborative Effort Between

Developing Countries, *Proceedings of the 2nd Asian-Pacific Regional IAU Meeting (APRIM 1981)*, Bandung, Indonesia (1984)

Swarup, G., B. Hidayat, S. Sukumar, Giant Equatorial Radio Telescope, *Astrophys. & Sp. Science*, 99, 403 (1984)

Toublanc, D., J. P. Parisot, J. Brillet, D. Gautier, F. Raulin, C. P. McKay, *Icarus*, 113, 2 (1995)

Vinatier, S., B. Bézard, C. A. Nixon, The Titan ¹⁴N/¹⁵N and ¹²C/¹³C isotopic ratios in HCN from Cassini/CIRS, *Icarus*, 191, 712 (2007)

Vuitton, V., R. V. Yelle, M. J. McEwan, Ion chemistry and N-containing molecules in Titan's upper atmosphere, *Icarus*, 191, 722 (2007)

Wilson, E. H., S. K. Atreya, Current state of modeling the photochemistry of Titan's mutually dependent atmosphere and ionosphere, *Journal Geophys. Res.*, 109, E6, E06002 (2004)

Wilson, T. L., K. Rohlfs, S. Hüttemeister, *Tools of Radio Astronomy*, 5Ed, Springer, (2009)

Wiramihardja, S. D., *Astronomi Indonesia Menapak ke Depan dan Kontribusinya pada Sebuah World Class University*, Pidato Ilmiah Guru Besar, Majelis Guru Besar - ITB (2010)

Wulandari, H., P. W. Premadi, Y. Yulianty, K. Vierdayanti, S. Permani, Sulistiyowati, A. T. Jaelani, A. B. Priambodo, A.T. Handini, Creating a Science Learning Center in Kupang, *paper presented in the 12th APRIM 2014*, Daejeon, Korea (2014)

Yung, Y. L., M. Allen, J. P. Pinto, Photochemistry of the atmosphere of Titan — Comparison between model and observations, *Astrophys. Journal Suppl. Ser.*, 55, 465 (1984)

Curriculum Vitae



Nama : Taufiq Hidayat
Tempat/Tanggal lahir : Surabaya, 27 April 1965
Nama Istri dan Anak : Dra. Rita Retnowati
Tombayu Amadeo Hidayat
Alamat Kantor : KK Astronomi, FMIPA
Institut Teknologi Bandung
Jl. Ganesha 10 Bandung 40132
Telp. 022-2511576
Fax. 022-2509170
E-mail: taufiq@as.itb.ac.id

I. Riwayat Pendidikan

1. *Docteur ès Science*, 1997, Doctorat d'Astrophysique et Techniques Spatiales, *Ecole Doctorale d'Astronomie et Astrophysique d'Ile de France, Université Paris Diderot (Paris 7)*, Paris, France
2. *DEA*, 1993, *Ecole Doctorale d'Astronomie et Astrophysique d'Ile de France, Université Paris Diderot (Paris 7)*, Paris, France
3. *Sarjana*, 1989, Jurusan Astronomi, FMIPA - Institut Teknologi Bandung, Bandung, Indonesia
4. SMAN 6 Surabaya, 1984
5. SMPN 2 Surabaya, 1981
6. SD Muhammadiyah 2 Surabaya, 1977

II. Riwayat Jabatan

Akademik

1. Guru Besar, FMIPA, ITB, sejak 1 Januari 2014
2. Lektor Kepala, FMIPA, ITB, 2008 – 2013
3. Lektor, FMIPA, ITB, 2002 – 2008
4. Asisten Ahli, FMIPA, ITB, 1999 – 2002
5. Asisten Ahli Madya, FMIPA, ITB, 1990 – 1999

Struktural

1. Ketua Program Studi Sarjana, Magister, dan Doktor Astronomi, FMIPA-ITB, 2012 – 2013
2. Kepala Observatorium Bosscha, FMIPA-ITB, 2006 – 2009
3. Wakil Dekan Sumber Daya dan Perencanaan, FMIPA-ITB, 2004 - 2005
4. Ketua Departemen Astronomi, FMIPA-ITB, 1999 - 2004
5. Sekretaris Jurusan Astronomi, FMIPA-ITB, 1998 - 1999

Manajemen

1. Anggota, Tim Akreditasi Internasional Prodi Astronomi S1, 2014
2. Anggota, Tim Akreditasi Nasional Program Studi Astronomi S3, 2013
3. Anggota, Tim Akreditasi Nasional Program Studi Astronomi S1, 2012
4. Anggota, Tim Akreditasi Nasional Program Studi Astronomi S2, 2010
5. Ketua, Program Revitalisasi Observatorium Bosscha, KNRT, 2007-2009
6. Anggota, Tim Bosscha-ITB untuk Penanganan Masalah Lingkungan dan Perencanaan di Lembang, 2006 – 2009
7. Narasumber, Tim Ad-hoc Standar Pembiayaan, BSNP, Depdiknas, 2006
8. Anggota, Tim Akreditasi Nasional Program Studi Astronomi S1, 2006
9. Anggota Reviewer, TPSDP Program, Ditjen Dikti, 2003-2006
10. Ketua Koordinator Pelaksana Sistem Manajemen Mutu Transformasi ITB, 2004
11. Narasumber, Panitia USM-PMBP ITB, 2003
12. Anggota Reviewer, Quality Assurance Program, Ditjen Dikti, 2002 – 2004
13. Ketua, Panitia Penerimaan Mahasiswa Baru ITB, 2002
14. Ketua, Panitia Ujian Saringan Masuk FSRD ITB, 2001
15. Ketua, Tim Akreditasi Nasional Program Studi Astronomi S1, 2000
16. Sekretaris, Panitia Ujian Saringan Masuk FSRD, ITB, 2000
17. Anggota, Tim Persiapan Otonomi-ITB, 1999 – 2000

III Riwayat Pekerjaan (terpilih, 5 tahun terakhir)

1. Anggota, Himpunan Astronomi Indonesia (HAI), 1989 - sekarang
2. Anggota, Societé Française de Specialiste en Astronomie (SFSA), 1997 - sekarang
3. Anggota, International Astronomical Union (IAU), 1998 – sekarang

4. Invited Speaker, Seminar Nasional Sains Atmosfer dan Antariksa, LAPAN, Bandung, 25 November 2014
5. Invited Speaker, the Galaxy Forum Southeast Asia, 1 March 2014, International Lunar Observatory Association (ILOA), Science Center, Singapore, 2014
6. Ketua Pelaksana, the 5th International Conference on Mathematics and Natural Sciences, Bandung, November 2014
7. Invited Lecturer, the NARIT-KASI Winter School in Radio Astronomy, Chiang Mai, Thailand, January 2014
8. Invited Speaker, the 3rd International Conference on Instrumentation, Communication, Information Technology, and Bio Medical Engineering (ICICI-BME), Bandung, 2013
9. Reviewer, Hibah Penulisan Buku LP4-ITB, Bandung, 2013
10. Invited Speaker, the 3rd Workshop of Space Weather in Indonesia, LAPAN, Bandung, 2013
11. Anggota, Space Education Forum, LAPAN, Bandung, 2013
12. Invited Speaker, Venus Transit, @America, Jakarta, 2012
13. Invited Speaker, Simposium Nasional Inovasi dan Pembelajaran Sains, Bandung, 2012
14. Invited Speaker, ITB-JAXA Joint Workshop, Bandung, 2012
15. Invited Speaker, International Workshop on Space Observation Techniques for Monitoring Global Earth Dynamics, FITB, ITB, Bandung 2011
16. Reviewer, The Chilean Antarctic Institute (INACH), site testing program in Antarctica, 2011
17. Visiting Scientist, at the Joint Atacama Large Millimeter/submillimeter Array Observatory (JAO), Santiago, Chile, 2011
18. Anggota Badan Hisab Rukyat (BHR) Jawa Barat, 2011 – sekarang
19. Invited Speaker, Kuliah Umum: *A la recherche d'une autre terre dans l'univers*, CCF Bandung, 2010
20. Invited speaker, Hari Sains Dikti, Menyambut Gerhana Matahari Total Terpanjang Abad ke-21, dalam rangka IYA2009, UNESCO-Dikti Depdiknas, Jakarta, 2009
21. Single Point of Contact, Indonesian Node for International Year of Astronomy 2009 (IYA 2009), IAU, 2009

IV. Penghargaan (terpilih)

1. Satyalencana Karya Satya 20 tahun, 2013
2. Ketua Program Studi Terbaik ITB, 2012
3. Satyalencana Karya Satya 10 tahun, 2004

Sebuah asteroid anggota Sabuk Utama (*Main-Belt Asteroid*) kini bernama **12179 Taufiq (5030 T-3)** — *International Astronomical Union* (2010)

Orbital Elements at Epoch 2457000.5 (2014-Dec-09.0) TDB Reference: JPL 11 (heliocentric ecliptic J2000)			
Element	Value	Uncertainty (1-sigma)	Units
<u>e</u>	.2021227925003375	6.7688e-08	
<u>a</u>	3.098506915150311	3.5204e-08	AU
<u>q</u>	2.472228044878523	2.1995e-07	AU
<u>i</u>	11.81423906148224	7.2556e-06	deg
<u>node</u>	149.83014211759	3.2297e-05	deg
<u>peri</u>	173.5235751620096	3.7422e-05	deg
<u>M</u>	320.3082016408833	2.3435e-05	deg
<u>t_p</u>	2457220.147066342393 (2015-Jul-16.64706634)	0.00013194	JED
<u>period</u>	1992.173374656361	3.3952e-05	d
	5.45	9.296e-08	yr
<u>n</u>	.1807071636333349	3.0797e-09	deg/d
<u>Q</u>	3.724785785422098	4.232e-08	AU

<http://ssd.jpl.nasa.gov/sbdb.cgi?sstr=12179;orb=1>

V. Daftar Publikasi

5.1 Jurnal (terpilih)

1. Hidayat, T., Munir, A., Dermawan, B., Jaelani, A.T., Leon, S., Nugroho, D.H., Suksmo, A.B., Mahasena, P., Premadi, P.W., Herdiwijaya, D., Kunjaya, C., Dupe, Z.L., Brahmantyo, B., Mandey, D., Yusuf, M.,

Wulandari, H.R.T., Arief, F., Irfan, M., Jatmiko, A.T.P., Akbar, E.I., Sianturi, H.L., Tanesib, J.L., Warsito, A., Utama, A., 2014, Radio frequency interference measurements in Indonesia. A survey to establish a radio astronomy observatory, *Experimental Astron.*, 37, 85–108, DOI 10.1007/s10686-013-9369-7

2. Hidayat, T., Mahasena, P., Dermawan, B., Hadi, T.W., Premadi, P.W., Herdiwijaya, D., 2012, Clear sky fraction above Indonesia: an analysis for astronomical site selection, *Monthly Notices Roy. Astron. Soc.*, 427, 1903
3. Dermawan, B., T. Hidayat, M. Irfan, D. Mandey, and P. Mahasena, 2011, CCD Photometry of Comet 73P/Schwassmann-Wachmann 3 during Its 2006 Apparition Observed from the Bosscha Observatory, *Indonesian J. Phys.*, 22, 121
4. Hidayat, T., P. Mahasena, dan B. Dermawan, 2010, Search for New Astronomical Site in Indonesia: I. Global Atmospheric Parameters, *Jurnal Matematika dan Sains*, 15, 16
5. Hidayat, T., P. Mahasena, dan B. Dermawan, 2010, Search for New Astronomical Site in Indonesia: II. Transparency of Tropical Atmosphere, *Jurnal Matematika dan Sains*, 15, 23
6. Dermawan, B., P. Mahasena, dan T. Hidayat, and M. Irfan, 2010, Search for New Astronomical Site in Indonesia: III. Astronomical Seeing Condition in West Timor, *Jurnal Matematika dan Sains*, 15, 29
7. Yamani, A., T. Hidayat, R. Satyaningsih, and B. Dermawan, 2010, A Monte Carlo Modeling of Planetary Formation: A Case of 47 Ursae Majoris System, *Jurnal Matematika dan Sains*, 15, 64
8. Satyaningsih, R., T. Hidayat, A. Yamani, and B. Dermawan, 2010, Probability of Finding Terrestrial Planet Within Habitable Zone of Extrasolar Planetary System, *Jurnal Matematika dan Sains*, 15, 71
9. Dermawan, B., T. Hidayat, M. Putra, A. Fermita, D. T. Wahyuningtyas, D. Mandey, Z. Hudaya, D. Utomo, Dinamika Orbit Asteroid yang Analog dengan Orbit Bumi, *Jurnal Sains Dirgantara*, 7, 164
10. Dermawan, B., Z. Hudaya, T. Hidayat, M. Putra, A. Fermita, D. T. Wahyuningtyas, D. Mandey, D. Utomo, Evolusi Orbit Centaurs dan Trans-Neptunus ke Bagian Dalam Tata Surya, *Jurnal Sains Dirgantara*, 8, 102

11. Hidayat, T., P. Mahasena, B. Dermawan, D. Herdiwijaya, H. Setyanto, M. Irfan, B. Suhardiman, A. Santoso, 2010, Developing Information System on Lunar Crescent Observations, *Journal Math. & Fund. Sci.* 42 A, 67
12. Moreno, R., A. Marten, T. Hidayat, 2005, Interferometric measurement of zonal winds on Titan, *Astronomy & Astrophysics*, 437, 319
13. Marten, A., H. Matthews, T. Owen, R. Moreno, T. Hidayat, Y. Biraud, 2005, Improved constraints on Neptune's atmosphere from submillimetre-wavelength observations, *Astronomy & Astrophysics*, 429, 1097
14. Hidayat, T., 2003, Problem Fraksionasi Isotop $^{15}\text{N}/^{14}\text{N}$ dan Mekanisme Pelepasan Non-thermik di Atmosfer Titan, *Indonesian J. Phys.*, 14, 149
15. Marten, A., T. Hidayat, Y. Biraud, R. Moreno, 2002, New Millimeter Heterodyne Observations of Titan: Vertical Distributions of Nitriles HCN, HC_3N , CH_3CN , and the Isotopic Ratio $^{15}\text{N}/^{14}\text{N}$ in Its Atmosphere, *Icarus*, 158, 532
16. Hidayat, T., A. Marten, B. Bezaud, D. Gautier, T. Owen, H.E. Matthews, G. Paubert, 1998, Millimeter and Submillimeter Heterodyne Observations of Titan: The Vertical Profile of Carbon Monoxide in Its Stratosphere, *Icarus*, 133, 109
17. Hidayat, T., A. Marten, 1998, Evidence for a strong $^{15}\text{N}/^{14}\text{N}$ enrichment in Titan's atmosphere from millimetre observations, *Annales Geophysicae*, 16 (Suppl. III), C998
18. Hidayat, T., A. Marten, B. Bezaud, D. Gautier, T. Owen, H.E. Matthews, G. Paubert, 1997, Millimeter and Submillimeter Heterodyne Observations of Titan: Retrieval of the Vertical Profile of HCN and the $^{12}\text{C}/^{13}\text{C}$ Ratio, *Icarus*, 126, 170
19. Rosenqvist, J., Y. Biraud, M. Cuisenier, A. Marten, T. Hidayat, G. Chountonov, D. Moreau, C. Muller, I. Maslov, M. Ackerman, Y. Balega, O. Korablev, 1995, Four micron infrared observations of the comet Shoemaker-Levy 9 collision with Jupiter at the Zelenchuk Observatory: Spectral evidence for a stratospheric haze and determination of its physical properties, *Geophys. Res. Lett.*, 22, 1585
20. Iskandar, A. A., T. Hidayat, 1992, O(3) extended supersymmetry transformation, *Kontribusi Fisika ITB*, 3, 11

5.2 Buku

1. T. Hidayat, 2010, *Teori Relativitas – Sebuah Pengantar*, Penerbit ITB, Bandung (Buku teks untuk tingkat sarjana lanjutan dan pengantar pascasarjana).
2. T. Hidayat (sebagai penerjemah), *Misteri Alam Semesta*, karya Brian Greene (dari buku dengan judul asli: *The Fabric of the Cosmos*), akan diterbitkan oleh Penerbit Mizan, Bandung.
3. J. Ernawati dan T. Hidayat, 2011, *Di mana Ada Alien?* Penerbit: Kepustakaan Populer Gramedia, Jakarta (Buku sains populer, serial untuk anak-anak, ditulis bersama wartawan Majalah Bobo).
4. J. Ernawati dan T. Hidayat, 2011, *Awas Serbuan Meteor!* Penerbit: Kepustakaan Populer Gramedia, Jakarta (Buku sains populer, serial untuk anak-anak, ditulis bersama wartawan Majalah Bobo).
5. Sebagai Ketua/anggota Editor Prosiding Konferensi: 10 buku (nasional dan internasional)

5.3 Prosidings/Konferensi/Seminar (terpilih, 10 yang terakhir > 100)

1. Moreno, R., Lellouch, E., Vinatier, S., Gurwell, M. A., Lara, L. M., Moullet, A., Hidayat, T., 2014, ALMA observations of Titan, *46th Division for Planetary Sciences (DPS) Meeting, American Astronomical Society*, Tucson, Arizona, November 2014
2. Hidayat, T., B. Dermawan, P. Mahasena, R. Abudan, L. D. S. Prabawa, and M. Azzahra, 2014, Evaluation of Aerosol Contents over Astronomical Candidate Site in Indonesia from Meteorological Satellite Data, *the 5th ICMNS 2014*, November 2014, Bandung
3. Hidayat, T., B. Dermawan, P. Mahasena, A. Munir, M. Z. Nurzaman, and A. T. Jaelani, 2014, Radio Frequency Interference Measurement in Site Testing Programs for the Future Multi-wavelength Observatory in Indonesia, *the 5th ICMNS 2014*, November 2014, Bandung
4. Mahasena, P., Hidayat, T., B. Dermawan, Z. L. Dupe, M. Yusuf, P. W. Premadi, H. R. T. Wulandari, A. Sjarmidi, W. Martokusumo, C. Y. Yatini, A. A. Iskandar, S. Siregar, D. Herdiwijaya, C. Kunjaya, J. L. Tanesib, T. Manik, E. S. Mumpuni, D. Mandey, K. Vierdayanti, A. Munir, B. Brahmantyo, A. T. Jailani, M. Irfan, Y. Yulianty, A. T. P. Jatmiko, E. I. Akbar, H. L. Sianturi, and A. Warsito, 2014, Current Status of Site Testing

- Programs in West Timor for the Future Indonesian Multi-wavelength Observatory, *the 5th ICMNS 2014*, November 2014, Bandung
5. Martokusumo, W., Hidayat, T., P. Mahasena, B. Dermawan, P. W. Premadi, D. Herdiwijaya, A. Sjarmidi, T. Djamaluddin, C. Y. Yatini, and Z. L. Dupe, 2014, A Preliminary Site Plan of National Astronomical Observatory in Timor, *the 5th ICMNS 2014*, November 2014, Bandung
 6. Wibowo, R. W., B. Dermawan, Hidayat, T., J. A. Utama, D. Mandey, I. N. Huda, I. Tampubolon, 2014, Revisiting Asymmetric Distribution of Jupiter Trojans, *the 5th ICMNS 2014*, November 2014, Bandung
 7. Dermawan, B., Hidayat, T., J. A. Utama, D. Mandey, R. W. Wibowo, I. N. Huda, I. Tampubolon, Motions of Kepler Circumbinary Planets in Restricted Three-Body Problem under Radiating Primaries, *the 5th ICMNS 2014*, November 2014, Bandung
 8. Huda, I. N., Dermawan, B., Hidayat, T., D. Mandey, R. W. Wibowo, I. Tampubolon, Utama, J. A., 2014, The Locations of Triangular Equilibrium Points in Elliptic Restricted Three-Body Problem under the Oblateness and Radiation Effects, *the 5th ICMNS 2014*, November 2014, Bandung
 9. Moreno, R., Lellouch, E., Vinatier, S., Gurwell, M. A., Moullet, A., Lara, L. M., Hidayat, T., 2014, ALMA observations of Titan, *European Planetary Science Congress*, Estoril, Cascais, Portugal, September 2014
 10. Hidayat, T., B. Dermawan, P. Mahasena, A. Munir, M. Z. Nurzaman, and A. T. Jaelani, 2014, Radio Frequency Interference Measurement in Site Testing Programs for the Future Multi-wavelength Observatory in Indonesia, *the 12th APRIM 2014*, August 2014, Daejeon, Korea