



天文学の技術と私たちの生活

医療からWi-Fiまで



EDITED BY:

— Bethany Downer, Michael Burton, Ewine van Dishoeck and Pedro Russo

CONTRIBUTIONS FROM:

— Jacob Baars, Tony Beasley, Dmitry Bisikalo, Georgia Bladon, Michael Burton, Ana Gomez de Castro, Lars Lindberg Christensen, Gabriele Giovannini, Jan Mathijs van der Hulst, Christoph Keller, Antonio Mário Magalhães, Marissa Rosenberg and Frans Snik

日本語訳:

— 縣 秀彦、浅見 奈緒子、市川 隆、岡村 定矩、片山真人、亀谷 和久、
鴈野 重之、津村 耕司、富田 晃彦、八巻 富士男

Published by the IAU
April 2019



Cover credit: ESO/Y. Beletsky

“ 知識を保存し、伝えることは簡単にできます。しかし、新しい知識を生み出すことは簡単ではありません。また、新しい知識はすぐに利益に結びつくものでもありません。基礎科学は長い年月をかけて社会に恩恵をもたらし、理性と真理を有する社会の文化を豊かにする力となります。 ”¹

—アハメッド・ズウェイル
ノーベル化学賞受賞者(1999)



序論

天文学はいつの時代も私たちの世界に大きな影響を与えています。古代文明では、天体は宗教的な対象であり、空を移動する天体の動きからやがて起こる現象を予言してきました。天文学はまた、時刻を測り、季節を区切り、広大な海を航海するためにも使われてきました。天地の理解が進むにつれ、私たちは自分自身や世界観が宇宙とより深く結びつけられていることに気がつきました。星やその周りのガスや塵に含まれる元素が、私たちの体を構成する元素と同じであることがわかり、私たちが宇宙とのつながりがさらに深まってきました。天文学は、私たちの視野を広げ、物事をより高い視点から考える手助けとなっています。天文学がもたらす美しい天体画像が現代社会の至る所で見られるようになったのは、人々が抱く

「自分は宇宙とつながっている」という思いと、それがもたらす畏敬の念が理由かもしれません。

天文学とその関連分野は科学・技術の最前線にあり、宇宙に関する根本的な問題に答えつつ、技術者を新たなレベルに押し上げ、イノベーションを駆動しています。そのため、国際天文学連合（IAU）の戦略計画では、技術・技能、科学・研究、文化・社会という多方面とのつながりを重視しています。

この冊子では、天文学における研究開発によって発展した技術の社会への応用を紹介します。医療から空港のセキュリティまで、天文学は私たちの日常生活に不可欠な役割を果たしています。



医療

天文学の医療への応用は、診断技術の向上から高度な画像処理まで、非常に多岐にわたっています。

天文学と医療分野の間での最も重要な技術移転の一つは、高解像度の天体画像を得るために電波天文学で用いられている干渉計技術です。干渉法では、広範囲に配置した多数の小型電波望遠鏡で同時に天体を観測し、その信号を電氣的に合成することで、非常に大きな望遠鏡で観測するのと同じ解像度が得られます。複数の望遠鏡のデータを組み合わせて1つの天体画像を作成する技術は「開口合成」と呼ばれ、ノーベル賞を受賞した電波天文研究者のマーティン・ライルによって開発されました。開口合成の重要な応用の一つは核磁気共鳴(MR)で、これにより医療診断における画像の解像度の向上やスキャン時間の短縮に貢献しました。核磁気共鳴画像法(MRI)では、強力な磁石と電波のパルスを使用して、人体の組織内にある

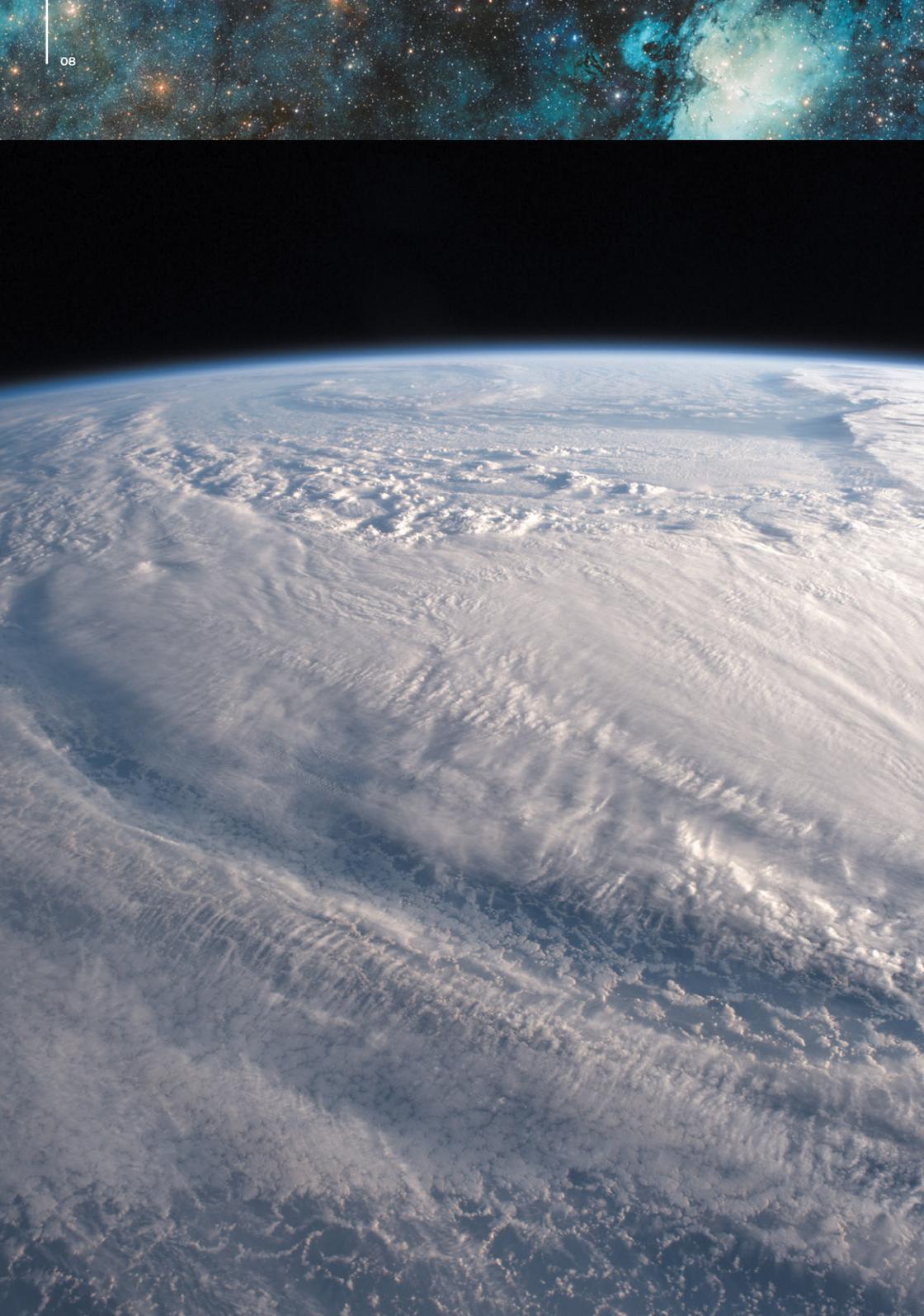
水分子中の水素原子を分極して励起させます。パルス照射が終わると、励起した水素原子は電波を発生して元の状態に戻ります。この電波がMRI装置内の受信機で測定・記録され、干渉技術を用いて画像に処理されます。

宇宙から飛来する高エネルギー放射線を観測する望遠鏡の技術は、コンピュータ断層撮影(CTスキャン)という医用画像診断技術にも応用されています。

天文学研究が医療の世界に貢献したもう一つの重要な例は、クリーンな作業環境の開発です。宇宙望遠鏡の製造過程で入り込むほこりや粒子は望遠鏡の反射率の低下や観測装置の性能の劣化を伴うため、非常にクリーンな作業環境が不可欠です²。天文学技術で開発されたクリーンルームに関する規則(クリーン度管理)、空気清浄フィルター、防塵作業服は、現在では病院や製薬ラボでも使用されています³。

宇宙望遠鏡や人工衛星の製造のために開発したクリーンな作業環境の開発やその規格水準の向上により、医療現場のクリーン度向上にも貢献しています。

Credit: NASA/Dominic Hart



気候変動

天文学で培われた技術や研究手法は、地球システムや気候変動を理解するための重要な手段も発展させてきました。

天文学的手法を用いた金星の研究を通じて、私たちの地球の気候についての理解が深まってきました。金星は地球に似た大きさと組成を持っているので、太陽系の中で地球のような進化する気候システムを理解する貴重な研究対象となっています。現在の金星の大気はとて濃くて大気圧は地球の90倍以上になっています。これは、金星の表面温度の上昇と大気中の水蒸気の増加に伴う温室効果の暴走の結果と考えられています。気候研究者のジェームズ・ハンセンは、大気中の電磁波によるエネルギーの移動を計算する放射輸送モデルを用いて、金星大気中の放射エネルギーの移動を計算

しました。さらに彼はこの手法を地球に応用して、地球大気中の微量ガスやエアロゾルが気候に与える影響をモデル化しました^{4,5}。

さらに最近では、太陽系外惑星の大気を研究するための偏光観測技術が開発され、それを基に地球大気中の粒子が私たちの健康や気候に及ぼす影響を研究するための一連のSPEX (Spectropolarimeter for Planetary Exploration : 惑星大気分光偏光装置)が開発されました⁶。この取り組みは、大気汚染を測定するための大規模な市民科学キャンペーン「iSPEX」につながっています⁷。この技術は、地上での大気汚染測定用装置として商品化されており、さらに地球観測衛星にも搭載され運用されています。

ヨーロッパ宇宙機関 (ESA) の宇宙飛行士アレクサンダー・ゲルストが2014年に国際宇宙ステーションから撮影した地球の画像。

Credit: ESA/NASA



コンピューター技術

天文学におけるデータ解析を通じて、グリッドコンピューティングや分散コンピューティングなどの新しいコンピューターシステムの開発や、大規模な市民科学の取り組みが進みました。

ここ数十年の間に、天文研究者が取得するデータの量は飛躍的に増えました。新しい望遠鏡や宇宙ミッションの登場により、得られたデータを解析するための新しいツールや方法が開発されました。これらのデータを処理するためには、膨大な量の計算資源が必要となります。コンピューターを広く分散させ、共通のネットワークを介して接続するグリッドコンピューティング技術は、集められた膨大な計算リソースを共有し、利用する効率的な方法です。「ビッグデータの時代」と呼ばれる現在、天文学研究者が収集するデータの量も指数関数的に増加し、科学の手法が変わりつつあります。

電波天文研究者による地球外知の文明探査： SETI (Search for

Extra-Terrestrial Intelligence) は、グリッドコンピューティングの誕生に一役買いました。世界中に分散した膨大な数のコンピューターを共同管理して複雑な科学的問題を解決するクラウドコンピューティングを利用したからです。

歴史的には、最初の2つの公開分散コンピューティングプロジェクトは、数学の問題 (GIMPS, 1996) と暗号の問題 (distributed.net, 1997) を解決する目的で始まりました。3番目の (そして最も有名な) プロジェクトは1999年に始まったSETI@homeプロジェクトです。SETIは、電波信号を使って地球外の知的生命体の兆候を見つけようとするものです。SETI@homeは、これまでは不可能であった方法で、科学の重要課題の解明に多くの市民が協力する最初の市民科学プロジェクトでした。この活動は2020年3月で終了しましたが、170万人以上の参加者が自分のコンピューターの空き時間をSETI@homeに提供しました。

ドイツ、ミュンヘン近郊のガルヒングにある欧州南天天文台 (ESO) 本部のデータセンターでは、ESO の運用する複数の望遠鏡で得られたデータをアーカイブして公開しています。

Credit: ESO



保時

地球と空に見える星の位置は、初期文明の暦から今日の衛星ナビゲーションや測位サービスに至るまで、時刻を維持する「保時」において不可欠の役割を果たしてきました。

有史以来、文化や地域と深く関連した多くの暦が作られてきました。時刻の概念は、太陽と月と星々の見かけの動きや、夜と昼の周期性を観察することで考え出されました。1日という概念は太陽の動きと関連しており、1ヶ月という概念は月の満ち欠けや位置の変化を観察することから生まれました。1時間という概念は、古代エジプト人が昼間を10分割し、日の出と日の入りを考慮して前後に各1時間を追加したことにまで遡ることができます。

現在、正確な時刻を維持するためには、原子の遷移の周波数を基準にした高精度の原子時計が使われています。世界の時刻のベースとなるのは国際原子時 (TAI) で、世界中の様々な機関に

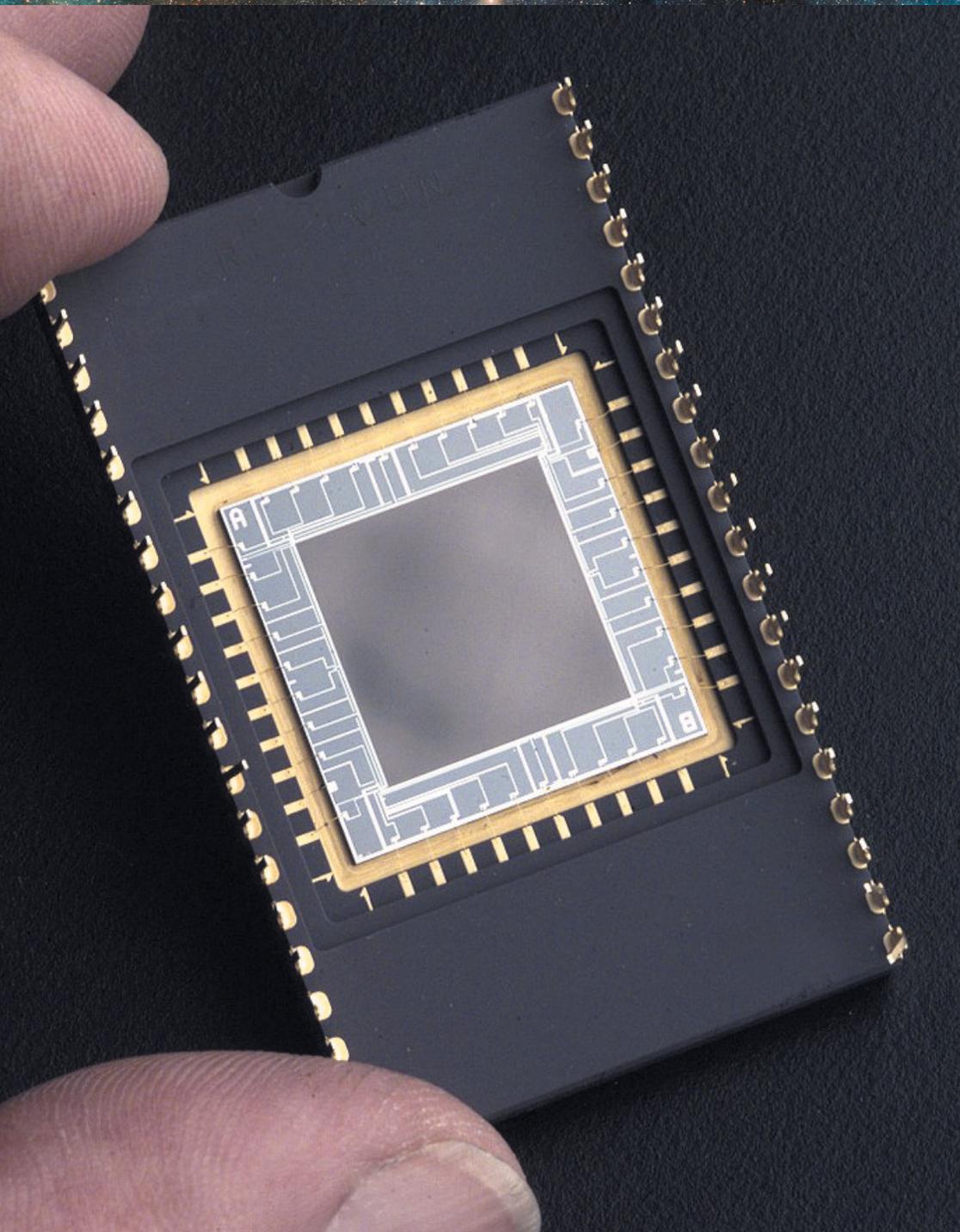
ある数百個の原子時計を国際度量衡局 (BIPM) が集約して維持しています。

一方、日の出入りなど日常生活に合わせて使われるのは地球の自転と公転を基にした世界時 (UT) という時刻系です。そこで、BIPMと国際地球回転・基準系事業 (IERS) は、国際原子時を基に、天文観測から決まる世界時とのずれが±0.9秒を超えないよう「うるう秒」による調整を加えた協定世界時 (UTC) を維持しています。協定世界時が我々の日常生活で用いられている時刻です。いつ「うるう秒」で調整するかはIERSから事前に全世界に知らされます。

全地球測位システム (GPS) では正確な時間を保持することが必須です。GPS衛星は正確な原子時計を搭載しています。GPS衛星から発信された衛星の位置と時刻の正確な情報を使って、受信機の地上での位置を高い精度で知ることができます。そこでは一般相対性理論に基づく補正も考慮されています。

全地球測位システム (GPS) 衛星では、正確な時刻の維持が不可欠です。各衛星には正確な原子時計が搭載されています。

Credit: Los Angeles Air Force Base



撮像

天文学と産業界の間の技術移転の最も役立った例としては、撮像（イメージング）と通信の進歩が挙げられます。

コダック社のテクニカルパンと呼ばれるフィルムは、医療や産業界の分光研究者、産業用写真家、芸術家などに広く使用されていますが、もともとは太陽の研究者が太陽の表面構造の変化を記録するために作られたものです。

ウィラード・S・ボイルとジョージ・E・スミスは、フィルムに替わり後に産業用として広く使われるようになった新しい撮像デバイスの発明により、2009年にノーベル物理学賞を受賞しました⁸。天体撮像用に開発されたこのセンサー（検出器）は、電荷結合素子（CCD）として知られており、1976年に天文学で初めて使用されました。CCDは、望遠鏡の撮像装置だけでなく、個人用のデジタルカメラやウェブカメラ、携帯電話にも採用され、瞬く間にフィルムに取って代わりました。CCDが改良され広く普及した背景に、NASAがハッブル宇宙望遠鏡に搭載する観測装置に超高感度CCD技術を採用したことが挙げられます⁹。今日では、CCDは世界中の天文台で採用され、

宇宙や地上に限らずあらゆる望遠鏡に使われており、赤外線からX線までの幅広い波長範囲で最適な検出器となっています。アマチュア天文家の望遠鏡にもCCDカメラが搭載され、夜空の明るい都会にあっても更なる良好な天体観測が可能になりました。

天文学はこのような撮像技術の向上のみならず、画像処理を格段に容易にするIDLやIRAFなどの様々なプログラミング言語の開発にも貢献してきました。これらの言語は現在、医療分野で広く利用されています¹⁰。

空港にも様々な天文用機器の応用例が見られます。遠方のガンマ線天体の観測のために開発された技術が、現在では空港のベルトコンベアに乗せられた手荷物の検査スキャナーとして使われています。化合物の成分分離と分析に使用されるクロマトグラフは、火星探査ミッションで使用するために小型化され、性能向上のための改良がなされました。この小型軽量化された装置は現在、麻薬や爆発物を探するための手荷物検査に使用されています。

電荷結合型デバイス（CCD）は当初、天文学で使用されていましたが、その後、個人用カメラや携帯電話でも一般的に使われるようになりました。



通信

通信の分野では、電波天文学からたくさんの有用なツールや装置、データ処理方法などが生まれてきました。成功を収めている通信会社の多くは、もともと電波天文研究者によって設立されたものです。

衛星通信の時代は電話交信のために始まりましたが、すぐにテレビ、ラジオ、データ交換にまで拡大しました。衛星通信は、太陽、惑星、天の川、およびさまざまな銀河系外の天体からの電波を観測するために電波天文研究者が大型のパラボラアンテナを開発・建設したことから生まれたものです。天体からの電波信号は非常に微弱なため、直径が25~75メートルもの大型アンテナが必要です。そこで、電波天文研究者と産業界との緊密な協力関係のもとで大型のパラボラアンテナが開発されました。世界中のい

くつもの企業が、新たに得た技術を利用して、衛星通信地上局の分野に参入しました。

大容量の光ファイバーケーブルが利用できるようになったことで、運用停止となっていた多くの30mの通信アンテナが改修され、アフリカ超長基線干渉計ネットワークが形成されました。同様に、パラメトリック増幅器のような高感度のマイクロ波受信システムでも電波天文研究者が開発の先駆者となりました。これにより、衛星通信の需要に応える企業が数多く誕生しました。このようなプロセスは現在も続いており、サブミリ波や赤外線線の信号を検出して増幅する装置が開発され、空港のセキュリティチェックポイントや自動車の衝突回避装置など、多くの民生品に利用されています。

アルマ望遠鏡。アルマ望遠鏡は、チリ北部のアタカマ砂漠にある66台のアンテナ（電波望遠鏡）からなる天体観測のための電波干渉計です。

Credit: ES0/B, Tafreshi (twanight.org)

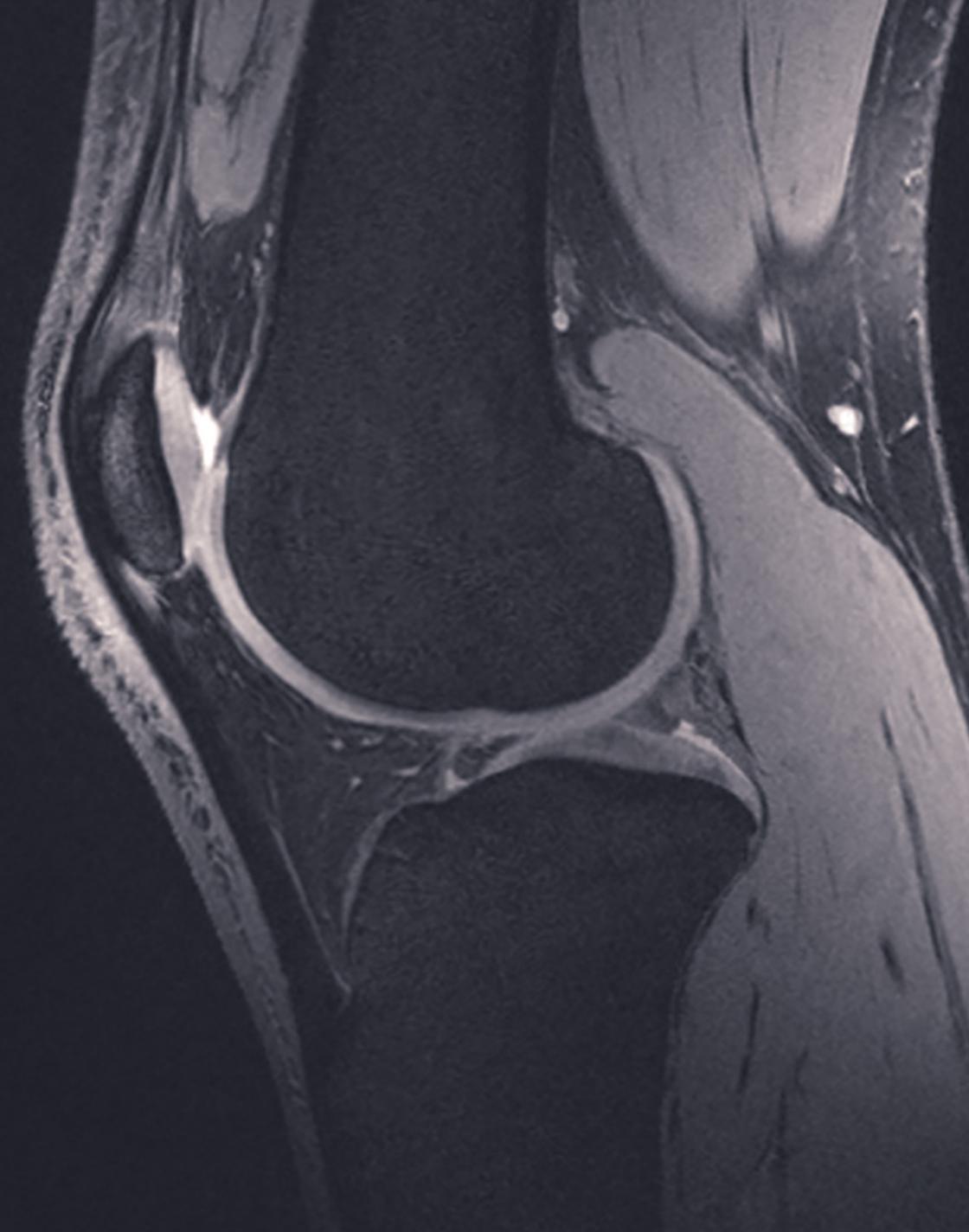


Wi-Fi

電波天文学は多くの道具や装置、データ処理方法を開発してきましたが、Wi-Fiの発明に貢献したことも高く評価されています。

オーストラリアの連邦科学産業研究機構（CSIRO）の研究チームは、ブラックホールから放射される電波を解析するために開発した技術を用いて、無線で情報を伝送する新しい技術を開発しました¹⁾。電波信号は周囲の物体の表面

で反射するために情報の伝達に乱れが生じますが、彼らはそのような環境でも電波を利用できるマイクロチップを開発しました。この発明に与えられた特許は、Wi-Fiを使ってネットワークと小型の携帯機器間で情報を交換する道を世界中の企業に拓きました。現代の生活はデータの流れに強く依存しています。電波天文学はもとより、科学は今後も、全人類に恩恵をもたらす技術を生み出し続けるでしょう。



参考文献

- 1 Edwards, Kieran Jay., et al. Astronomy and Big Data A Data Clustering Approach to Identifying Uncertain Galaxy Morphology. 2014.
- 2 Gruman, J. B., Image Artifacts-Telescope and Camera Defects, 2011 [http://stereo.gsfc.nasa.gov/artifacts/artifacts_camera.shtml]
- 3 Clark, H., Modern-day cleanroom invented by Sandia physicist still used 50 years later, 2012 [https://share-ng.sandia.gov/news/resources/news_releases/cleanroom_50th/]
- 4 Hansen, J.E.; S. Matsushima, The atmosphere and surface temperature of Venus: A dust insulation model, *Astrophys. J.* 150: 1139–1157, 1967
- 5 Hansen, J.E., et al., GISS Analysis of Surface Temperature Change, *J. Geophys. Res.* 104(D24): 20997–31022, 1999
- 6 Snik, F. et al., SPEG: the spectropolarimeter for planetary exploration. Proceedings Volume 7731, Space Telescopes and Instrumentation 2010: Optical, Infrared, and Millimeter Wave; 77311B, 2010
- 7 Snik, F. et al., Mapping Atmospheric Aerosols with a Citizen Science Network of Smartphone Spectropolarimeters. *Geophysical Research Letters*, vol. 41, no. 20, pp. 7351–7358, 2014
- 8 Boyle, W.S., Smith, G.E., Charge Couple Semiconductor Devices. *Bell System Technical Journal* 49, p. 587, 1970
- 9 Kiger, P. & English, M., Top 10 NASA Inventions, 2011 [<http://www.howstuffworks.com/innovation/inventions/top-5-nasa-inventions.htm>]
- 10 Shasharina, S. G. et al. GRIDL: high-performance and distributed interactive data language, High Performance Distributed Computing, HPDC-14. Proceedings. 14th IEEE International Symposium, 291–292, 2005
- 11 J. P. Hamaker, J. D. O’ Sullivan, and J. E. Noordam, Image sharpness, Fourier optics, and redundant-spacing interferometry, *J. Opt. Soc. Am.* 67, 1122–1123, 1977

複数の望遠鏡からのデータを組み合わせて1つの画像を生成する「開口合成」と呼ばれる天文学の技術は、医療診断に使われる核磁気共鳴（MR）に応用され、画像の解像度を上げ、スキャン時間の短縮に役立っています。

Credit: ESA



www.iau.org

