

Увод в радиоастрономията

д-р Росица Митева

ИКИТ-БАН

rmiteva@space.bas.bg

летен семестър 2019

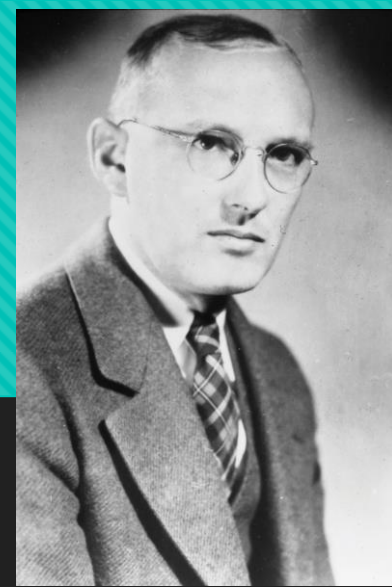
Съдържание

1. Кратка история на радиоастрономията
2. Въведение. Радиотелескопи.
3. Механизми за радиоизлъчване
4. Източници на радиоизлъчване

Литература

- Francis Graham-Smith, *Unseen cosmos – the universe in radio*, Oxford University Press, 2013
- Basics of radio astronomy: <https://www2.jpl.nasa.gov/radioastronomy/>
- Essential radio astronomy: https://www.cv.nrao.edu/course/ast534/ERA_old.shtml

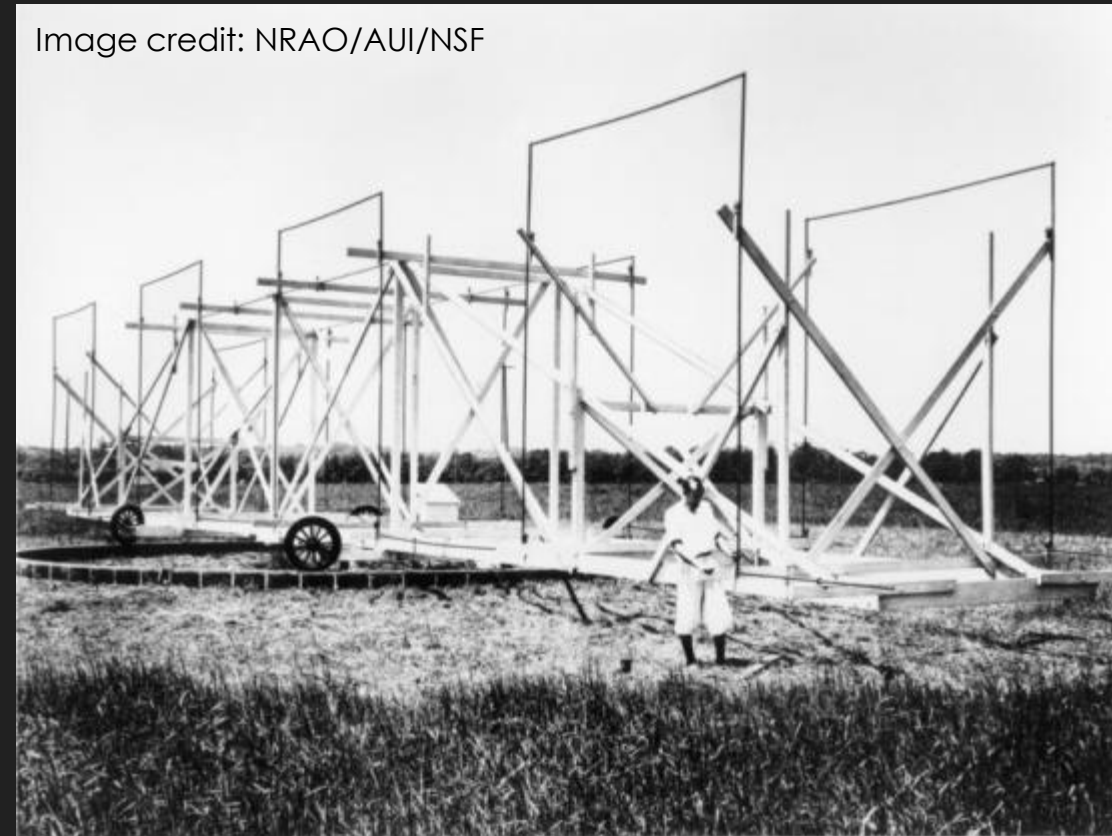
Откритието на Карл Янски: радио шум с космически произход



<https://public.nrao.edu/gallery/portrait-of-karl-jansky/>

- ~1920: къси радио вълни ($\lambda \sim 15 \text{ m}$, $f \sim 20.5 \text{ MHz}$) се използват за трансатлантическа телефонна връзка от Bell Telephone company.
- 1932: Bell Telephone Laboratory поставят задача на Karl Jansky (1905–1950) да открие източника на естествения радио статичен шум и т.нар. атмосферни смущения.
- Построява насочваща антена (merry-go-round), която може да се управлява и да сканира ниско до хоризонта: открива, че повечето атмосферни смущения се дължат на светкавици от тропически бури, а статичния шум е с произход извън Слънчевата система.
- Сканира по азимут (от север до изток по хоризонта) с антената и прави радио карта на интензитета на смущението: максимума се движи по небето с период 23 часа 56 минути (един сидеричен ден) и съвпада със съзвездие Стрелец (Галактичния център).
- Публикува през 1933 в Proceedings of the Institute of Radio Engineers, Nature & New York Times, но откритието остава незабелязано от астрономите.
- **The Karl Guthe Jansky Very Large Array (VLA)**
- **Единица за радио поток $1 \text{ Jy} = 10^{-26} \text{ W}/(\text{m}^2 \text{ Hz})$**

Image credit: NRAO/AUI/NSF



Гроуте Ребер и първият радиотелескоп



- Grote Reber, професионален радиоинженер и радиолюбител, единствен продължава радиоастрономическите наблюдения на Янски.
- 1937: Построява в дома си първата параболична антена D~9.5 m рефлектор, тъй като не е настроена към специфична дължина, в зависимост от вида на детектора във фокуса, може да записва сигнал в различни дължини на вълната.
- Продължава наблюдения с нов детектор на 480 MHz (63 cm) и с по-тесен сноп (beam), прави по-детайлни радиокарти през 1948. Прави наблюдения на Слънчето. През 1954 построява антена за наблюдения на 150 m.



Гро̀те Ребер: радиокарти на галактиката

- Започва да сканира областта около Галактичния център, неуспешно на $f \sim 3300$ MHz (най-високата възможна тогава честота) и 910 MHz, но успешно на 160 MHz (187 cm) с $\sim 10^\circ$ ъглова разделителна способност.
- Погрешно очаква, че емисията е чернотелна $B_f \sim f^2$, но открива, че е радиоемисията има нетоплинен спектър.
- Публикува през 1940 първо в *Proceedings of the Institute of Radio Engineers*, след това в *Astronomical Journal*, потвърждавайки наблюденията на Янски за центъра на Млечния път.

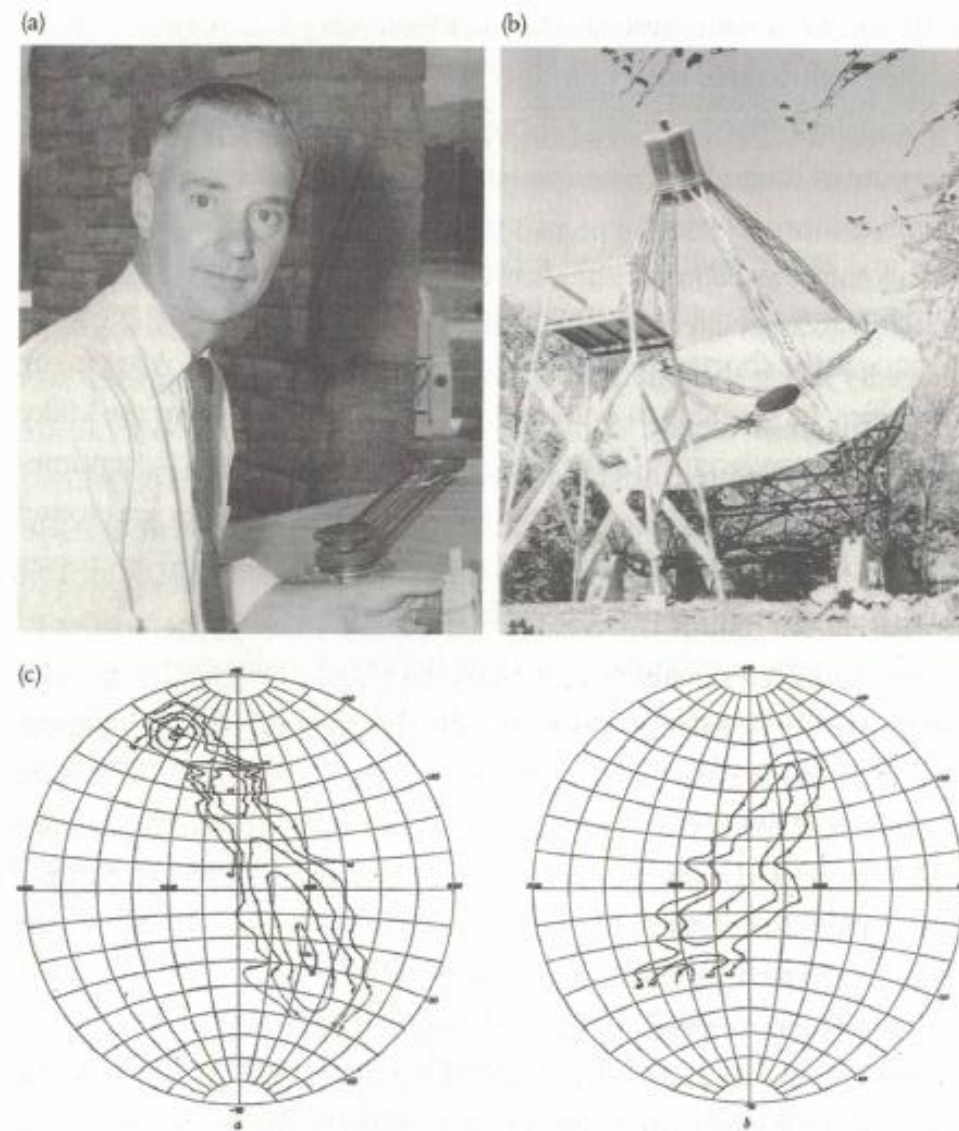


FIGURE 2 (a) Grote Reber. Photographed in 1937, when he built the first reflector radio telescope. (b) Reber's radio telescope. The 31-foot-diameter telescope at Reber's home in Wheaton, IL. Image courtesy of NRAO/AUI. (c) The radio sky mapped at 160 MHz. This contour map, published in 1944, shows the intensity of cosmic radio waves concentrated in a strip of sky along the Milky Way. Image courtesy of NRAO/AUI.

Радиокарти на Галактиката

408 MHz

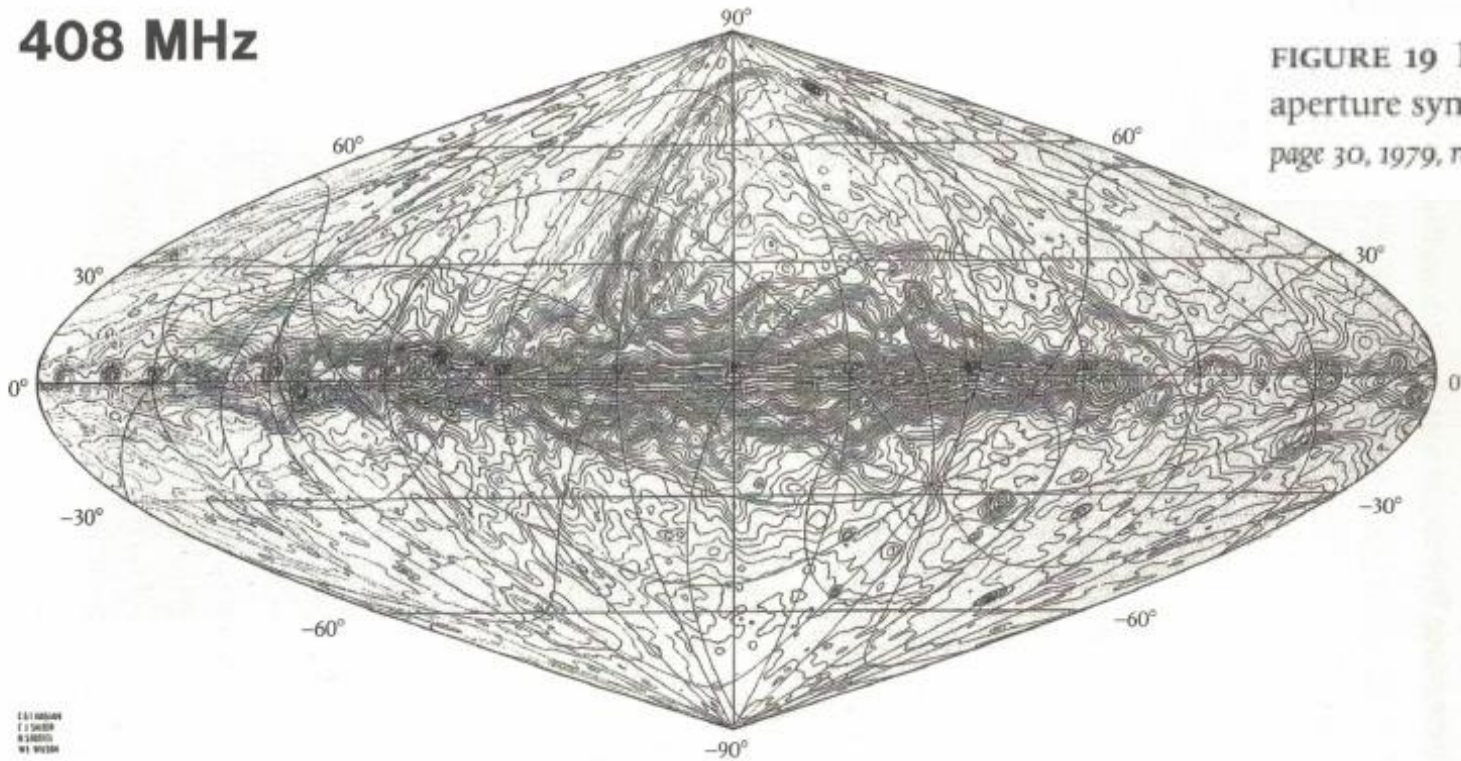


FIGURE 3 An all-sky map at 408 MHz (Haslam et al 1982). Courtesy Richard Wielebinski, MPIfR.

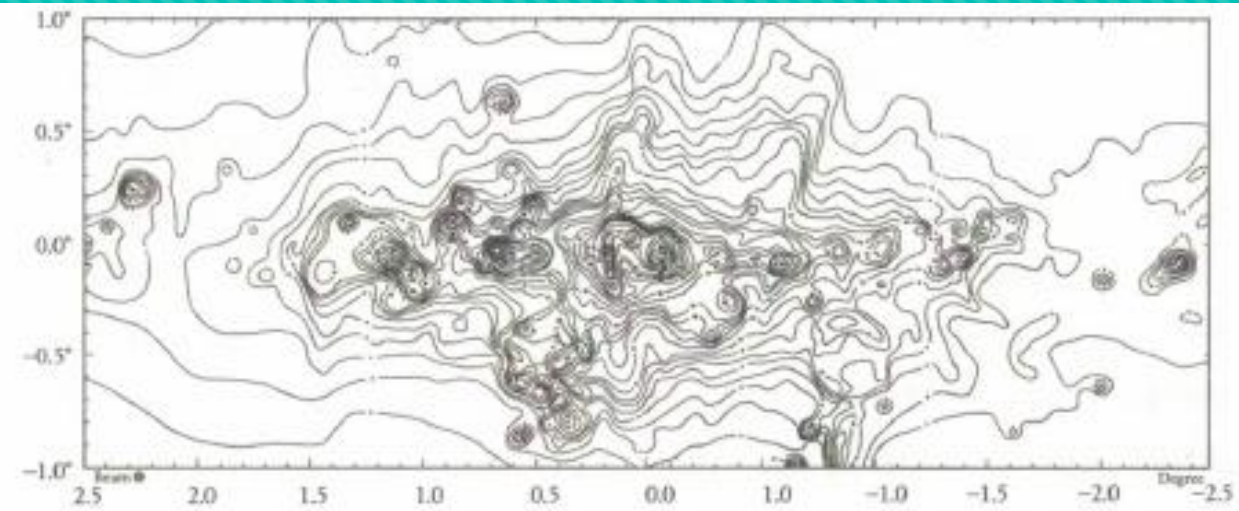


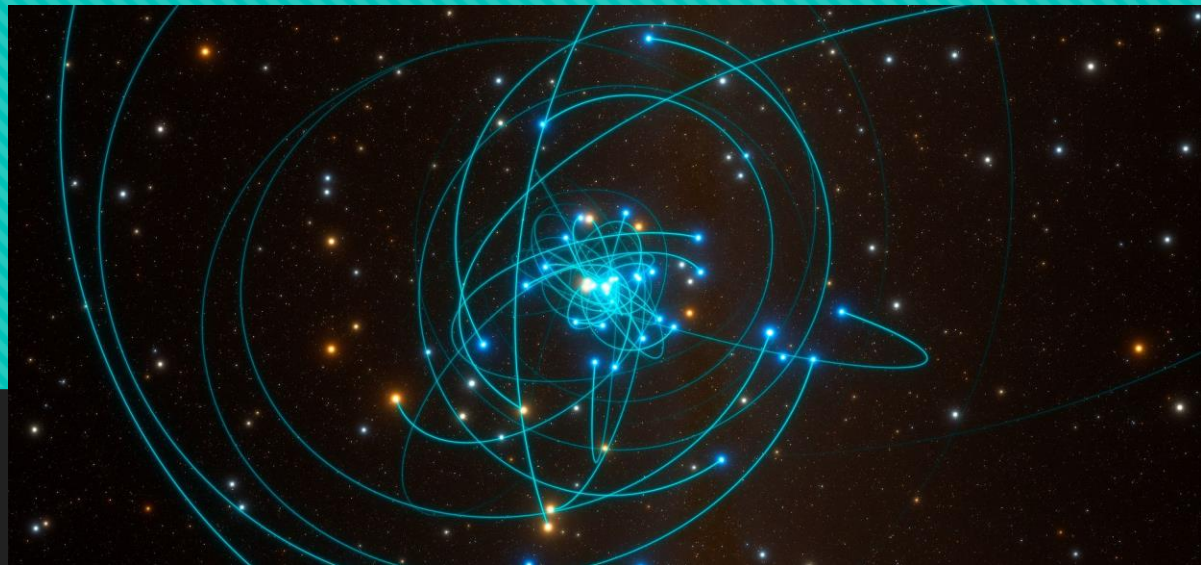
FIGURE 19 Radio map of the centre of our Galaxy, using a high resolution aperture synthesis radio telescope. Altenhoff, W.J. et al., *Astronomy & Astrophysics*, vol 35, page 30, 1979, reproduced with permission © ESO. *Astronomical Journal* 119:207.

Unseen cosmos, p.49

Unseen cosmos, p.13

Активни галактични ядра и черни дупки

<https://www.eso.org/public/news/eso0846/>



- 1964: Zel'dovich предполага, че в ядрата на активните галактики има масивна черна дупка
- 1969: по подобие на радионаблюденията на тези активни галактики, Donald Lynden-Bell предполага, че в центъра на нашата Галактика също има черна дупка
- 1974: ~ 3.5 cm (34 km-интерферометър) Bruce Balick & Robert Brown показват, че областта на силно радиоизлъчване в Стрелец – Sagittarius A* – има размер 1–3 дъгови секунди
- Централния обект Sgr A* е наблюдаван в радио 1–230 GHz (30 cm–13 mm)
- Показва също рязка промяна в яркостта – от рентгенови наблюдения
- В продължение на 16 години се конструират орбитите на звезди, обикалящи около Sgr A* – от инфрачервени наблюдения (~ 2 μ m, 0.1"): масата на централния обект се оценява на 4 мил. слънчеви маси и е с размер по-малък от разстоянието до най-близката орбита (S2) – от което следва, че в центъра на нашата Галактика има черна дупка

Метеори



FIGURE 5 Meteor radar at Jodrell Bank. This radar was the first instrument to be set up at this famous radio observatory.

Unseen cosmos, p.16

- Bernard Lovell, радарни наблюдения по време на втората световна война, построява радар на 20 мили от университета Манчестър с цел търсене на ехо от космични лъчи (cosmic ray showers)
- Открива ехо от метеори, вкл. през деня и в облачно време
- Построява нов мощен радар, използвайки насочена вертикално радиоантена-параболоиден рефlector ($D = 218 \text{ foot, } 66.4 \text{ m}$), $\lambda \sim 2 \text{ m}$, beamwidth $\sim 2^\circ$



FIGURE 6 The 218-foot radio telescope at Jodrell Bank. Central Press Photos Ltd

Unseen cosmos, p.17

Радиокарта на Андромеда

- Ограничението на фиксираната антена в Jodrell Bank се заобикаля с промяна ориентацията на приемащата антена – а с въртенето на Земята става възможно описването на област по небето до 15° : наблюдават радиоизлъчването от Галактиката и още няколко изолирани източника
- 1950: направена е първата радиокарта на галактиката Андромеда (спиралната структура в радио емисия е от областите на неутрален водород)
- Поставя се началото на новата обсерватория Jodrell Bank Observatory, монтировка alt-az

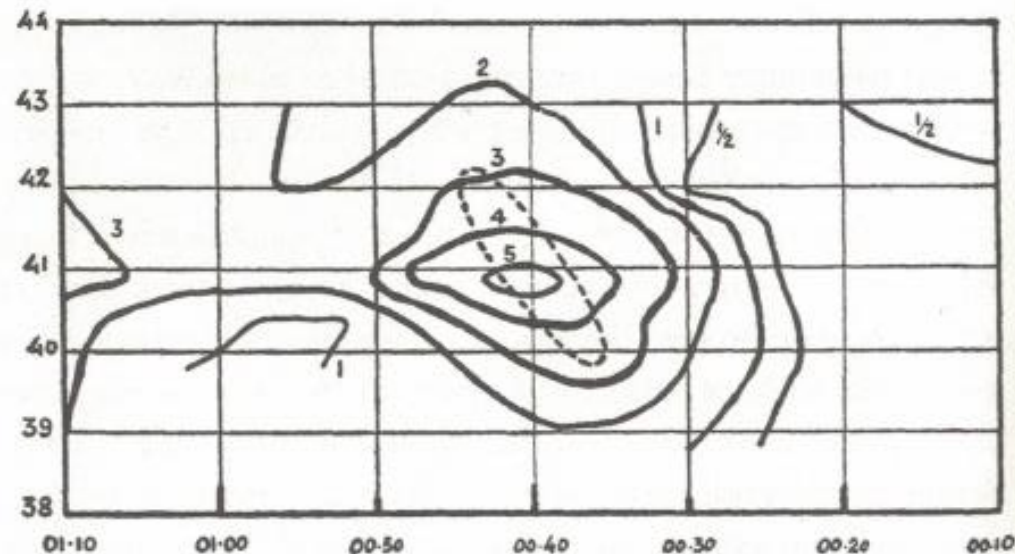


FIGURE 7 The Andromeda Nebula. A radio map made in 1950 with the 218-foot paraboloid radio telescope at Jodrell Bank. Courtesy of Oxford University Press and the Monthly Notices of the Royal Astronomical Society.

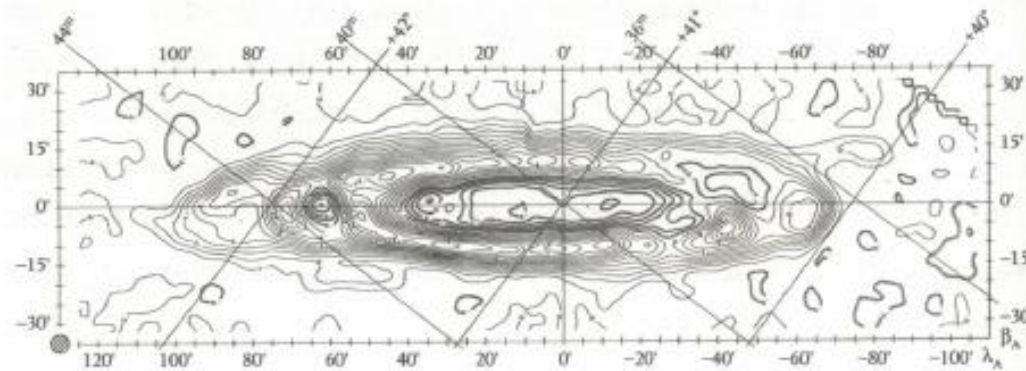


FIGURE 8 A modern radio map of the Andromeda Nebula. A radio map made in 1974 with the 100-metre radio telescope at Effelsberg, Germany. A short wavelength was used, giving the telescope a narrow beam only 5 minutes of arc across. Berkhuijsen, E. M., *Astronomy & Astrophysics*, vol 57, page 14, 1977, reproduced with permission © ESO.

Радиокарта на Андромеда

○ 1984: ~50 cm

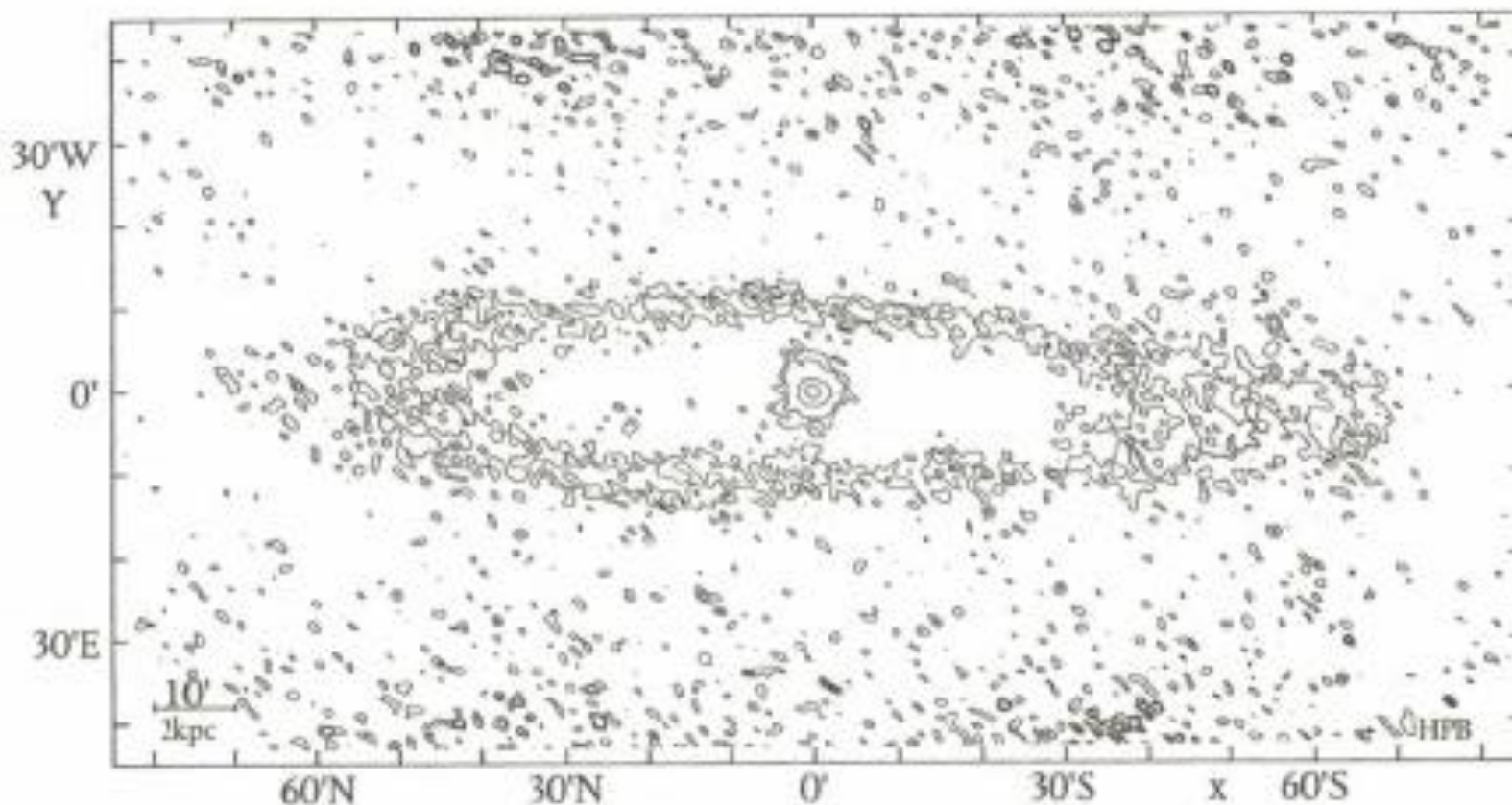
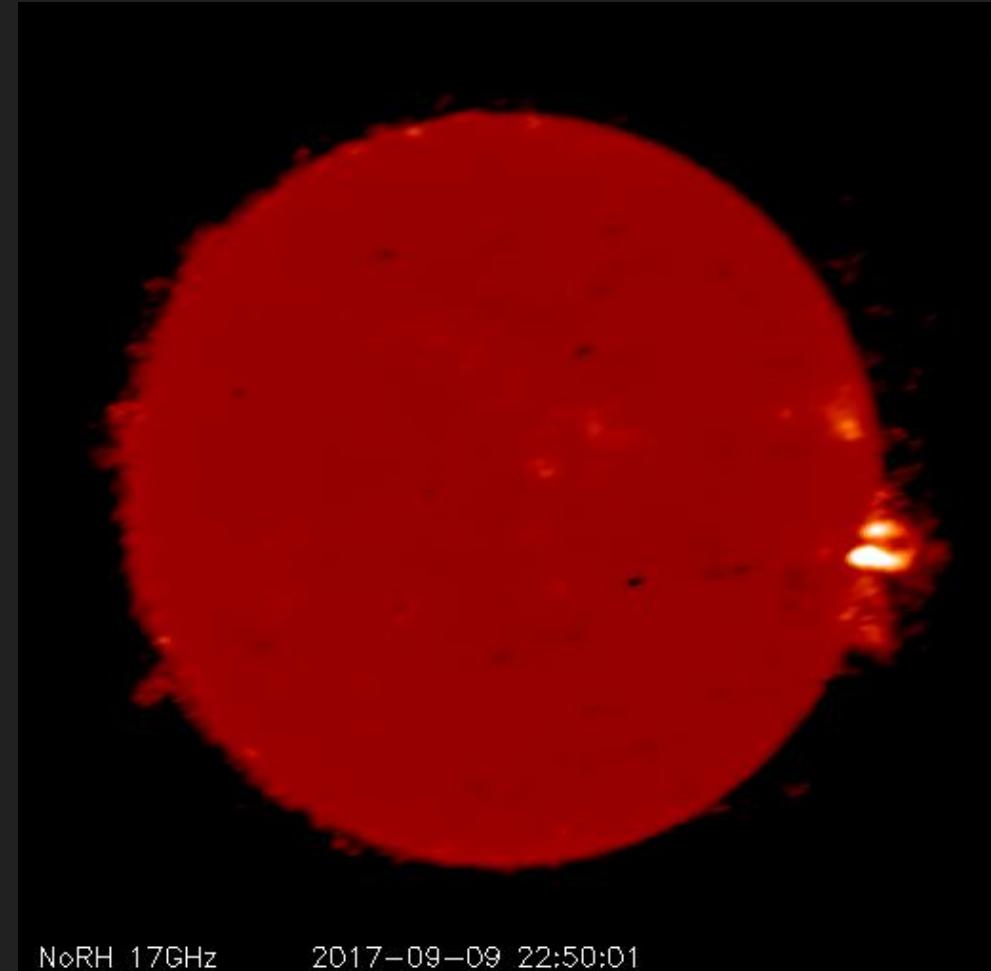


FIGURE 18 Radio map of the Andromeda Nebula, showing a bright source at the centre. An early example of a map made using an aperture synthesis telescope, the WSRT. Bystedt, J.E.V. et al., *Astronomy & Astrophysics*, vol 56, page 277, 1984, reproduced with permission © ESO.

Слънцето в радиовълни

- Спокойното Слънце – няма значителна емисия
- Активното Слънце – силен радиоизточник по време на слънчеви избухвания
- George Southworth (Bell Labs.), докладва температури 10 000 K на къси вълни – емисия от хромосферата
- На дълги вълни ~ 1.5 m, Joseph Pawsey (Австралия), докладва температури от 1 мил. K – емисия от короната
- 1944: Гроте Ребер наблюдава радиоемисия
- Слънчеви радио обсерватории в Сев. Америка, Европа, Австралия, Азия – динамични спектрограми и радио-хелиографи
- <http://secchirh.obspm.fr/>
- https://cdaw.gsfc.nasa.gov/CME_list/



NoRH 17GHz

2017-09-09 22:50:01

Юпитер и другите планети от Слънчевата система

- 1955 (USA): 22 MHz (14 m), с цел наблюдение на мъглявината Рак, след преминаване на Юпитер през зоната на наблюдение се открива и емисия от атмосферата на планетата
- Радарни наблюдения (за карти на повърхността и разстояния):

1946: Луната (за първи път от Zoltan Bay - Унгария) – по-късно се правят детайлни карти на повърхността

1961?: Венера (едновременно в няколко страни) – за точно определяне на разстоянията в Слънчевата система

1965: Меркурий

(околоосно въртене : орбитално въртене = 3:2)

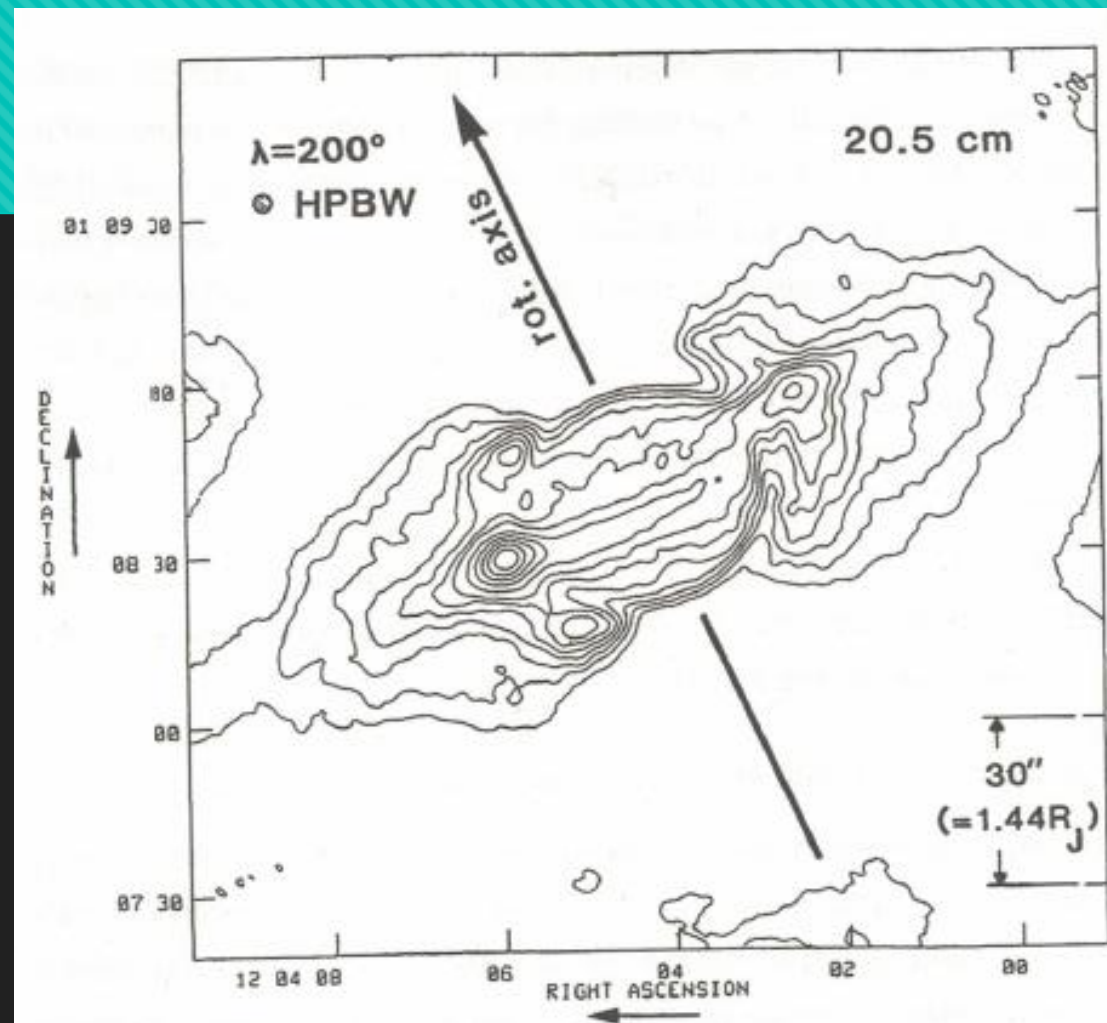


FIGURE 14 A contour map of Jupiter at wavelength 20 centimetres. Republished with permission of Annual Review of Astronomy and Astrophysics, from 'Radio images of the planets', de Pater, I., Vol 28, 1990; permission conveyed through Copyright Clearance Center, Inc.

Спиралната структура на Галактиката

- Jan Oort (Netherlands) дава задача на студента Hendrik van der Hulst да открие спектрална линия в радио-областта, която да може да се наблюдава
- 21-см линия (1420 MHz) е открита и наблюдавана за първи път в САЩ, а после и в Холандия и Австралия, забранена линия, при промяна на спина
- 1958: Наблюдения на неутрален водород на 21 см чрез доплерови отмествания – диагностика за динамиката на Галактиката
- Наблюдение по лъча на зрение дава само разпределение на скоростите, използвайки модел от скоростите се извеждат разстоянията

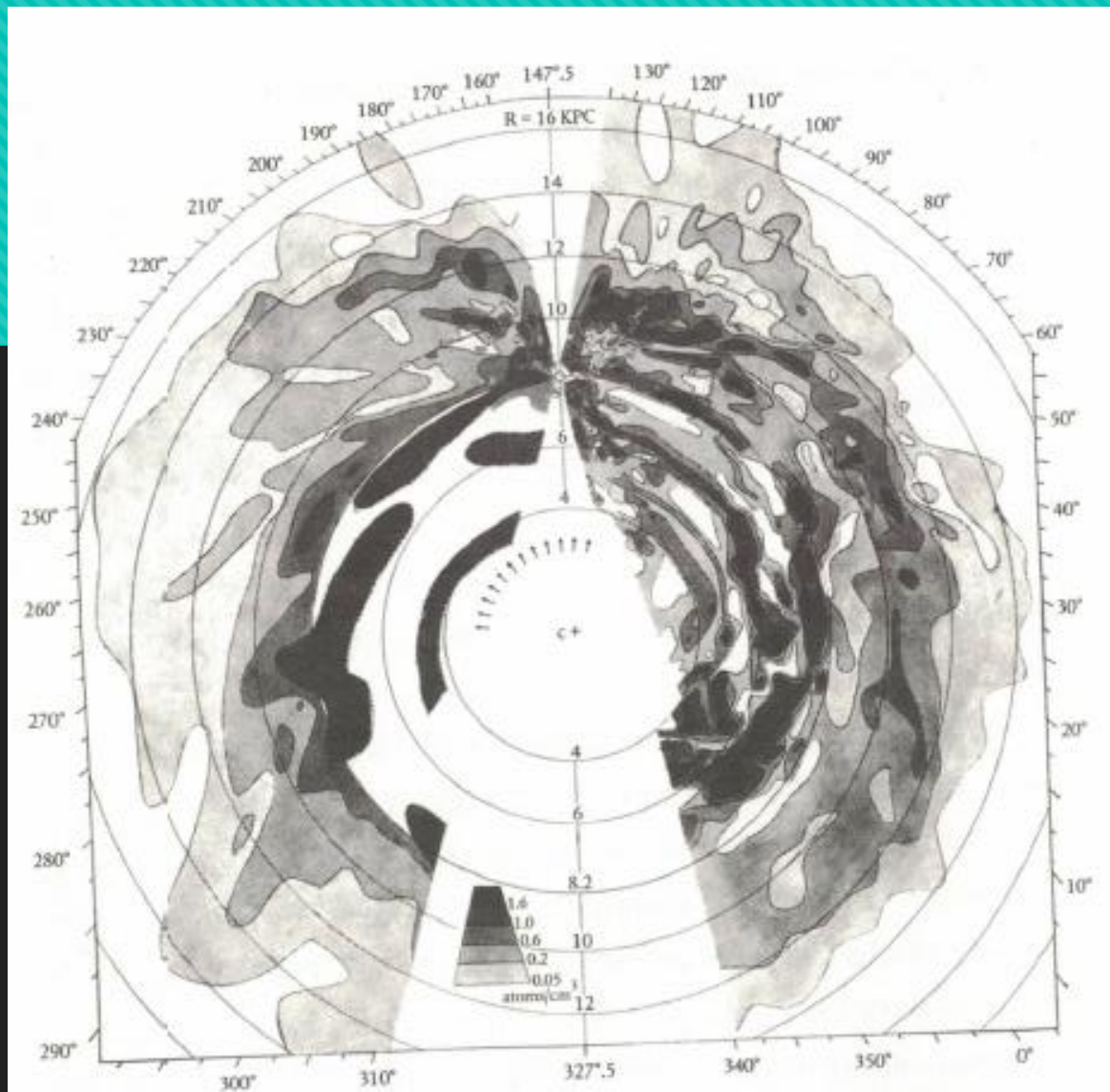


FIGURE 16 A map of hydrogen in the Milky Way galaxy, drawn in 1958 by combining hydrogen spectral line observations made in the Netherlands and Australia. This was the first map to show the spiral arm structure of our own Galaxy. Courtesy of Oxford University Press and the Monthly Notices of the Royal Astronomical Society.

Тъмна материя

- Крива на въртене на Галактиката: чрез спектроскопия на звезди и радионаблюдения на междувъзден газ
- Подобни криви са получени и за други галактики

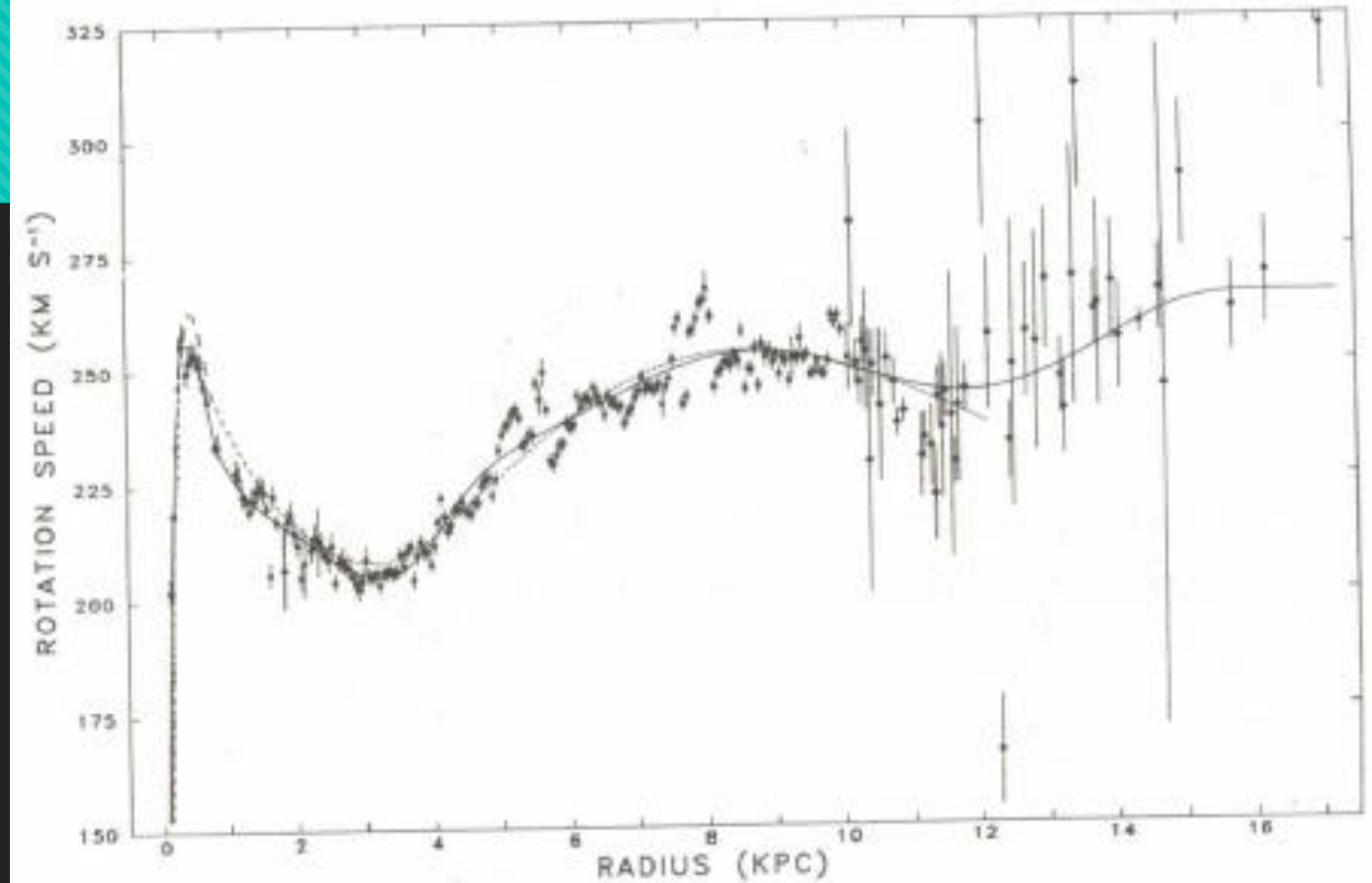


FIGURE 17 The rotation curve of the Milky Way. The curve, which is found from measurements of velocities of stars and gas, shows how the rotation increases from the centre out to a distance of around 15,000 light-years, and continues at more than 200 kilometres per second as far as measurements can be made. Clemens 1985. Reproduced by permission of the AAS.

Радиогалактики

- 1946: James Hey открива флукутиращ радиосигнал от съзвездието Лебед
- Показва се, че радиоемисията идва от обект с компактни размери подобни на звезда – т.нар. радиогалактика Cygnus A
- Необходимо е точно измерване на позицията на радиоизточника, за да се сравни с оптически наблюдения

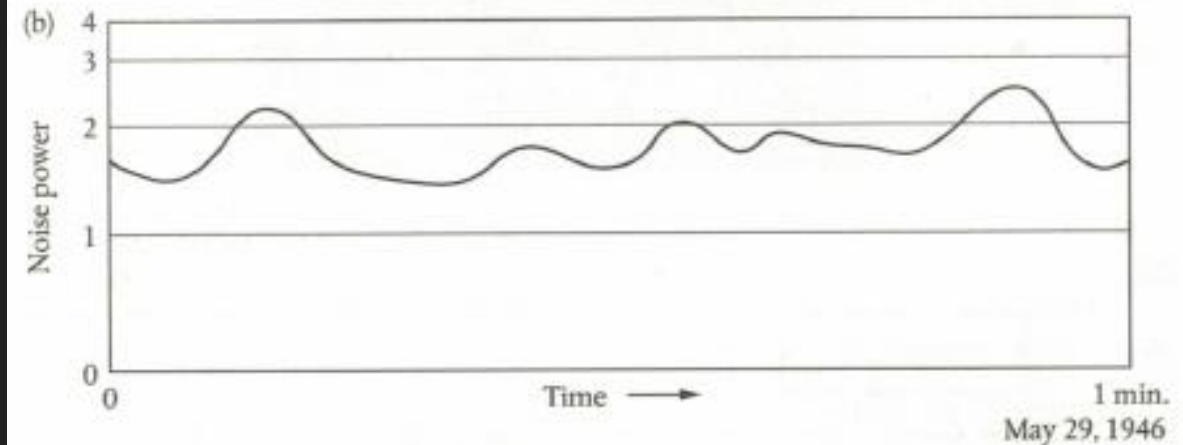


FIGURE 28 James Hey (a) and the record of a fluctuating signal from Cygnus (b). (a) Hencoup/Galaxy. (b) Reprinted by permission from Macmillan Publishers Ltd: Nature Hey, J.S. et al 1946 'Fluctuations in Cosmic Radiation at Radio-Frequencies' vol. 158 © 1946.

Радиогалактики

- В Австралия се построява интерферометър с по-голяма разделителна способност, главно за наблюдения на Слънцето и слънчеви петна, който се използва за новооткритите радиоизточници

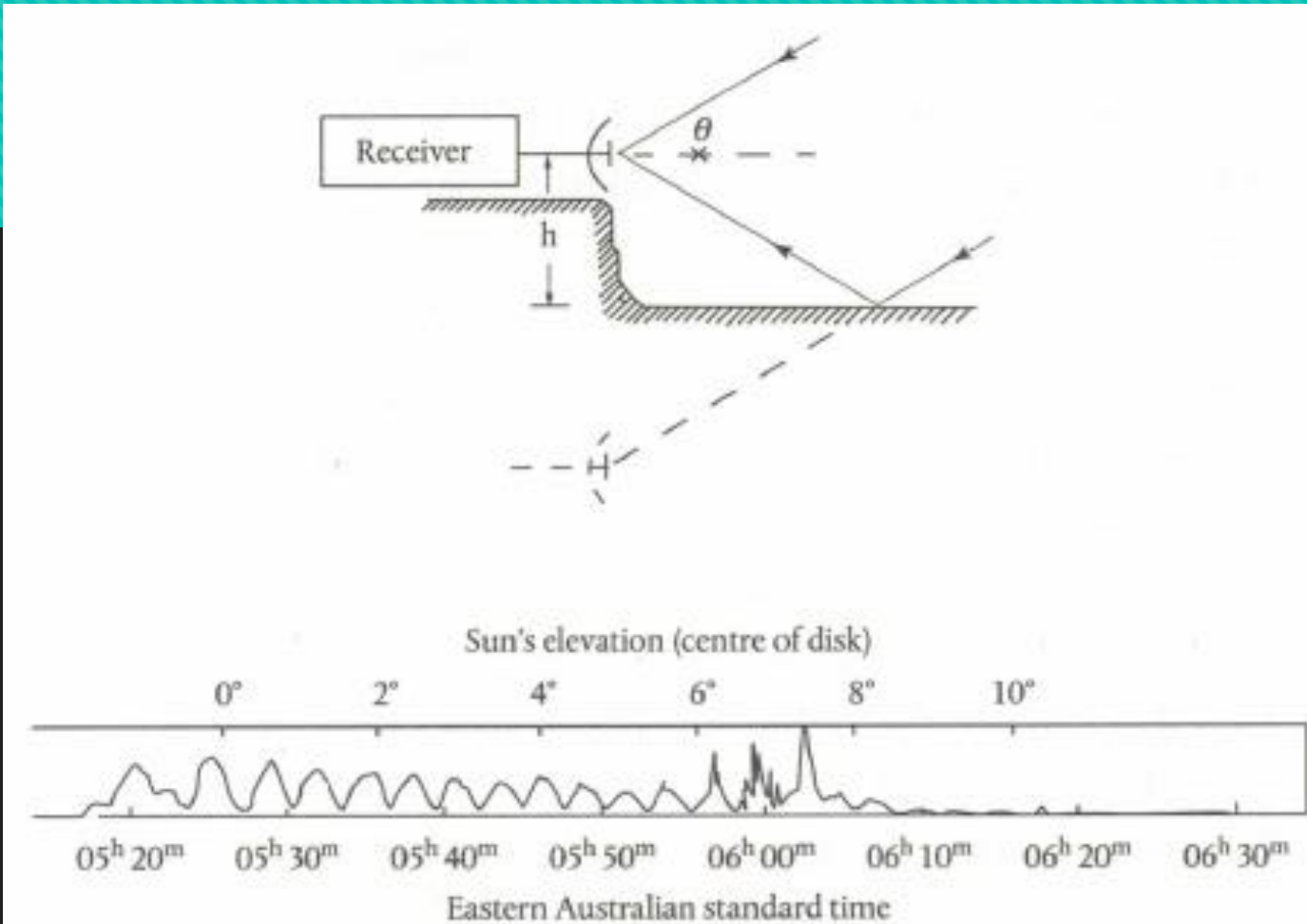


FIGURE 11 Distribution of radio brightness across the Sun: (a) at a long wavelength (2.5 m, 120 MHz), where the corona dominates; (b) at a short wavelength (9 mm, 33 GHz), where the inner part of the corona is seen brightly at the edge of the chromosphere.

Радиогалактики

- 1948: John Bolton (Australia) използва интерферометър, построен за наблюдения на Слънцето и слънчеви петна
- От интерферентния сигнал определя позицията на източника Cygnus A, с точност части от градуса, първоначално без да е открит ярък обект или звезда в близката околност
- Намира още три подобни радиоизточника, тяхната позиция и ги сравнява с оптически видими обекти, открива, че това са: M87 (in Virgo), Centaurus A & Crab Nebula (в нашата галактика)

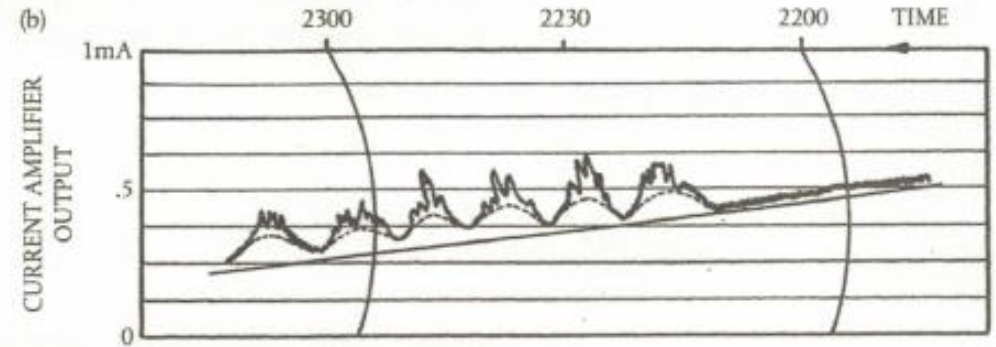


FIGURE 29 John Bolton (a) and the first interferometer record of Cygnus A (b). His interferometer used a single antenna, mounted on a cliff (Dover Heights) near Sydney. Pointing near the horizon, the antenna picked up radio waves reflected in the sea, giving the effect of an interferometer pair spaced by twice the cliff height. Cygnus A rose above the horizon at 2215 (time increases right to left). (a) Courtesy of the Archives, California Institute of Technology. (b) CSIRO Radio Astronomy Image Archive.

Радиогалактики

- Едновременно, през 1948: Martin Ryle & Francis Graham-Smith (UK) също използват интерферометър за наблюдения на Слънцето и слънчеви петна
- 1949: наблюдават Cygnus A, но откриват втори радио източник, по-близък до северния полюс (времето на диаграмата дава дължината, ректазцензията, а степента на ъглово движение – ширината, деклинацията)
- Това е т.нар. Cas A (Cassiopeia A) – с помощта на астрономи с по-мощни телескопи – откриват, че обекта е остатък от избухване на свръхнова
- Построяват по-мощен (транзитен) интерферометър, даващ позициите с точност $1''$, с който потвърждават наблюденията от Австралия

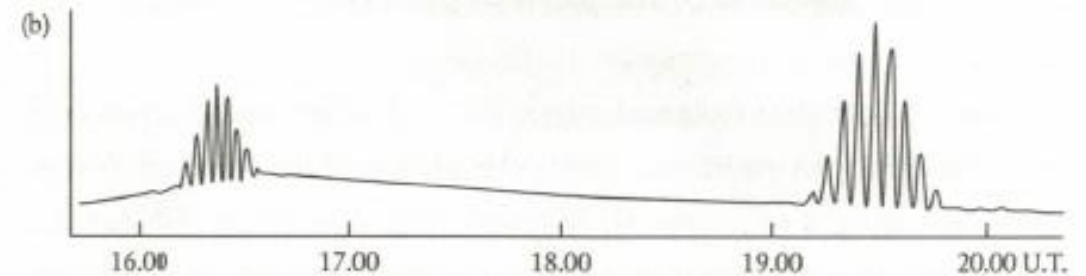


FIGURE 30 (a) Martin Ryle and the author are shown constructing the interferometer antenna. (b) The radio sources Cygnus A and Cassiopeia A recorded with an interferometer at Cambridge in 1949. (a) Bruce Elsmore. (b) Courtesy of Oxford University Press and the Monthly Notices of the Royal Astronomical Society.

Cygnus A

- От позициите, определени в Кеймбридж, използвайки най-мощния тогава телескоп – Mount Palomar Observatory 508 cm, Walter Baade & Rudolf Minkowski откриват далечна галактика
- По спектъра на галактиката се открива, че линиите са отместени към червения край – т.е. галактиката се отдалечава ($z = 0.056$) и по закона на Хъбъл се определя разстояние от 10 мил. светлинни години
- За да се определи по-точно обекта, радионаблюденията трябва да оценят ъгловия размер на източника
- Почти едновременно това се прави в Сидни, Кеймбридж и Джодрел Банк (там също дават и структурата): видима галактика – няколко дъгови секунди, радиогалактика – няколко дъгови минути
- Структурата е наблюдавана с новия телескоп в Кеймбридж – т.нар. aperture synthesis, 1 cm, 1''

Unseen cosmos, p.96

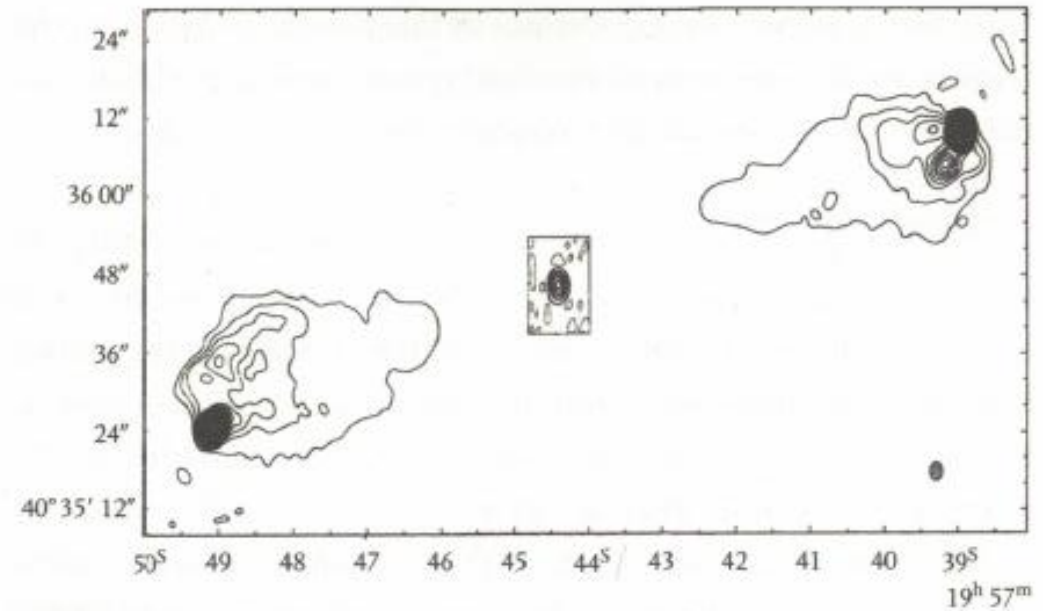


FIGURE 31 The Cygnus A radio galaxy mapped using the Ryle 5 km Radio Telescope at Cambridge in 1974. Courtesy of Oxford University Press and the Monthly Notices of the Royal Astronomical Society.

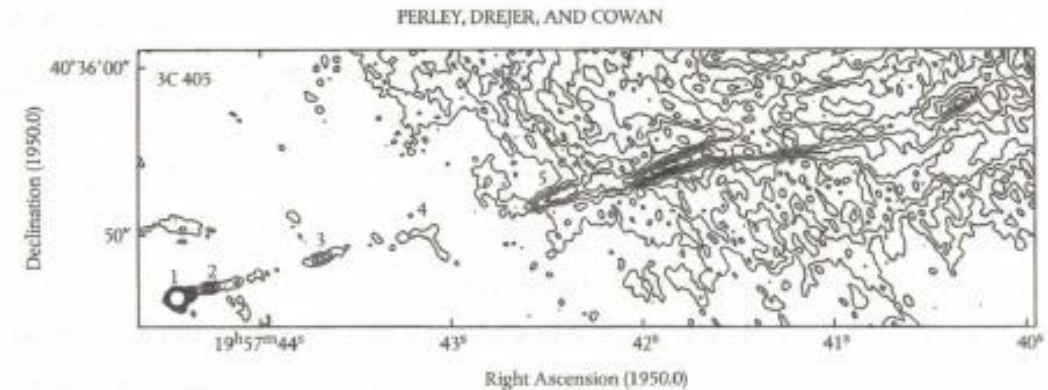
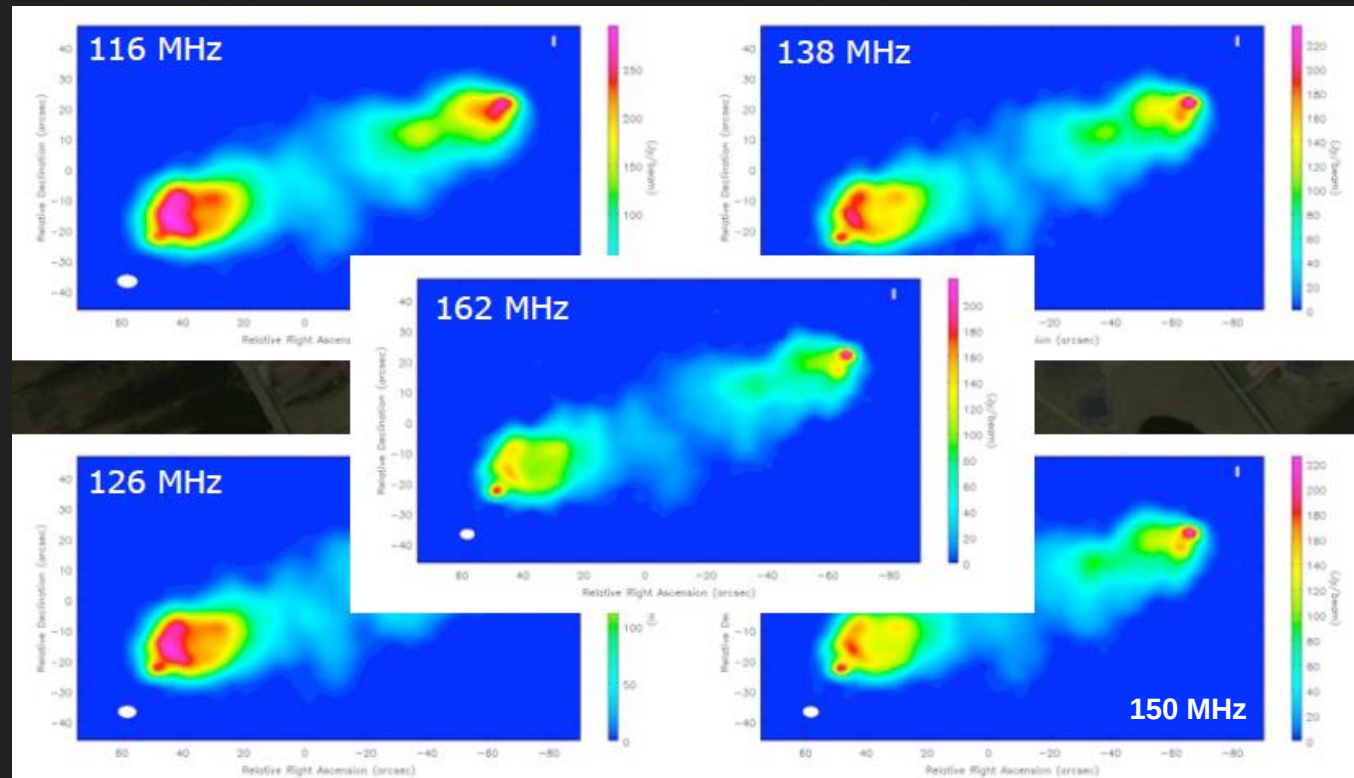
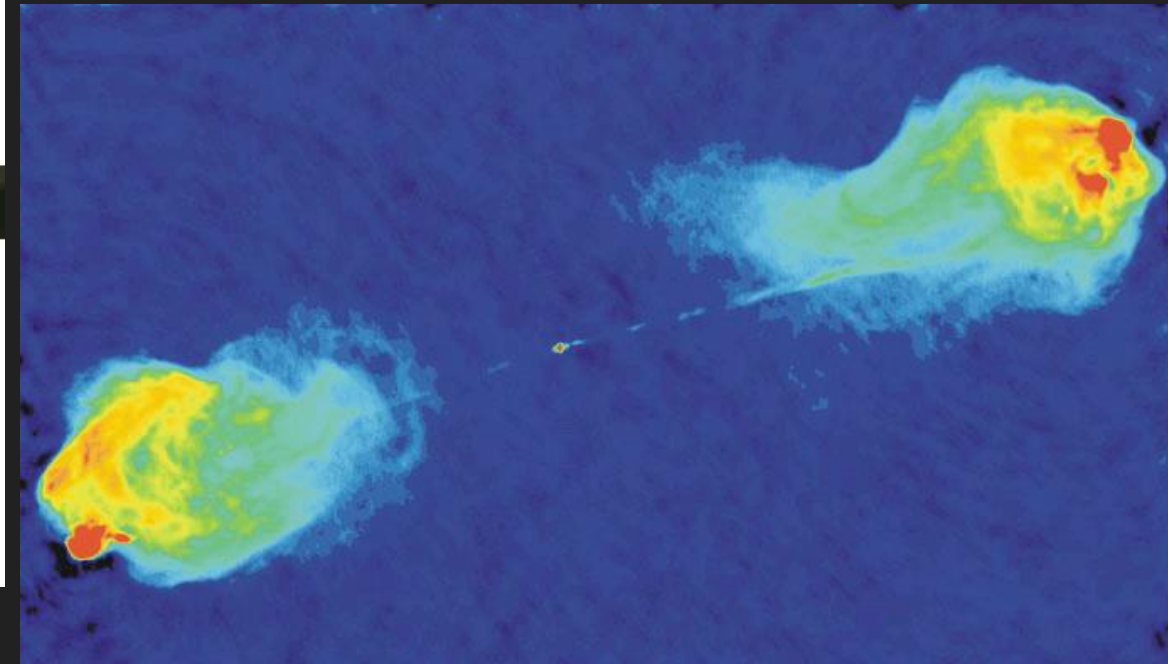


FIGURE 32 The jet in the Cygnus A radio galaxy. The central black hole is the origin of a jet whose energy is dissipated in the diffuse outer lobe of hot gas. VLA map at 6 cm wavelength. (Perley et al. 1984). Reproduced by permission of the AAS.

Cygnus A

VLT, 6 cm, 300 000 ly: twin-jet, twin-lobe (hotspots)

VLA, 4.9 GHz, Perley et al. (1984)



Quasars

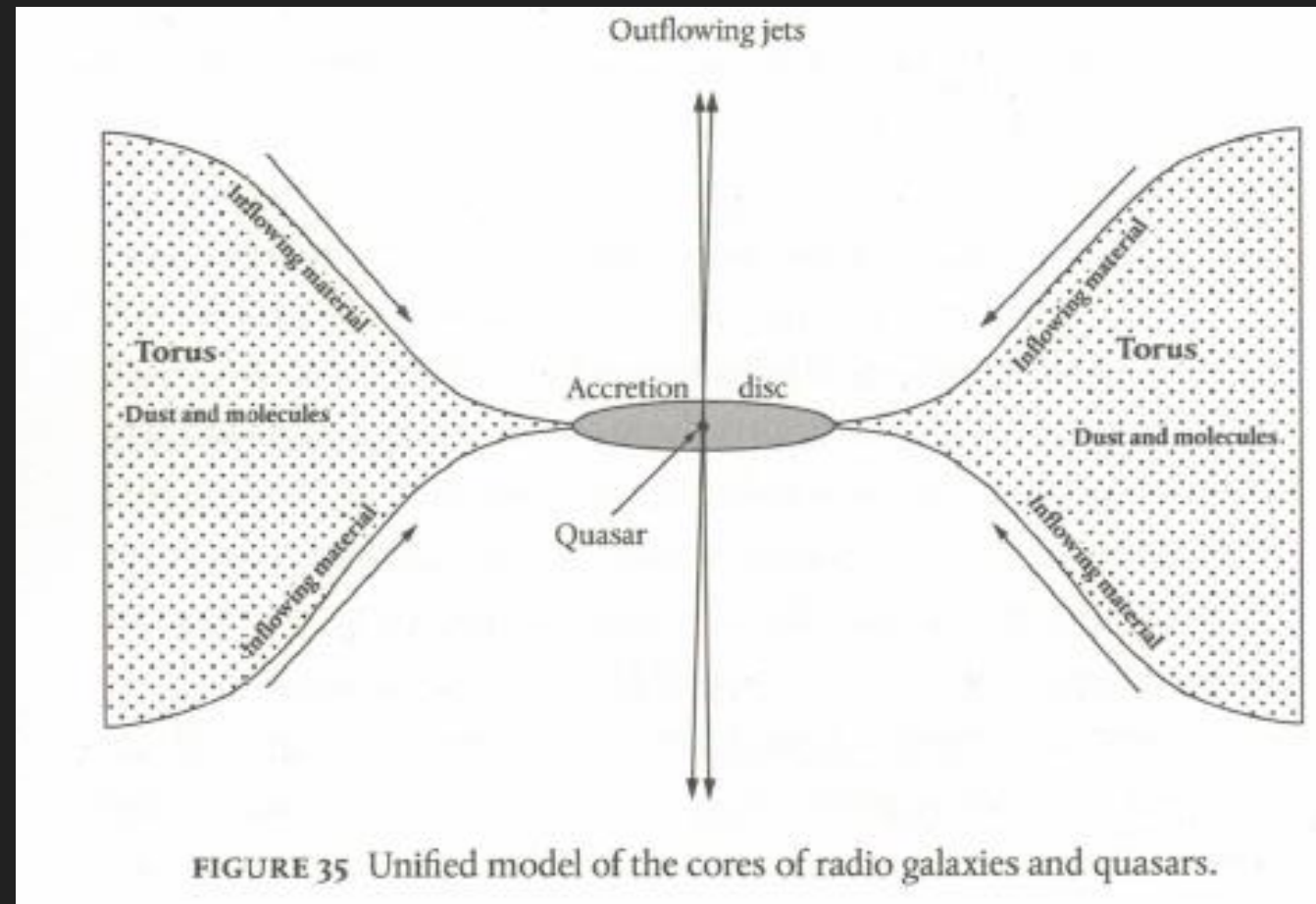
- 1950s: Cambridge 3C catalog
- Откриват 470 радио източника с позиции, установяват се оптичните източници
- Нов интерферометър в Jodrell Bank (Lowell Telescope, 115 km baseline): разделителна способност под $3''$, Cyg A се разделя на две компоненти, както повечето източници, но 4 обекта остават точкови източници (с размери под $0.5''$) – наричат ги **quasar – quasi-stellar objects**
- 3C 273 – чрез лунна окултация се определя позицията на обекта до $1''$ съвпадащ със звезда от 13-та звездна величина, от отместените спектрални линии на обекта се определя: $z = 0.158$, откриват джет
- За останалите три обекта определят: $z = 0.3675, 0.425, 0.545$
- 1965: Maarten Schmidt открива нов квазар: 2C9, $z = 2.012$

Други наблюдения

- 1956: Walter Baade показва, че емисията от джета в M87 е поляризиран (знак за синхротронна емисия)
- AGNs, Seyfert galaxies
- 1965: Alan Sandage открива радио-тихи квазари

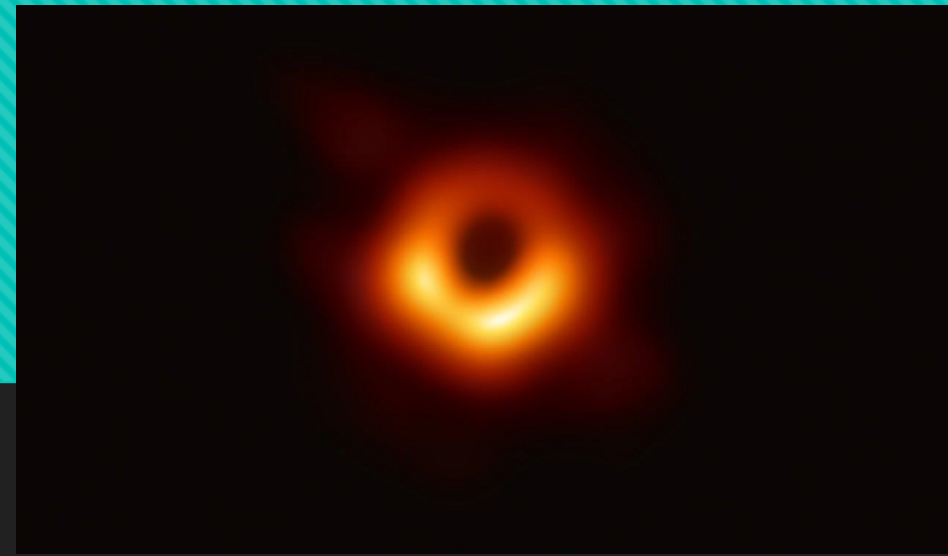
Radio galaxies – quasars – AGNs

- 1964: Edwin Salpeter/Yakov Zel'dovich независимо един от друг създават теория за централния обект в AGN – черна дупка
- Наблюдавани са само два вида: Двойни системи с черна дупка с 10–20 слънчеви маси или черни дупки с милиони слънчеви маси в центъра на галактики
- Един и същ феномен, имащ черна дупка като източник на енергия, с разлика в радиояркостта – като при радиогалактиките не се различава централен обект
- Обобщен модел (черна дупка, акреционен диск, джетове, торус)



ESO latest news: M87's black hole

<https://www.eso.org/public/news/eso1907/?lang>



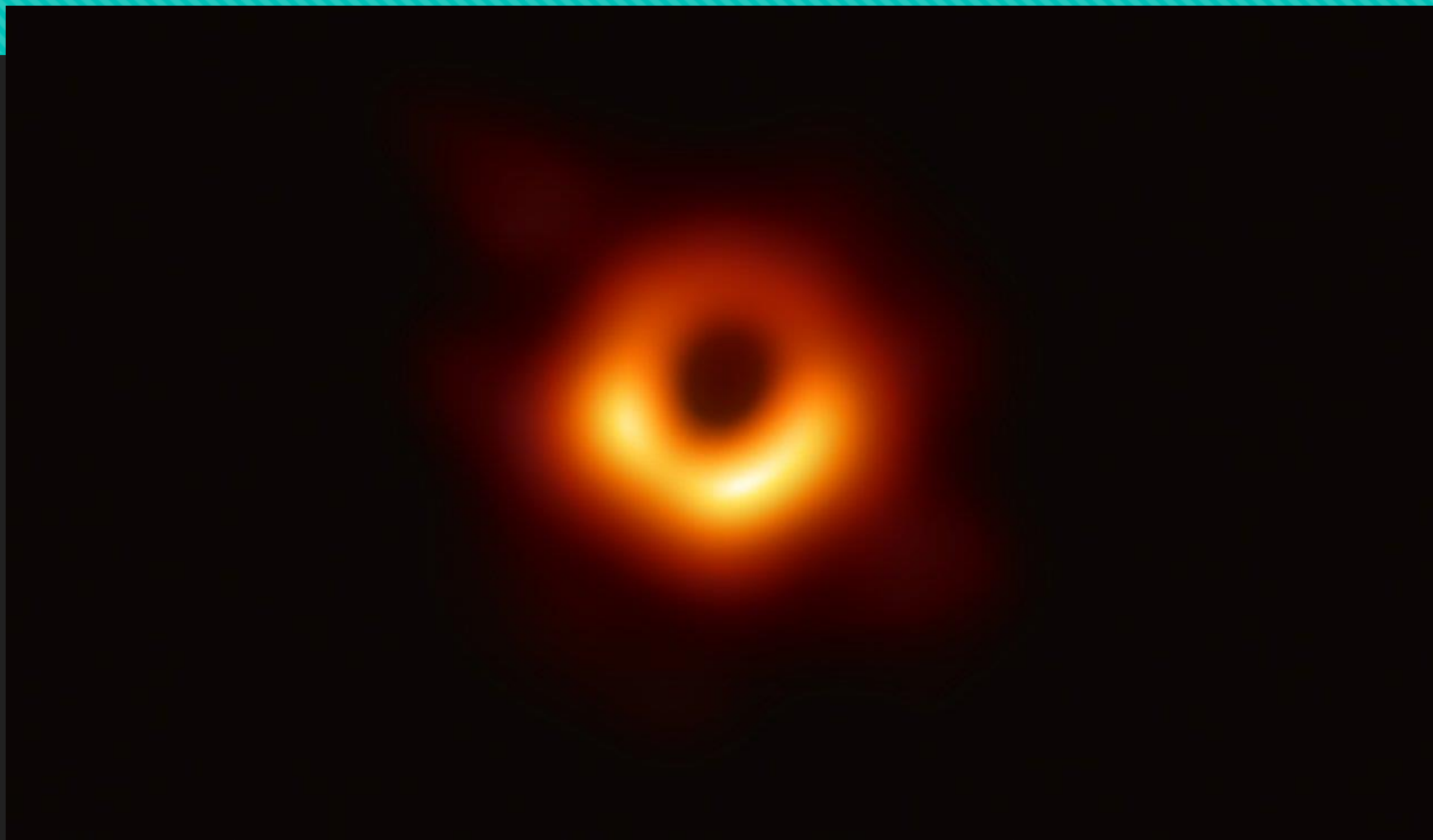
“Astronomers Capture First Image of a Black Hole

- The shadow of a black hole is the closest we can come to an image of the black hole itself, a completely dark object from which light cannot escape. The black hole's boundary — the event horizon from which the EHT takes its name — is around 2.5 times smaller than the shadow it casts and measures just under 40 billion km across. *"If immersed in a bright region, like a disc of glowing gas, we expect a black hole to create a dark region similar to a shadow — something predicted by Einstein's general relativity that we've never seen before,"* explained chair of the EHT Science Council Heino Falcke of Radboud University, the Netherlands. *"This shadow, caused by the gravitational bending and capture of light by the event horizon, reveals a lot about the nature of these fascinating objects and has allowed us to measure the enormous mass of M87's black hole."*
- Supermassive black holes are relatively tiny astronomical objects — which has made them impossible to directly observe until now. As the size of a black hole's event horizon is proportional to its mass, the more massive a black hole, the larger the shadow. Thanks to its enormous mass and relative proximity, M87's black hole was predicted to be one of the largest viewable from Earth — making it a perfect target for the EHT.
- Although the telescopes are not physically connected, they are able to synchronize their recorded data with atomic clocks — hydrogen masers — which precisely time their observations. These observations were collected at a wavelength of 1.3 mm during a 2017 global campaign. Each telescope of the EHT produced enormous amounts of data – roughly 350 terabytes per day – which was stored on high-performance helium-filled hard drives. These data were flown to highly specialized supercomputers — known as correlators — at the Max Planck Institute for Radio Astronomy and MIT Haystack Observatory to be combined. They were then painstakingly converted into an image using novel computational tools developed by the collaboration.

ESO latest news: M87's black hole

За наблюдението са
използвани 8 наземни
радиотелескопа

- ALMA
- APEX
- IRAM 30-meter telescope
- James Clerk Maxwell Telescope
- Large Millimeter Telescope Alfonso Serrano
- Submillimeter Array
- Submillimeter Telescope
- South Pole Telescope



Singularity

At the very centre of a black hole, matter has collapsed into a region of infinite density called a singularity. All the matter and energy that fall into the black hole ends up here. The prediction of infinite density by general relativity is thought to indicate the breakdown of the theory where quantum effects become important.

Event horizon

This is the radius around a singularity where matter and energy cannot escape the black hole's gravity: the point of no return. This is the "black" part of the black hole.

Photon sphere

Although the black hole itself is dark, photons are emitted from nearby hot plasma in jets or an accretion disc (see below). In the absence of gravity, these photons would travel in straight lines, but just outside the event horizon of a black hole, gravity is strong enough to bend their paths so that we see a bright ring surrounding a roughly circular dark "shadow".

Relativistic jets

When a black hole feeds on stars, gas or dust, the meal produces jets of particles and radiation blasting out from the black hole's poles at near light speed. They can extend for thousands of light-years into space.

Innermost stable orbit

The inner edge of an accretion disc is the last place that material can orbit safely without the risk of falling past the point of no return.

Accretion disc

A disc of superheated gas and dust whirls around a black hole at immense speeds, producing electromagnetic radiation (X-rays, optical, infrared and radio) that reveal the black hole's location. Some of this material is doomed to cross the event horizon, while other parts may be forced out to create jets.

Accretion disc

Event horizon

Relativistic Jet

Singularity

Photon sphere

Innermost stable orbit

Artist impression

Credit: ESO

<https://www.eso.org/public/news/eso1907/?lang>

Диагностика за електронна плътност

Приложения от наблюдения на квазари:

- Квазари – дисперсионно забавяне на сигнала на различни честоти при наблюдения от всички посоки, поради наличието на електрони по пътя на зрение. Използва се за оценка на съдържанието на електрони (total electron content), а ако е известно разстоянието до пулсара може да се оцени и електронната плътност.
- Свободна (free-free) емисия на електрони, при преминаване в полето на протон $\sim n_e^2$

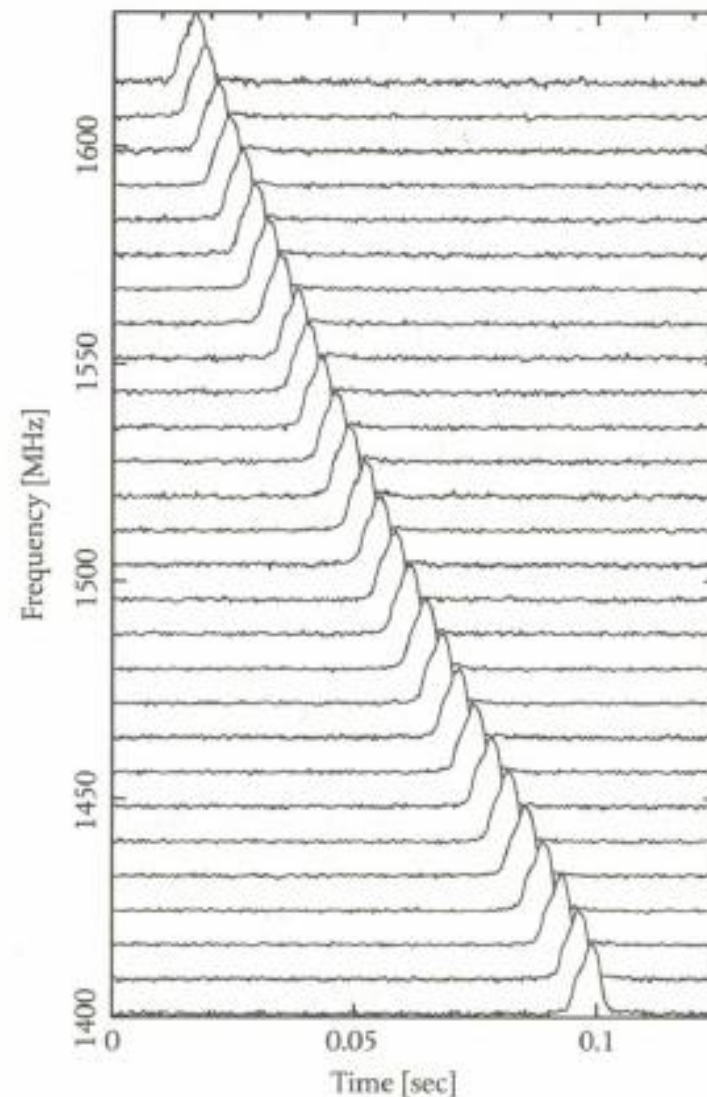


FIGURE 21 The arrival time of a pulse from a pulsar is delayed by electrons in interstellar space. The delay is greater for lower frequencies, as seen from the arrival time in 28 adjacent frequency bands. From 1620 to 1400 MHz the delay increases by 80 milliseconds. Patrick Weltevrede, Jodrell Bank Observatory.

Магнитно поле на Галактиката

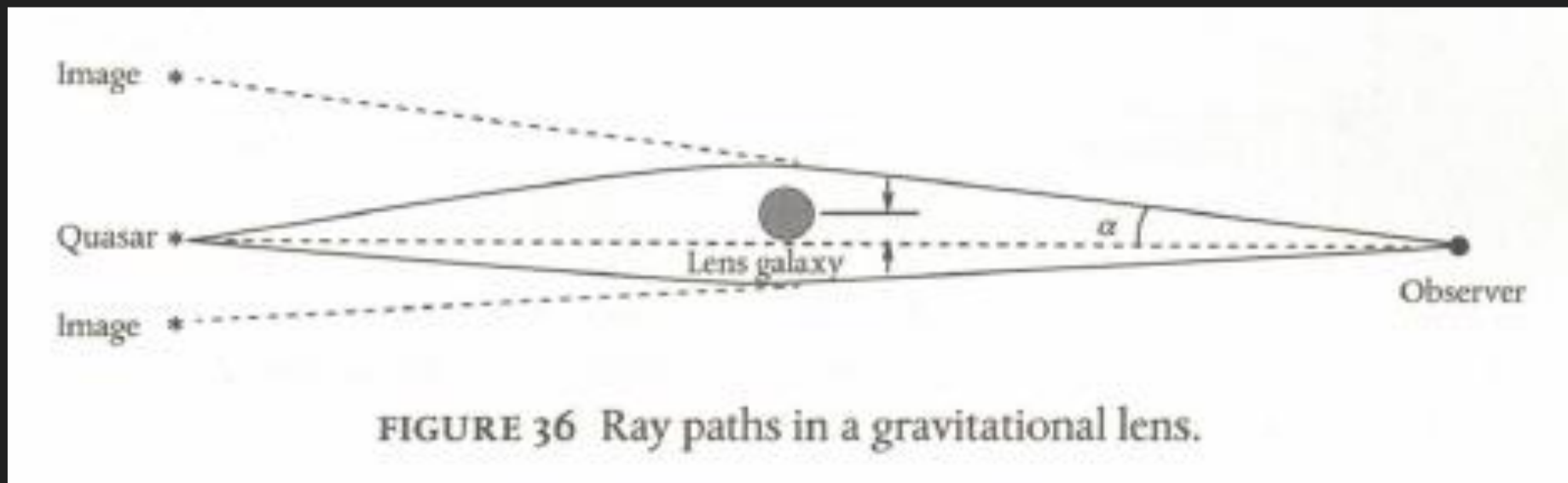
Приложения от наблюдения на квазари:

- Показва се, че радиоемисията им е поляризирана – нов начин да се намери магнитното поле на междупланетната среда по лъча на зрение – Faraday rotation
- Магнитното поле на Галактиката следва ориентацията на ръкавите
- Сцинтилация на радиоемисия – използва се за диагностика на турбуленцията в междупланетната среда

Gravitational lens

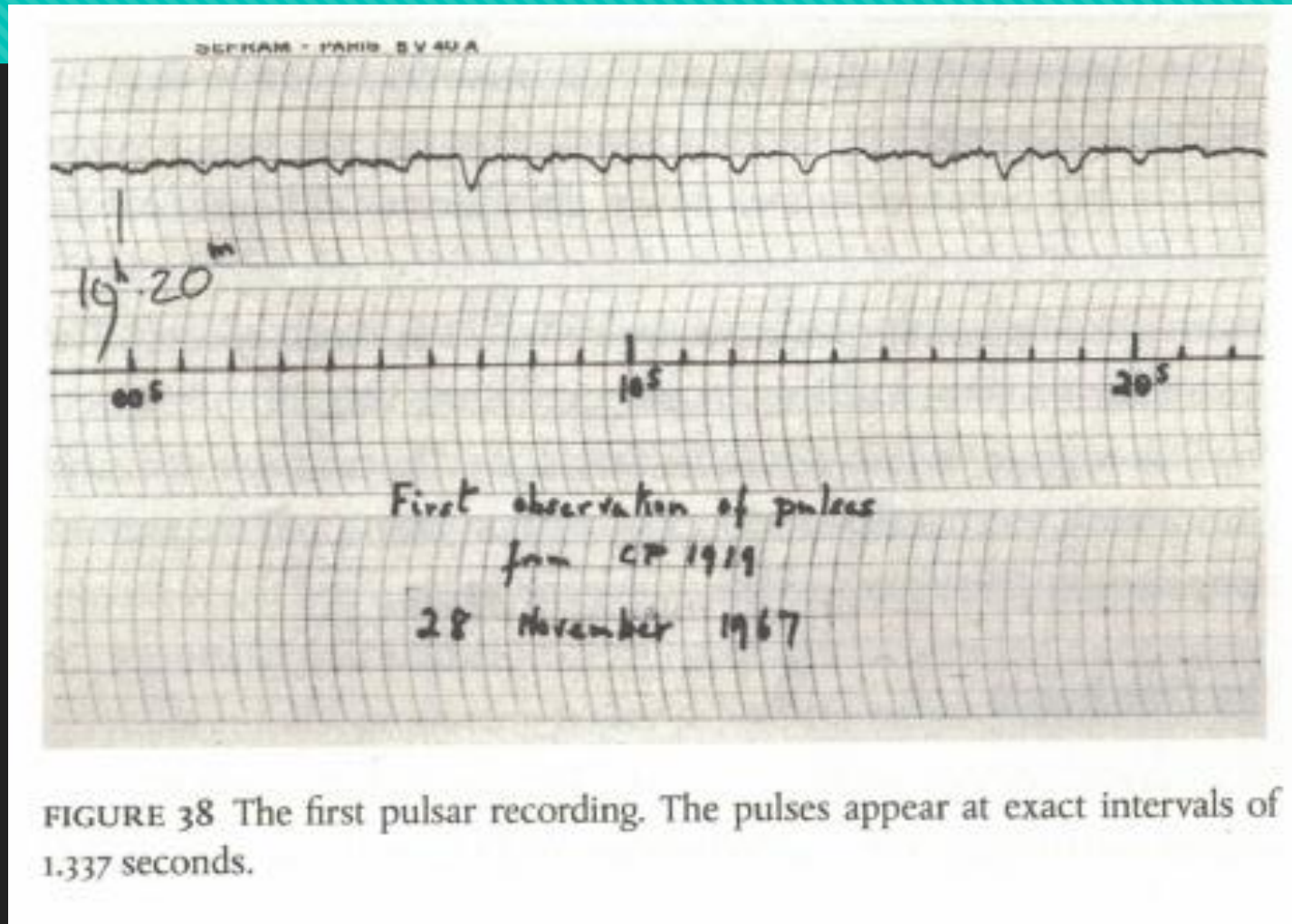
Приложения

- 1979: Dennis Walsh наблюдава (Jodrell Bank Observatory) двойка квазари с почти еднаква радиояркост, на $5.7'$, оптичните спектри и на двата са на $z = 1.4$ – това е първият пример на гравитационна леща



Pulsars

- Antony Hewish & Joselyn Bell (UK) изграждат нова радиоантена за наблюдение вариацията – $1/10$ sec – на квазари – поради ефект известен като сцинтилация
- Изграждат поле от 2048 антени, 3.7 m
- Юли 1967: J. Bell открива нов източник, чийто сигнал се състои само от флуктуации, с различен интензитет, но без се наблюдава ежедневно
- Ноември 1967: повторното наблюдение на сигнала с по-добър приемник, показва серия от импулси на интервал 1.334 sec – по-късно се означава като PSR B1919+21
- Февруари 1968: публикация в Nature, открити са още 3 такива обекта, а предположението за неутронна звезда там е само една от изброените възможности
- 1974: A. Hewish получава Нобелова награда за откритието от J. Bell



Pulsars

- Обяснението се оказва вече публикувано в Nature от Franco Pacini, който предполага, че в центъра на Ракообразната мъглявина има неутронна звезда (като резултат от колапс на звезда по предположение на Fritz Zwicky), ако е със силно магнитно поле и се върти бързо – ще може да се забележи като радиоизточник.
- Thomas Gold публикува подобна статия в Nature
- В случай, че енергията на източника идва от въртене – трябва да се забележи забавяне на импулсите, а ако е в резултат на осцилации – пулсарът няма да се забави

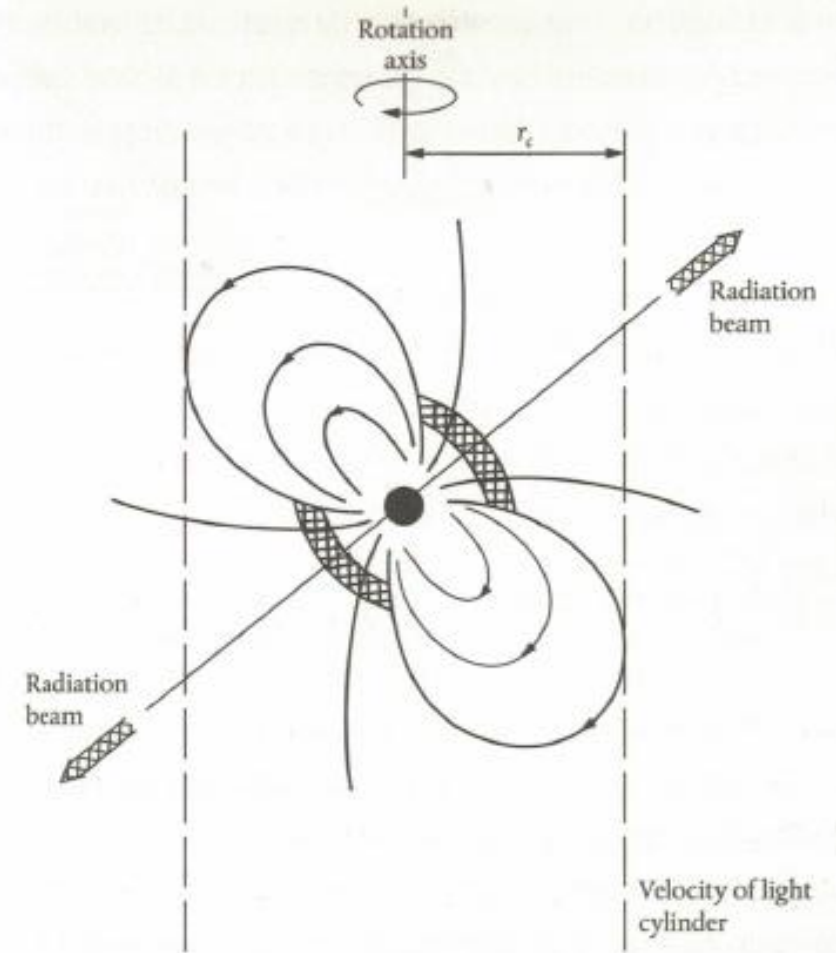


FIGURE 39 The dipole magnetic field round a neutron star. The pattern is confined within a 'velocity of light cylinder', within which the whole pattern rotates with the neutron star. A large electric field above the polar region accelerates charged particles to very high energies. Radio and other radiation originate above the polar region and in a vacuum gap at the boundary of the polar region. Within the equatorial regions the particles are confined to the field lines and no radiation is observable. The field lines from the polar regions penetrate the cylinder, and charged particles (electrons and positrons) can flow outwards.

Pulsars

- 1968: David Staetlin & Edward Reifinstein наблюдават забавяне на пулсара в Ракообразната мъглявина от 33 до 33.2 милисекунди
- 1969: Peter Goldreich & William Julian създават теория за магнетосфера около неутронната звезда, от където произлиза радиоизлъчването
- Следват много други наблюдения на пулсари на дължини от 3.7 m до 11 cm (Owens Valley Radio Observatory)
- Parkes Multibeam Pulsar Survey – около 2000 известни пулсара (спектрален анализ/Фурие трансформация, автокорелация)
- Формата и сечението на пулса дава информация за радиоизлъчващия сноп, наблюдава се разширение на ниски честоти

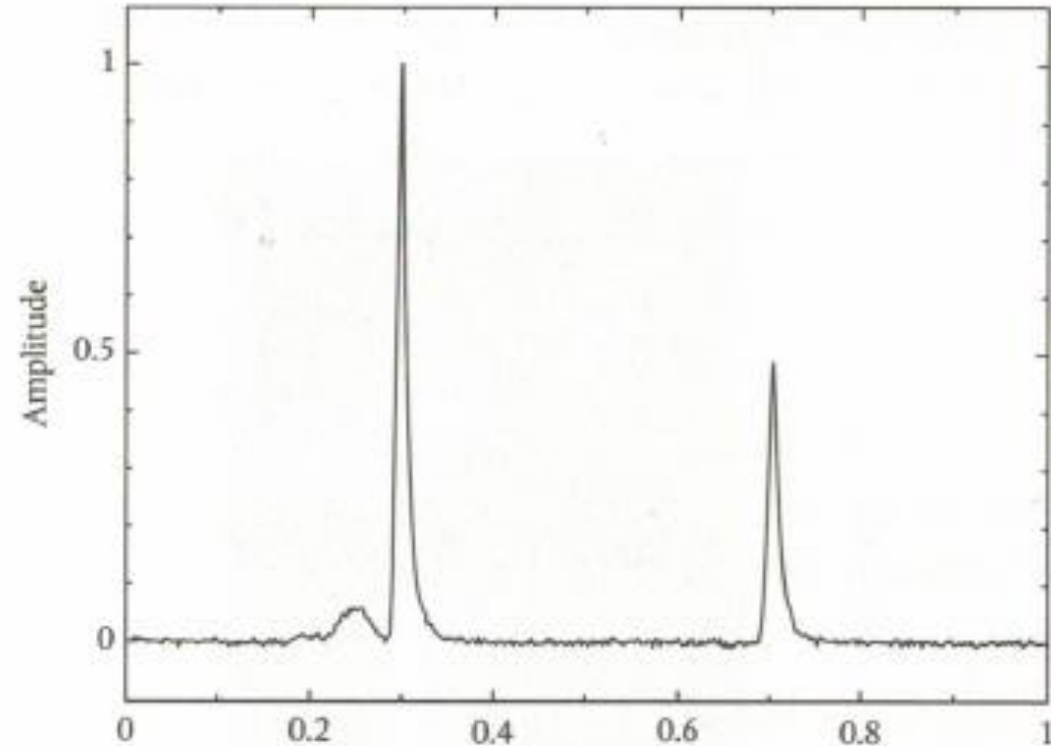


FIGURE 42 The Crab pulsar profile at a low radio frequency (610 MHz), showing a precursor pulse.

Pulsars

- За откриване на неизвестни в радиопулсари се използват времеви редове в други дължини на вълната
- Рентгенови и гама-телескопи могат да наблюдават високоенергетичните фотони, но само от сателити – като наблюденията се натрупват за по-дълъг период от време (над година)
- Едни от най-постоянните часовници във Вселената (с изключение на т.нар. glitch)

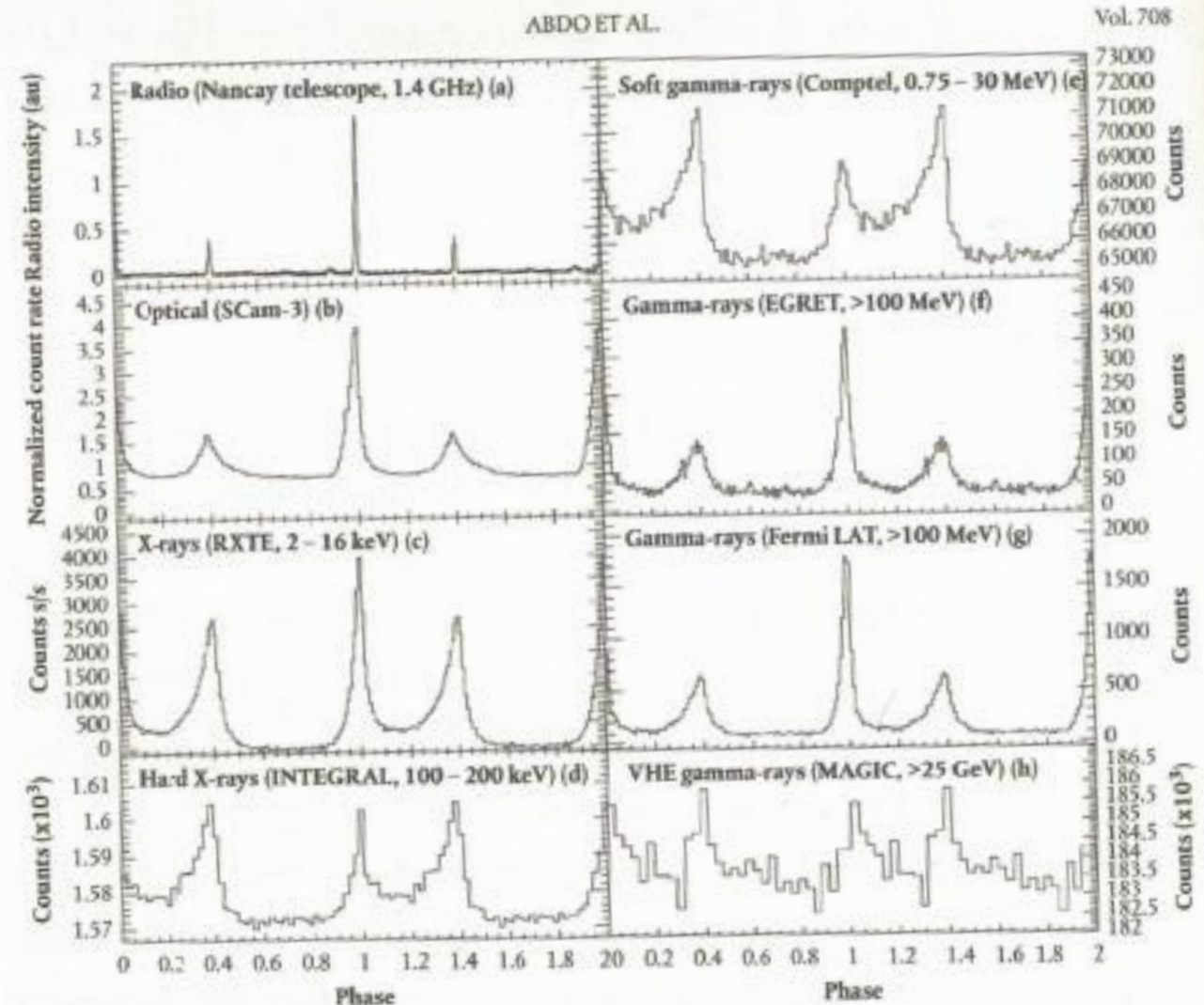
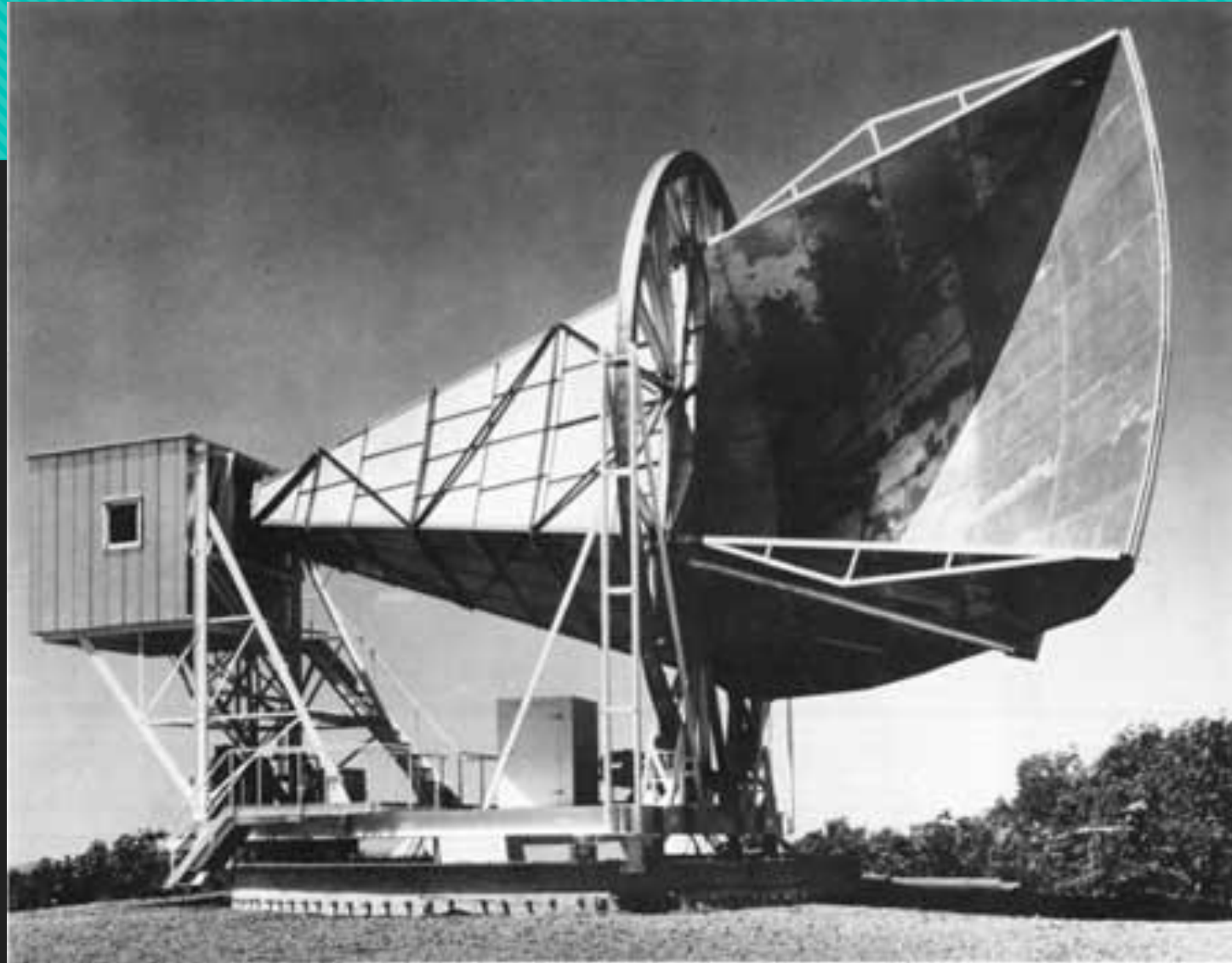


FIGURE 41 Pulse shapes recorded from the Crab Pulsar in radio, visible light, X-rays, and gamma-rays. All these profiles are shown for two complete periods. (Abdo et al. 2010). Reproduced by permission of the AAS.

Cosmic microwave background

- Най-важният принос на радиоастрономията – в космологията
- Наблюдения на най-ранната Вселена след епохата на рекомбинация, т.нар. последна повърхност на разсейване (оценка за температура от 4000 K, $z = 1500$, при постижими около $z = 10$)
- Видимата светлина е отместена на около $1\ \mu\text{m} - 1\ \text{mm}$
- Излъчването трябва да е навсякъде около нас
- 1961: Edward Ohm (Bell Telephone Labs.) изследва колко е приноса от Галактиката на 7 cm, използвана за регистрация на сателити
- Открива нисък фонов шум съответстващ на 22 K (резултатът включва приноси и от радио системата от тип horn)



Cosmic microwave background

- Arnold Penzias & Robert Wilson идват в Bell Telephone Labs. и инсталират нов приемник с най-добрата тогава чувствителност и нисък собствен шум
- След почистване на антената, остава принос от 3.3 K, идващ от всички посоки
- В същото време Robert Dicke се опитва да построи антена и приемник, за да намери сигнал от около 3 K, остатък от Големия Взрив
- Bernard Burke свързва двете групи
- 1978: Penzias & Wilson получават Нобелова награда

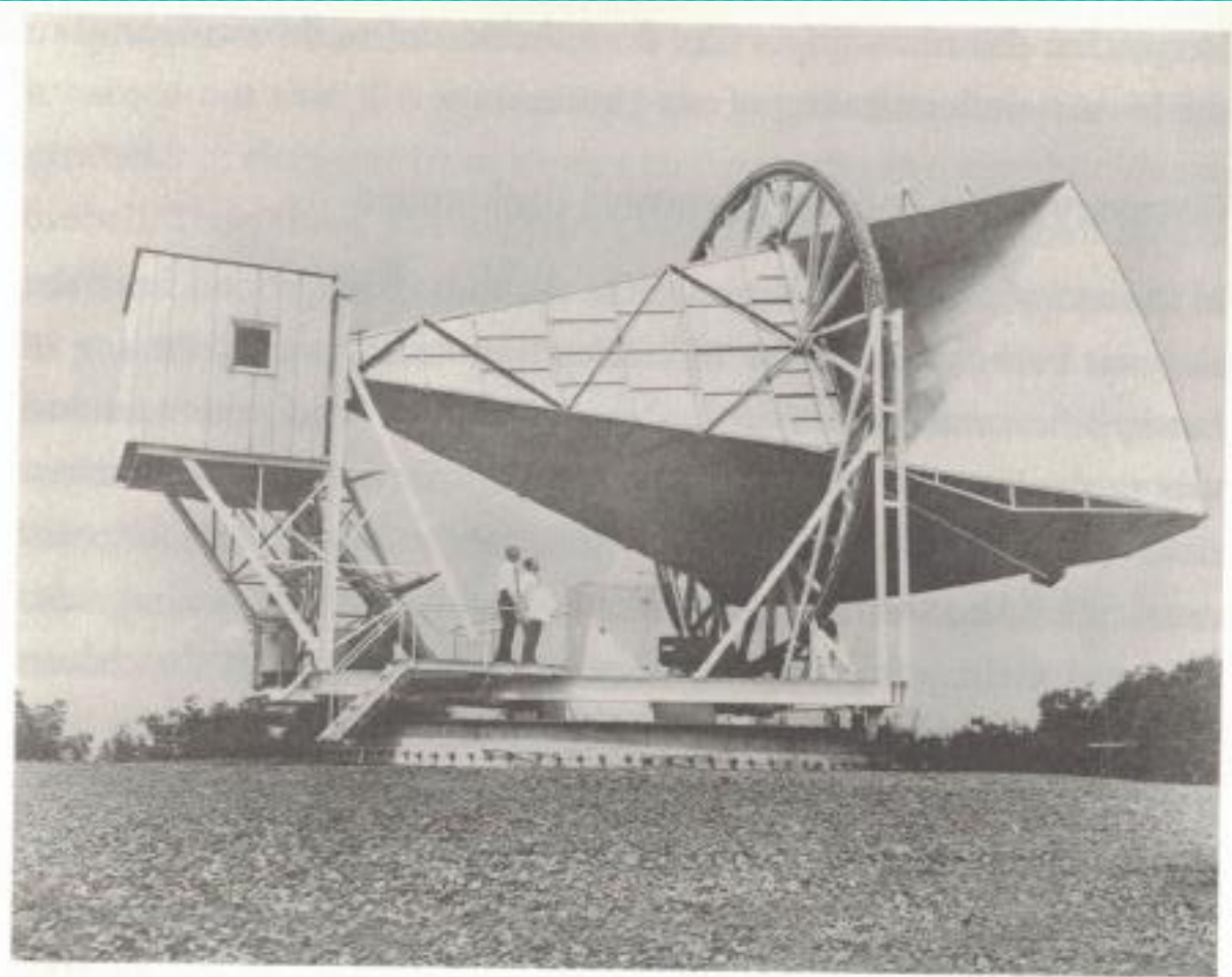
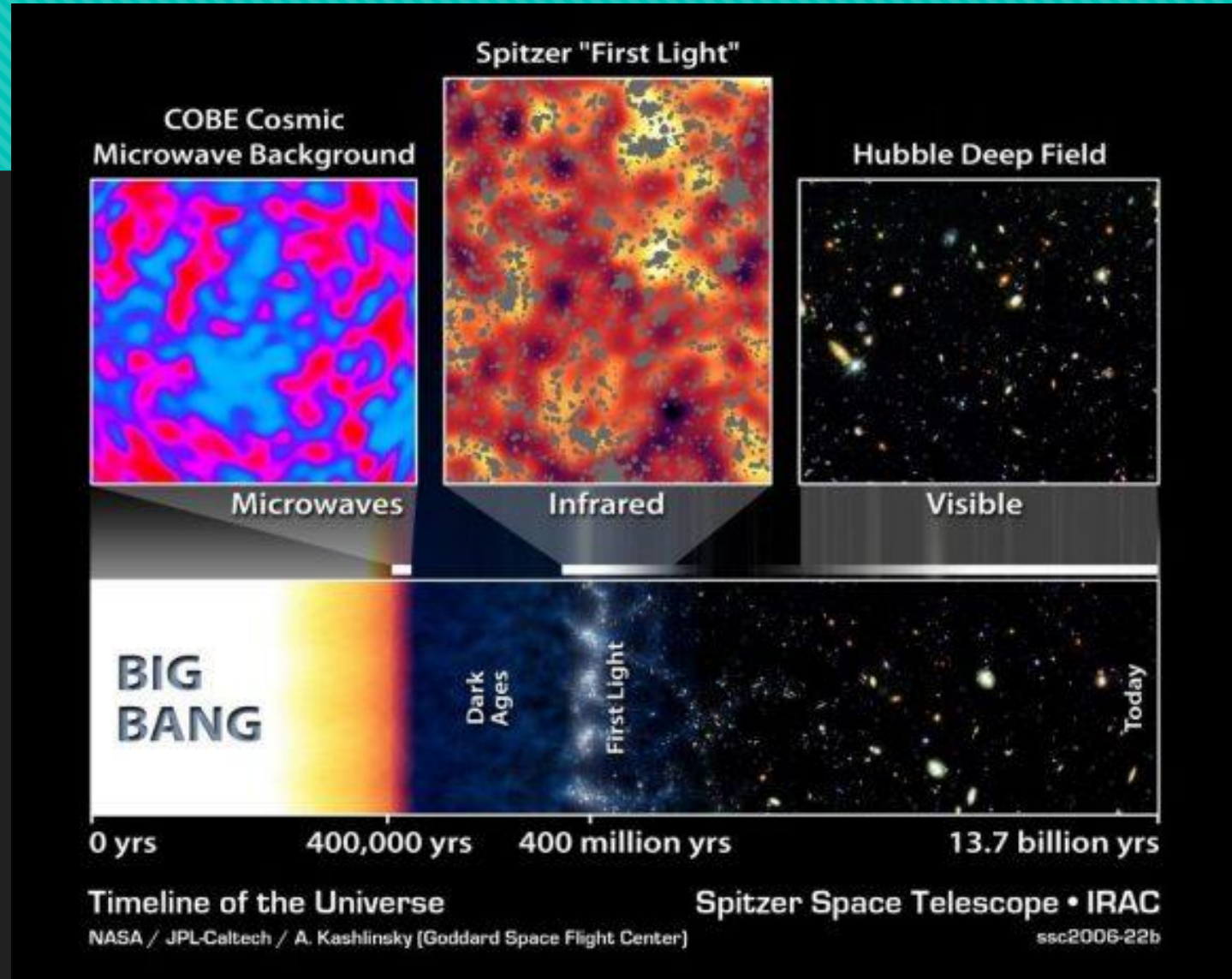


FIGURE 43 The microwave antenna used by Arnold Penzias and Robert Wilson in their discovery of the radio remnant of the Big Bang. Reprinted with permission of Alcatel-Lucent USA Inc.

Cosmic microwave background

- Излъчването е чернотелно на температура от около 4000 K, но поради червеното отместване се наблюдава на 3 K (намалено с $1 + z$, $z \sim 1000$), на радио – инфрачервени дължини.



Cosmic microwave background

- Измерване на спектъра би потвърдил очакването, но трябва да е далече от земни радиоизлъчватели
- 1989: COBE – Cosmic Background Explorer (John Mather – PI, 900 km, 4 години) сателит за измерване на инфрачервена температура в mm-диапазон и на радио честоти
- Измерва се еднородно CMB, 2.728 ± 0.002 K (месеци по-късно и от Canada: 2.736 K)
- 2006: George Smoot & John Mather получават Нобелова награда

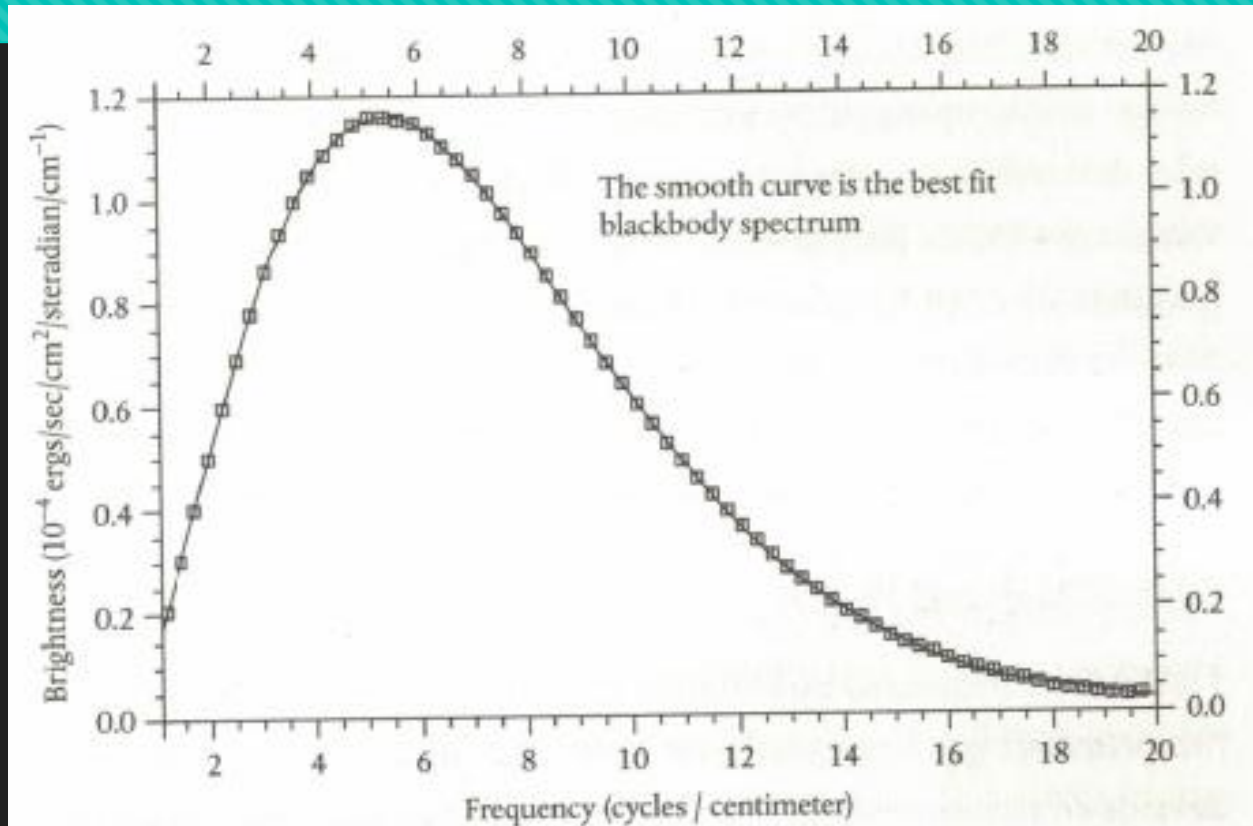
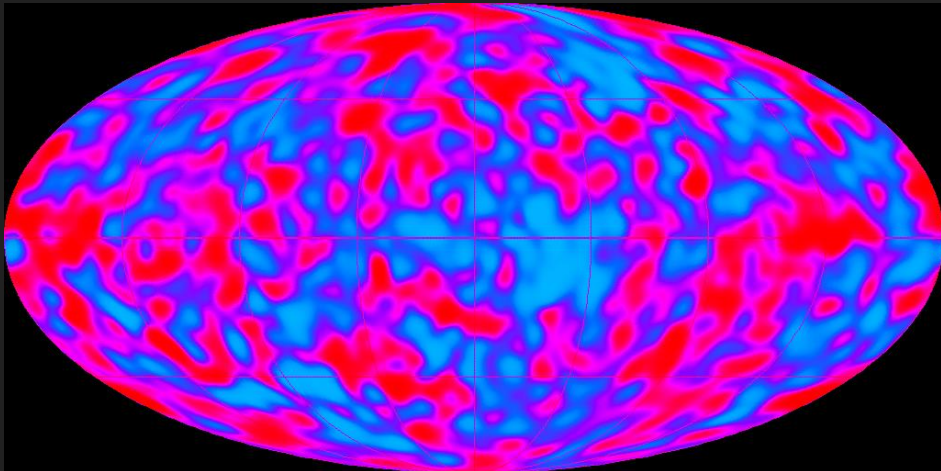


FIGURE 49 The spectrum of the cosmic microwave background, measured by the COBE satellite. Reproduced by permission of the AAS.

Cosmic microwave background

WMAP – Wilkinson Microwave Anisotropy Probe

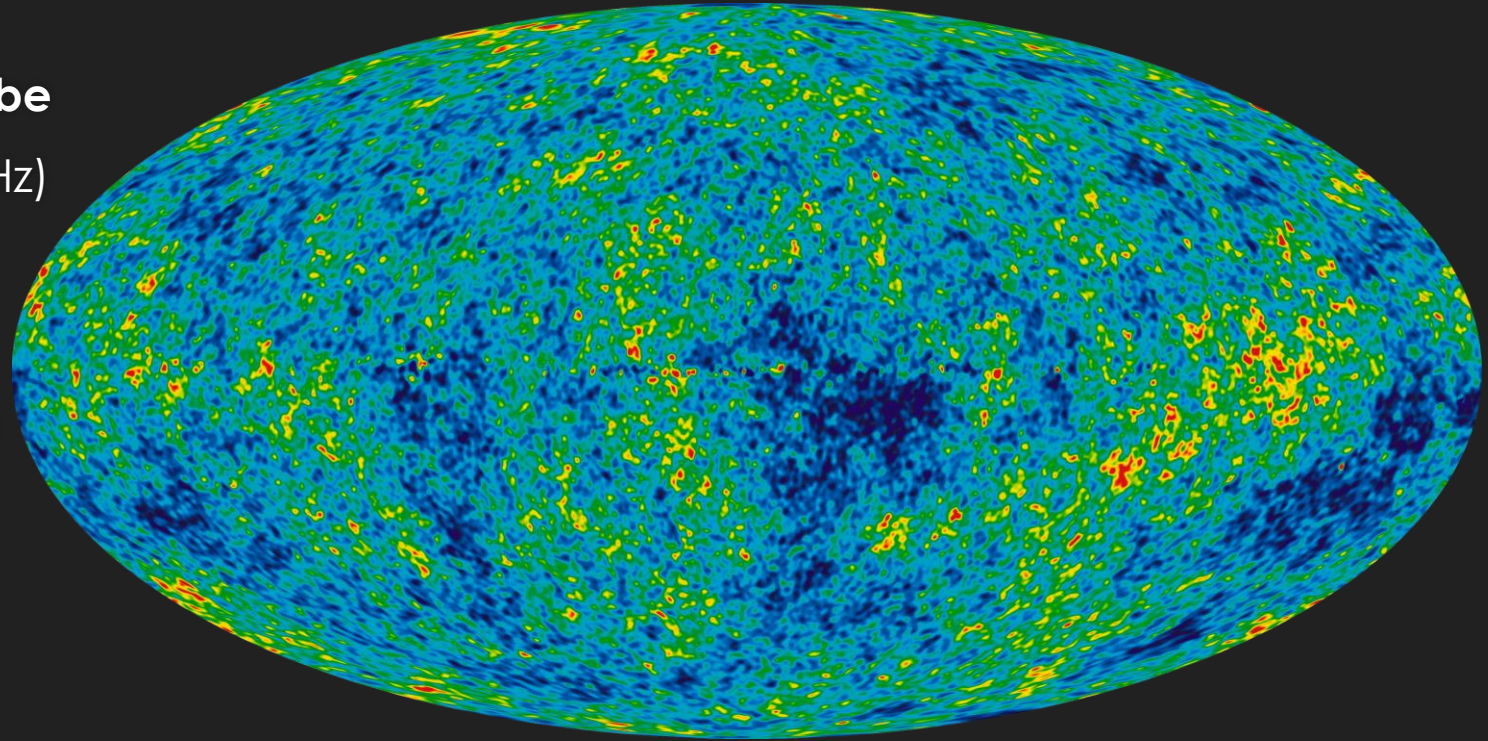
- 23–94 GHz (CMB: 20–900 GHz, max 160 GHz)
- L2, въртящ се спътник, 9 години
- Карти на цялото небе с 15'
- Дава точни стойности на космологични параметри като:

Възраст на Вселената (13.7 милиарда г.)

Кривина на пространството (около 0)

Оценки за пропорцията на барионна материя към тъмна материя и енергия

https://wmap.gsfc.nasa.gov/universe/bb_cosmo_fluct.html

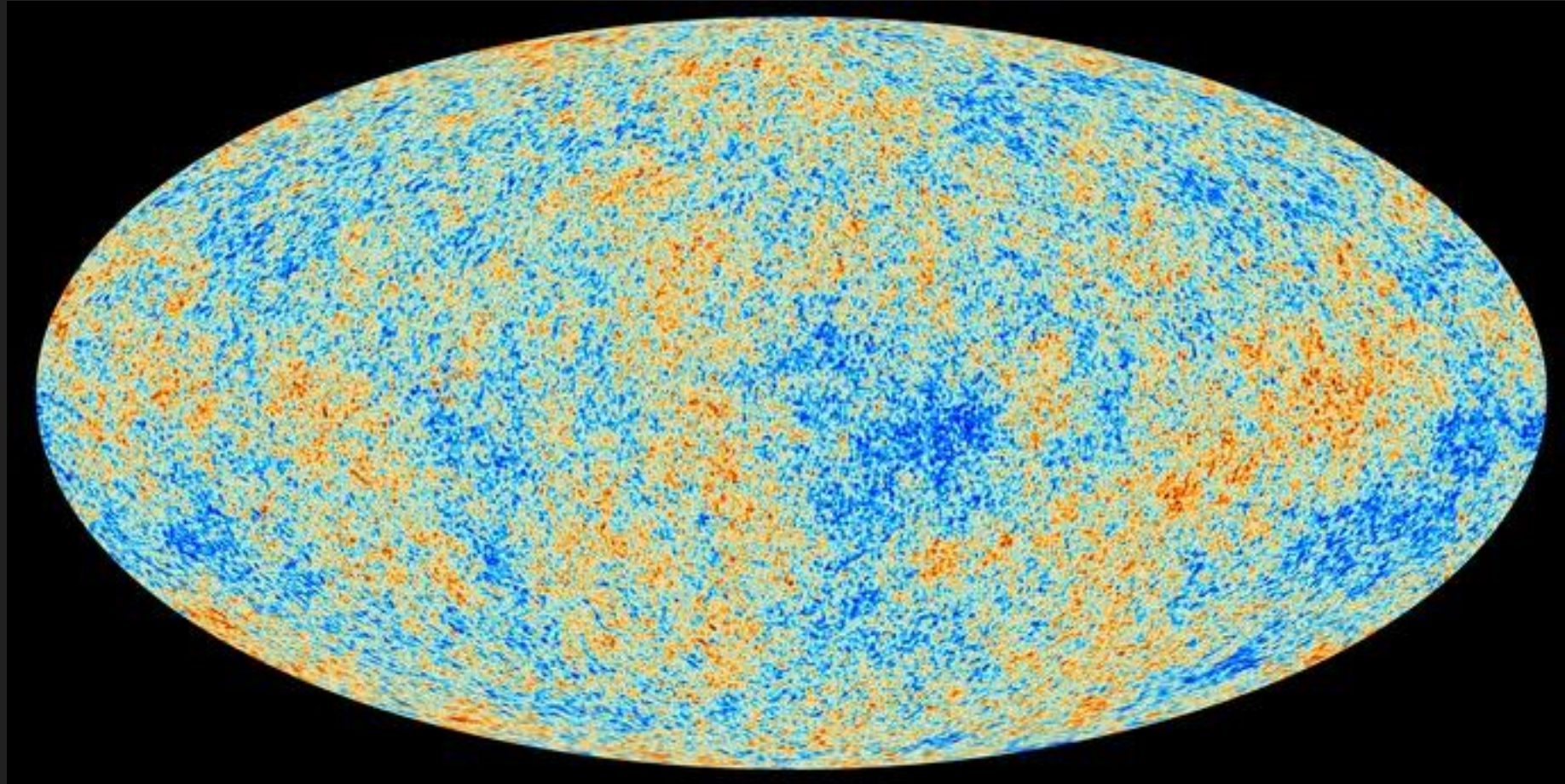


<https://map.gsfc.nasa.gov/media/121238/index.html>

Cosmic microwave background

Planck

- 30, 40, 70, 100–857 GHz
- L2, 2.5 години, също измерва поляризация
- Дава структурата на температурните осцилации (в микро-келвини) като функция от ъгловия размер
- Определя: 4.9% барионна материя, 27% - тъмна материя, 68% - тъмна енергия

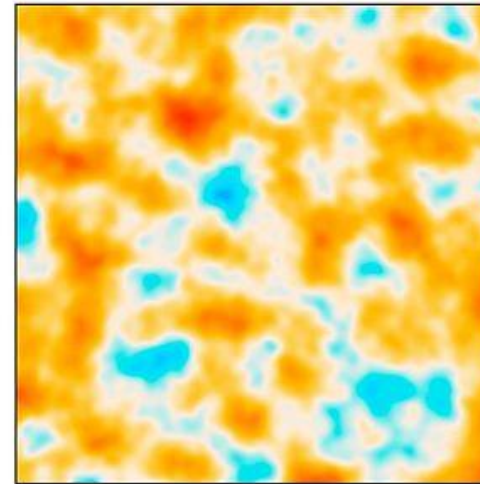
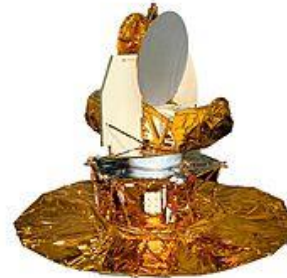


Cosmic microwave background

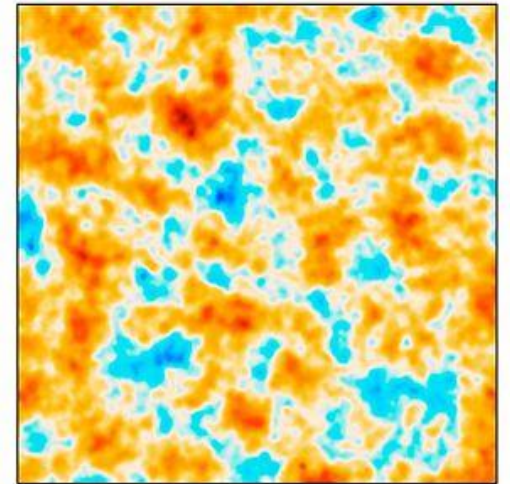
- COBE
- WMAP
- Planck



COBE

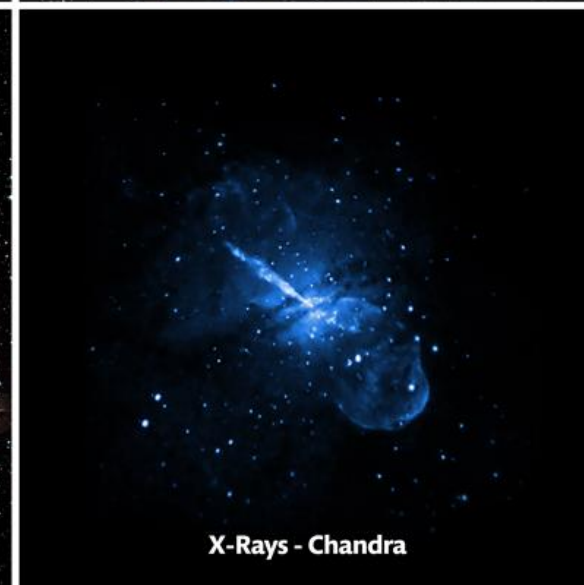
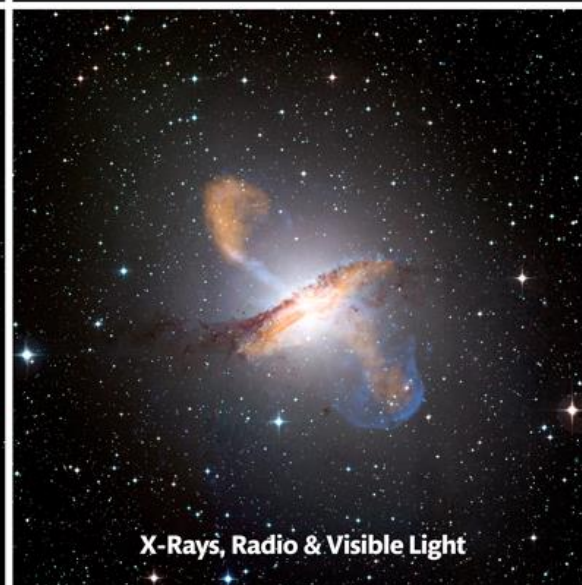
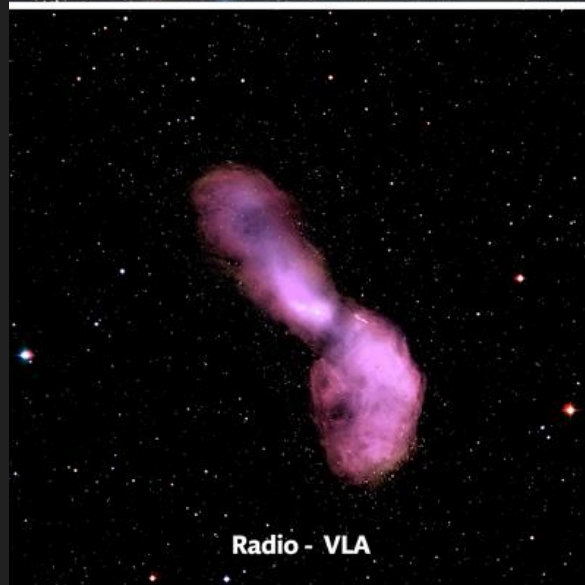
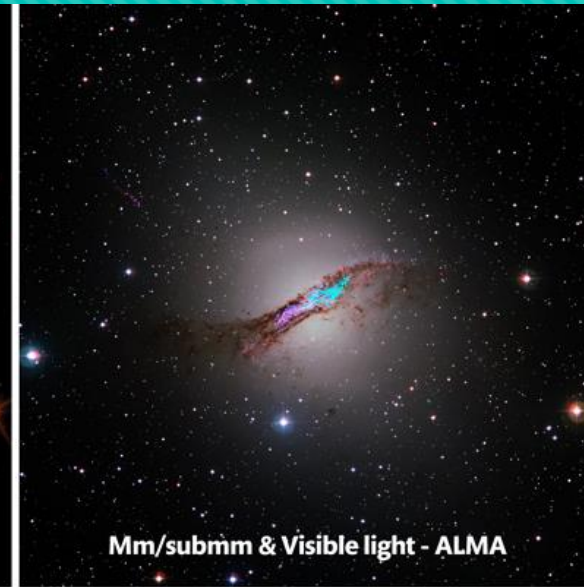
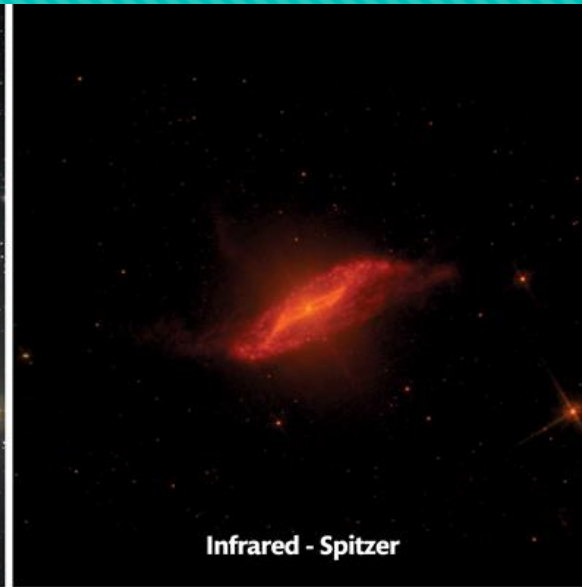


WMAP



Planck

Centaurus A



Crab nebula

CRAB NEBULA



Crab Nebula

