

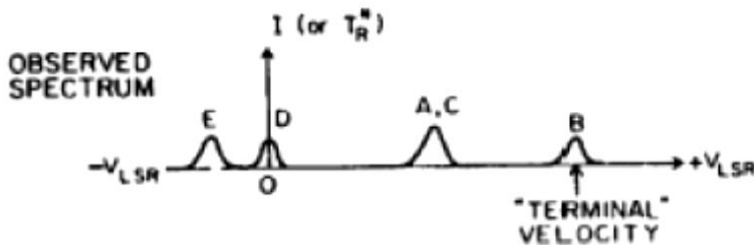
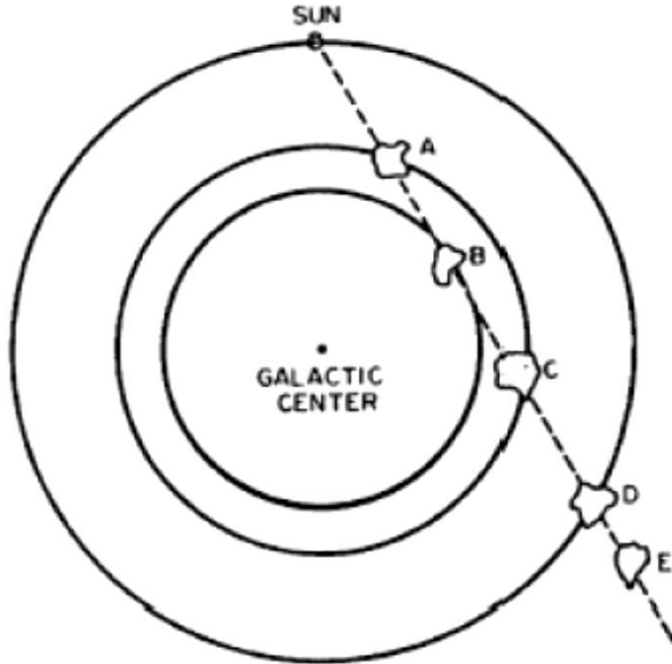
## Emisja wodoru neutralnego – przewidywania teoretyczne



Chociaż Holandia była okupowana przez Niemców w czasie II Wojny Światowej, tym niemniej holenderscy astronomowie mieli możliwość spotkania się od czasu do czasu i dyskusowania o sprawach naukowych. Kopie czasopisma *Astrophysical Journal* docierały m.in. do **Obserwatorium w Leidzie**, gdzie m.in. pracował Jan Oort.

*Jan Oort (1900-1992)*

**Oort** z artykułu Grote Reber'a (z roku 1944) dowiedział się o odkryciach w dziedzinie radioastronomii (pierwsze mapy nieba) i uświadomił sobie, że emisja w liniach widmowych w dziedzinie radiowej mogłaby być ważnym narzędziem w odkryciu struktury naszej Galaktyki. Obserwacje w liniach, z uwagi na **efekt Dopplera**, dają bowiem możliwość określenia prędkości świecącego gazu.



## Efekt Dopplera

Ze względu na ruch źródła fal ich obserwowany okres jest różny od okresu w układzie spoczynkowym źródła:

$$T_{obs} = T + \frac{vT}{c}$$

$v > 0$  – oddalanie

$v < 0$  – przybliżanie

$$T_{obs} = \left(1 + \frac{v}{c}\right) T, \quad \frac{1}{f_{obs}} = \left(1 + \frac{v}{c}\right) \frac{1}{f}$$

$$\frac{f - f_{obs}}{f_{obs}} = \frac{v}{c}; \quad \frac{f - f_{obs}}{f} \cong \frac{v}{c}$$

Dla fali elektromagnetycznej:  $c = f\lambda$ , wtedy

$$\frac{\lambda_{obs} - \lambda}{\lambda} = \frac{v}{c}$$

Znając przesunięcie linii widmowej obliczymy radialną składową prędkości źródła (w kierunku obserwator-źródło). Zwykle wyrażamy prędkości w tzw. lokalnym układzie spoczynkowym (Local Standard of Rest, LSR), uwzględniając dodatkowo ruch Ziemi i Słońca.

Oort spędził wiele lat na studiowaniu rotacji naszej Galaktyki używając i analizując linie widmowe w dziedzinie optycznej. Był jednak sfrustrowany gdyż olbrzymie obłoki pyłu przesłaniały światło z płaszczyzny galaktyki. Z powodu absorpcji światła w ośrodku międzygwiazdowym można było obserwować emitujący w liniach gaz jedynie do kilku tys. lat świetlnych. Jednak fale radiowe mogłyby penetrować pył i dostarczać informacji nawet z drugiej strony Galaktyki.

Oort zlecił swojemu studentowi **Henkowi Van de Hulst** zadanie rozpoznania jakie linie spektralne mogą istnieć w dziedzinie radiowej i na jakich konkretnie częstotliwościach.

Ponieważ wodór jest najpowszechniejszym pierwiastkiem we Wszechświecie Hulst rozpoczął badania właśnie od niego. Znalazł on w **1944r. przejścia tzw. nadsubtelne wodoru** w stanie podstawowym na częstotści 1420.4 MHz (21.1 cm). Przewidywania Van der Hulsta zostały opublikowane w Ned. Tijdschrift voor Natuurkunde (vol.11, p210) w 1945r.

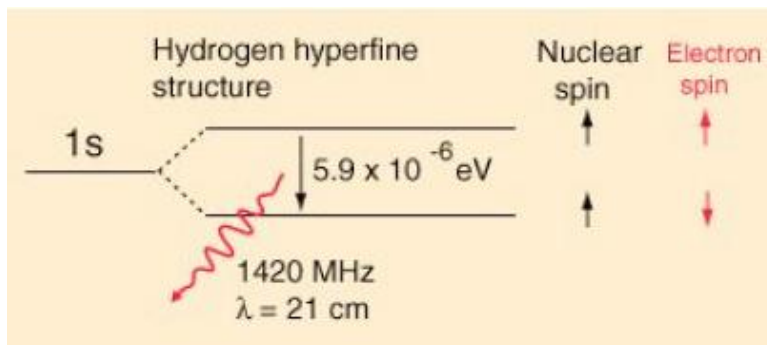
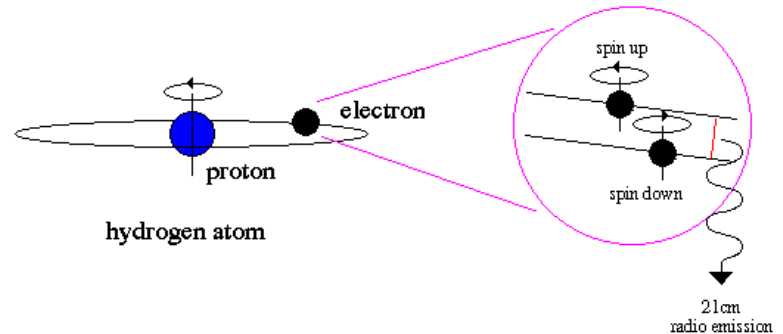


Henk van de Hulst discusses the H I 21-cm line at the Leiden Observatory

### Struktura nadsubtelna atomu wodoru

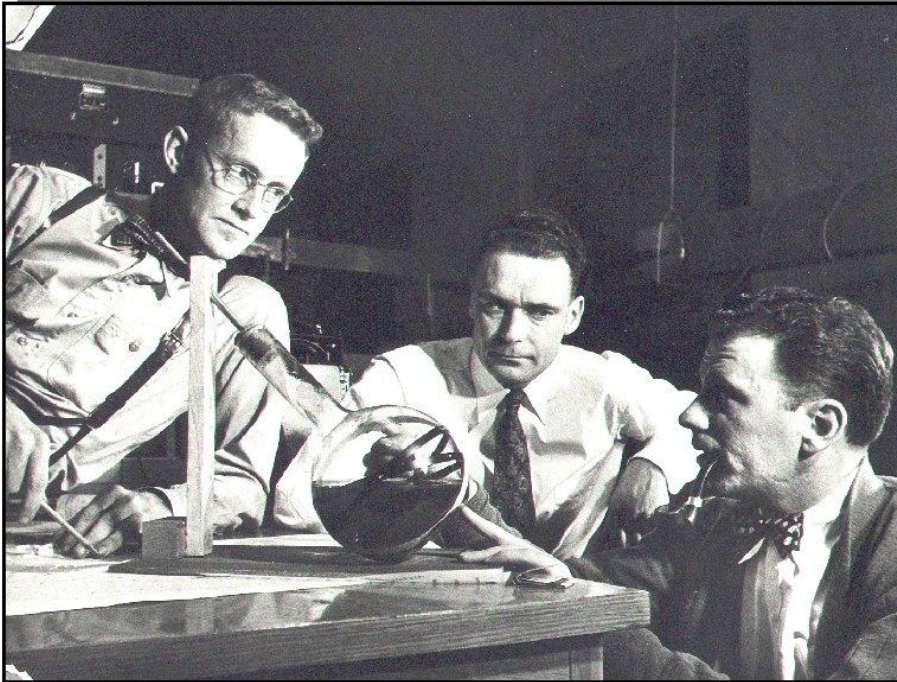
Interakcja pomiędzy spinem elektronu  $S$  ( $S=1/2$ , prowadzącym do powstania momentu magnetycznego) a jego ruchem orbitalnym  $L$  (prowadzącym do powstania pola magnetycznego skutkiem ruchu orbitalnego elektronu – pętla prądowa) daje tzw. sprzężenie spin-orbita -  $LS$ , prowadząc do rozszczepienia poziomów energetycznych atomu i powstania **struktury subtelnej** poziomów (zwykły model Bohra atomu wodoru jest niewystarczający i nie obejmuje tej struktury).

**Jądro atomu** również posiada spin, a więc i moment magnetyczny  $I$ . Oddziaływanie z nim momentu magnetycznego (spinu) elektronu daje dalsze rozszczepienie linii widmowych tzw. **strukturę nadsubtelną** poziomów.



### Odkrycie emisji wodoru przez Ewena i Purcella

Oryginalny artykuł Van de Hulsta raczej powątpiewał w możliwość detekcji linii wodoru. Natomiast inny **artykuł Shklovskiego z 1948r. był już bardziej optymistyczny.**



W uniwersytecie Harwarda **Edward Purcell** wraz ze swoim podopiecznym **Haroldem Ewenem** również zastanawiali się nad detekcją linii 21cm. Zakładali, że Holendrzy prawdopodobnie nie pracują nad tym problemem (pesymistyczny wydźwięk artykułu Hulsta) natomiast możliwe, że Rosjanie mogą próbować skonstruować w niedługim czasie odpowiednią aparaturę i dokonać pierwszej detekcji. Chcieli być szybsi. Jako uwieńczenie doktoratu Ewen pod kierunkiem Purcella zaczął konstruować po nocach i w weekendy odbiornik na linię 21cm.

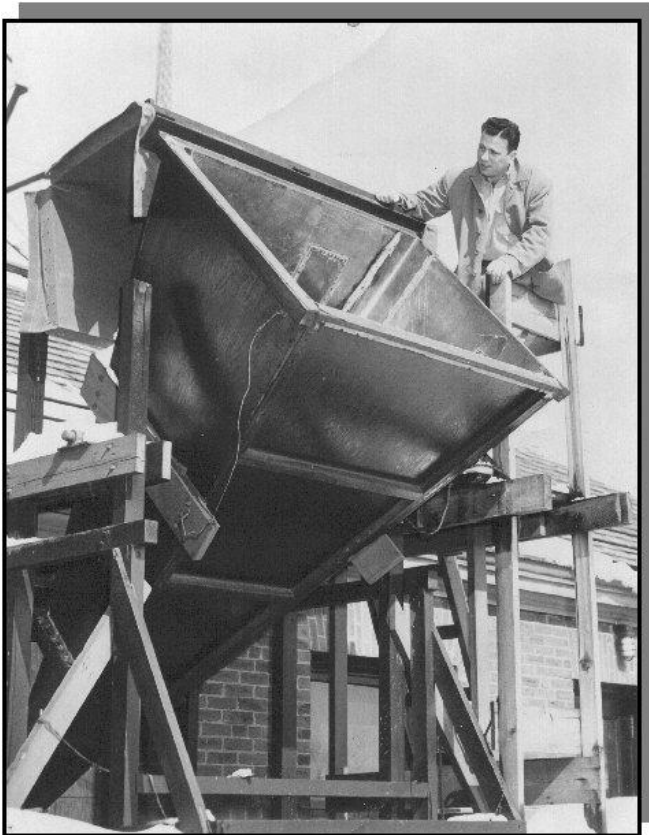
*Od lewej: Ed Purcell, Taffy Bowen, Doc Ewen*

**Purcell poprosił o grant w wysokości 500\$** od Fundacji Rumforda American Academy of Arts and Sciences na pokrycie kosztów materiałów i wykonanie anteny, falowodów oraz odbiornika. I ten grant otrzymał.



## Antena

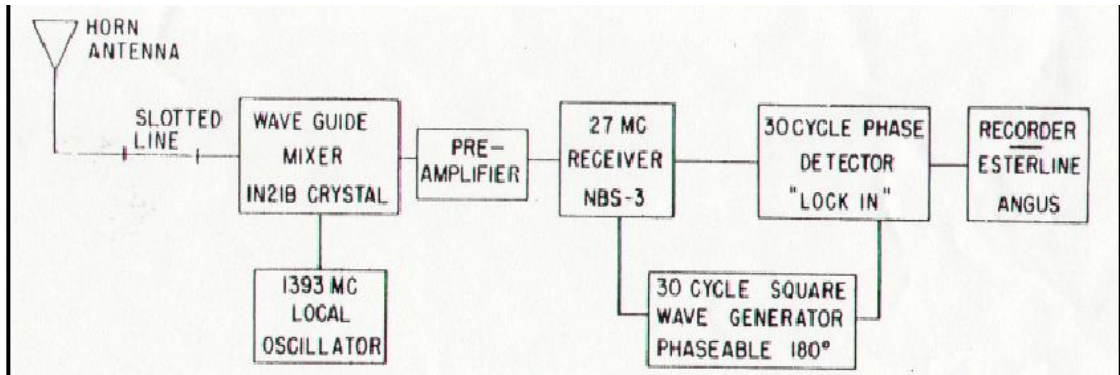
Ewen zaprojektował antenę rogową bazując na opisanych dokładnie rozwiązaniach w książce o konstrukcjach anten Sama Silvera, do którego projekt został też skierowany dla sprawdzenia.



W trzy tygodnie laboratorium instytutu fizyki wykonało antenę. Rozmiar anteny został podyktowany wielkością balkonu na IV piętrze Laboratorium Lymanna, gdzie antenę umieszczono, kierując falowody bezpośrednio przez okno do środka.

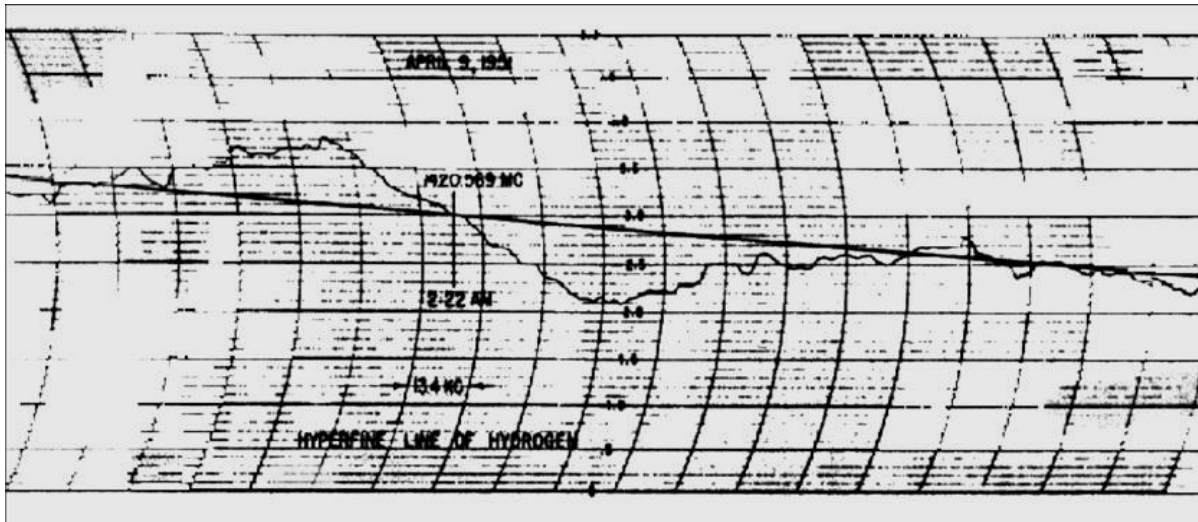
Były chwile zgrozy. Latem podczas silnych deszczy antena była jak lejek poprzez który woda dostawała się do środka i zalewała laboratorium. Natomiast zimą była ulubionym celem dla przechodzących studentów do wrzucania kulek śniegowych.

## Odbiornik



Również projekt odbiornika Ewen konsultował ze specjalistą Bobem Pundem. **Odbiornik używał techniki przełączania częstotliwości** celem wyeliminowania szumów tła, która była wtedy nowinką. Ten odbiornik był kluczem do sukcesu.

Częstotliwości były oddalone o 75kHz i przełączane co 30/s. Obie częstotliwości były dodatkowo przesuwane od niskich do wyższych by pokryć możliwy zakres promieniowania linii wodoru, przesuniętej przez ruchy gazu (efekt Dopplera). Synchroniczny detektor przypisując „+” i „-”, sygnałom z tych dwóch częstotliwości powodował odjęcie sygnałów. Niestabilności samej aparatury były w ten sposób odejmowane (występowały na obu częstotliwościach), a sygnał z nieba był stabilny, niezakłócony.



Detekcji wodoru dokonano 25 marca 1951r. (Nature v.168, p.356, 1951). Cały projekt od momentu otrzymania owych 500\$ do detekcji linii wodoru zrealizowano w ciągu jednego roku. Ponieważ był on realizowany jako uboczny, w weekendy, zajęł de facto  $2/7 \cdot 12 = 3.4$  miesiąca. Detekcji dokonano w 7 lat po przewidywaniach Van der Hulsta.

Po odkryciu linii Ewen dowiedział się, że Prof. Van der Hulst spędzał urlop naukowy w Obserwatorium w Harvardzie. Za sugestią Purcella Ewen spotkał się z Van der Hulstem, a ten zadzwonił do Oorta. Podczas tej rozmowy Ewen dokładnie objaśnił użytą technikę przełączania częstotliwości. Dowiedział się wtedy, że Holendrzy bezskutecznie usiłowali od lat zdetektować linię. **Jak pisze Ewen w swoich notatkach, „nigdy byśmy nie próbowali tego eksperymentu gdybyśmy o tym wiedzieli...”**. Czasami niewiedza jest lepsza...

**Grupa holenderska** w miesiąc zaadoptowała **technikę przełączania częstotliwości** i 11 Maja 1951r. potwierdziła detekcję linii 21cm! Następne potwierdzenie detekcji nastąpiło w **Australii** 12 czerwca 1951r.



### Dlaczego Holendrzy byli tak pesymistyczni?!

Prawdopodobieństwo spontanicznego odwrócenia spinu elektronu i zmiany poziomu energetycznego atomu wodoru jest  $10^{23}$  razy mniejsze od zwykłych, dozwolonych przejść w dziedzinie optycznej. Głównie z powodu różnicy częstości (jak  $v^3$ ), ale również  $5 \times 10^5$  razy z powodu mniejszego momentu magnetycznego elektronu w porównaniu z momentem dipolowym.

Podkscytowany atom wyemituje spontanicznie foton na fali 21cm średnio po czasie (połówkowym):

$$t_{1/2} = 3.49 \times 10^{14} s = 1.11 \times 10^7 lat$$

Ten długi czas był źródłem pesymistycznego traktowania możliwości detekcji HI. Okazało się jednak, że atomów **HI jest tak dużo, że emitują obserwowalną** ilość promieniowania.

Typowe zderzenia atomów wodoru w przestrzeni międzygwiazdowej następują średnio co 400lat. Zatem rozkład atomów na poziomach energetycznych zdeterminowany jest termicznie, niezależnie od emisji HI. **Ekscytacja atomów jest głównie zderzeniowa**. Zatem temperatura ekscytacji decydująca o tym procesie to temperatura kinetyczna obłoków. Jej pomiary wskazują na typowe wartości ok. 125K. **Neutralne obłoki HI tworzą zatem tzw. chłodną składową ośrodka międzygwiazdowego (Warm Neutral Matter, WNM)** – ok. 5% masy Galaktyki.

## HI a rotacja Galaktyki

Załóżmy dla uproszczenia, że ruch materii w galaktyce jest **po okręgach**, oraz że prędkość liniowa  $V$  jest stała w danej odległości  $R$  od centrum (dowolny punkt  $M$ ). Dla Słońca prędkość liniowa to  $V_0$ , a odległość  $R_0$ . Kąty  $l$  i  $\delta$  tworzą kierunki widzenia teleskopu i centrum galaktyki odpowiednio dla punktu  $S$  i  $M$ . Wtedy względną prędkość w kierunku  $M$  (radialną) możemy wyrazić jako różnicę składowych prędkości radialnych obłoku w  $M$  i Słońca:

$$V_r = V \sin \delta - V_0 \sin l$$

Z twierdzenia sinusów:

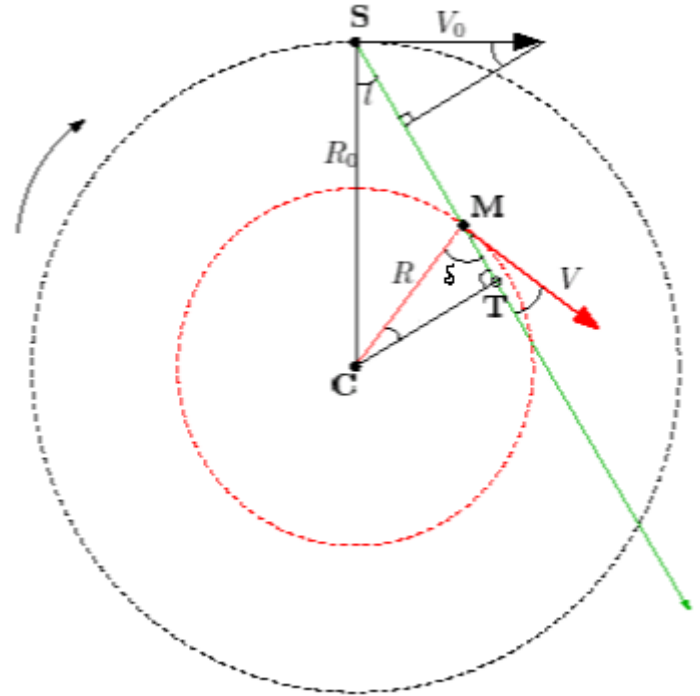
$$\frac{\sin l}{R} = \frac{\sin(180 - \delta)}{R_0} = \frac{\sin \delta}{R_0}$$

czyli:  $R \sin \delta = R_0 \sin l$

Wzór na prędkość względną przybierze postać:

$$V_r = V \frac{R_0}{R} \sin l - V_0 \sin l \quad \boxed{V_r = \left( V \frac{R_0}{R} - V_0 \right) \sin l}$$

Dla Słońca z innych pomiarów znamy:  $V_0 = 220 \text{ km/s}$ ,  $R_0 = 8.5 \text{ kpc}$ . Do określenia  $V$  brakuje  $R$ .



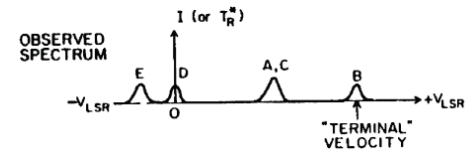
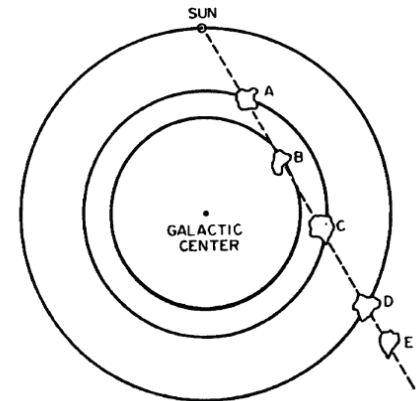
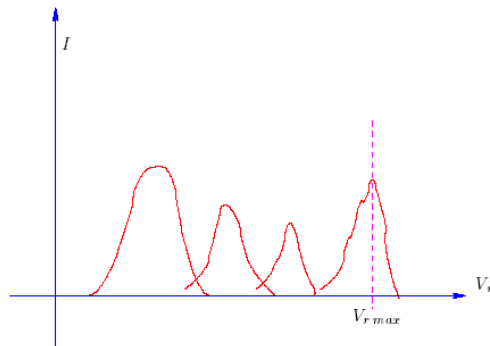
## W punkcie stycznym

Dla  $0 < l < 90$  na linii widzenia może znajdować się kilka obłoków o różnych przesunięciach dopplerowskich. Prędkość radialna przyjmuje największą wartość w punkcie stycznym T, gdyż w tym miejscu cały wektor prędkości leży na linii widzenia ST i prędkości liniowe są większe bliżej centrum. Dla takiego obłoku wodorowego  $\delta = 90^\circ$  zatem

$$R = R_0 \sin l$$

$$V_r = V - V_0 \sin l$$

Znając z obserwacji  $l$  i  $V_r$  możemy wyznaczyć całkowitą prędkość obłoku po orbicie  $V$  i jego odległość  $R$  od centrum Galaktyki  $R!$  Jest to tzw. metoda tangencjalna określania prędkości i odległości obłoków wodorowych.



## Krzywa rotacji a ciemna materia

Obserwacje obłoków HI w różnych kierunkach umożliwiają wykreślenie zależności  $V(R)$ , tzw. **krzywej rotacji**. W układzie Słonecznym, z dominującą centralną masą (Słońce), planety poruszają się w zgodzie z prawem Keplera. Jeśli galaktyka miałaby się obracać jak planety w Układzie Słonecznym to przy założeniu orbit kołowych:

$$\frac{V^2}{R} = \frac{GM}{R^2}$$

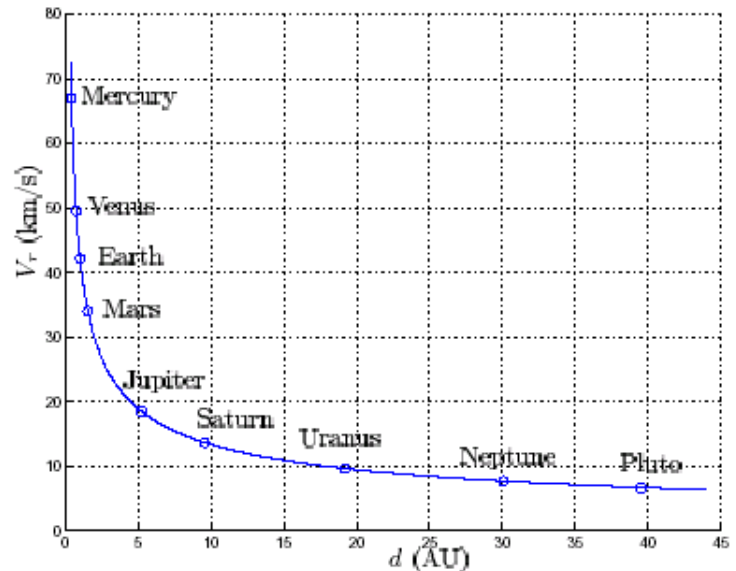
Ruch powinien być zatem **keplerowski** i spełniać w szczególności III prawo Keplera:

$$\frac{\omega^2 R^2}{R} = \frac{4\pi^2 R^2}{P^2 R} = \frac{GM}{R^2}$$

$$P^2 = \frac{4\pi^2}{GM} R^3$$

gdzie  $P$  jest okresem,  $M$  masą wewnątrz orbity. Zatem prędkość rotacji z tych relacji:

$$V = \sqrt{\frac{GM}{R}} \quad \text{czyli } V(R) \propto R^{-1/2}$$



Dla sztywnej rotacji mielibyśmy natomiast:

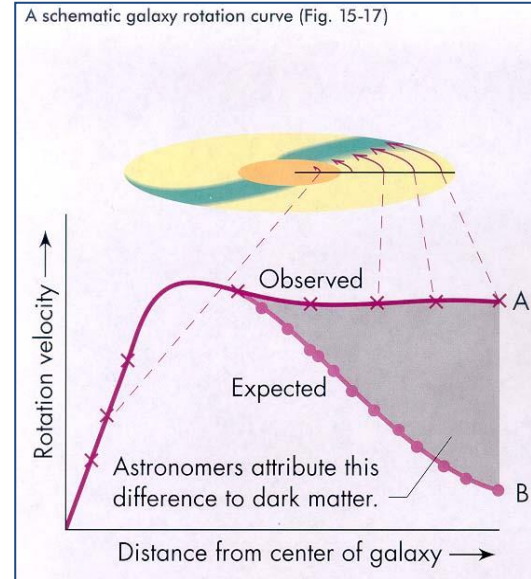
$$V = \omega R \propto R$$

Okazuje się, że sztywna rotacja występuje w centrum Galaktyki. Natomiast niespodziewanie prędkości w Galaktyce na dużych odległościach są znacznie większe niż keplerowskie!

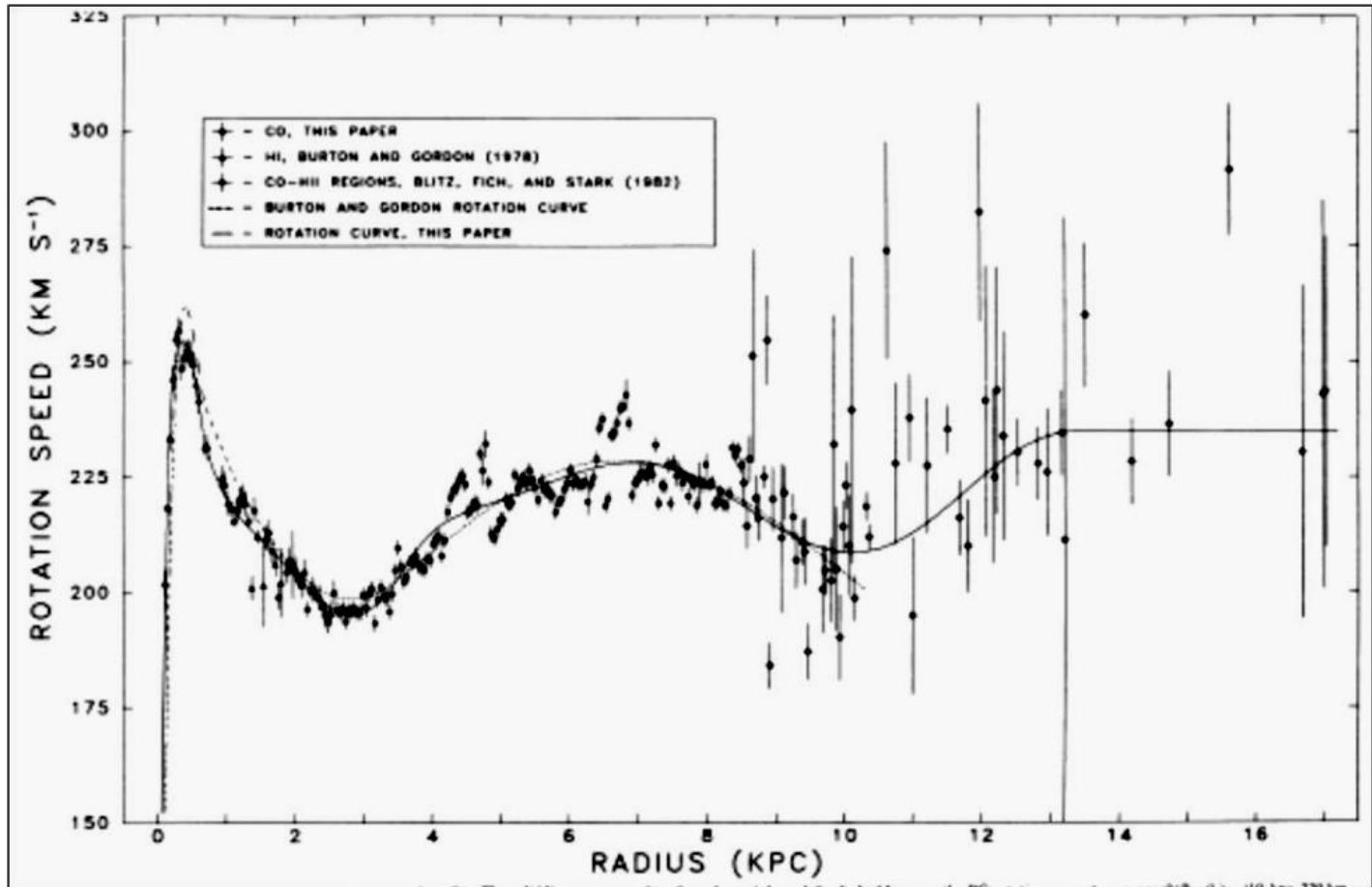
Jeśli rozkład materii w zewnętrznej części Galaktyki jest sferyczny to obserwowana krzywa rotacji wskazuje na dodatkową, dużą masę, niewidoczną w obserwowanych gwiazdach i świecącej materii.

$$V = \sqrt{\frac{GM}{R}}$$

Tą brakującą masę nazwano tzw. **ciemną materią**.



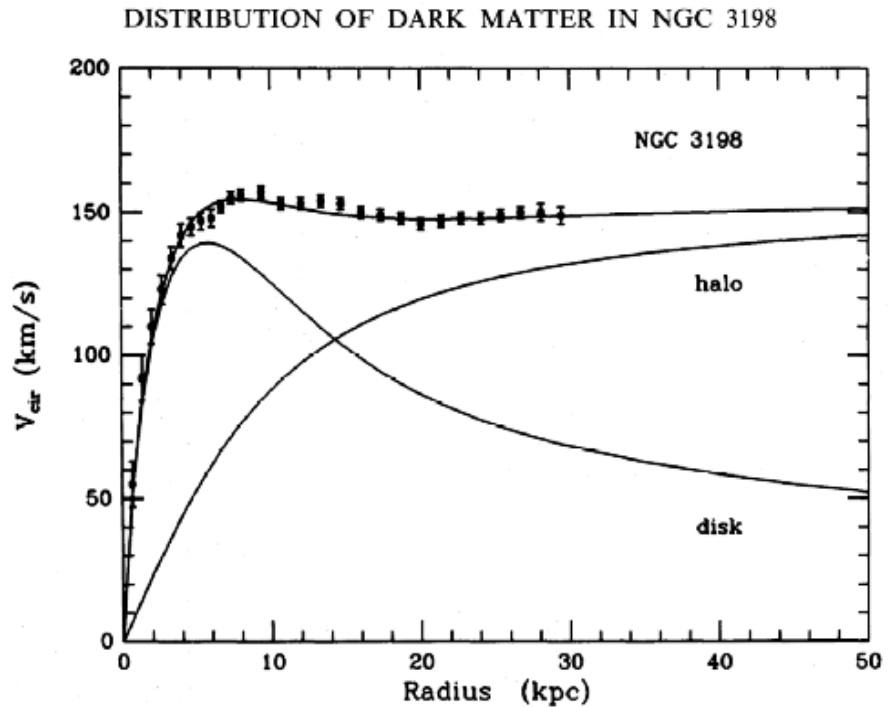




Krzywa rotacji Drogi Mlecznej na podstawie obserwacji HI i molekuly CO (Clemens 1985), zob. Nakanishi i Sofue 2003.

W wielu innych galaktykach jest podobnie! W modelach rotacji zakłada się istnienie hala ciemnej materii!

Są też jednak prace próbujące tłumaczyć płaskie krzywe rotacji działaniem pola magnetycznego lub niesferycznym rozkładem materii galaktyk (prace Jałocha i Bratek z UJ, 2008-2015)..



## Wyznaczenie masy Galaktyki

Możemy wyznaczyć masę Galaktyki w odległości  $R$  z przybliżenia rozkładem sferycznym (duże uproszczenie):

$$M(< R) = \frac{V^2 R}{G}$$

np. przyjmując  $R=10$  kpc,  $V=220$  km/s otrzymamy  $M$ .

## Wyznaczenie rozkładu wodoru, struktury ramion spiralnych

Do wyznaczenia położenia obserwowanego obłoku oprócz  $l$ , potrzebna jest odległość  $R$  od centrum Galaktyki i odległość  $r$  od obserwatora. Prędkość obłoku można w przybliżeniu założyć z krzywej rotacji  $V=220$  km/s. Wtedy dla dowolnego obłoku (niekoniecznie w punkcie tangencjalnym):

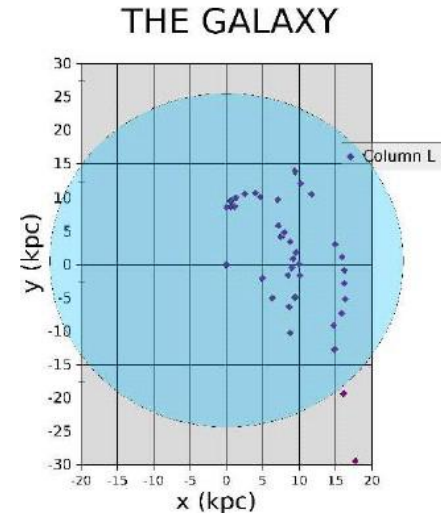
$$V_r = \left( \frac{R_o}{R} - 1 \right) V_0 \sin l \quad R = \frac{R_o V_0 \sin l}{V_r + V_0 \sin l}$$

Natomiast z twierdzenia kosinusów:

$$R^2 = R_o^2 + r^2 - 2R_o r \cos l$$

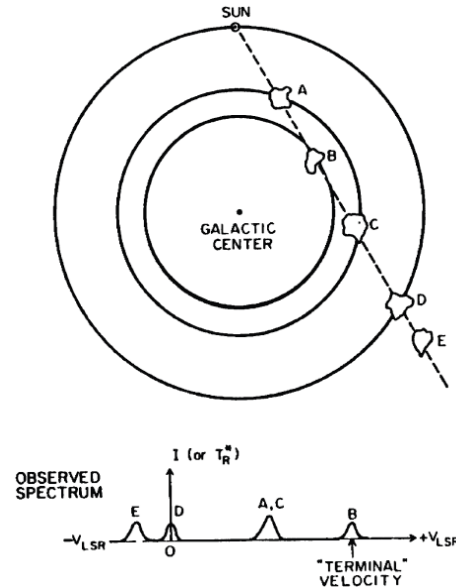
Otrzymujemy rozwiązania:

$$r_{\pm} = R_o \cos l \pm \sqrt{R^2 - R_o^2 \sin^2 l}$$



Dla ćwiartek długości galaktycznej:

- I i IV – oba rozwiązania na  $r$  są dodatnie, obłok może być bliski (np. A na rysunku) lub daleki (C). Potrzebna jest dodatkowa obserwacja dla tego samego  $l$  ale np. większej szerokości galaktycznej  $b$ , daleki obłok nie będzie widoczny na większych  $b$  (statystycznie mniejszy rozmiar kątowy)



- II i III – odrzucamy rozwiązanie ujemne, jako нефизyczne

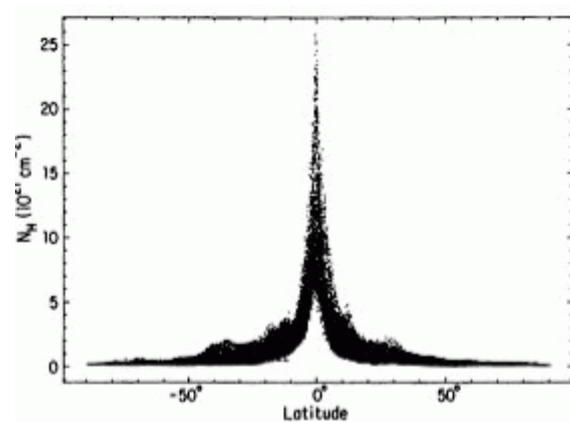
## Rozkład materii w Galaktyce

### Wyznaczanie gęstości wodoru neutralnego z obserwacji

Dla emisji optycznie cienkiej (mała głębokość optyczna) gęstość kolumnowa:

$$\frac{N_{Hc}}{cm^{-2}} = 1.8224 \times 10^{18} \int_{-\infty}^{+\infty} \left( \frac{T_b(\nu)}{K} \right) d \left( \frac{\nu}{km/s} \right)$$

Ta zależność jest niezwykle użyteczna. Zależy ona wyłącznie od temperatury jasnościowej (obserwowanej). Może być zatem wyznaczona z prostego scałkowania emisji w obszarze obserwowanej linii. Można nawet np. pomnożyć wartość w maksimum przez szerokość połówkową linii aby dostać zgrubne oszacowanie gęstości kolumnowej wodoru!

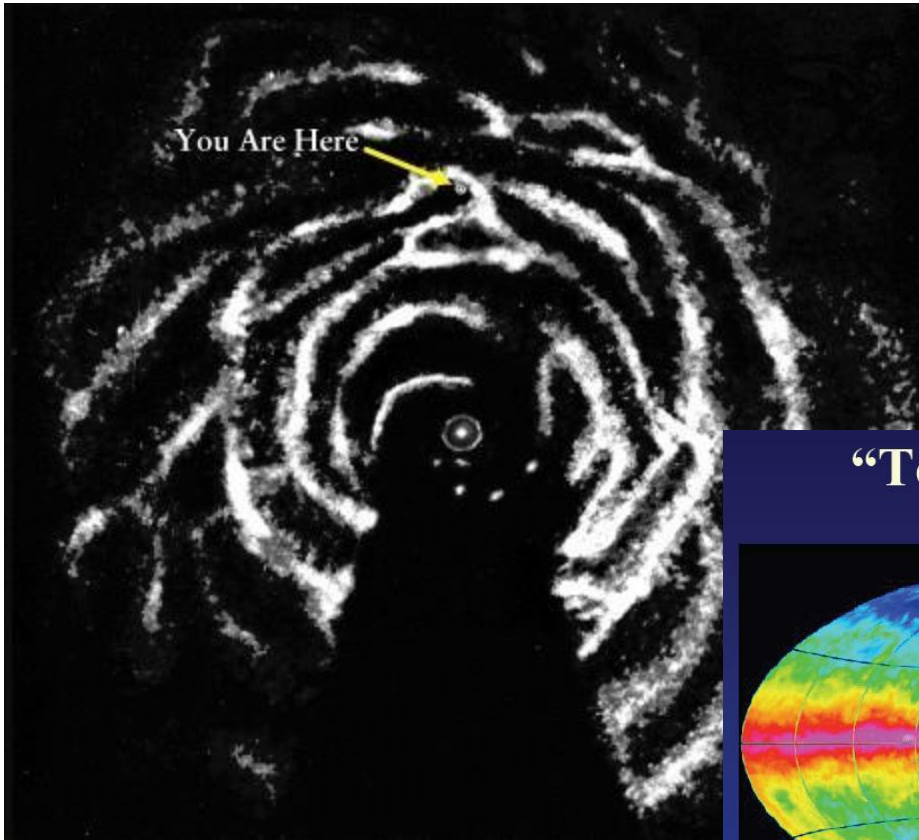


Obserwacje HI wskazują, że *Galaktyka = naleśnik!*

*Rys. Rozkład wodoru HI w poprzek płaszczyzny Galaktyki.*

Integracja po wszystkich kierunkach daje dolne ograniczenie (możliwa absorpcja) na **masę wodoru** w Galaktyce na  $5 \times 10^9 M_{\odot}$ .



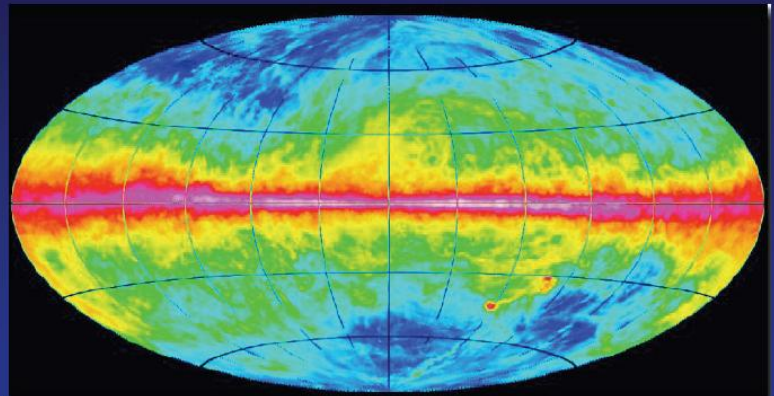


Z prawej: rozkład wodoru na niebie z przelądu:  
<http://www.astro.uni-bonn.de/hisurvey/euhou/> Tutaj  
nie trzeba znać odległości do obłoków HI by go  
narysować.

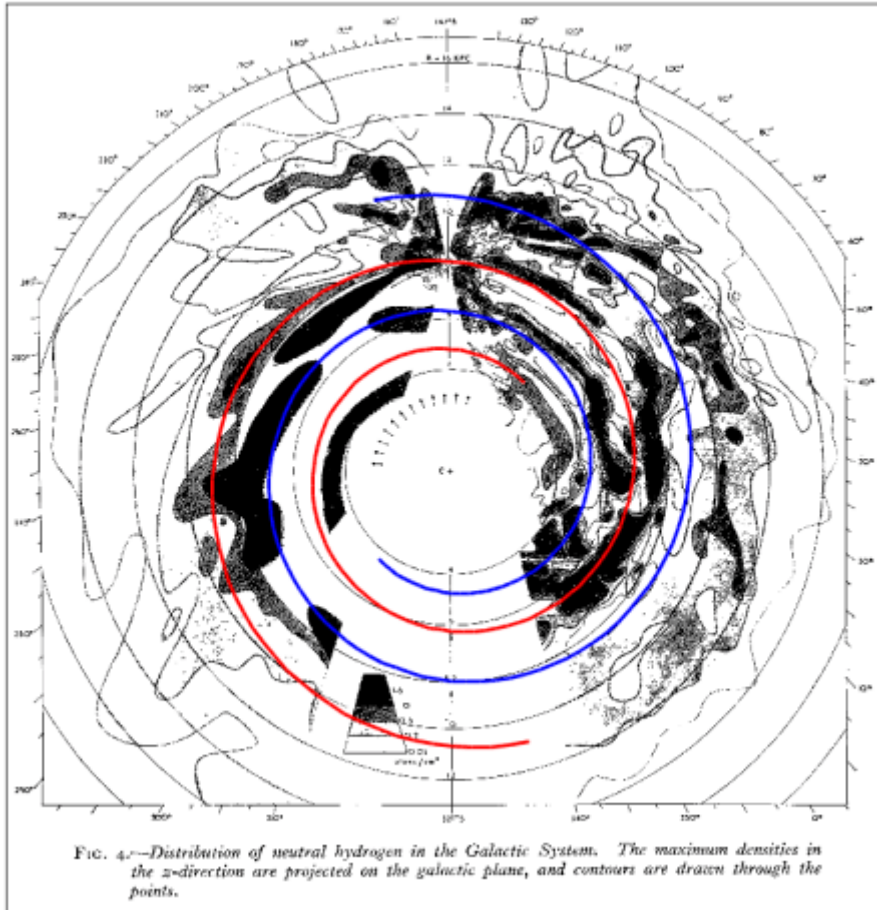
Dzięki obserwacjom wodoru po raz pierwszy mogliśmy stwierdzić, że nasza Galaktyka ma strukturę spiralną.

Z lewej: „Rzut z góry” na galaktykę (Słońce – strzałka) – trudno taki rozkład uzyskać – potrzebne odległości obłoków HI

## “Total” H I all-sky map



Leiden-Bonn-Argentina survey

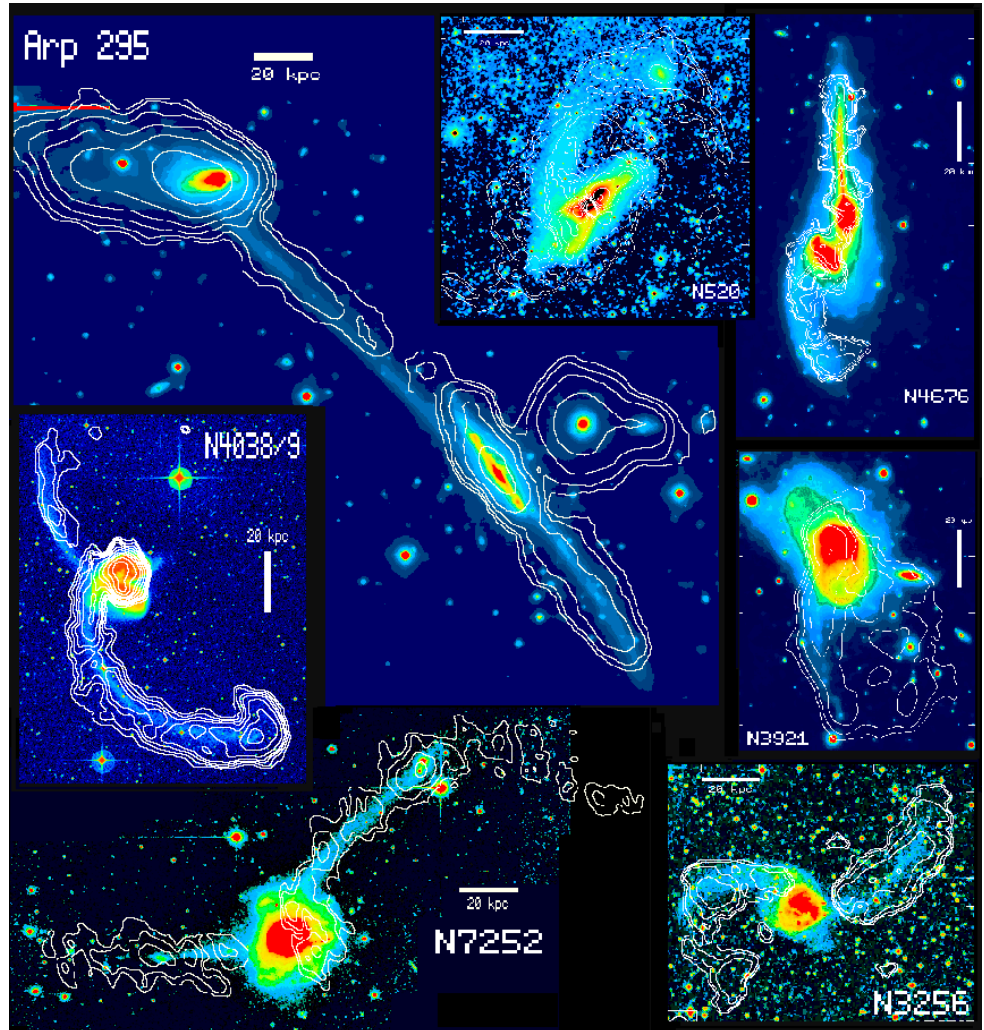


Struktura ramion spiralnych według historycznej pracy Oort et al. 1958

**Możliwa praca magisterska z pomiarów RT3!**



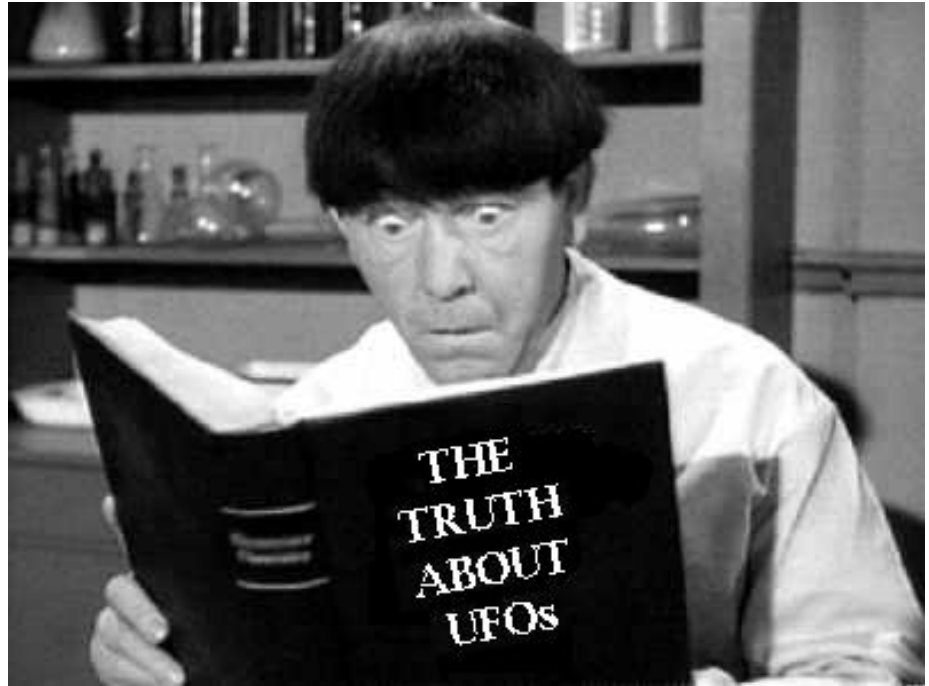
**HI – badanie dynamiki galaktyk!**



## HI w służbie SETI

SETI (ang. Search for Extra-Terrestrial Intelligence) to rozbudowany, wieloletni projekt naukowy, którego celem jest znalezienie kontaktu z pozaziemskimi cywilizacjami poprzez poszukiwanie sygnałów radiowych i świetlnych sztucznie wytworzonych, pochodzących z przestrzeni kosmicznej i nie będących dziełem człowieka. Instytut powstał w 1984r.

Dyr. Inst. SETI dr Jill Tarter





A composite image of Earth, the Moon, and the Sun in space. The Earth is the large blue and white sphere in the center, with the Moon as a smaller brown sphere in the foreground. The Sun is a bright yellow sphere in the top left corner. The background is a dark starry space.

**"The probability of success is difficult to estimate; but if we never search, the chance of success is zero."**

Cocconi & Morrison, Nature (1959)

Poszukiwania pozaziemskich cywilizacji na fali 21cm:

- wodór – najpowszechniejszy pierwiastek we Wszechświecie
- fale o długości 21cm propagują się bez przeszkód (w odróżnieniu od fal krótszych, np. widzialnych)
- „Obcy” powinni to wiedzieć...

W 1960 astronom Frank Drake z Cornell University przeprowadził pierwszą serię eksperymentów, które zostały nazwane **Projektem Ozma**. Drake posługiwał się **radioteleskopem o średnicy 26m**, umieszczonym w miejscowości Green Bank, w Zachodniej Wirginii. Badał on szum radiowy z najbliższej Ziemi położonych gwiazd o średniej wielkości Tau Ceti i Epsilon Eridani, odległych od Słońca odpowiednio 10,5 i 11,9 lat świetlnych. Przez 200 godzin obserwował 7200 kanałów o szerokości 100 Hz położonych blisko centralnej **częstotliwości 1420 MHz**. Nagrywał on ten szum na kasyety magnetofonowe, a następnie je odsłuchiwał na zwykłym magnetofonie. Nic oprócz szumu nie usłyszał.

Pierwsza konferencja naukowa na temat poszukiwań sygnałów pozaziemskich odbyła się w Green Park w 1961. Zainterесowała ona radioastronomów z ZSRR, którzy wspólnie z **Carlem Saganem** rozpoczęli regularne badania SETI, korzystając z radzieckich anten wielokierunkowych. W 1966 roku, Sagan razem z radzieckim astrofizykiem **Josifem Shkolovskim** opublikowali książkę *Inteligentne życie we wszechświecie*, która stała się rodzajem biblii dla późniejszych badaczy SETI.

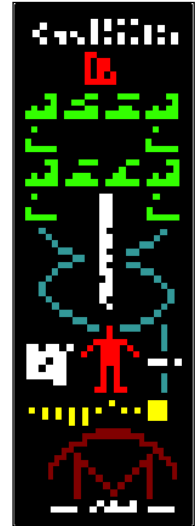
W 1974 podjęto **pierwszą próbę wysłania własnego sygnału** do cywilizacji pozaziemskich. Sygnał był emitowany przez radioteleskop w **Arecibo**.



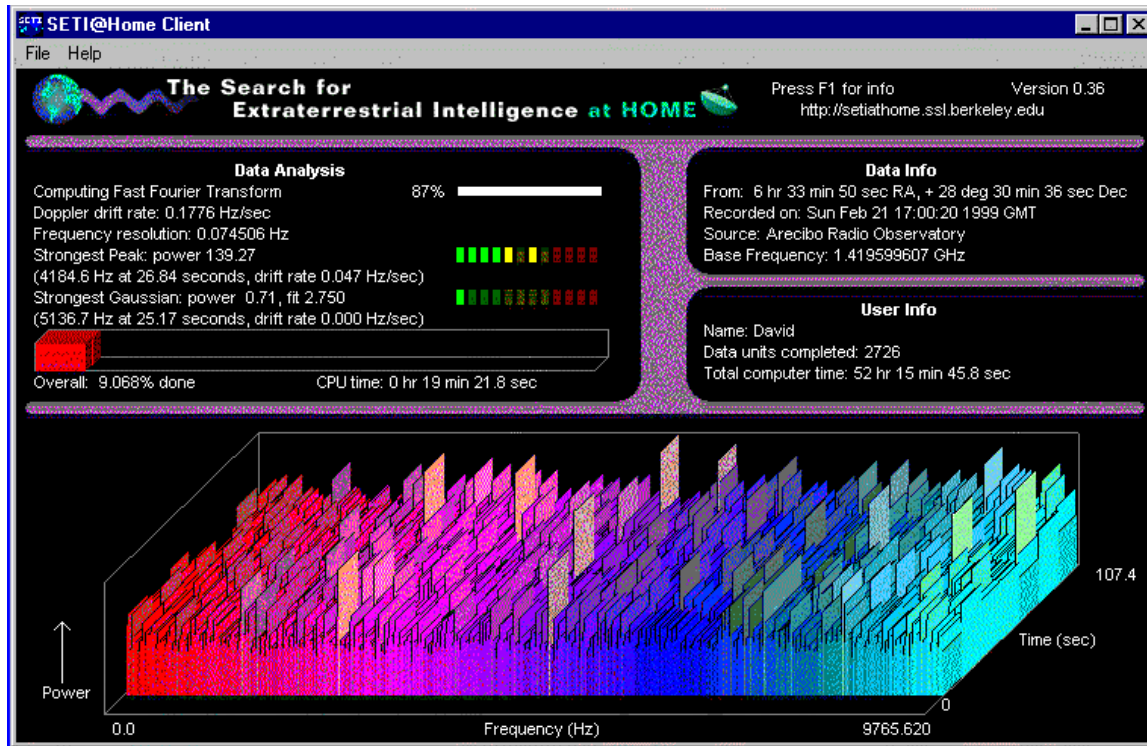
Był to przekaz liczący 1 679 bitów, na który składała się mapa bitowa o rozmiarach 23 x 73 piksele, zawierająca schematyczny rysunek kobiety i mężczyzny, położenie kuli ziemskiej w kosmosie, oraz samego radioteleskopu. Sygnał był wysyłany **do gromady kulistej** gwiazd M13, położonej ok. 25 000 lat świetlnych od Ziemi. Na skutek krytyki tego projektu (stare gwiazdy!) został on jednak szybko zarzucony.

W 1979 na Uniwersytecie Kalifornijskim w **Berkeley** uruchomiono kolejny projekt SETI o nazwie **SERENDIP** (ang. Search for Extraterrestrial Radio from Nearby Developed Populations), który jest kontynuowany po dziś dzień (w oparciu o Arecibo). Równolegle, w 1980 Sagan, Bruce Murray i Louis Friedman zapoczątkowali działanie prywatnego stowarzyszenia Planetary Society, którego jednym z zadań miało być wspieranie projektów SETI.

11 listopada 2007r. Uniwersytet Berkeley i SETI Institute uruchomili pierwsze 42 anteny **Allen Telescope Array (ATA)**. Jest to pierwsza faza budowy interferometru o 350 antenach do prowadzenia poszukiwań cywilizacji i badań naukowych na w linii wodoru 21cm. Fundatorem części projektu był Paul G. Allen, filantrop z Microsoftu („prawa ręka” Billa Gatesa).



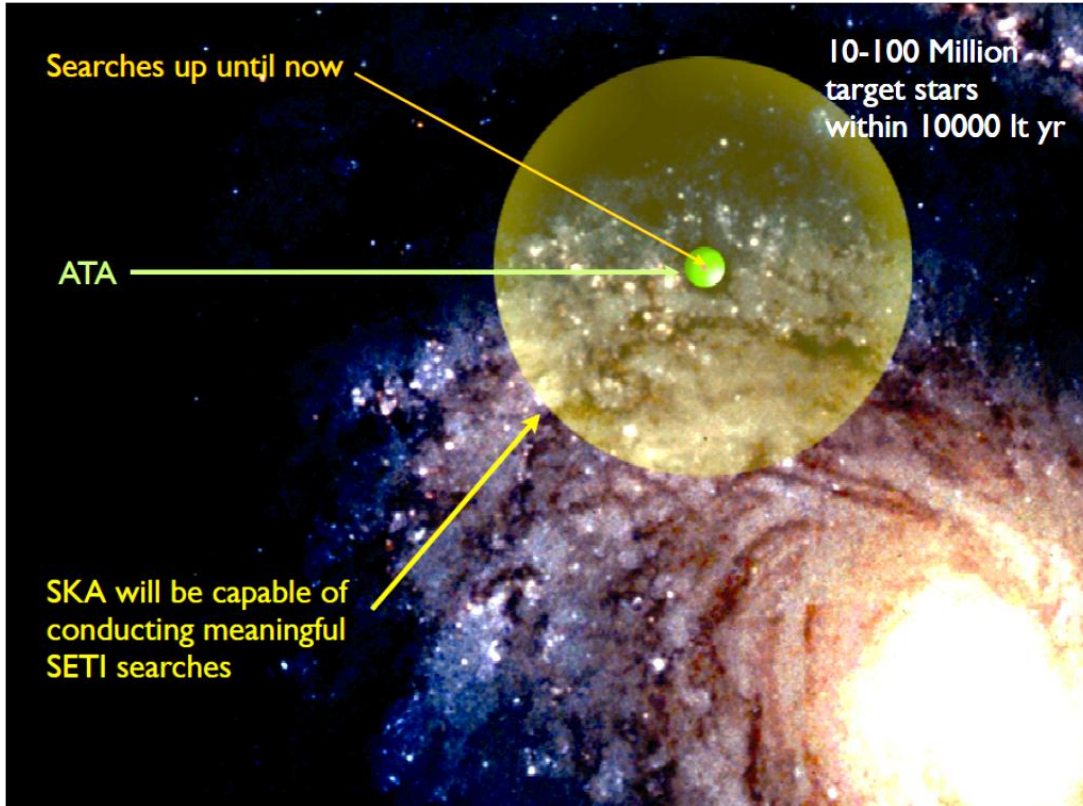
Innym interesującym projektem, który zapewne zostanie też powiązany z ATA, jest **SETI@home**. Projekt ten wystartował w 1999 r. i polega na wykorzystywaniu wolnych mocy obliczeniowych komputerów internautów-wolontariuszy. Zwykli użytkownicy przystępując do projektu instalują u siebie program działający w tle, który automatycznie pobiera przez Internet kolejne porcje szumu kosmicznego z anten radiowych, analizuje go i odsyła wyniki do serwerów w Berkeley.







## Krytyka



Paradoks Fermiego: Galaktyka powinna być już cała zasiedlona jeśli istnieje choćby jedna stara cywilizacja

By spróbować odebrać sygnał z bardzo wielu gwiazd potrzebne są znacznie lepsze narzędzia!

By odebrać sygnał ze statystycznie biorąc dużego obszaru galaktyki M31 potrzebny jest co najmniej zespół anten SKA (Square Kilometre Array) - w początkowym stadium budowy