

# SETI 宇宙に知性体をもとめる

平林 久

電波と光SETI  
わたしたちは何者？  
宇宙の理解と今後の進み方  
などなど、

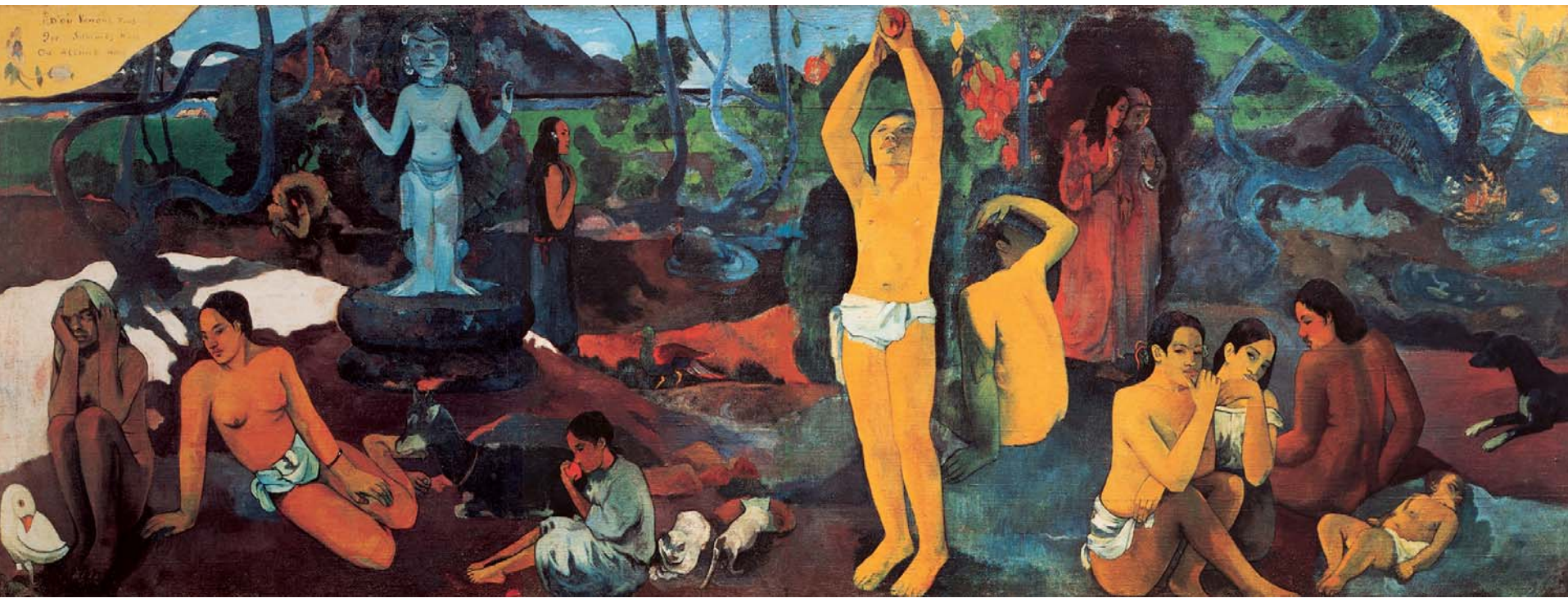


# 惑星状星雲

白色矮星

仏教では、56億7000万年あとに  
弥勒菩薩が救ってくださるそうです。





## Paul Gauguin

D'où venons-nous? Que sommes-nous? Où allons-nous?



1600 ブルーノ 刑死  
1633 ガリレオ 終身刑

## ジョルダナーノ・ブルーノ

恒星は太陽と同じような天体である。すなわち、太陽は無数にある恒星のひとつに過ぎない。

太陽系と同じく恒星のまわりにも惑星が公転しており、そこには知的生命の存在する地球のような世界も存在するはずだ。

宇宙は無限に広がっており、そこに中心はなく、その中で無数の世界がそれぞれ生成消滅を繰り返している。

地球だけが特別なのではなく、自然界の法則は宇宙のどこでも同じように働いている。

山片幡桃（1748－1821）幡は虫偏  
「夢ノ代」

他惑星の居住者、異星の惑星系も、

ロケットの速度が秒速30 km/秒だと  
光の1万分の1

1光年の距離を1万年かかる

α Centauri  
4.3 光年

ダイダロス計画 (英)  
バーナード星へのフライバイ原子力飛行

半径  
1000光年

10光年の範囲にG型星10とすると  
1000光年の範囲に 1000万星

27000光年

10000光年

G,K,M星だと x10

銀河

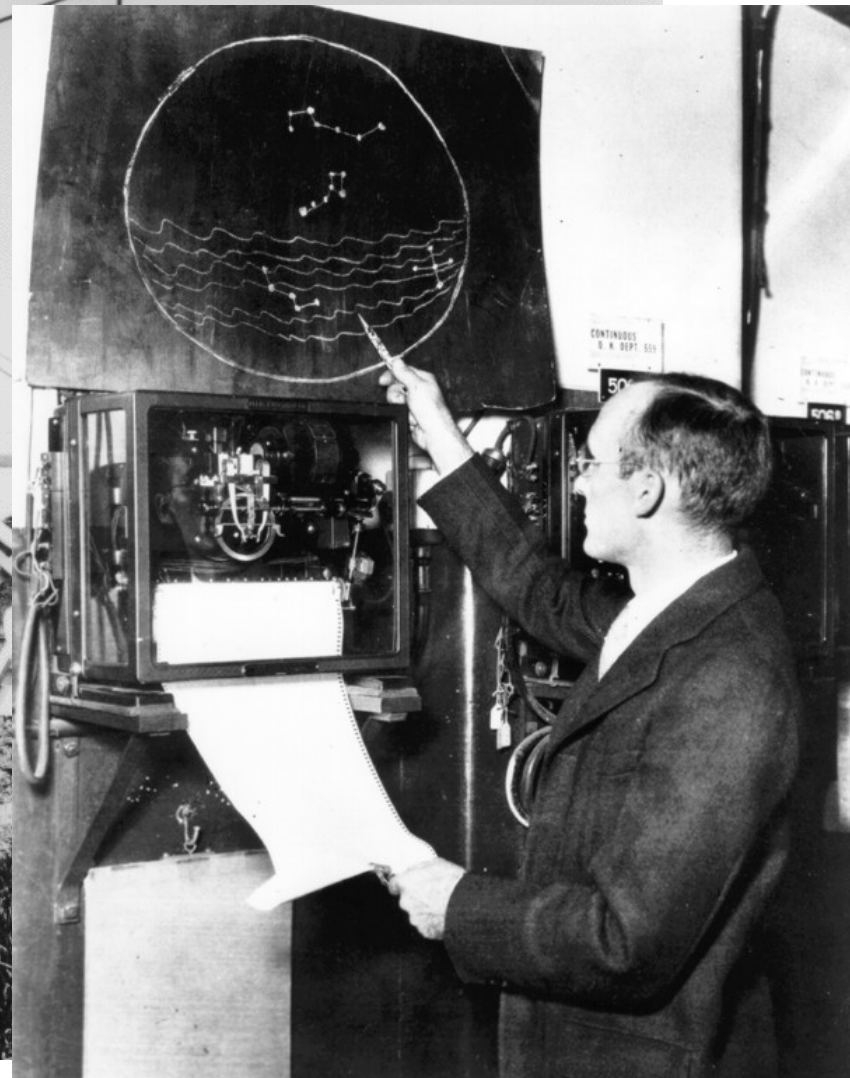
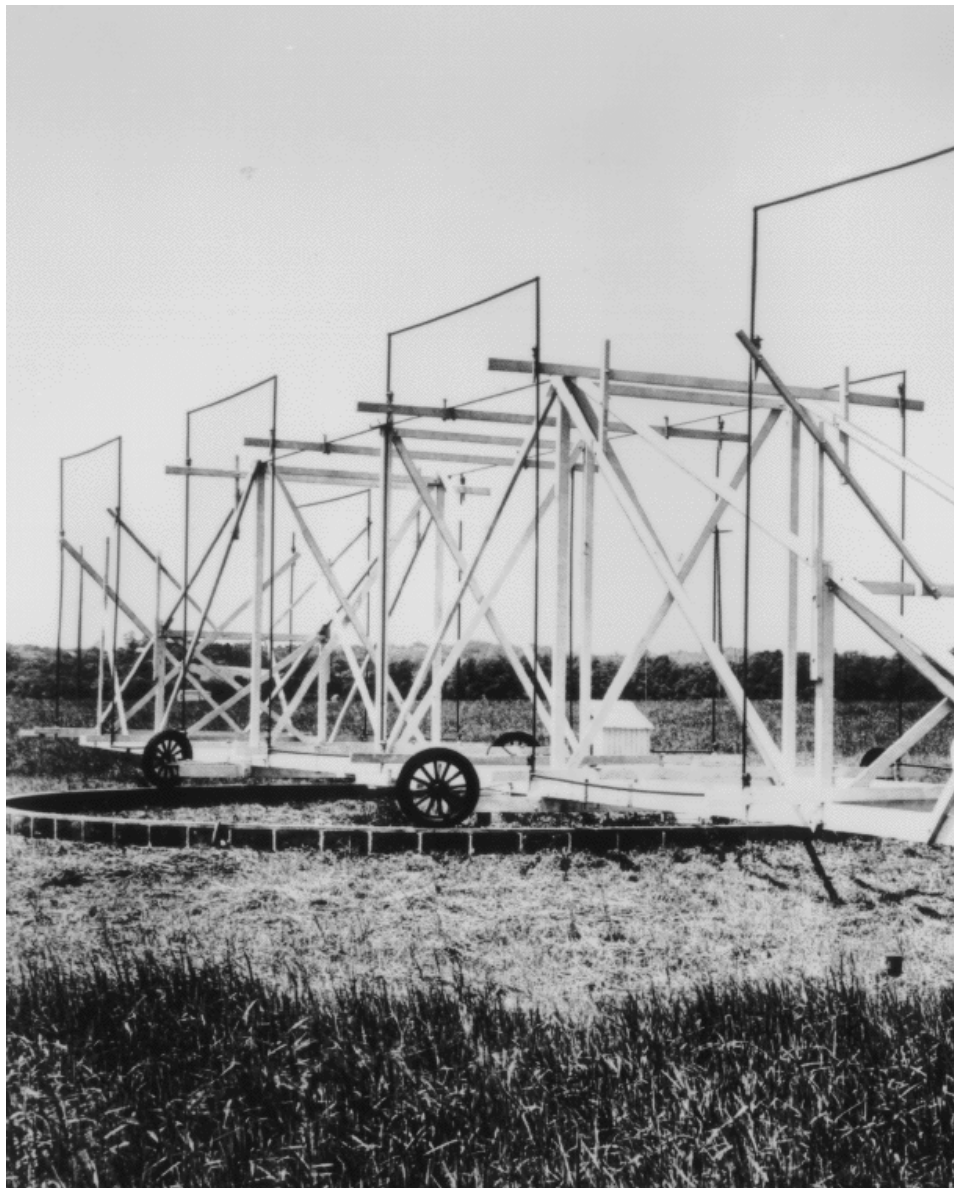
10万光年のひろがりの中に、  
数千億の星

Spiral Galaxy NGC 3370

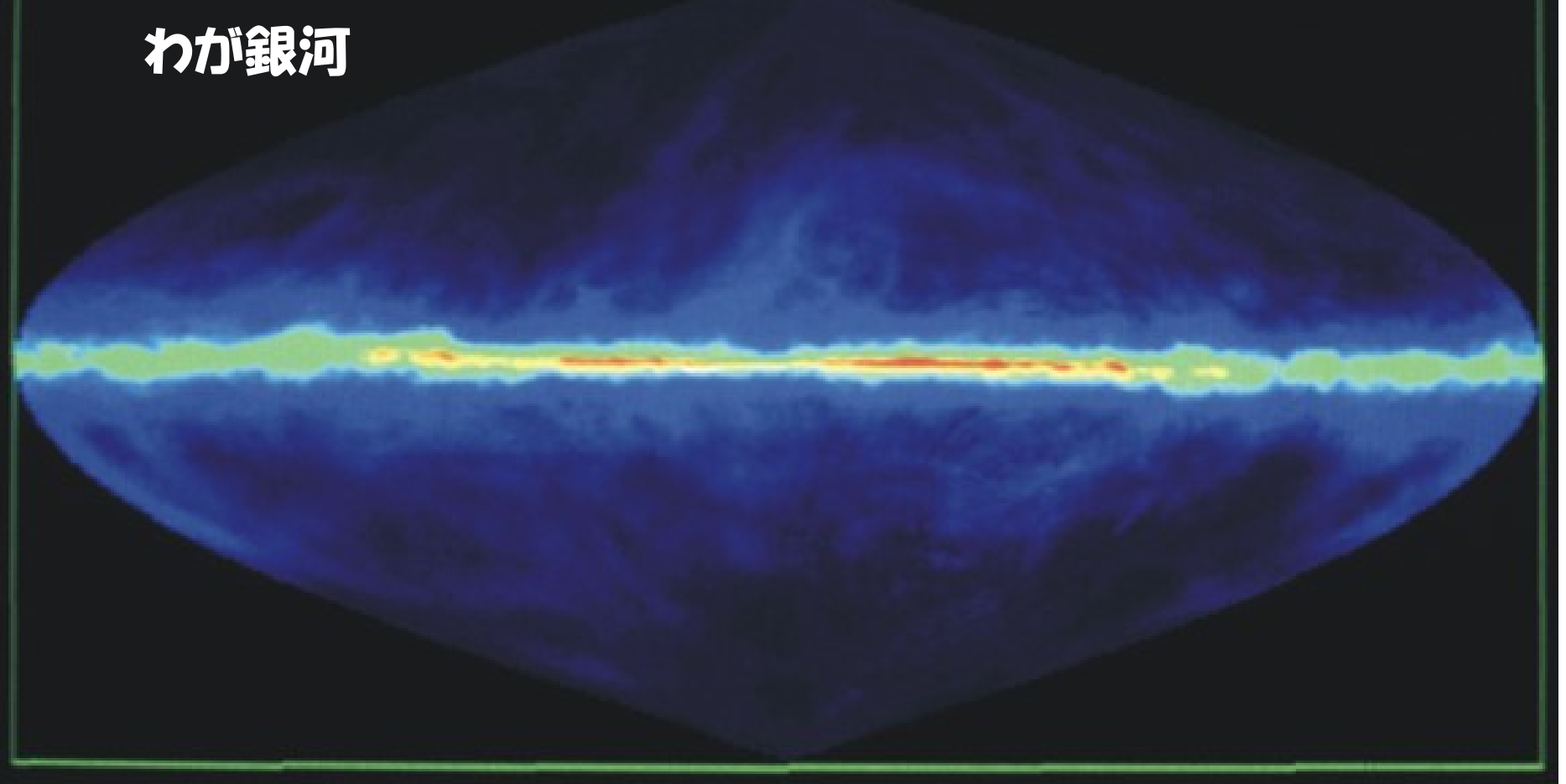


HUBBLESITE.org

# ジャンスキー (ベル電信電話研究所) 宇宙からの電波の発見(1930年ごろ)



# わが銀河



**中性水素原子ガスを  
電波線(1420MHz)で観る**

**この波長で宇宙が明るく見える。**

**この波長で探査すると  
通信のSN比では不利**



# ココニ, モリソン論文

(1959)

## 問題提起

電波探査の可能性  
水素 21cm線

(Nature, 184, 844-846, 1959)

"Searching for Interstellar Communications"



## 実際の探査 オズマ計画

(1960)

### ドレーク

(アメリカ国立電波天文台)

1420 MHz

60 時間

2 太陽型星

(11 光年)

SETI (Search for Extra-Terrestrial Intelligence)

## 地球外文明探査

Drake 博士     Tarter 博士



臼田深宇宙観測所  
64mアンテナ

We were here.



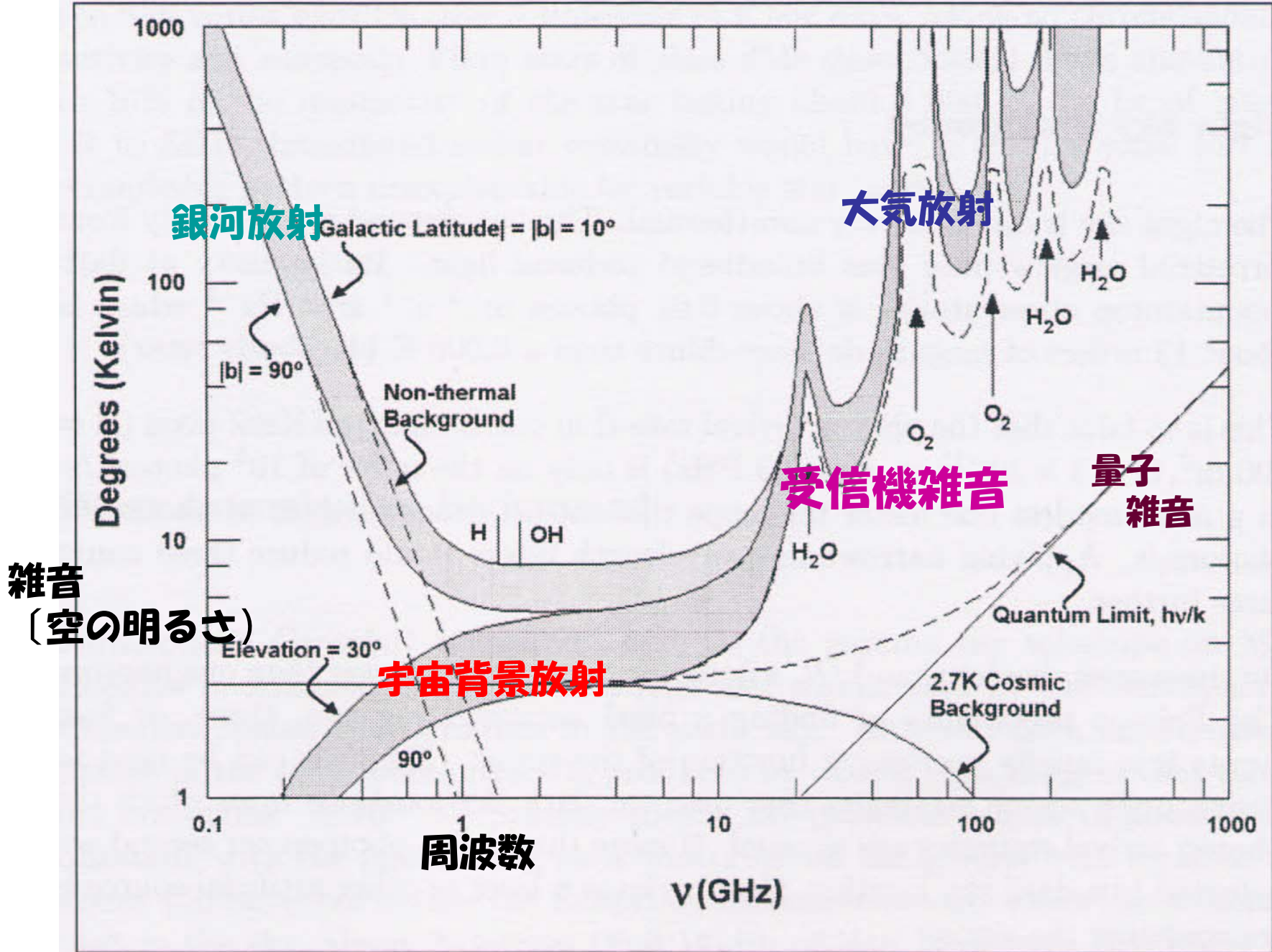


Figure 2.12: Background Noise Sources in the Microwave.

# SETI観測の実際

1960: Drake, NRAO, 1.4GHz, 2 stars OZMA  
1964: Kardashev, Crimia, 0.92GHz, 2 quasars  
1965: Kardashev, Crimia, 0.92GHz, 2 quasars  
1966: Kellerman, CSIRO, 0.3-5GHz, 1 galaxy  
1970: Slysh, Nancey, 1.6GHz, 10 nearest stars  
1970: Slysh, Nancey, 1.6GHz, 5 OH masers  
1971: Verchuur, NRAO, 1.4GHz, 9 stars  
1972: Kardashev, Crimia, 8.5GHz, galactic center  
1972: Bridle, ARO, 22GHz, 70 stars  
1972: Palmer, NRAO, 1.4GHz, 674stars  
1973: Dixon, OSURO, 1.4GHz, All sky search  
1975: Sagan, NAIC, 1.4GHz, four galaxy  
1975: Israel, WSRT, 1.4GHz, 50 stars  
1976: Clark, NRAO, 8.5GHz, 4 stars  
1976: Bowyer (SERENDIP), 1.4GHz, all sky  
1977: Stull, NAIC, 1.6GHz, 6 stars  
1977: Tarter, NRAO, 1.6GHz, 200 stars  
1977: Wielebinski, MPIFR, 1.4GHz, 3 stars  
1978: Cohen, NAIC, 1.6GHz, 25 global clusters  
1978: Horowitz, NAIC, 1.4GHz, 185 stars  
1978: Knowles, NAIC, 0.13-0.5GHz, 2 stars  
1980: Witteborn, NASA, 8.5-13.5GHz, 20 stars  
1981: Shostak, WSRT, 1.4GHz, galactic center  
1981: Talent, KPNO, 3.5GHz, 3 stars  
1981: Tarter, WSRT, 1.4GHz, 85 stars  
1981: Biraud, Nancey, 1.4GHz, 343 stars

1982: Horowitz, NAIC, 1.4GHz, 400 stars  
1983: Damashek, NRAO, 3.9GHz, sky survey  
1983: Valdes, HCRO, 1.5GHz, 80 stars  
1983: Horowitz, Harvard, 1.4GHz, sky survey  
1983: Gray, SETI Obs., 1.4GHz, sky survey  
1985: Horowitz, Harvard, 1.4GHz, sky survey  
1986: Mirabel, NRAO, 4.8GHz, 33 stars  
1986: Colombo, IAR, 1.4GHz, 70 solar type stars  
1987: Gray, Oak Ridge, 1.4GHz  
1990: Blair, CSIRO, 4.4 GHz, 100 solar type stars  
1990: Gray, Oak Ridge, 1.4GHz  
1990: Lemarchand, Argentine, 1.4GHz, sky survey  
1992: NASA, Goldstone, 1.7GHz, sky survey  
1992: SERENDIP, Arecibo, 0.4GHz, sky survey  
1994: Mauersberger, IRAM, 203GHz, 16 stars  
1995: Gray, VLA, 1.4GHz, Wow locale  
1995: Brown, OSURO, 1.4GHz, sky survey

その後: ハーバード大学BETA計画

: U.C.バークレーSERENDIP計画

: SETI研究所Phoenix計画

: Alan Telescope Array

: SKA pathfinder

: SKA (Square Kilometer Array)

# ET信号を思わせたもの：

1942 **太陽電波**

**ドイツ軍のかく乱電波？  
太陽の表面爆発現象**

19 **電波源の速い変動** CTA102,

**速い電波変動**

**銀河の中心の超巨大ブラックホールとジェット現象**

1963 **OHメーザー**

**狭い帯域のスペクトル線、速い変化、偏波  
生成期、晩期の星周でのメーザー現象**

1967 **パルサー** CP1919,,

**規則的なパルス**

**中性子星と放射機構**

# Pulsar 1967

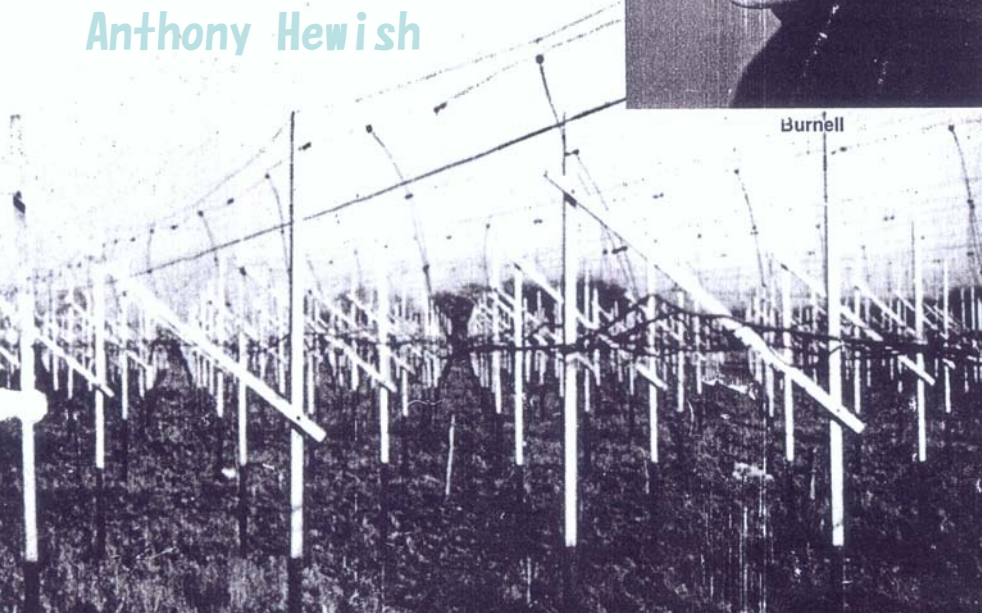
S. Jocelyn Bell Burnell was born in northern Ireland in 1943. After receiving a B.S. degree in physics from Glasgow University, Scotland, she went to Cambridge University, England, where she earned her doctorate in radio astronomy in 1969. Since then she has done research in the newest branches of astronomy involving gamma-rays and x-rays. In 1978 she received the American Astronomical Society Award for her pulsar research. Currently she is a research scientist at the Mullard Space Science Laboratory of the University College London.



Burnell

Jocelyne-Bell Burnell  
ケンブリッジ大学

Anthony Hewish



電弱統一理論(ワインバーグ、サラム)  
1979ノーベル賞

"We put up over a thousand posts and strung more than 2000 dipoles between them."



## パルサーの発見 1967年

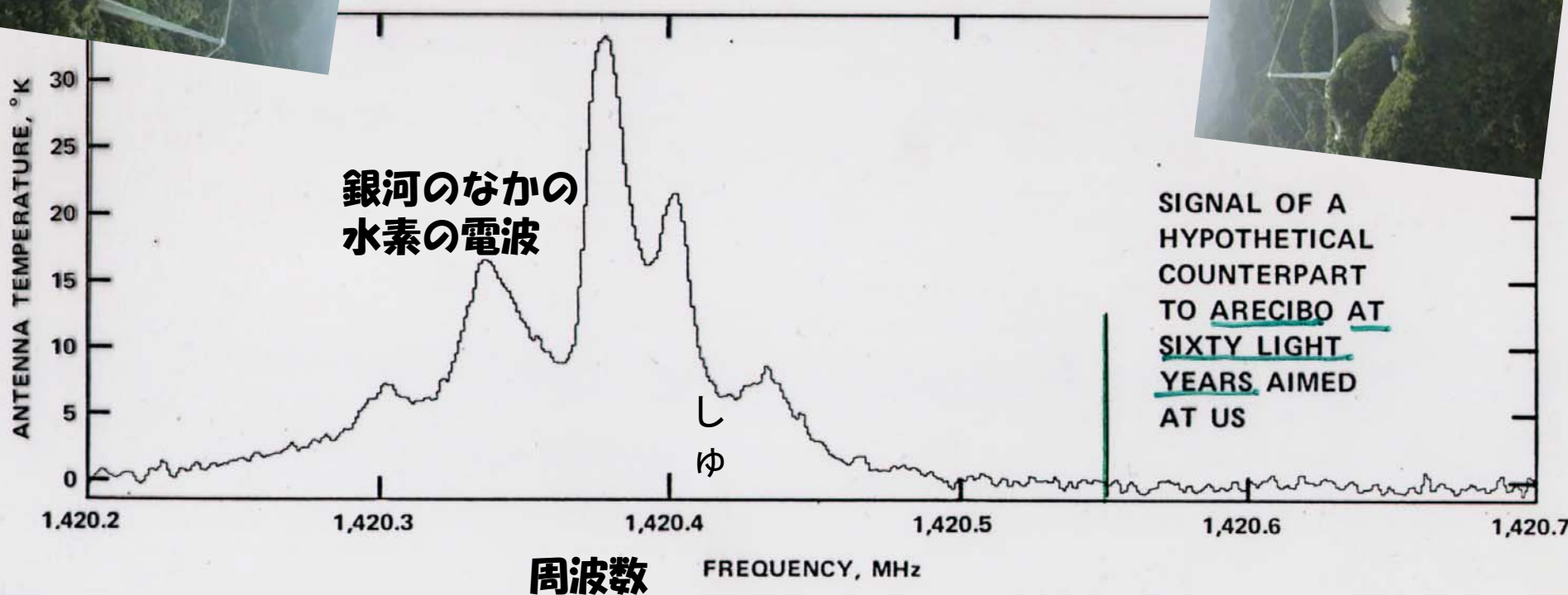
ベータ、ノーベル賞、星での核反応



**Arecibo 305m**

**M13**

アレシボの送信機と受信機を使えば  
60光年離れても信号が受かる。



周波数帯域を1kHzから1Hzに絞れば、1900光年まで。

Portion of output scan from 1024 channel ( of 1 KHz each) analyzer at Arecibo Observatory showing an ETI search, centered on HI line, with  $\alpha$ -Ophiuchi as the target. Structure shown is due to interstellar hydrogen





Figure 1.9: Radio Telescope Antenna Size vs. Time.

**アンテナの面積は20年で10倍向上!**

# 電波望遠鏡の大型化

宇宙をくわしく、  
遠くまで見たい。

Green Bank  
Telescope  
(GBT 100m)

野辺山  
45m望遠鏡

特定の方向だけに  
とてつもない感度  
があるが、他はだめ。



通信の能力は  $\text{有効面積}/\text{波長}^2$   
解像能力は  $\text{有効直径}/\text{波長}$

無指向アンテナは  
感度はとても弱い  
が、どちらからもOK。

# 干渉計型の電波望遠鏡

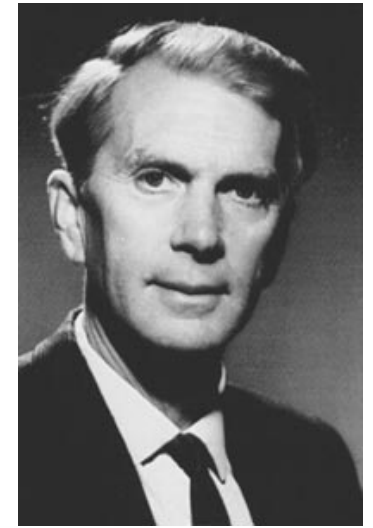
ケンブリッジ大学

1マイル望遠鏡

1.4 GHz 1.6 km 基線 → 40 秒角

5km 望遠鏡

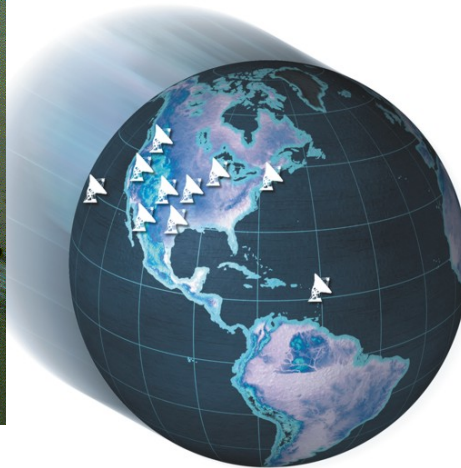
5 GHz 5 km 基線 → 3 秒角 (1974)



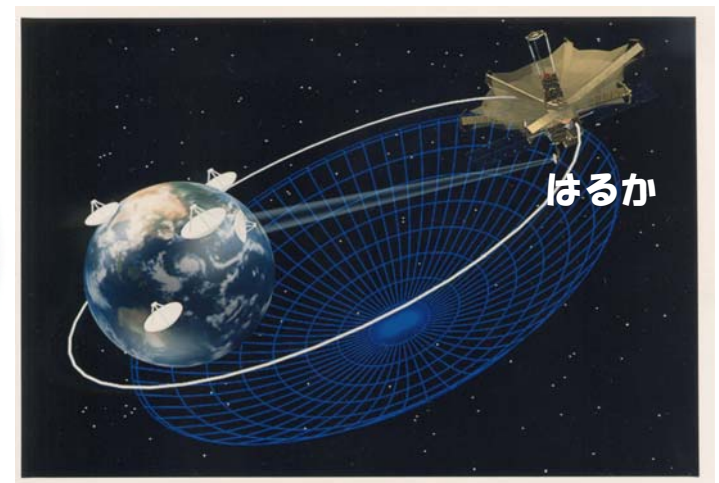
- **マーチン・ライル** 卿
- **開口合成型電波干渉計**  
1962 原理 → 1965 観測  
1974 ノーベル物理学賞



VLA 25 m x 27 台



VLBA 25 m x 10 台



VSOP



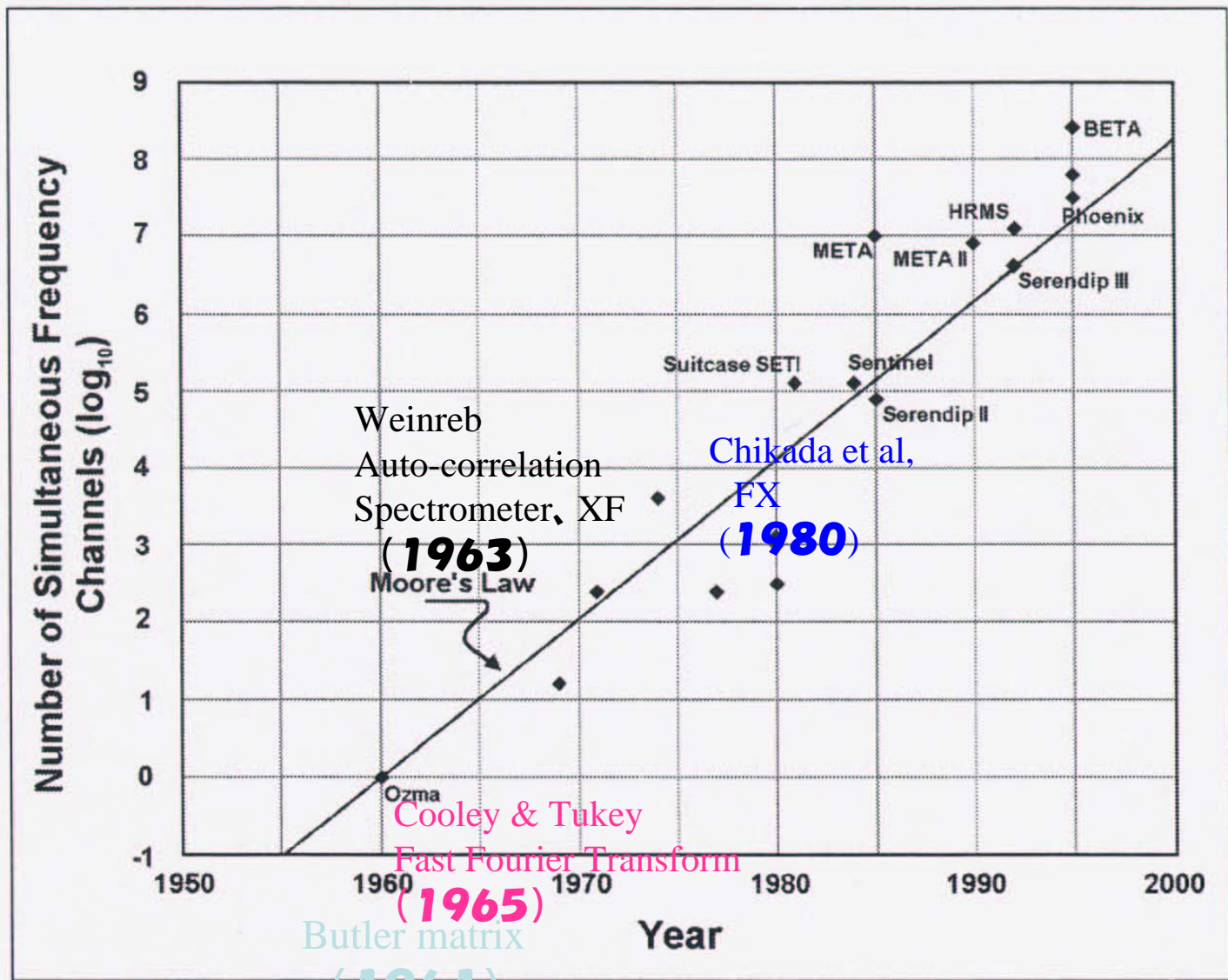


Figure 1.10: Number of Frequency Channels vs. Time.

**スペクトル解析能力は20年で100倍向上!**

探査能力：

アンテナの面積は 20年で10倍向上！

受信機の感度向上は 20年で10倍向上！

スペクトル解析能力は 20年で100倍向上！

微弱信号を検出する

探査能力は、、、 20年で100万倍向上！？

---

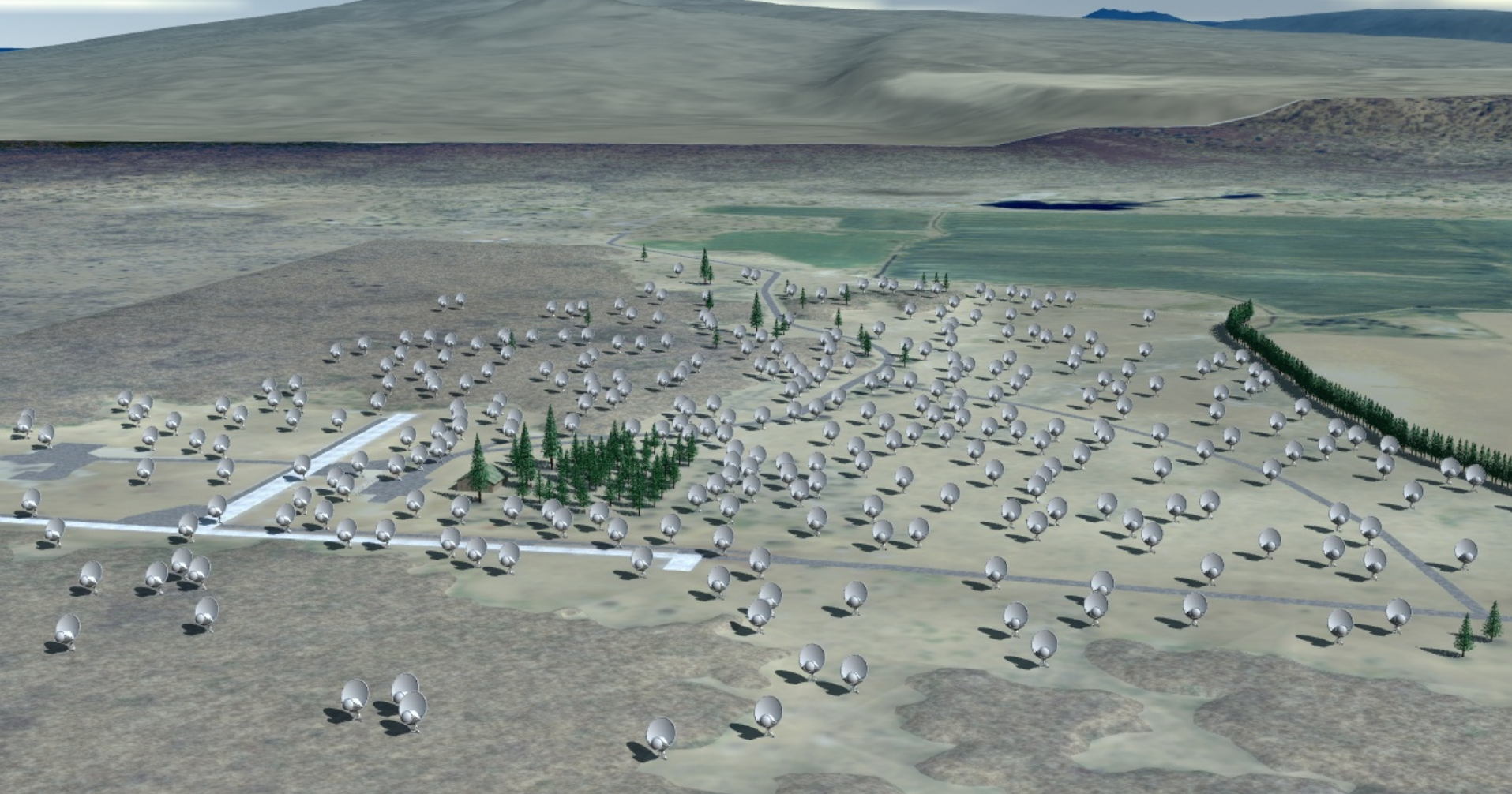
Ozma計画から50年経過、！ 15乗倍！

しかし飽和に近づいている

さらに、広視野探査能力も！ 約10万倍！

20乗倍！！

成否は予断を許さない



350 の 6.1 m アンテナ  
0.5-11 GHz (同時)  
視野 2.5度四方

ATA

The Allen Telescope Array  
SETI Institute  
UCB



0.5-11 GHz feed

冷却受信機



# アンドロメダ銀河 (M31)



## Allan Telescope Array

電波天文学とSETIに  
使われる

部分運用始まった

### ATAの夜景

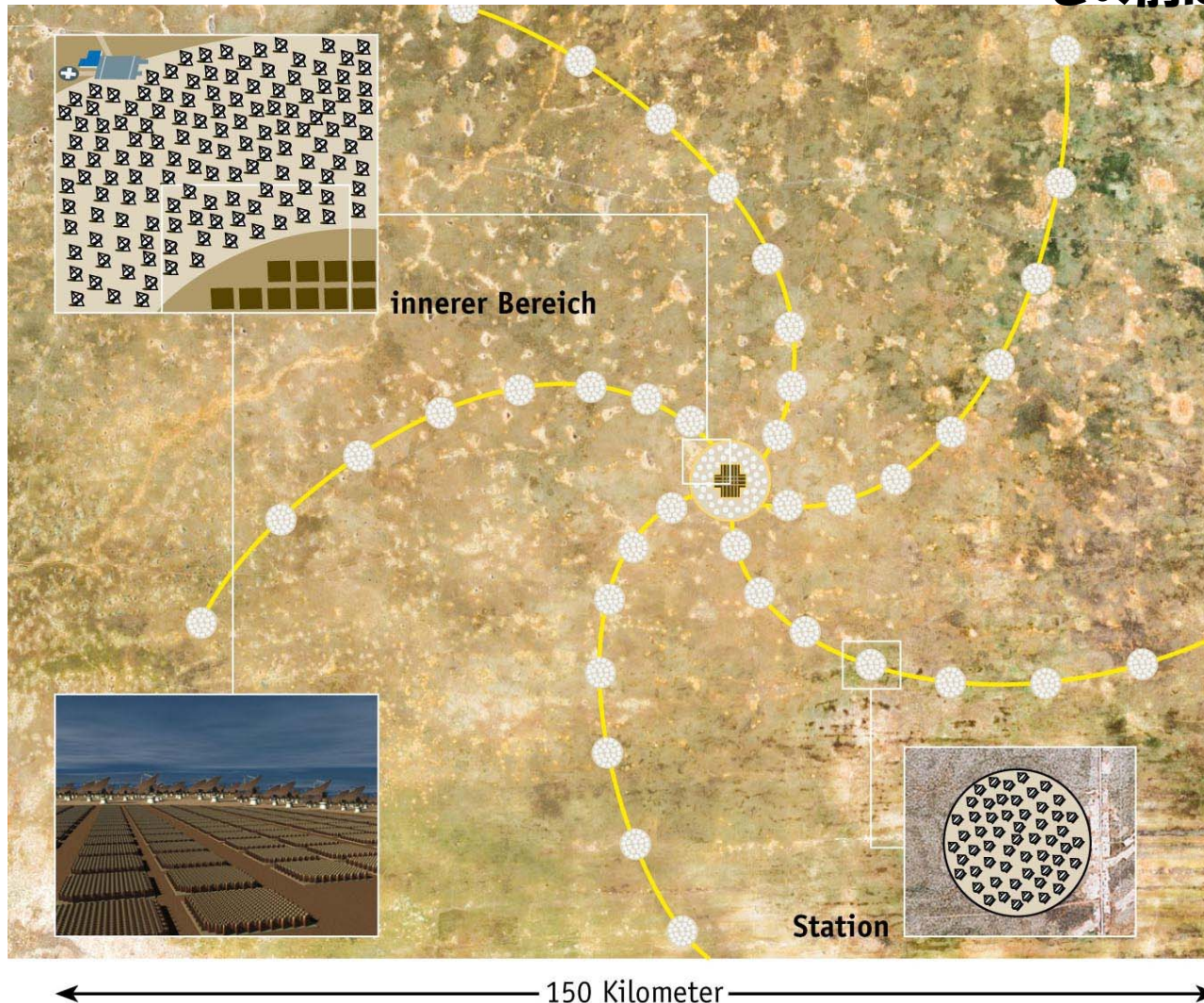


# 世界の多くが一緒になってつくる Square Kilometer Array (SKA)

100MHz - 22GHz 辺り

その前に

SKA Pathfinder  
2010年代に稼動



ひらたくいうと、直径 1 km の電波望遠鏡が何百台 相当

## 電磁波による通信

Maxwell の方程式  
Hertz の実験  
Marconi の実験

1900

ラジオ放送

レーダー出現  
レーダー天文学も

テレビ放送

1960

Townsら、レーザー  
国際マイクロ波中継

光ケーブル通信

2000

## 電磁波と宇宙

Jansky 宇宙電波の発見  
太陽電波の発見  
21cm波の観測

電波SETI始まる

3K宇宙背景放射  
星間分子線

光SETI始まる

電磁波の利用と宇宙観測は一緒にすすんできた

1961 年、ケネディ大統領、

5 月「60年代中に人類を月面へ送り無事帰還させる」演説。

7 月「全世界が平等に利用できる衛星通信システム」の実現を提唱。

1962 年、AT&T ベル研究所テルスター 1 号、NASA リレー 1 号打ち上げ。  
日米、衛星通信実験の取り決めを交わす。

1963 年 11 月 20 日に「KDD茨城宇宙通信実験所」、開所。

Hx 大学入学

11 月 23 日、茨城局と米ゴールドストーン間で、リレー 1 号衛星使って初の日米間テレビ衛星  
中継 実験。

「ケネディ大統領がダラスで暗殺された」

ビッグバンの電波発見

1964

1965

Hx天文に進む

1966 12 月にはインテルサット太平洋衛星向け地球局として本格運用開始。

1967

パルサーの発見

Hx大学院へ

1968

電波研究所（鹿島）30m 観測

1969 KDD茨城ミリ波用 7mアンテナ

Hx 修士

1970

1971

KDD（高萩）7m 観測

1972

Hx 博士

野辺山就職

199x KDD山口アンテナ、山口大学へ

200x KDD茨城アンテナ2基、茨城大学へ

# 地球の電波利用は続くか？

**続く。**

光通信（ビーム、ケーブル問わず）が盛んになるにしても、使い勝手が違う。電波のメリットを使わないはずが無い。現在よりも有効に使い切るだろう。そのとき、電波は外にもれださなくなるだろう。L

**SETIでは、意図的発信電波をさがすのが本命だろう  
発見可能性最大、星間通信有利性だけで発信法が決まるだろう  
〔文明活動での利用とは独立に、）**

**電波も、光も、それ以外でも、一般利用とは別に、  
SETI成功最大の評価で使うべき。**

## 光SETI周辺のできごと

レーザーの理論 1958 タウンズ、バーソフ、フロホロフ  
レーザー発信

電波SETI 1959 コーニ、モリソン論文

レーザーの実現 1960 メイマン オズマ計画 ドレーク

1961 タウンズ 光SETI論文(Nature)

1964 レーザーでノーベル賞

1965 マイクロ波宇宙放射 ペンジアス、ウィルソン

1967 パルサー (中性子星) ヒューイッシュら

星間OHレーザー

H<sub>2</sub>O

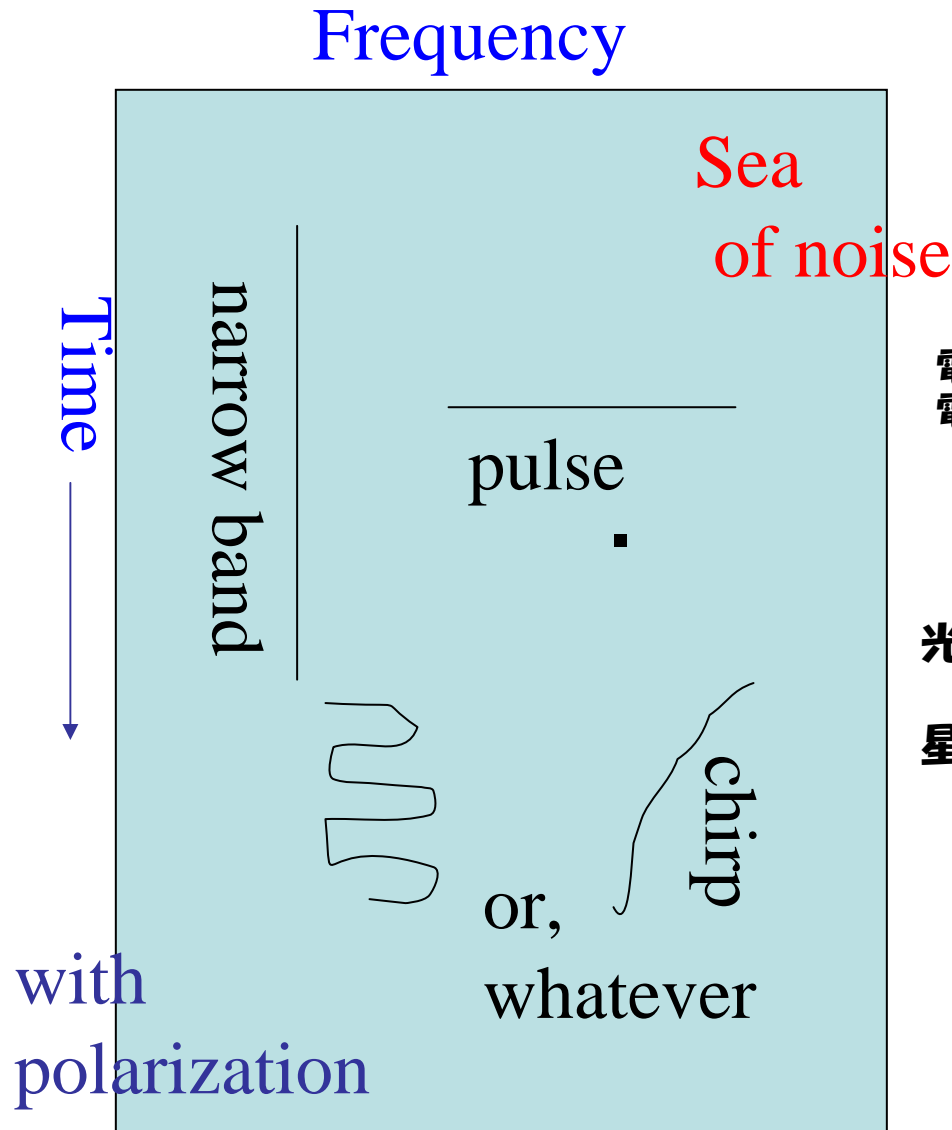
SiO

CH<sub>3</sub>OH

宇宙人からの電波!??

# Radio **VS** Optical SETI

信号がある領域は？



電波では星間電子による分散あり  
電波ではヘテロダイン増幅、分光が容易  
波の  
狭帯域信号か？

光では光電管による光子検出が高感度  
ヘテロダイン、分光は不得手  
星間分散なし  
粒子的  
パルス信号か？

# 電波、光SETIでがんばってきた Paul Horovits (Harvard Univ.)

## SETI Lunch at Oakridge Observatory (Massachusetts, US)



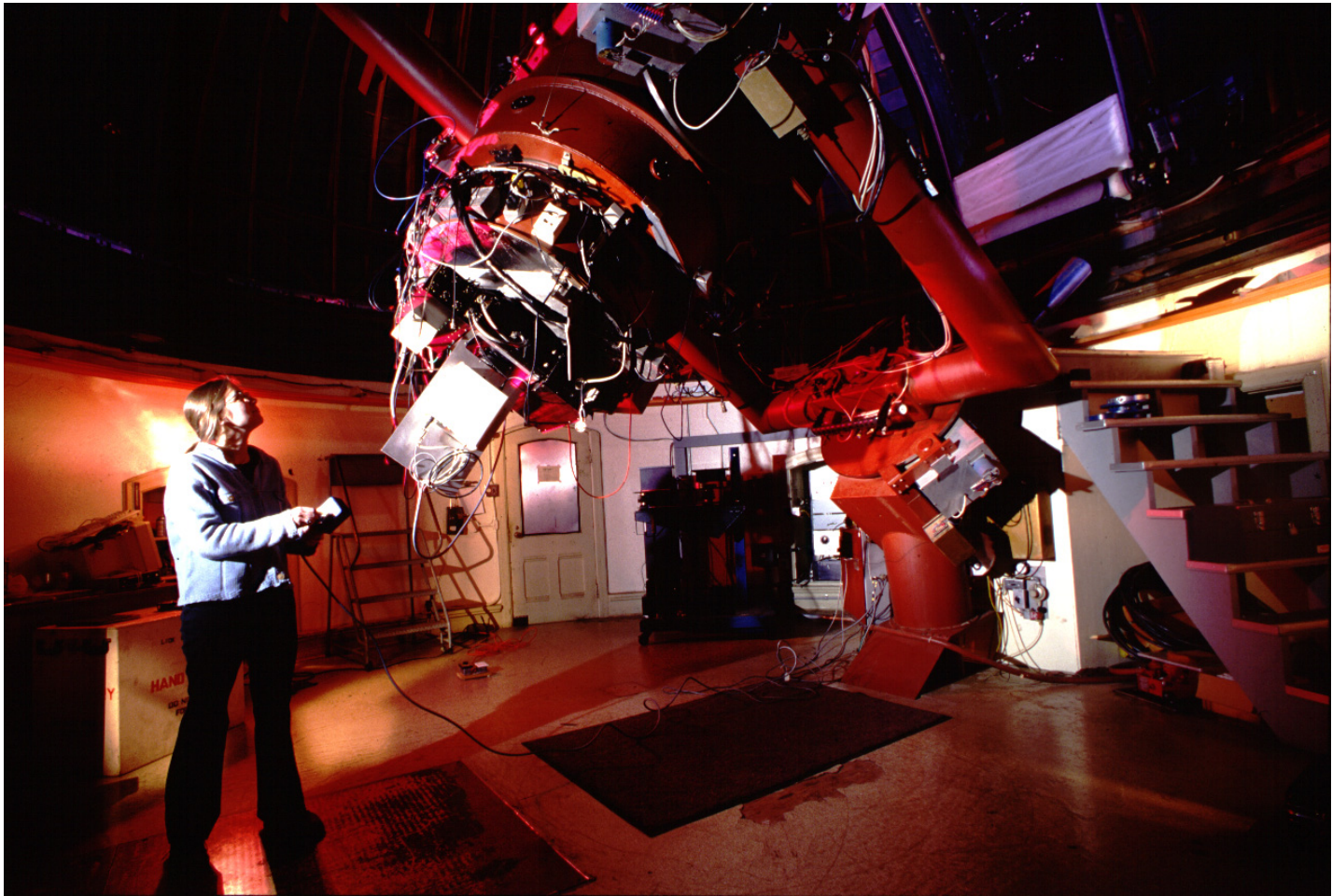
Kardashev

Hirax

Morrison  
Horovits

Mrs.H. Burke





**光学SETI リック天文台**  
**41" 望遠鏡**

**300星**  
**数個の星団も探査した例**

# 光パルス通信の試算と探査例

Helios **レーザー** 4.7 MJ (3ns)  
**波長** 1.047  $\mu\text{m}$   
**距離** 1000 **光年** (吸収で  $\times 0.87$  考慮)  
**送信、受信アンテナ** 10m

**光子数**  $N_p = 1500$

G2V星の**バックグラウンド**  
**光子数** 0.03 / ns  
or 0.1 / 3ns  
(1000**光年**で(12等), 10m,)

**送,受信のビーム巾**

0.02 **秒角**  
= 6 AU / 1000**光年**  
= 60 AU / 100**光年**

**指向性能、惑星軌道から考えて、  
これより狭いビームは得策でない**

Howard et al, ApJ (2004)  
“Search for ns optical pulses  
from nearby solar-type stars”

## 探査結果

**13,000 太陽型星**  
**2,400 時間/5年**

**1.5m望遠鏡**  
**at Oak Ridge天文台**  
**with 0.5m at Princeton**

**結果:**  
**274 pulse events**  
**with single simultaneous event**

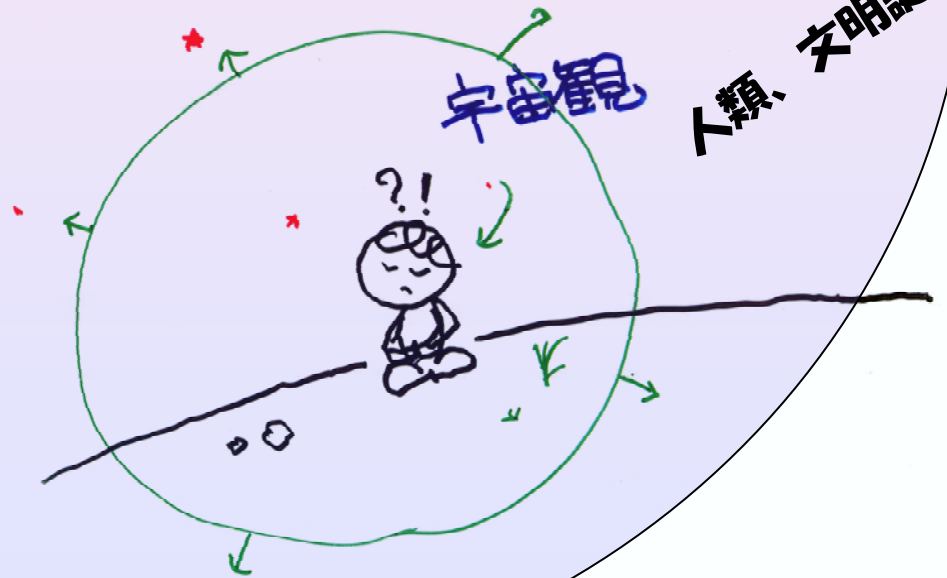
ビッグバンで  
始まった宇宙(137億年前)

銀河、星がで始める(130年前)  
H. He  
C. N. O. など、  
重元素のある宇宙



太陽系ができた(46億年前)  
生命誕生(40億年前?)

最初の宇宙文明は?



# 宇宙文明のさまざまな消長シナリオ

現在 未来

星の発生頻度 ( t, M, 場所)  
重元素の増加 ( t, 場所)

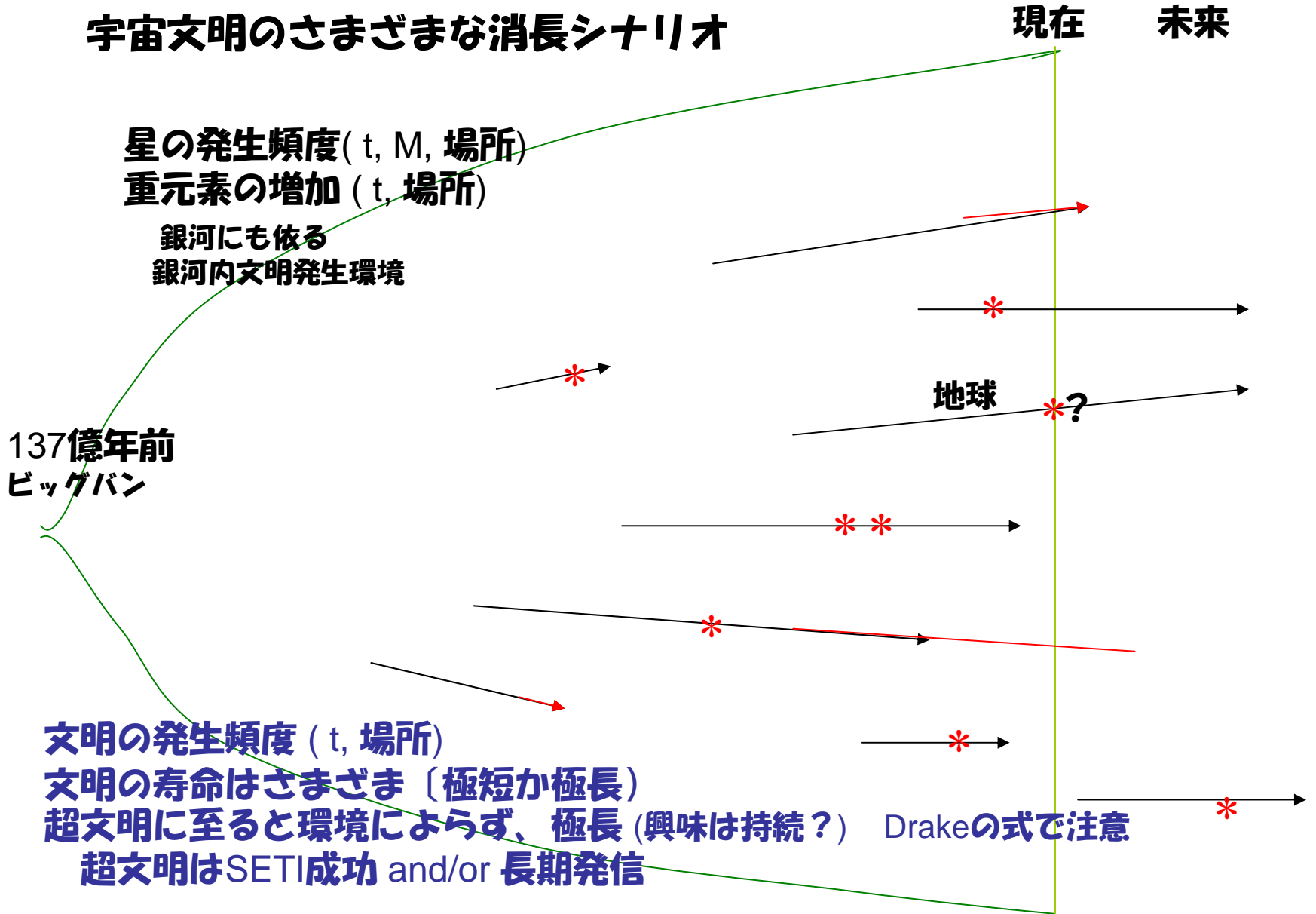
銀河にも依る  
銀河内文明発生環境

137億年前  
ビッグバン

文明の発生頻度 ( t, 場所)  
文明の寿命はさまざま (極短か極長)  
超文明に至ると環境によらず、極長 (興味は持続?) Drakeの式で注意  
超文明はSETI成功 and/or 長期発信

地球文明は後発型なのだろうか？

有本さん？



# SETIの今後の長期戦略

**意図的発信源を探す**〔現在〕  
50年さがしてきたが、まだ不完全  
ATA, SKAなどを動員して探す

宇宙研究から宇宙理解に努める。

**非意図的発信源も意識して探す**〔30年後から〕  
非意図的信号は、**超大探査システムでも近傍星に限られる。**

見つかったら**発信**〔返信〕  
見つければ**すぐに複数になる。**

どうしても見つからなかったら、、、**探査深めながら、  
発信する。**〔100年後から〕

信号は**見つけやすさ最大**〔ビーコン〕と、**有意な伝送レート**で信号のせ、**並列  
一方的通信であっても1000年は続ける。**

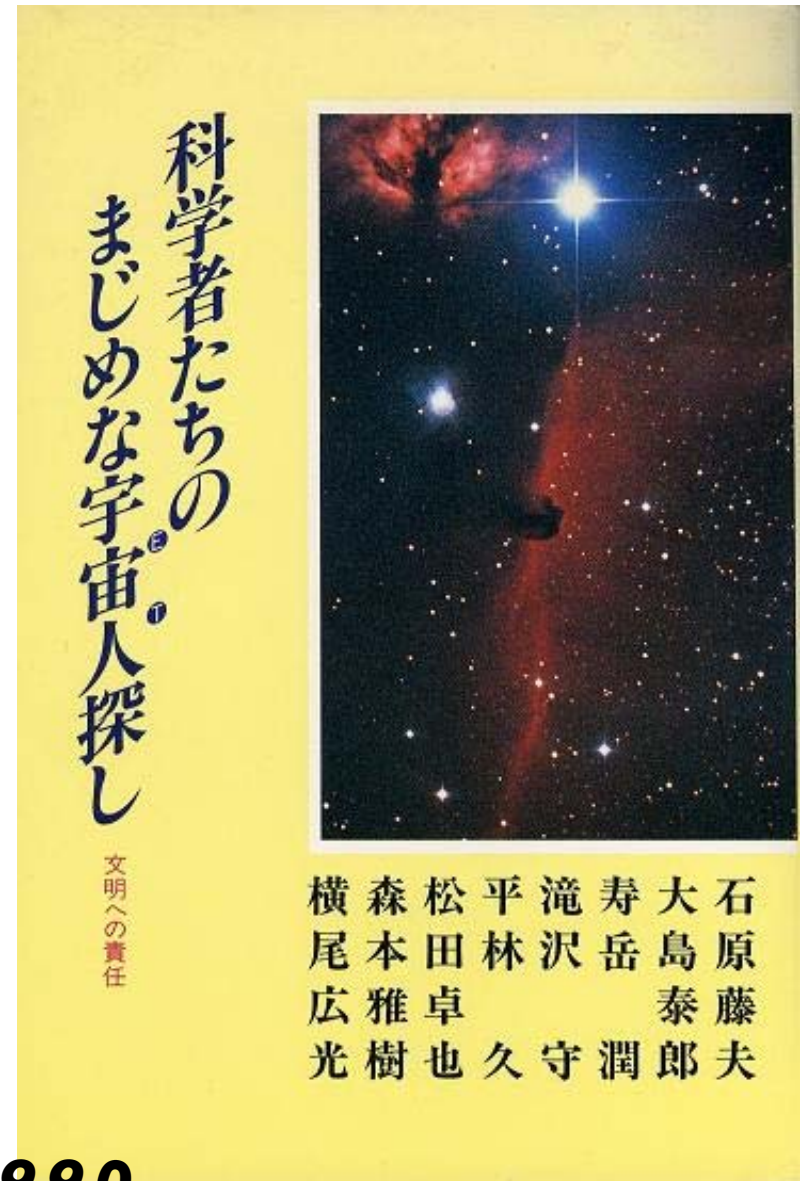
**100-1000年の先は予測不確定領域？**  
〔技術、宇宙の理解〕



1987

宇宙科学のおもしろさを  
理解してもらい、心の世界を  
話合った。

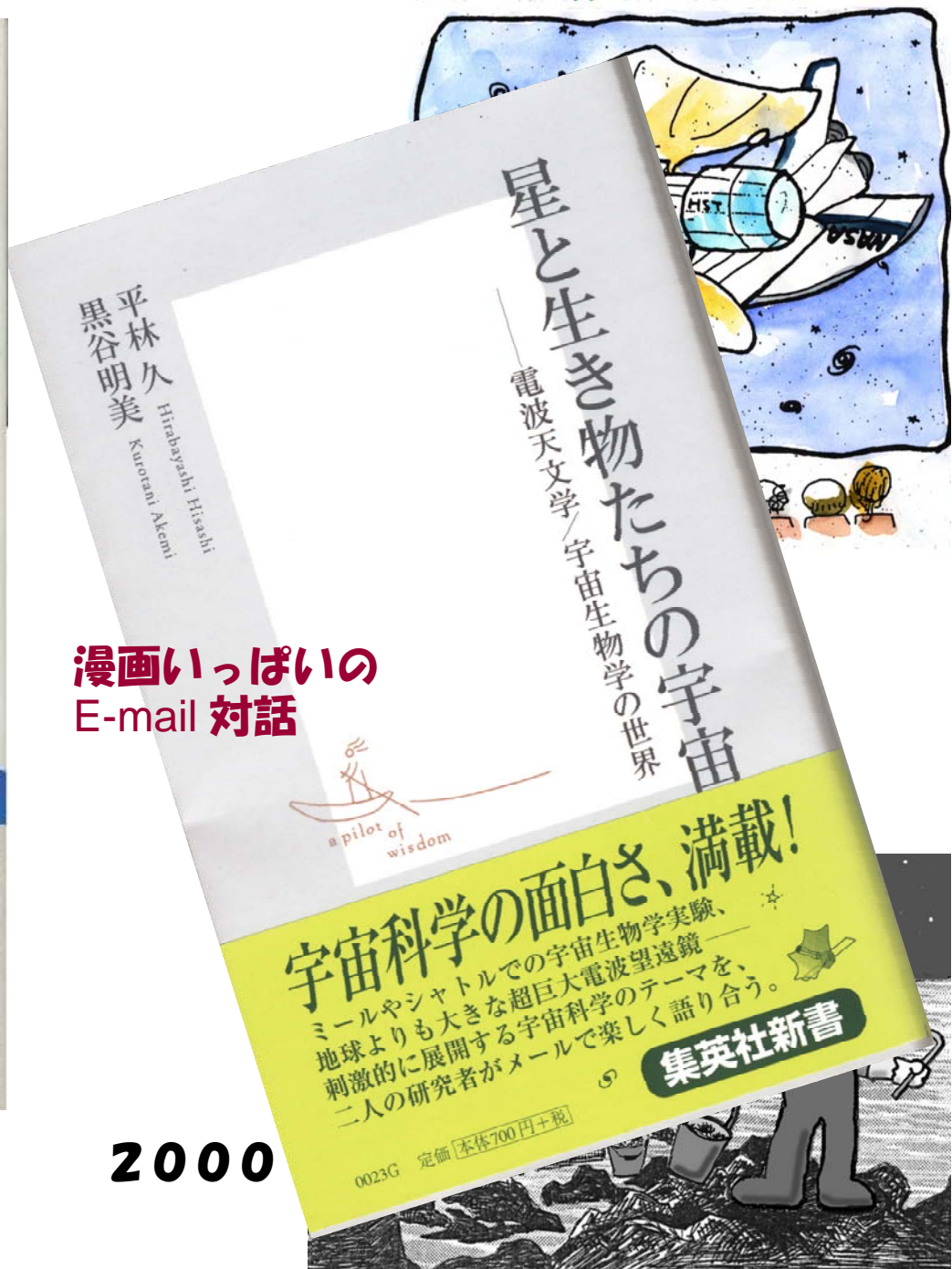
さまざまな論点が個性的に  
論じられた。



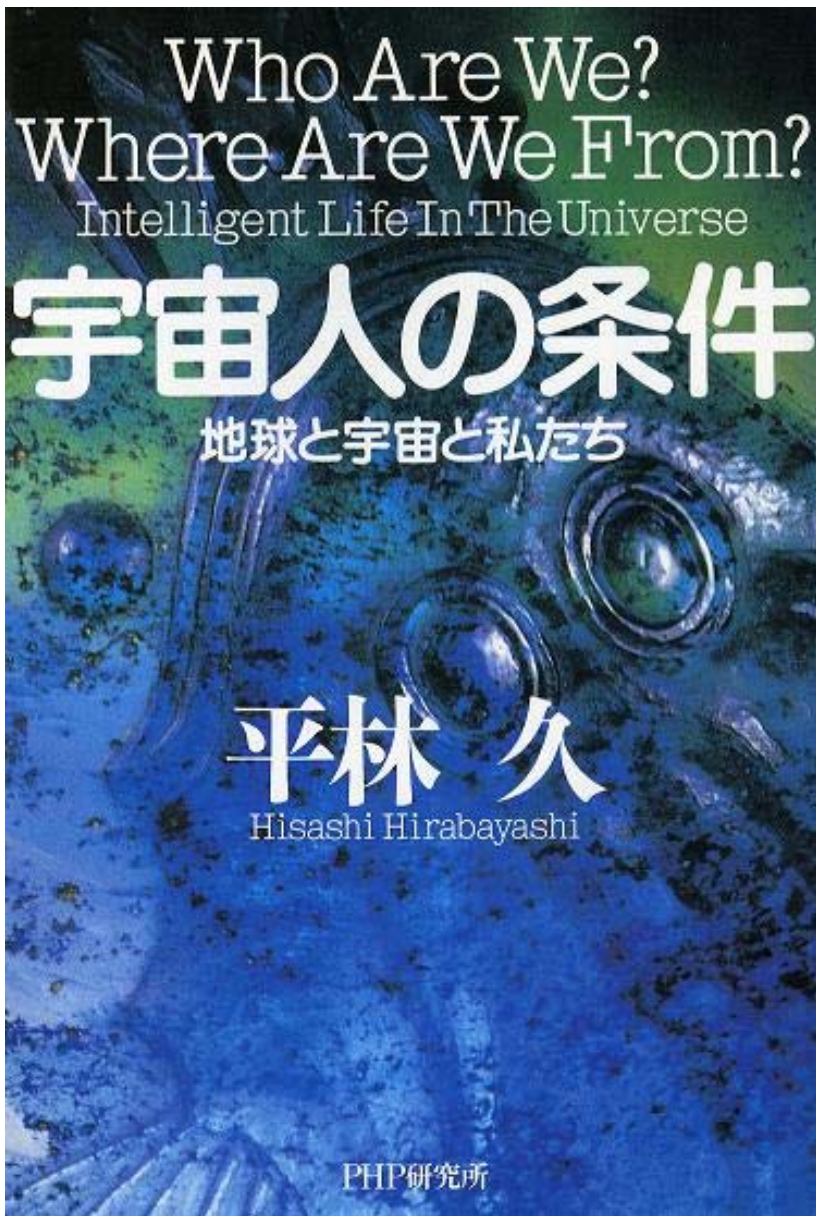
1990



1992  
さまざまな疑問に答える。



2000



**1993**  
ソロでじっくり自在に論じる。



**2008**  
SETIの歴史と意味

さらに、2011?



$$N=R^* \times f_p \times n_e \times f_l \times f_i \times f_c \times L$$

$N$  : 銀河系内の文明の数

$R^*$  : 銀河系の中で1年に生まれる恒星の数

$f_p$  : 恒星の中で惑星をもつものの割合

$n_e$  : その惑星の中で生物が存在できるような環境をもつものの数

$f_l$  : その惑星に生物が発生する確率

$f_i$  : その生物が知的生命体に進化する確率

$f_c$  : その知的生命体が他の星と交信を行うほど文明を発達させる確率

$L$  : そのような文明がどれくらい長く続くことになるか (年)



**ドレークの式** は、  
銀河にどのくらいの  
文明があるかを考える式



1960年から何がわかったか?  $f_p$ が前よりちょっと前進???

## バナールの考えたこと

John Desmond Bernal (1901-1971) **アイルランド生まれ**

### 結晶構造学

**フラッグ父子** 。。 **バナル**。。 **ベルツ、ケンドルー、  
ウィルキンス、ホジキン、クリック、  
(DNA構造を解明した世代)**  
(1953)

1929 (27**才の時**)

“The World, The Flesh, and The Devil”

**邦訳「宇宙、肉体、悪魔」**

# 交信の相手となる知性体

知的文明の寿命  
外的な自然要因  
文明のもろさ

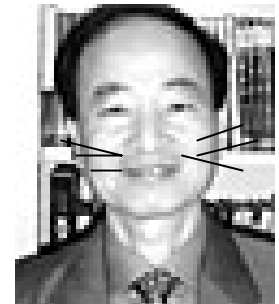
知的文明の興味、関心

「興味は内なる世界に向かう」 松田卓也さん

Hx、アマチュア無線の経験

夭折した兄のこと、

猫のたとえ、





スターウォーズに備える？

あるいは、



# この宇宙を知る 宇宙研究を進める

観測装置を進化させながら、  
適正レベルにSETIを続ける

どのようなものを探すのか？  
私たちはどのような文明になるのか？

超文明、バナー、



# 長恨歌

白居易

玄宗皇帝と楊貴妃を題材に  
120行で永遠の愛を歌う

臨別殷勤重寄詞  
詞中在誓兩心知  
七月七日長生殿  
夜半無人私語時  
天願作比翼鳥  
在地願爲連理枝

天長地久有時盡  
此恨綿綿無盡期