

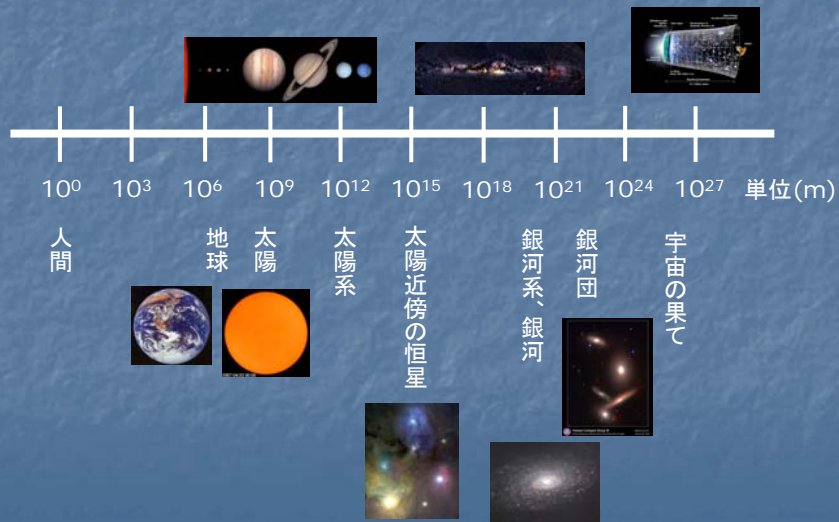
宇宙科学II（電波天文学）  
第11回

パルサー

前回の復習

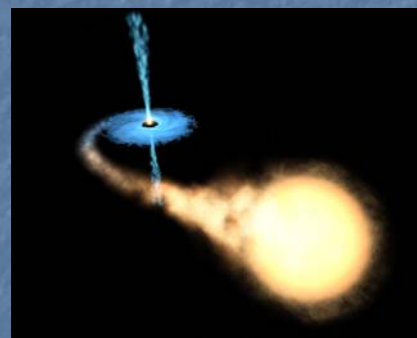
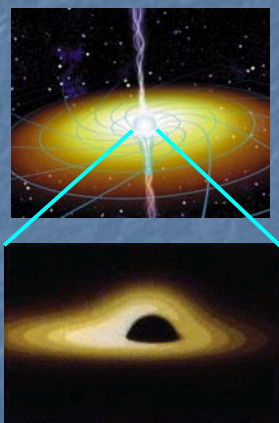
# 宇宙の階層構造

## ■ ログスケールで表示した宇宙の大きさ



# ブラックホールの想像図

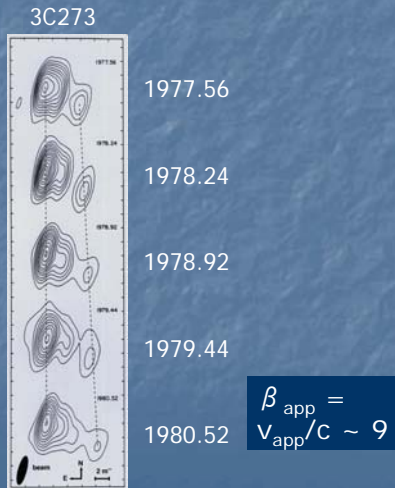
- 銀河中心ブラックホール
- 連星系ブラックホール



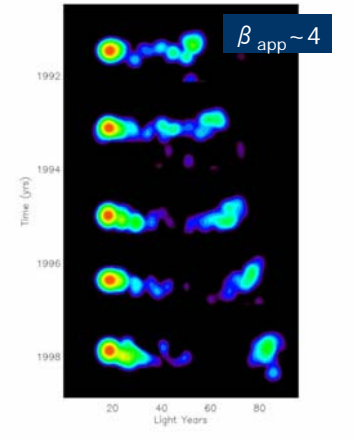
ブラックホールは通常、ブラックホール、円盤、ジェットからなる

## ジェットの超光速運動

- VLBIでミリ秒角スケールまでジェットを分解してモニターすると、ジェットの見かけの運動速度が光速度を超えることがある



電波でみた3C279の超光速運動



## ブラックホールは見える？

- ブラックホール自身は暗い(はず)
- ブラックホールに落ち込むガスが回転しながら高温で明るく輝くので、それを背景に「黒い穴」が見えると期待される。



Fukue et al. (1989)

銀河系中心のブラックホールは「黒い穴」の見た目が最も大きい

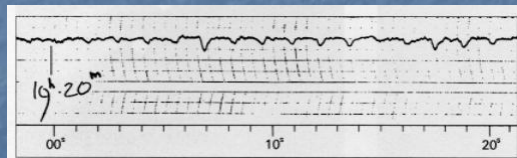
直径~30マイクロ秒角  
(波長の短い電波干渉計なら分解可能)

# パルサー

## パルサーの発見

- 周期的なパルスを出す天体
- 発見者  
ヒューイッシュ、ベル(1967年)

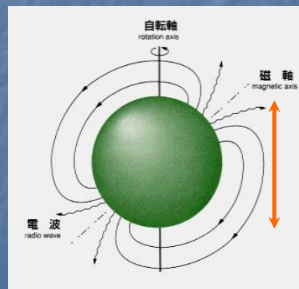
使用した望遠鏡



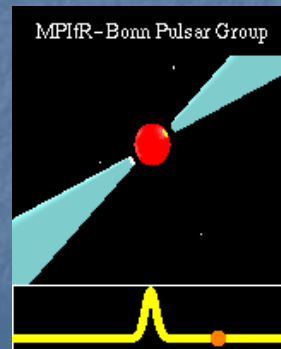
観測された周期パルス

# パルサー = 中性子星

- 最初は宇宙人の信号説も！？  
パルサー第一号は当時 LGM-1 と命名された。  
LGMは宇宙人を意味する”Little Green Men”。
- 結局は 中性子星 と判明



パルサー(中性子星)の模式図



パルサーからの放射の模式図

# 1974年度ノーベル物理学賞

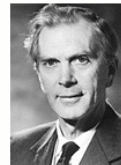
- Ryle (干渉計の開発)
- Hewish (パルサーの発見)

第一発見者のベルが  
選からもれたことに対  
して多くの意義が唱え  
られた、、、



## The Nobel Prize in Physics 1974

"for their pioneering research in radio astrophysics: Ryle for his observations and inventions, in particular of the aperture synthesis technique, and Hewish for his decisive role in the discovery of pulsars"



**Sir Martin Ryle**  
 1/2 of the prize  
 United Kingdom

University of Cambridge  
 Cambridge, United Kingdom  
 b. 1918  
 d. 1984

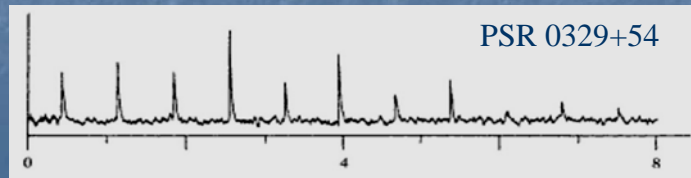


**Antony Hewish**  
 1/2 of the prize  
 United Kingdom

University of Cambridge  
 Cambridge, United Kingdom  
 b. 1924

## パルサーのパルスの性質

- 周期ミリ秒から数秒の規則的なパルスを持つ
- 周期に比べてパルス幅は小さい(ビーム立体角が小さいことを示す)
- 周期が伸びていくのが観測される  $dP/dt > 0$  (回転の減速を示す)



## 天体回転と大きさ

- 高速回転する天体は、遠心力が重力よりも大きくなならない条件から、半径の上限が決まる
- 遠心力  $f_{\text{cen}} \sim m r \omega^2$
- 重力  $f_{\text{grav}} \sim GMm/r^2$
- 半径の上限値は  
$$r \sim (GM/\omega^2)^{1/3}$$



## パルサーの大きさ

- パルサーの周期はミリ秒～数秒
- $P \sim 1 \text{ s}$  とすると最大半径  $r_{\text{max}}$  は  
 $r_{\text{max}} \sim 1500 \text{ km}$   
> これでも白色矮星よりも小さい
- $P \sim 1 \text{ ms}$  とすると最大半径  $r_{\text{max}}$  は  
 $r_{\text{max}} \sim 15 \text{ km} !!$

## パルサーの密度

- パルサーは極めてコンパクトな天体であり、中性子の縮退圧で支えられる中性子星である
- $M \sim 1 M_{\text{sun}}$ ,  $R \sim 10 \text{ km}$  の場合、平均密度は  
 $\rho \sim 5 \times 10^{11} \text{ kg / cc}$   
(1立方センチ当たり 5億トン !!)
- 1太陽質量をもった天体の平均密度の比較

	半径	平均密度
太陽	70万 km	1 g/cc
白色矮星	6000 km	2 トン/cc
中性子星	10 km	5億 トン/cc

## 超新星残骸とパルサー

- パルサー/中性子星は超新星爆発で形成される。
- パルサーは超新星残骸に付随して見られることもある。



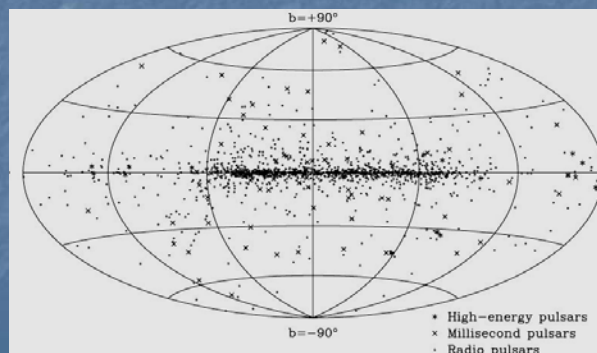
かに星雲 : 1054年に出現した超新星の残骸。この中心にもパルサーが見つかった。



光とX線で見たかに星雲のパルサー

## パルサーの分布

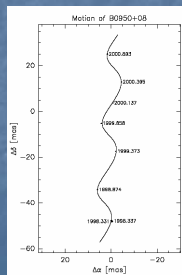
- 現在2000個近くのパルサーが知られる
- 銀河面に集中。しかし、高い銀緯にも存在する (近傍天体または高速度天体)



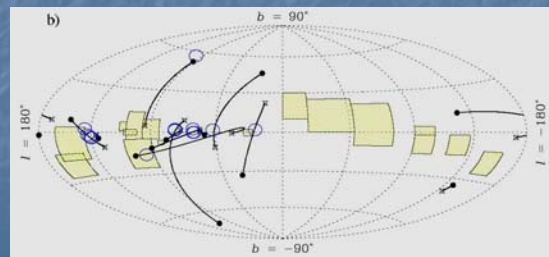


## パルサーの運動

- いくつかのパルサーはVLBI観測等により精密に距離と運動が測られている。
- パルサーは極めて大きな固有運動を持っている ( $v \sim 300 - 1000 \text{ km/s}$ , 銀河回転速度よりも大きい)
- 超新星爆発の非対称により放り出されたと考えられる(Pulsar-kick)



パルサーの位置観測例



運動速度と年齢から得られたパルサーの運動の軌跡

## パルサーのエネルギー

## パルサーの回転と減速 I

- パルサーの周期を長期に観測すると、周期が伸びていく(回転が減速している)のが観測される
- この減速は、回転運動のエネルギーを放射によって失ったために起きていると考えられる
- パルサーの回転エネルギー  
$$E = \frac{1}{2} I \omega^2 = 2\pi^2 I P^{-2}$$
- 回転エネルギーの変化率  
$$dE/dt = I \omega d\omega/dt = -4\pi^2 I P^{-3} dP/dt$$

(I: 慣性モーメント。ここでは簡単のため  
一様球の値  $I = \frac{2}{5} M r^2$  で近似する)

## パルサーの回転と減速 II

- カニ星雲のパルサー(Crab pulsar)の場合  
 $M=1 M_{\text{sun}}, R=10 \text{ km}$   
 $P = 0.03 \text{ s}, dP/dt = 4 \times 10^{-13} \text{ s/s}$  から

回転エネルギー  $E_{\text{rot}} = 1.7 \times 10^{42} \text{ J}$   
変化率  $|dE/dt| = 4.7 \times 10^{31} \text{ W}$



となる。一方、Crab パルサーのおよその放射光度は、  
 $L \sim 5 \times 10^{31} \text{ W}$

なので、上記のエネルギーから説明できる。

> パルサーは回転エネルギーを放射に変換して、太陽光度の10万倍ものエネルギーを放出する。

## パルサーのエネルギーの源 I

- パルサー/中性子星は超新星爆発で作られる

- 超新星爆発のエネルギー源は、星の中心がつぶれるときに解放される重力エネルギー。

$$E_{\text{sn}} \sim GM^2/R$$

- $M \sim 1 M_{\text{sun}}$ ,  $R \sim 10 \text{ km}$ なら

$$E_{\text{sn}} \sim 3 \times 10^{46} \text{ J}$$

このうち99%はニュートリノが持ち去り  
残りの1%が爆発の運動エネルギーに

$$E_{\text{sn}_k} \sim 3 \times 10^{44} \text{ J}$$

大マゼラン雲の超新星1987A



カミオカンデ: 1987Aからの  
ニュートリノを検出



## パルサーのエネルギーの源 II

- パルサーの回転エネルギー

$$E_{\text{rot}} \sim 1.7 \times 10^{42} \text{ J} \ll E_{\text{sn}_k}$$

- パルサーの運動エネルギー ( $v \sim 1000 \text{ km/s}$ )

$$E_k \sim \frac{1}{2} m v^2 \sim 1 \times 10^{42} \text{ J} \ll E_{\text{sn}_k}$$

パルサーの回転、運動とも、超新星爆発時の重力エネルギーの一部を運動エネルギーに渡すことで説明可能。

## パルサーのタイミング観測

### パルサーの基本的な観測量

- 基本的観測量:パルスの到達時間
- これを精密に測定することを、タイミング観測という。
- 非常に単純な観測であるが、この観測からさまざまな情報が得られる(ただし、周期の安定したパルサーのみ利用可能)

## 周期の変動

- パルサーの周期を長期に観測すると、回転速度が遅くなっているのがわかる  
( $dP/dt > 0$ )
- パルスの放射によって回転エネルギーを失っているため
- パルサーの大まかな年齢の見積もり  
 $\tau \sim P / (dP/dt)$
- 典型的なパルサーの年齢  
1000 yr ~  $10^7$  yr 程度  
比較的若い種族(ただし、古くてリサイクルされたパルサーも存在する)

## パルサータイミングと天体位置

- パルサータイミングの変動計測から、天体位置の情報が得られる。
- タイミングの遅れ幅 :  $\tau \sim 1\text{AU}/c \sim 8 \text{ min} \sim 500\text{s}$
- タイミングの精度 :  $\Delta \tau \sim 1 \mu\text{s}$   
位置精度  $\theta \sim \Delta \tau / \tau \sim 2 \times 10^{-9} \text{ rad} \sim 0.4 \text{ mas}$

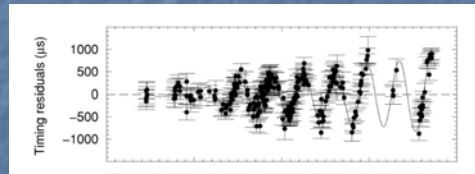


## パルサータイミングによる位置計測

- PSJ J0538+2817のタイミング観測例(Kramer et al. 2003)

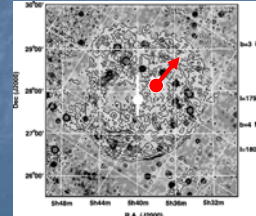
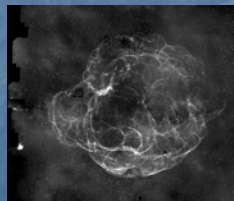
- 天体が点球面上に静止しているとするとき、タイミングの残差に年周成分が見られ、残差が増大する。

タイミングの残差



>パルサーの運動を見ている

>超新星残骸との関連、パルサーの年齢などが得られる



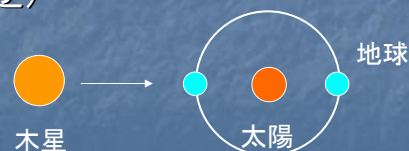
超新星残骸S147とパルサーの位置関係

## 光速度測定とタイミング観測

- 歴史上有名な「タイミング観測」は、レーマーによる光速度の計測(1676年)
- 木星のガリレオ衛星の食の時刻が季節変動することから、光速度を求めた(食の時間差～光の伝搬時間)
- この場合、天体位置が既知、光速度が未知(パルサータイミングとは逆)



木星とガリレオ衛星



## パルサータイミングと連星

- パルサーが連星系になっている場合、その軌道運動によってもタイミングに変動がみられる。ここから連星の軌道情報を得ることが可能。
- この手法により
  - 1) パルサー周囲の惑星検出
  - 2) 連星パルサー観測による相対論検証なども行われている



## パルサーと太陽系外惑星

## 太陽系外惑星

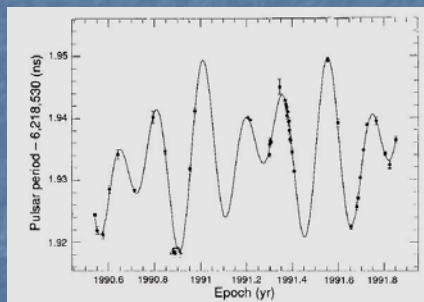
- 太陽系のような惑星系は宇宙に普遍的に存在するか？  
— 人類の根源にかかわる現代天文学の重要課題
- 2009年までに460個を超える系外惑星が検出されており、太陽系とかけ離れた惑星系の存在が明らかになっている。



太陽系

## パルサーによる惑星検出

- 最初に見つかった太陽系外惑星
- PSR 1257+12, 周期 6 msのパルサー  
(Wolszczan et al.1992)
- パルスタイミングの残差が2惑星モデルでフィットできる
- パルサーの周りに地球の3倍程度の惑星が2個存在！主星からの距離0.4 AU





## 太陽系外惑星の観測手法

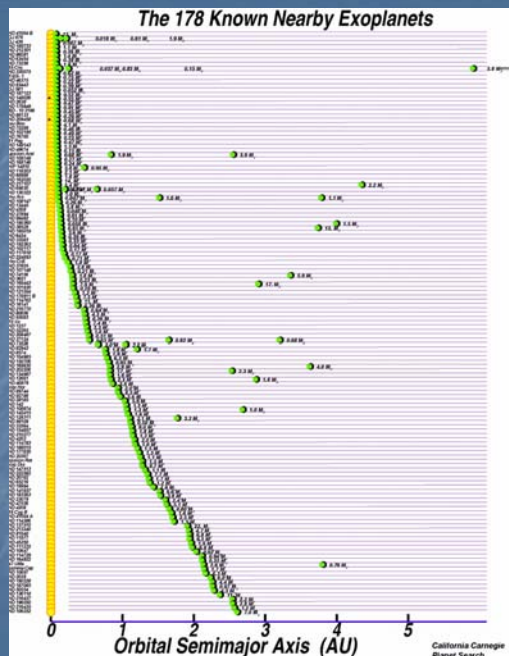
- パルサータイミング  
最初の系外惑星発見 (1992年~)
- ドップラー法 (主星の視線速度変化)  
恒星周囲の最初の惑星発見 (1995年~)
- トランジット法 (惑星による食、1999年~)
- 重力マイクロレンズ法 (2005年~)
- 直接撮像法 (2004年~)



現在、ドップラー法による発見が最も多く(400個超)、  
次いでトランジット法が多い(80個程度、一部重複)。  
それ以外の方法は数例~10例程度

## 系外惑星の現状

- これまでに見つかった惑星系は、太陽系と大きく異なるシステムが多い
- 木星型が主星の近傍を回るものが多い(ホットジュピター)  
ただし観測手法によるバイアスもある
- 地球型惑星の検出はまだ(感度不足)



## 系外惑星観測の今後

- 地球型惑星は存在するか？  
(あるはず、今度の観測精度向上次第)
- 生命が誕生しうる惑星は存在するか？
- 知的生命体は存在するか？
- 高度文明は存在するか？

## ATA (Allen Telescope Array)

- SETI (地球外知的生命体探査)用の望遠鏡
- 米国のSETI研究所とUCバークレーが運用主体
- 口径6mのアンテナを350台建設し、地球外知的生命体からの電波を捉えることを目的とする  
(現在建設中、一部稼動中)
- 名前は寄付者のPaul Allen (Microsoft設立者)にちなむ



成果はもちろんまだ。しかし、すでに本気でSETIをやっている！

## パルサーと相対論検証

### 連星パルサーと重力波

- 連星パルサーPSR1913+16の発見(ハルス、テイラー)
- 公転周期がわずか7.7時間
- 公転運動で加速を受け、重力波放出が起こるはず。

PSR 1913+16の模式図



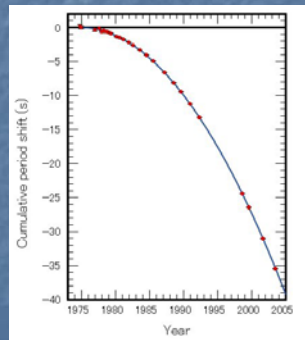
公転周期はたったの7.7時間  
2天体間は70万~350万km



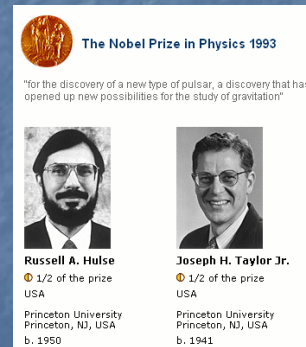
アレシボ望遠鏡

## 連星パルサーと重力波 (2)

- 公転周期の変化が、重力波によるエネルギー放出による予測と一致
- 重力波存在の間接的な証明



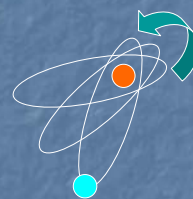
公転周期が現象する様子。一般相対論の重力波放出による予言とぴったり一致



1993年度  
ノーベル賞受賞

## 一般相対性理論の検証

- 水星の近日点移動
- 太陽重力による光の屈折
- 太陽重力による光の伝搬遅延 (シャピロ効果)
- 重力による時計の遅れ
- 重力波の存在 (間接的) etc.



水星の近日点移動の模式図

ちなみに、

特殊相対論効果  $v / c$

一般相対論効果  $(v / c)^2$

で表され、太陽系の場合 (地球近傍) は、

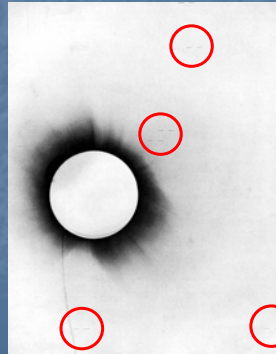
$v/c \sim 10^{-4}$ ,  $(v/c)^2 \sim 10^{-8}$  である。

## 太陽による光の屈折

- 太陽表面近傍を通過する光の屈折角

$$\alpha = 4 GM / c^2 r \sim 1.7 \text{ 秒角}$$

- 歴史的にはエディントンらによる日食観測で初めて検出(1919年)
- 現在はVLBI観測等により、上記の屈折角が $10^{-3}$ の精度で計測されており、相対論が正しいことが確められている。

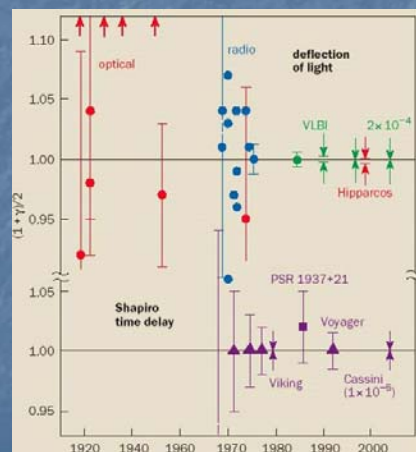


1919年の皆既日食と周囲の星

## 相対論検証の状況

- 相対論パラメーター  $\gamma$  の測定  
(相対論なら  $\gamma=1$ 、他の理論なら1以外)
- 0.1%以下の精度で相対論は正しいと確認されている。
- ただし、そのほとんどは太陽系内の弱い重力場
- BH近傍などの強重力場での観測はこれから

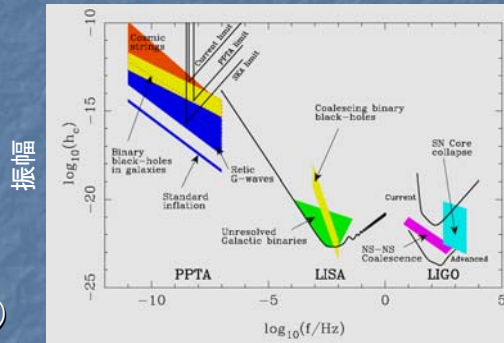
相対論パラメーターの測定の歴史



VLBI観測やパルサー観測などの電波天文観測も重要な貢献をしている

## パルサータイミングと重力波

- パルサータイミングを利用して、重力波の直接検出を目指す計画が進行中
- さまざまな方向のパルサーを精密に観測し、その変動から重力波の存在を調べる
- 周波数:  $10^{-8}$  Hz (周期数年、波長数光年)
- レーザー干渉計型の重力波望遠鏡と異なる周波数帯を観測可能



重力波周波数

## SKA (Square Kilometer Array)

- 国際協力で1km平方の集光面積を持つ望遠鏡を計画中  
パルサー観測やSETIにも利用可能 (豪州 or 南アフリカ?)



ASKAP: 豪州のSKAプロトタイプ



SKAの完成想像図

2020年ごろ稼働? パルサー研究にも大きく貢献すると期待される

## 授業全体のまとめ

- 電波天文学はその誕生から80年の間に、人類の宇宙に対する理解を飛躍的に深めた
- 電波天文の研究対象は、恒星から銀河、宇宙全体と多岐にわたる
- 今後も上記分野に加えて、ブラックホール直接撮像から知的生命体探査まで、さまざまな分野で電波による宇宙の観測が大きな役割を果たすであろう。