

第3章 ミッションへの要求

この章のまとめ

前章で述べた「宇宙史の解明」という課題を達成するためには、どのような観測機器が必要であるかを議論する。

まず波長領域としては、(1) 科学的要求と、(2) 他のミッションにはない特徴を出すと言う2つの意味において、波長 5-200 μm の中間・遠赤外線領域を最重要波長域と設定する。

この領域で十分な感度を達成しようとする、観測機器からの熱放射をおさえるために、望遠鏡全体を 4.5 K に冷却する必要がある。

続いて、どれだけの口径が必要であるかを、いくつかの観点から議論する。口径は、感度と空間分解能の2つの重要パラメータを決定する。

まず、銀河の観測の観点では、銀河の進化、星生成の歴史を解明するために、遠赤外線背景放射源を十分に分解できることを目標とする。すると、口径 3.5m クラスの望遠鏡が必要となる。

また、系外惑星の直接観測と言う分野も重要であるが、数十個程度以上の数の系外銀河を観測しようとする、やはり口径 3.5m クラスの望遠鏡が必要である。

ここから、SPICA 望遠鏡の基本仕様として、口径 3.5 m、温度 4.5K を設定する。

3.1 波長領域

前章で述べた「宇宙史の解明」という課題を達成するためには、どのような観測機器が必要であるかを、この章では議論する。

まず波長領域について議論する。宇宙史の解明を行なうためには、以下の3点に留意する必要がある。

1. 銀河の誕生と進化

- 遠方天体からの赤方偏移した信号をとらえる
- 塵による減光の影響無しに、銀河の活動性を探る

2. 星と惑星系の誕生と進化

- 塵に包まれた天体からの信号をとらえる
- 明るい中心星のまわりにある微弱な惑星からの信号をとらえる
- 原始惑星系円盤からの熱放射をとらえる

3. 物質の進化

- ガスだけではなく、固体の化学状態を調べる

上記の留意点を満たすためには、赤外線、特に中間・遠赤外線での高感度の観測を行なうことが必要になる。

しかしながら、2010年代までに計画されている赤外線ミッションは、近赤外線 (JWST) やサブミリ波 (Herschel) に集中したものであり、上記の科学的要求を満たす物ではない。

そこで、SPICA では、(1) 科学的要求と、(2) 他のミッションにはない特徴を出すと言う2つの意味において、波長 5-200 μm の中間・遠赤外線領域を最重要波長域と設定する。

3.2 温度

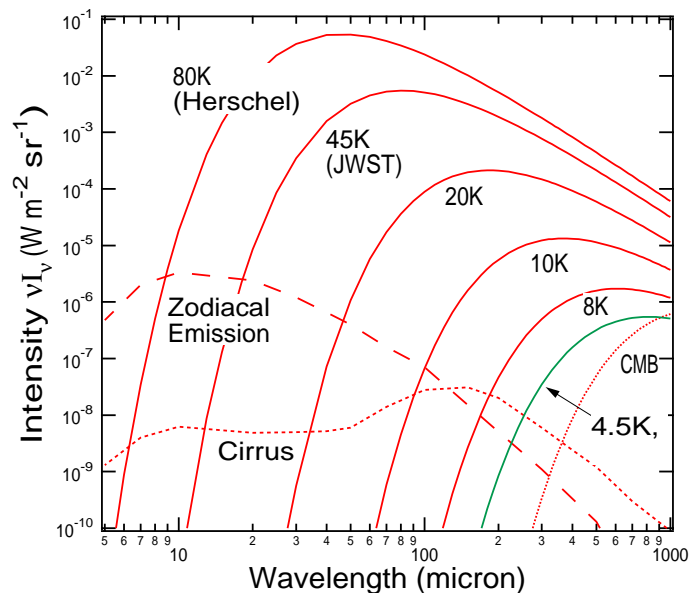


図 3.1: 天体からの信号強度 (点線) と望遠鏡からの熱放射 (実線) の比較。

波長 5-200 μm の中間・遠赤外線領域において、十分な感度を達成しようとする際に留意すべき点は、観測機器からの熱放射を、天体からの信号よりも低く抑えることである。これができないと、観測機器からの熱放射の揺らぎが観測限界を決めてしまうことになり、本来達成することができる感度にまで到達することができない。

図 3.1 に、天体からの信号強度と望遠鏡からの熱放射との比較を示す。天体からの信号としては、Zodiacal Emission (太陽系内の塵からの熱放射)、Cirrus (銀河系内の塵の熱放射)、CMB (マイクロ波宇宙背景放射) の3つの拡散放射を考えている。これらの天体からの信号よりも、望遠鏡からの熱放射が小さいことが、高感度観測には必須である。

しかしながら、極低温に冷却されていない望遠鏡では、望遠鏡の熱放射のほうが、天体からの信号よりも圧倒的に強大であることが図 3.1 から分かる。例えば、Herschel の温度である 80 K や、JWST の温度である 45 K では、望遠鏡からの放射が、天体からの信号に比べて、圧倒的に (波長によっては数桁) 強い。

この放射を抑えるためには、望遠鏡を冷却すれば良い。図 3.2 に、どの程度、望遠鏡を冷却すれば良いかを、波長 μm を例にとり示す。図 3.2 からわかるように、天体からの信号 (Cirrus) よりも、望遠鏡の熱放射をおさえるためには、望遠鏡を数 K 以下に冷却しなければならない。

このことから、高感度観測のために、SPICA では、望遠鏡を 4.5 K に冷却することとした。

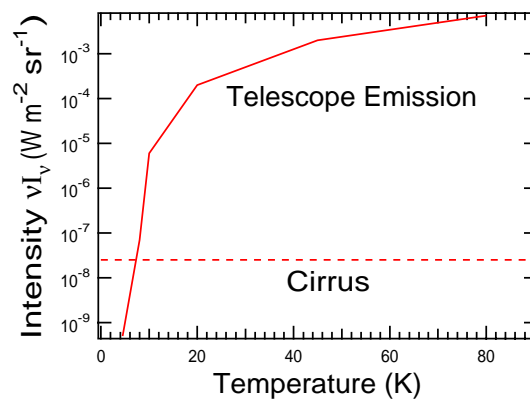


図 3.2: 波長 $200\mu\text{m}$ における、天体からの信号強度 (cirrus, 銀河内の塵の放射) と望遠鏡からの熱放射 (実線) の比較。望遠鏡からの熱放射を天体からの信号以下に抑えるためには、望遠鏡を数 K 以下に冷却しなければならないことがわかる。

3.3 望遠鏡の口径

次に、宇宙史の解明のためには、どの程度の口径の望遠鏡が必要であるかを議論する。望遠鏡の口径は、(1) 感度と (2) 空間分解能という 2 つの重要な観測性能を決めるものである。

3.3.1 銀河の誕生と進化

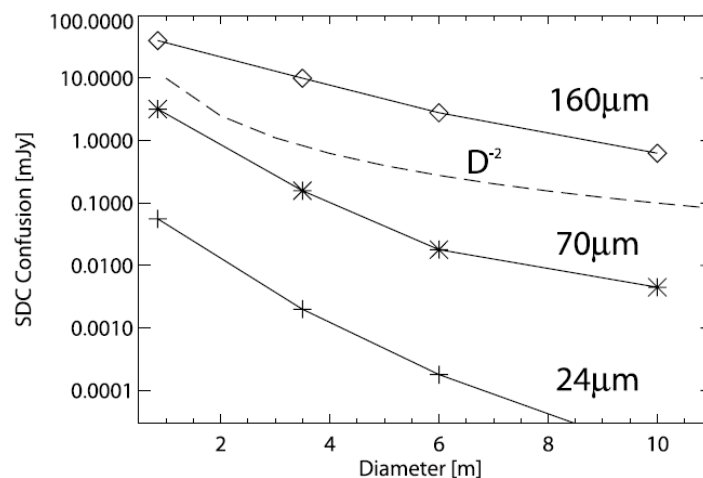


図 3.3: 遠赤外線の point source に対する感度。source confusion が支配的なパラメータである場合を仮定。口径の関数として示す (Dole et al. 2004)。

まず、感度と言う観点から、銀河の誕生と進化の解明を例にとって、どの程度の口径が必要であるかを議論する。

C 章で説明しているように、遠赤外線外線の wide band imaging の感度は、source confusion で決まっている。source confusion の値は実際に sources がどのような光度分布をしているかに依存する。すなわち、confusion の測定そのものが、観測目的のひとつとなる。最近の Spitzer Space Telescope の観測結果を反映した source confusion の値の見積りを図 3.3 に示す。

2 章で議論されているように、遠赤外サブミリ波領域では FIRAS/COBE および DIRBE/COBE

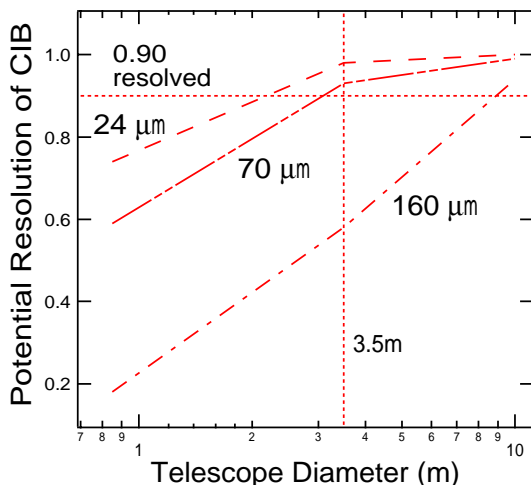


図 3.4: 赤外線背景放射が銀河の重ね合わせであるとして、どれくらいの割合が観測的に分解できるかを、望遠鏡の口径の関数として示したもの (Dole et al. 2004)。遠赤外線の代表的波長である $70 \mu\text{m}$ において、赤外線背景放射を 90 % 以上分解しようとする、3m 以上の口径の望遠鏡が必要である。

により強い背景放射が観測されている。このうちサブミリ波の背景放射については、SCUBA によって観測されている赤方偏移 2 程度の銀河で説明出来ることがわかっている。しかし、遠赤外線領域ではまだ銀河の重ね合わせでは背景放射を説明出来ていない。遠赤外線領域の背景放射の謎を解明することは、SPICA の大きな課題の一つである。

最近の Spitzer Space Telescope の結果をもとに (図 3.3 に示す confusion を仮定)、図 3.4 に、遠赤外線背景放射のどれだけの割合が銀河として分解できるかという見積りを示す。Spitzer や ASTRO-F では、口径が小さいために、背景放射の本質に迫ることは難しい。

一方、口径 3.5m の望遠鏡が実現すれば、波長 $70 \mu\text{m}$ においても、背景放射の大半を分解することができる。 $24 \mu\text{m}$ では、やや小さな口径でも背景放射の大半を分解することができるが、 $24 \mu\text{m}$ と $70 \mu\text{m}$ では異なる population の銀河を見ている可能性があり、遠赤外線外線の背景放射の源を探るためには、遠赤外線の代表的な波長である $70 \mu\text{m}$ において、赤外線背景放射を 90 % 以上分解する必要がある。そのため、3m クラス以上の口径の望遠鏡が必要である。

望遠鏡の口径を約半分の 1.8m にすると、遠赤外線の代表的な波長である $70 \mu\text{m}$ における赤外線背景放射の分解は 75% 程度にとどまり、遠赤外線外線の背景放射の源を完全には探ることができない (表 3.1)。

表 3.1: 科学的目的と達成度。望遠鏡の口径の関数として示す。

科学的目的	遠赤外線背景放射の源の解明	系外惑星の直接検出
観測への要求	波長 $70 \mu\text{m}$ において、背景放射光の大半 (90%以上) を点源に分解	十分な数 ($\gg 10$ 個) の系外惑星を直接検出する
達成度 (口径 1.8m)	波長 $70 \mu\text{m}$ において、背景放射光の 75% しか分解できない。	期待される系外惑星の検出個数は 10 個を下回る。
達成度 (口径 3.5m)	波長 $70 \mu\text{m}$ において、背景放射光の 90% 以上を分解できる。	数十個の系外惑星の検出が期待できる

したがって、赤外線背景放射の源の解明のためには、3m クラス以上の口径の望遠鏡が必要である。

3.3.2 系外惑星の直接検出

次に、空間分解能という観点から、系外惑星の直接検出を例にとって、どれだけの口径が必要であるかを議論する。

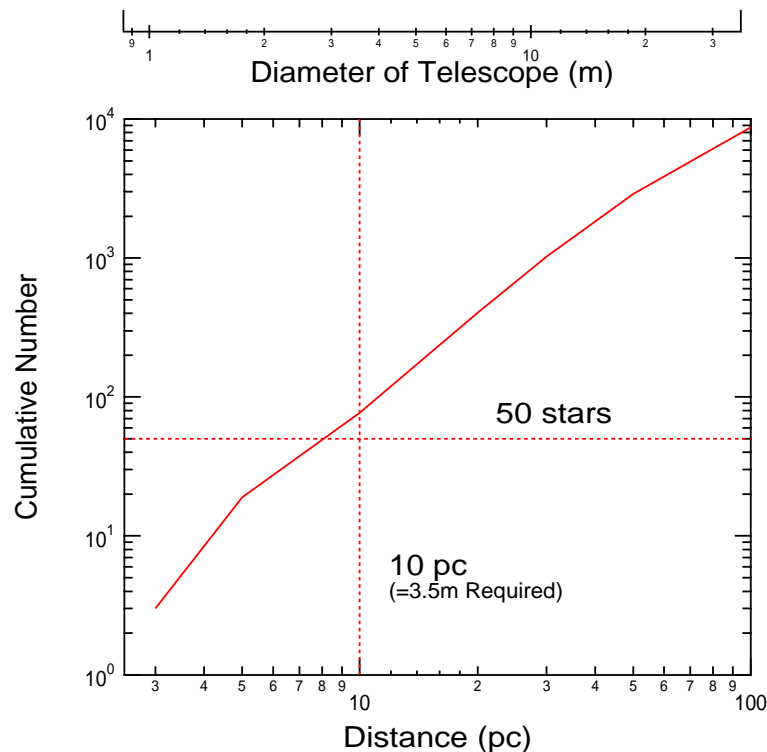


図 3.5: 太陽近傍の主系列星の数。ヒッパルコスカatalogから算出。統計的に有意な数 (数十個以上) のサンプルを観測するためには、10pc 程度までの星の観測を行なわなければならない。10pc の距離に星の周り 10AU を公転している系外惑星を波長 $5\mu\text{m}$ で検出するためには、3m クラスの口径が必要である。

5 で議論されているように、SPICA で直接検出を目指すのは、中心星から離れた巨大ガス惑星である。ここでは、土星なみの距離 (10pc) をもつ惑星を対象とする。5 で議論されているように、SPICA に搭載するステラー・コロナグラフは、 $\theta_{\text{IWD}} > 3\lambda/D$ において 10^{-6} 以上のコントラストを達成することを目指している。すると、どこまで星に近いところまで観測できるか (θ_{IWD}) は、以下のようにかける。

$$\theta_{\text{IWD}} \sim 1''(\lambda/5\mu\text{m})(3\text{m}/D)$$

この分解能で、どれだけの星が観測対象となり得るかを考える。図 3.5 に、太陽近傍に主系列星がどれだけの数存在するかを、太陽系からの距離の関数として示す。ここでは、星のスペクトル型によらず、一定の割合 (例えば半数) で惑星が存在すると仮定する。また、 θ_{IWD} の最も小さくなる $\lambda = 5\mu\text{m}$ の観測を考える。すると口径 1m クラスの望遠鏡では、3pc までの距離にある星の周りの惑星しか観測できないため、観測できる星はほとんどない (a few stars)。口径 2m クラスの望遠鏡になると、6pc までが観測可能となるため、星の数として 20 個弱、惑星としては 10 個弱

が期待される。ただし、数の見積りには極めて不定性が大きいため、惑星の数としては一桁代の小さな数となる可能性も高い。これでは、統計的な議論を行なうには、全く不十分である。

これが口径 3m クラスの望遠鏡になると、10pc の距離まで到達するため、星の数としては数十個となる。したがって、惑星系の検出数としても 10 個を十分に越えることが期待される。これだけの系外惑星が直接に検出されれば、統計的にも十分な議論ができるはずである (表 3.1)。

したがって、系外惑星の検出という目的のためには、空間分解能という観点から、少なくとも口径 3m クラスの望遠鏡が必要である。

3.4 ミッションへの要求

上記の議論より、「宇宙史の解明」という科学的な目的の達成のためには、SPICA 望遠鏡として、以下の仕様が必要である。

1. 中心となる観測波長域は $5\mu\text{m} - 200\mu\text{m}$ の中間・遠赤外線領域
2. 望遠鏡の温度としては数 K 以下
3. 口径 3m クラス以上の望遠鏡