

超広視野初期宇宙探査衛星WISHで狙うサイエンスの検討

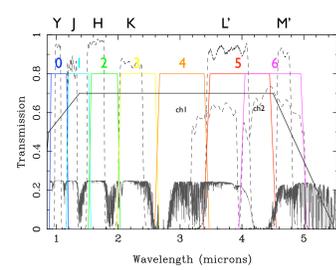
○ 矢部清人, 太田耕司 (京都大学)、岩田 生, 小林正和 (国立天文台)、山田 亨 (東北大学)、他WISH Working Group

A. 概要

超広視野初期宇宙探査衛星WISHは、口径1.5m、約1000平方角の広視野カメラを持つ宇宙望遠鏡により、宇宙第一世代の銀河を検出し最初期の宇宙での天体形成を探ることを主目的とする計画である。本発表では、WISHで達成される検出限界を推定し、特に初期宇宙の銀河を検出するために必要な望遠鏡および近赤外線カメラのコンポーネントごとの温度要求と、最適なフィルタセットの検討結果を報告する。さらに、銀河進化モデルから予想される光度関数などの比較を通じて、WISHによる広視野サーベイで期待される超遠方銀河の検出数について議論する。さらに、同一天域の複数回露出によって検出される超新星などのトランジェント天体や、ガンマ線バーストのフォローアップ観測を含め、WISHによって展開が期待される広範囲の研究について概観する。

B. WISH標準フィルタシステム

WISH標準広帯域フィルタセットの検討



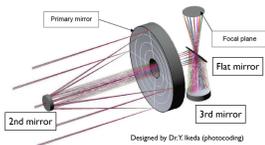
図B1. WISH標準広帯域フィルタセット (filter0 - filter6) 地上望遠鏡で使用されているY, J, H, K, L', M' (Subaru IRCs)とch1, ch2(Spitzer IRAC)を破線で示してある。また、地球大気の透過率も併せて示している。

WISHWGでは過去2回のサイエンスワークショップを行い、そこでの議論をもとにWISH衛星の主目的を達成するために最適な、かつ幅広いサイエンスにも対応できるようなフィルタセットの検討を行っている。

地球大気の影響を受けない宇宙観測の利点を生かすべく0.9 μ mから5 μ mを隙間なくカバーするフィルタセットを検討している。現在の案では0.9 μ mから4.5 μ mを対数スペースで等間隔にカバーするfilter0からfilter5の6枚と4.0 μ m-5.0 μ mをカバーするfilter6(具体的なサイエンスケースを含め現在検討中)の計7枚の広帯域フィルタを定義している。

C. 検出限界の評価

現在WISHで想定されている光学系に基づき、期待される検出限界を各フィルタセットについて推定した。



図C1. WISH光学系レイアウト

Telescope	
Mirror diameter	1.5m
Mirror Material	low CTE glass
Focal ratio	16
Strahl ratio	> 0.85 over whole filed-of-view in 1-5 μ m
Wide-field Camera	
Shape of field of view	Donut-like
Inner diameter of annulus	172.8 mm = 24.8'
Outer diameter of annulus	388.8 mm = 55.7'
Plate scale	8.67"/mm
Detector	32 2k \times 2k HgCdTe arrays
Area covered by detectors	840 sqarcmin
Wavelength	1-5 μ m
Number of filters	7 or 11 (TBD)
Mission	
Orbit	Sun-Earth L2
Mission Lifetime	5 years at L2
Expected launch year	late 2010s

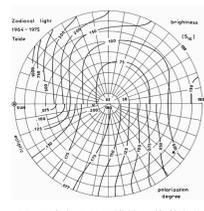
表C1. WISH計画の基本的な仕様

コンポーネント名	温度(K)	emissivity(%)	立体角 (str)
主鏡	100	5	0.036
副鏡	100	5	0.036
平面鏡(表面)	100	5	0.023
平面鏡(裏面)	100	5	0.16
第三鏡	100	5	0.057
フィルタ	80	10	2.8
クワイースタット	80	10	2.8
スパイダー	100	90	4.5 \times 10 ²

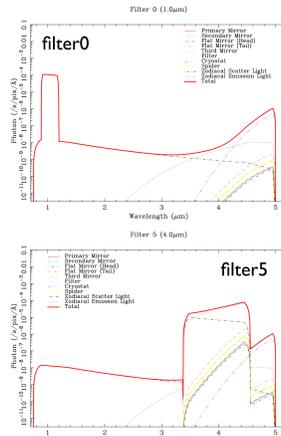
表C2. 各コンポーネントの温度とemissivity

光学系の各コンポーネント(図C1を参照)からの熱放射はgray bodyを仮定した。また、検出器の効率は60%程度(5.0 μ mでcutoff)を仮定し、フィルタに1 \times 10⁻⁴のリークがあると仮定している。

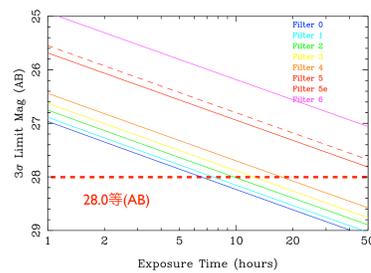
各コンポーネントの温度は熱放射の影響が黄道光のそれよりも小さくなるように設定してある。各コンポーネントの温度とemissivityなどは表C2を参照。黄道光の強さは黄極付近の3倍の値を仮定(図C2)。



図C2. 地球上での平均的な黄道光強度 (Leinert et al. 1998)



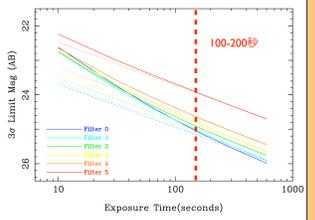
図C3. 各コンポーネントからの熱放射計算。単位時間単位波長当り検出器1ピクセルに放射される光子数を表している。例としてfilter0とfilter5の場合を示した。



図C4. 積分時間に対する3 σ 限界等級(AB)。天体は点源であるとし、Apertureは各中心波長での回折限界の2倍とした。

光学系が十分に冷却されている場合、28.0等ABの限界等級を達成するのに必要な積分時間はfilter0からfilter4の短波長側では10-20時間程度。長波長側では50時間以上必要。

100-200秒以下の露出では、background limitedの場合に期待されるものよりも限界等級が浅くなるが、これは読み出しノイズが効いてくるのが原因だと思われる。

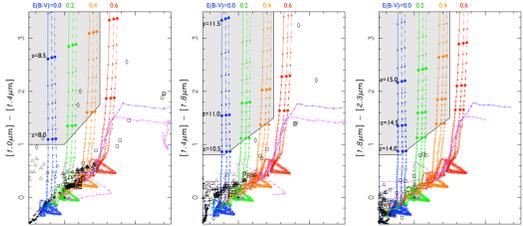


図C5. 短時間露出(1回露出+1回読み出し)の場合の3 σ 限界等級(AB)。

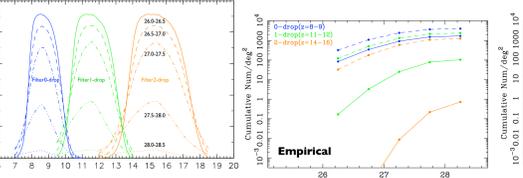
D. WISHで狙うサイエンス

第一世代銀河の探査

WISH計画の主目的は宇宙第一世代の銀河を検出することにある。これにより最初期の宇宙での天体形成と進化や宇宙再電離に関する系統的な研究が可能となる。我々はCで評価した期待される検出限界に基づき、これらの天体の検出可能性を検証した。



図D1. 二色図上での銀河モデルスペクトルのカラートラック。左からfilter1-dropout (8<z<10), filter1-dropout (10.5<z<13), filter2-dropout (14<z<17.5)。グレーの領域がdropout天体の選択基準。また、銀河系内の低温星の予想されるカラーも示してある(白抜き)。



図D2. Completenessの評価。

図D3. 1平方度あたりに期待されるdropout天体の数。実線がそれぞれEmpiricalなUV光度関数(LF)進化、ダークマターハロー(DMH)の質量関数(MF)進化から求めたLF進化、Kobayashi+07の準解析的銀河進化モデル(SAM)から予想されるLF進化がある場合に予想される検出数を示している。破線はLF進化が無い場合を表している。

1平方度あたりの検出期待数

z	光度関数(LF)進化なし	LF進化あり(empirical)	LF進化あり(DMH)	LF進化あり(SAM)
0-drop	8-9	4000	1690	852.3
1-drop	11-12	2393	104.2	4.116
2-drop	14-17	1249	0.723	0.723

表D1. 1平方度あたりに期待されるdropout天体の数。^{*}UVLFの進化ありは、empiricalなUVLF進化、DMHのMF進化から導いたUVLF進化、SAMから予測されるUVLF進化の3通りについて示してある。

最遠方天体の探査

銀河のモデルスペクトル分布を仮定してdropout銀河、低赤方偏移の銀河、銀河系内の低温度星の予想される色を二色図上に示した(図D1)。連続的な透過曲線とシャープなカットオフを持つフィルタを使用することで、低赤方偏移銀河や銀河系内の星の混入が極めて少ない、グリーンなz>8銀河のサンプルを選ぶことができる。

測光誤差等による検出失敗の確率(図D2)を考慮した上で、各フィルタについて28等ABの限界等級のデータから期待される検出数を求めた。UV光度関数の進化を考慮すると、z=15の銀河の検出には100平方度の広域サーベイが必要である。

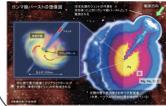
WISHで見つかる最遠方銀河は最も明るい部類の銀河でありJWSTやTMTなど次世代望遠鏡によるフォローアップ分光でより詳細な性質が明らかになるであろう。JWSTでも同様に最遠方銀河の発見が期待されるが、これらは暗くJWSTやTMTによっても分光が極めて困難であることを強調しておきたい。

我々は広帯域フィルタに加え狭帯域フィルタの可能性も検討している。近赤外狭帯域撮像サーベイによりz>8のLy α 輝線天体を大量に発見することで、再電離時代における原始銀河の形成と進化の系統的な研究を行うことができる。

ガンマ線バースト

ガンマ線バースト(GRB)は大質量の星がその一生の最期に起こす大爆発であり、数十秒間の爆発的な γ 線と、そのあと数時間で減衰するX線から可視光・赤外線にわたる残光を放射する。初代の星は太陽の数十倍を越える大質量で生まれたと考えられており、百万年程度の短期間に燃え尽きてGRBを起こすと期待される。

発生直後にWISHによる多波長近赤外撮像でのフォローアップ観測を行い、宇宙初期(z=20)のGRBの検出を狙う。



図D4. GRBの想像図

観測可能領域、姿勢変更の時間、スリットレス分光の可能性など今後更新の検討が必要である。

QSO探査

遠方QSO探査は宇宙再電離、銀河とBHの共進化、宇宙初期の星形成史を探る上で非常に重要である。

QSOは稀な天体であるため、通常の銀河探査よりもはるかに広い範囲をサーベイする必要がある。後述するUWSがこれに適したサーベイとなる。

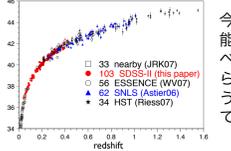
太陽系天体・系外惑星探査

WISHによってトロヤ群やカイパーベルト天体などの小惑星の近赤外領域での多波長情報を得る。特に3 μ m付近のfilter4によってH₂Oの吸収の有無が判定できる。また、系外惑星トランジット探査などにもWISHの近赤外での撮像能力を十分に生かすことができる。

超新星探査

1a型超新星を標準光源として使い宇宙論パラメータに制限を与える研究が勢力的に行われている。WISHによる深く広視野のサーベイにより、z<3までの1a型超新星の発見を目指す。系統誤差の主な原因の一つとなるダスト吸収の影響を少なくするため、近赤外領域で行うWISHサーベイは非常に有効な手段となる。

また超新星の発生頻度を測定することで、銀河から求めるのとは独立の方法で、宇宙の星形成史について調べることができる。



図D5. 距離指標としての1a型SN (Kessler+09)

今後も含めて、具体的なサーベイ計画(1視野あたりどれくらいの間隔で何回の観測を行うかなど)をより詳細に検討していく。

銀河の形成進化に関わる広範囲な探査研究

WISHで行う近赤外でのマルチバンドサーベイによりz<6での銀河の質量集積過程を明らかにする。また、狭帯域フィルタによりH α 輝線天体などの撮像サーベイを行い、ダスト吸収の影響が比較的小さい手法で宇宙の星形成史を探る。

また、遠方銀河団のサーベイにより星形成と環境効果の関係を系統的に調べることができる。

銀河系内天体

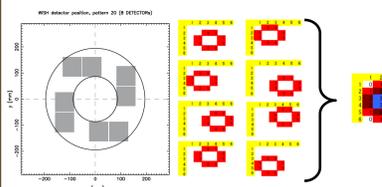
天の川銀河面の近赤外アストロメトリにより、ディスク渦状腕の形成の謎に迫る。また、銀河系内の超低温星の探査を行い、初期質量関数の低質量側に制限を与える。

その他

2009年と2010年に行われたWISHサイエンスワークショップの集録は <http://www.wishmission.org/jp/doc.html> で見ることができます

E. WISHサーベイプラン

Dで述べたサイエンスケースを念頭に置き、我々はWISHサーベイプランの検討を行っている。主なサーベイとして、限界等級28等ABで100平方度を5バンドで掃くUltra Deep Survey (UDS; 主に最遠方のdropout天体をターゲットとする)、24-25等ABと浅いがより広い1000平方度を3-4バンドで掃くUltra Wide Survey (UWS; 主に明るいQSOがターゲット)の2種類を想定している。いずれのサーベイも1視野を複数回観測し、超新星探査を行う。また、GRBなどの突発天体に対して望遠鏡が指向可能な場合は必要に応じてToO観測を行う。



図E1. WISH検出器配置案(左)とデザリングパターン(右)の例。

Cで評価したWISHの検出限界に基づき、UDSに必要なサーベイ日数を見積もった(表E1)。filter0からfilter4の5バンドを28等ABで100平方度サーベイするのに必要な日数はおよそ1500日である。また、1視野のみ29-30等ABまで観測するExtremely Deep Survey (EDS)の可能性についても現在検討中である。

WISHは視野中心が抜けた検出器配置をしているが、図E1のようにデザリングを工夫することで均一な深さのサーベイを行うことができる。

UDS	限界等級	サーベイ日数 [*]
filter0	28.0等(AB)	183日
filter1	28.0等(AB)	211日
filter2	28.0等(AB)	272日
filter3	28.0等(AB)	346日
filter4	28.0等(AB)	486日
計		1498日

表E1. WISH UDSサーベイプラン

	フィルタ数	限界等級	サーベイ面積	サーベイ日数 [*]
Ultra Deep Survey (UDS)	5	28.0等(AB)	100平方度	1500日
Ultra Wide Survey (UWS)	3-4	25.0等(AB)	1000平方度	50-70日

表E2. WISHサーベイプランまとめ

UWSではfilter0からfilter3(可能であればfilter4も)で24-25等ABの深さまで観測する。1000平方度を掃くのに必要なサーベイ日数は50-70日である。

filter5(とfilter6)については黄道光の影響により限界等級が他のバンドと比べ浅くなるため、限界等級、サーベイ日数については現在検討中。また、狭帯域フィルタやスリットレス分光によるサーベイについてもその可能性を現在検討中である。

F. まとめ

現在WISHで想定されている光学系に基づき、WISH標準広帯域フィルタセットについて検出限界を推定した。その結果、光学系が十分に冷却された場合、短波長側では10-20時間、長波長側では50時間程度で28等ABの限界等級が達成可能であることが分かった。

WISHによって期待されるサイエンスケースを概観した。最遠方銀河/QSO探査から、同一視野の反復観測による超新星探査、GRBフォローアップ、太陽系内・銀河系内天体の探査までWISHによって展開が期待される領域は多岐にわたることが分かった。

これらのサイエンスケースとWISHの検出限界を念頭に、我々はUltra Deep SurveyとUltra Wide Surveyを中心とするサーベイプランを現在検討中である。