

科学目的へのインパクト

柏川伸成(TMT推進室)

TMT SACにおける議論
国内におけるインパクト調査

TMT SACにおける議論

- ◆ 5/27 TMT SACにおいて表記の話題について議論を行った。その概略を紹介する。
- ◆ Board からのリクエストに従い、Maunakea 以外のバックアップ候補地について科学的な見地から選択の議論を行うことになった。現在はSan Pedro Matier (Mexico), La Palma (Spain), Mackenna (Chile), Honor (Chile) が候補として挙がっている。NIR / MIR のサイエンスへのインパクト、観測できる天域の違い、LSST への即応性の違い、紫外線への影響、ALMA望遠鏡やスペース計画 (WFIRST, JWST) とのシナジーと言ったことが科学的な影響として議論された。
- ◆ 議論は大きくまとめると、1) North vs. South, 2) Altitude, 3) Competition with E-ELT / GMT, の3つの観点に分類されるがこれら3つは密接に関係している。
- ◆ 日本の考えるサイエンスケースに与えるインパクトについてご意見を伺いたい。

Summary of site characteristics

	ORM	SPM	Armazonos Mackenna	MK 13N	Tolonchar	Hanle	Ali	Honar
	2250	2790	3114	4050	4480	4500	5100	5400
Parameter								
Usable time fraction	0.75	0.82	0.89	0.76	0.82	0.70	0.77	0.82
Median seeing (60 m)	0.55	0.57	0.50	0.50	0.51	0.95	0.75	0.51
AO Strehl merit function	0.93	0.81	0.92	1.00	0.87	0.65	0.75	0.87
Isoplanatic angle	2.33	1.99	2.05	2.55	1.78	1.50	2.00	1.80
Atm. coherence time	<u>6.0</u>	5.1	5.0	7.3	5.2	4.5	5.0	5.0
NIR sensitivity (Cohen metric)	0.74	0.84	0.80	0.93	1.00	1.00	1.05	1.10
PWV < 2mm	0.18	0.25	0.50	0.54	0.62	0.60	0.75	0.75
Mean night temperature	7.6	5.4	7.5	2.3	-0.7	-3.0	-5.0	-7.3

0.123	green background: input values
0.75	gray font: significantly uncertain values
<u>6.00</u>	gray underlined: might still be able to harden this value

- Large values are good for: usable time, Strehl merit, isoplanatic angle, coherence time, NIR sensitivity metric, PWV < 2 mm
- Small values are good for: seeing, temperature
- In the following, only metric-based numbers will be shown, i.e. larger values are always better

Site Merit Function Spreadsheet

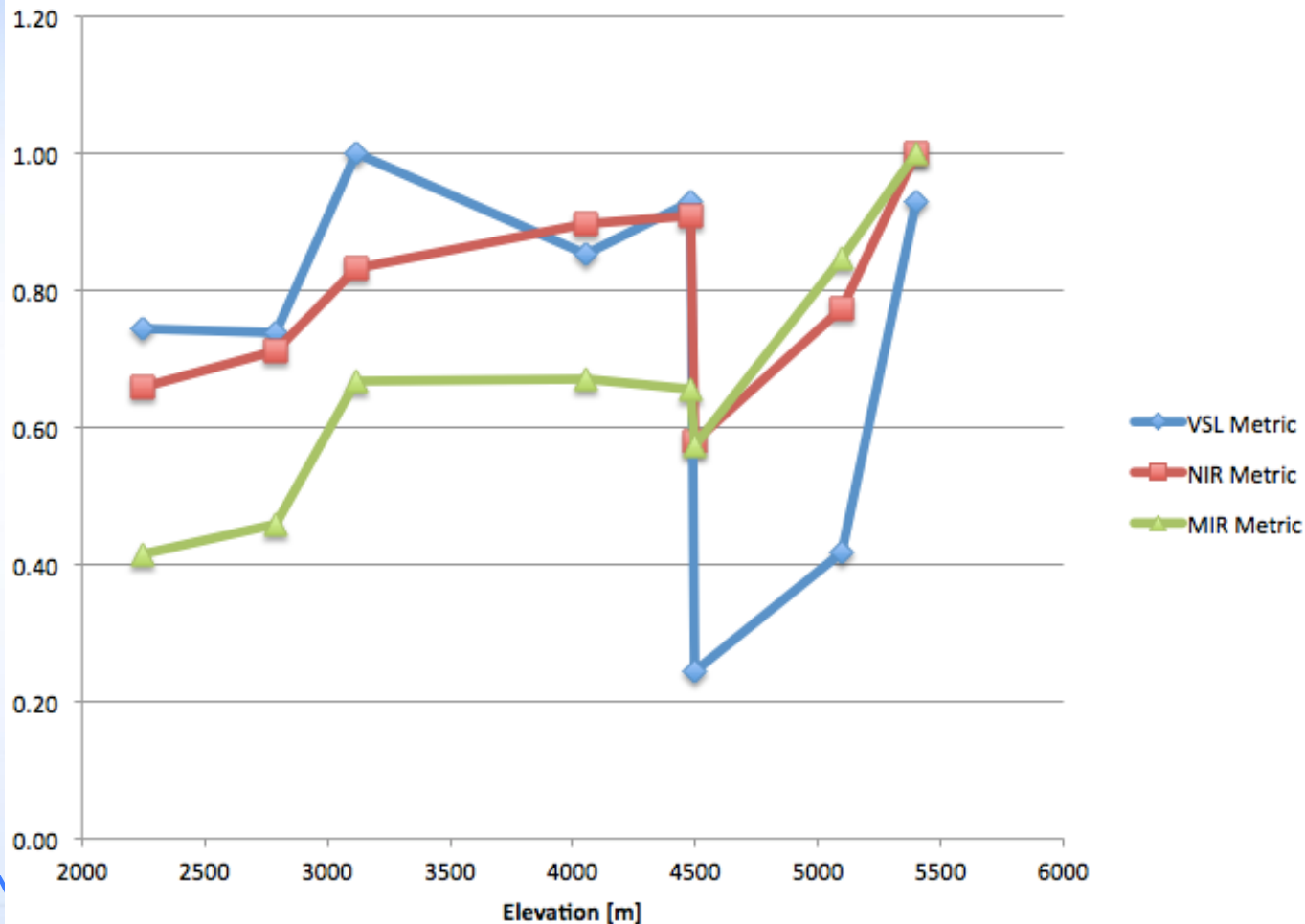
Top Level Metrics (Jul 2016)

	ORM	SPM	Armazones Mackenna	MK 13N	Tolonchar	Hanle	Ali	Honar
	2250	2790	3114	4050	4480	4500	5100	5400
Visible seeing-limited								
Usable time fraction	0.84	0.92	1.00	0.85	0.92	0.79	0.87	0.92
Median seeing	0.87	0.79	0.99	0.99	1.00	0.31	0.48	1.00
VSL metric (normalized)	0.74	0.74	1.00	0.85	0.93	0.24	0.42	0.93
NIR AO								
Usable time fraction	0.84	0.92	1.00	0.85	0.92	0.79	0.87	0.92
AO Strehl merit function	0.93	0.81	0.92	1.00	0.87	0.65	0.75	0.87
NIR sensitivity (Cohen metric)	0.67	0.76	0.73	0.84	0.91	0.91	0.95	1.00
NIR metric (normalized)	0.66	0.71	0.83	0.90	0.91	0.58	0.77	1.00
MIR AO								
Usable time fraction	0.84	0.92	1.00	0.85	0.92	0.79	0.87	0.92
AO Strehl merit function	0.97	0.90	0.96	1.00	0.93	0.81	0.87	0.93
PWV < 2mm	0.53	0.56	0.72	0.76	0.84	0.82	1.00	1.00
Mean night temperature	0.83	0.85	0.83	0.89	0.78	0.95	0.97	1.00
MIR metric (normalized)	0.42	0.46	0.67	0.67	0.66	0.58	0.85	1.00
Weights								
visible	0.40							
NIR	0.50							
MIR (calculated from prev. two)	0.10							
Total metric (normalized)	0.70	0.72	0.92	0.88	0.92	0.44	0.64	1.00
with respect to MK 13N	0.79	0.82	1.04	1.00	1.04	0.50	0.73	1.13

Site Merit Function Spreadsheet

Science Regime Merit Functions

ORM	SPM	Armazones Mackenna	MK 13N	Tolonchar	Hanle	Ali	Honar
2250	2790	3114	4050	4480	4500	5100	5400



- ◆ 北半球は当然独自性がある。JWSTやWFIRSTのフォローアップを考えても。サイエンスメリットファンクションとして、ターゲットのユニークさを考慮する必要があるのではないか？
- ◆ 南半球は銀河中心や星形成領域のサイエンスにとってユニークな天体が多い。ALMAやLSSTとのシナジーも強い。北半球はM31が観測しやすい。
- ◆ Na layer の厚さは latitude に依存するが、問題になるような違いはない。たとえば Keck と Paranal で大きな違いは報告されていない。La Palma はより厚くなるはずである。

- ◆ コストやリスクを無視して数字だけ見ると**当然高いサイトの方が条件がよい。**
- ◆ 10-20um science の重みをどれくらい重要と位置付けるかに依存する。水蒸気量と温度が変化するので、サイトの高さはMIR だけでなくNIR にも大きく影響する。（水蒸気量はMIR、温度は2 μ mのwindowに直結する）
- ◆ 表の数値はダストの影響は考慮されておらず、La Palma はダストの影響が大きいので、紫外線の散乱が大きいかもしれない。UV の透過率が変わるのはオゾンの量が効き、高いサイトの方が良い（高度のexponentialで効く）。
- ◆ La Palma の PWV <2mm の割合が高く見積もられすぎているかもしれない。

Competition with E-ELT / GMT

- ◆ もし仮にチリ、特にMackennaに建設するようなことがある場合には、装置計画（特に第2期）の見直しが必要で、似たような機能の装置開発は避け、お互いの機能をシェアするような装置計画にすべき。
- ◆ Honorの場合にはMIR性能は大きく違うので、E-ELTのファーストライト装置のMETISがあってもMICHIIの意義はあるだろう。
- ◆ Time-domain issue. LSST で見つかった変光天体への即応性を考えると SPM が La Palmaよりも良い。マウナケアでは減光期間の観測になる。E-ELTはacquisitionまでに時間がかかる（7分程度）ことも考慮しておく。
- ◆ 最大視野の比較は E-ELT FoV=10' TMT FoV=15' GMT FoV=20' となっている。ケラレも考慮すると TMT FoV=20' も可能。

- ◆ コスト、リスクを抜きにしてサイエンスだけでサイトを議論するには無理がある。総コストによって、装置計画も限定され、実現できるサイエンスも限定される。
- ◆ MIRの性能がサイトによって大きくことなるが、将来キュー観測にすることを考えれば、MIR観測条件がベストの時に観測すればいいので、平均値だけの比較では意味がない。
- ◆ サイト評価では悪いシーイングなどによって失われた時間も含めて時間のロスを評価するべきである。
- ◆ 長期的な気候変動について懸念があるが、Maunakea をサイト選定した時点のサイトサーベイでは 2005 年までの 20 年間のデータで大きな変動は見られなかった。
- ◆ 地表での風速についてはサイトごとに大きな違いは見られない。温度変動の違いの方が大きい。夜間の温度変動はスカイ引きの精度に影響を与える。昼夜の温度差は高コントラスト装置に影響を与えるだろう。

国内におけるインパクト調査

TMTの科学研究に与えるインパクト：国内調査

- ◆ 光赤天連が今年とりまとめた「2020年代の光赤外天文分野」検討報告書でとり上げられているTMTによる観測テーマ案ごとに、まずは定性的に影響の分析を行った。報告書をとりまとめた検討班からのコメントもいただいているが、より定量的・包括的な検討が必要である。
- ◆ 検討の観点
 - ◆ 観測領域（北天／南天）
 - ◆ 補償光学の性能
 - ◆ 観測波長への影響（標高が低いと赤外・紫外線観測効率が減少）
 - ◆ 計画延伸の影響：他のELTやスペース計画との関係
- ◆ 以下で公開中
<http://tmt.mtk.nao.ac.jp/meeting-j.html>

宇宙論・構造形成

- 北天／南天の選択はほとんど影響なし。広域撮像分光サーベイとの連携が重要。
- 補償光学の性能は「よいに越したことはない」程度
- 標高に関わらずシーイングのよいサイトが望ましい
- 計画延伸の影響は特になし。高性能の高分散分光器をEELTより先に立ち上げられるか。

対象	観測内容	北/南	補償光学の性能	赤外・紫外線	延伸
宇宙膨張の直接測定	クエーサー吸収線系の超高精度分光モニター観測	どちらでも可	必要なし	可視分光	特になし
重力レンズサーベイ	測光的赤方偏移の較正	どちらでも可	-	可視近赤外分光	EELTと競合
小質量サブハロー	面分光による速度場測定	どちらでも可	-	可視近赤外面分光	EELTと競合

巨大ブラックホールと活動銀河核

- 北天／南天の選択の影響は大きくはない:チリから観測できないほど北天にある天体を除けば、早くやったもの勝ち。
- AGNはコンパクトで、補償光学の性能の影響は大きい(空間分解、感度)。
- 標高が低いと、 $>3\mu\text{m}$ の熱的赤外線に影響大。塵・分子遮蔽体(トーラス)構造の観測のためには $10\text{-}20\mu\text{m}$ の中間赤外線観測が極めて重要。
- 計画延伸の影響は大きい。なぜなら、主要な天体が先にやられるから。

対象	観測内容	北/南	補償光学の性能	赤外・紫外線	延伸
巨大BHの質量 星間空間の力学構造 中質量BH 銀河バルジとの相関	星、ガスの空間分解した分光(可視、近赤外)	特になし	空間分解できるスケールに大きく影響	Kバンド以下で影響は限定的	影響大
降着円盤アウトフロー	高感度高分散分光(可視、近赤外)	特になし	星像が悪化すると感度低下。影響大	Kバンド以下で影響限定的	影響大
電離ガスの構造	高感度偏光分光(特に可視)	特になし	影響は限定的	可視光がメインで影響小	影響大
分子、塵遮蔽体構造	高空間分解能撮像(中間赤外線)	特になし	MIR AOが効けば問題なし	標高がかなり重要	影響大
ジェット	高空間分解能撮像(可視、近赤外)	特になし	影響は限定的	影響は限定的	影響大
巨大BHの誕生 BH質量、エディントン比関数進化 光度時間変動	高感度中分散分光(近赤外)	特になし	星像が悪化すると感度低下。影響大	Kバンド以下で影響は限定的	影響あり

初代天体と再電離

- 北天／南天の選択はほとんど影響なし
- 補償光学の性能はクリティカル
- 標高が低いサイトでもほとんどの研究は実施可能
- 計画延伸の影響は大きい

対象	観測内容	北/南	補償光学の性能	赤外・紫外線	延伸
初代星	種族III星団の検出	どちらでも可	極めて重要	近赤外分光	EELTとの競合に難 JWSTとの連携に難
	初代星の終焉(GRB)	どちらでも可	極めて重要	TOO近赤外 分光	EELTとの競合に難 JWSTとの連携に難
初代銀河	運動学的銀河形態の理解	どちらでも可	極めて重要	近赤外3次元 分光	EELTとの競合に難 JWSTとの連携に難
再電離	再電離史 (GRBの中性度の測定)	どちらでも可	極めて重要	近赤外分光	EELTとの競合に難 JWSTとの連携に難
	再電離史 (QSOの中性度の測定)	どちらでも可	極めて重要	近赤外分光	EELTとの競合に難 JWSTとの連携に難
	再電離史 (Ly α 速度差測定)	どちらでも可	極めて重要	近赤外分光	EELTとの競合に難 JWSTとの連携に難
	電離源(個別検出による電離光子脱出率)	どちらでも可	極めて重要	近赤外分光	EELTとの競合に難 JWSTとの連携に難

銀河進化と構造形成

- 北天／南天の選択はあまり影響ない。但しALMAとの連携ができる緯度範囲内で。
- 補償光学の性能がは多くの課題でクリティカル。高層も地表も。
- 標高が低いサイトでは、赤外線透過率(特にバンド間のギャップ)が多少問題。
- 計画延伸の影響は、EELTとの競合、JWST/WFIRSTとの連携の観点で大きい。

対象	観測内容	北/南	補償光学の性能	赤外・紫外線	延伸
形成途上銀河の内部構造	AO近赤外面分光	どちらでも可	極めて重要	近赤外線	EELTとの競合に難 JWSTとの連携に難
ハッブル系列の起源	近赤外面分光 AO近赤外撮像	どちらでも可	極めて重要	近赤外線	EELTとの競合に難 JWSTとの連携に難
星形成活動の終焉	近赤外分光	どちらでも可		近赤外線	EELTとの競合に難
ダークハローと星形成	広視野撮像+分光	どちらでも可		近赤外線	WFIRSTとの連携に難
銀河の合体史	AO近赤外撮像 広視野多天体分光	どちらでも可	極めて重要	近赤外線	EELTとの競合に難 JWSTとの連携に難
銀河間ガス、銀河周ガス	紫外可視中分散分光	どちらでも可		紫外線観測も重要	EELTとの競合に難
銀河の力学進化	AO近赤外面分光	どちらでも可	極めて重要	近赤外線	EELTとの競合に難 JWSTとの連携に難
環境効果	AO近赤外面分光 多天体分光	どちらでも可	極めて重要	近赤外線	EELTとの競合に難 JWST/WFIRSTとの連携に難
大規模構造、原始銀河団	広視野撮像+分光	どちらでも可			WFIRSTとの連携に難

銀河系・局所銀河群

- 北天／南天の選択は大きく影響(テーマごとに得失あり)
- 補償光学の性能が与える位置天文への影響の評価が必要
- 標高が低いサイトでもほとんどの研究は実施可能
- 計画延伸の影響は大きくはない

対象	観測内容	北/南	補償光学の性能	赤外・紫外線	延伸
銀河系中心BH	中心付近の星の運動 (位置、視線速度)	南が望ましい	位置天文に影響	-	-
銀河系中心の星団	運動(位置、視線速度)、面分光	南が望ましい	位置天文に影響	-	-
銀河系バルジ	近赤外分光	南が望ましい	-	-	-
円盤構造	星の(近赤外)分光		-	-	-
近傍銀河ハコ一	星の可視撮像・分光	M31をはじめ、 北の天体もある	-	-	-
矮小銀河	星の可視分光	北にも天体がある	-	-	-
初期世代星	星の可視高分散分光	北にも天体がある	-	紫外線観測も有効	-
局所銀河群の銀河	銀河の運動、星形成	北にも天体がある	位置天文に影響	-	

銀河系・近傍銀河の星生成と物質進化

- 北天／南天の選択は銀河系の星生成研究にのみ大きく影響(テーマごとに得失あり)
- 銀河系・近傍銀河の詳細な星生成研究と磁場進化の研究には補償光学は不可欠
- 中間赤外線が必要な研究には標高が高いサイトが望ましい
- 計画延伸の影響は、EELTとの競合、JWST/WFIRSTとの連携の観点で大きい

対象	観測内容	北/南	補償光学の性能	赤外・紫外線	延伸
銀河系内の詳細な星生成	AO近赤外撮像 +分光	北: 第1,2象限 南: 第3,4象限	極めて重要	近赤外線	EELTとの競合に難 JWST/WFIRSTとの連携に難
近傍銀河の詳細な星生成 (1Mpcまで)	AO近赤外撮像	どちらでも可	極めて重要	可視 近赤外線	EELTとの競合に難 JWST/WFIRSTとの連携に難
星生成率の多様性の物理条件の追求	近赤外分光 (R~1000)	どちらでも可		中間赤外線	EELTとの競合に難
銀河のガス・ダスト進化	近赤外分光 (R~100,1000)	どちらでも可		中間赤外線	EELTとの競合に難
銀河の磁場進化	AO広視野撮像 + 偏光観測	どちらでも可	極めて重要	中間赤外線	EELTとの競合に難

星間物質

- 北天／南天の選択はあまり影響しないが、テーマによっては南天はマゼラン雲が観測できるメリットがある
- 主に中間赤外線での観測なので、補償光学の性能の影響は大きい
- 主に中間赤外線(特にQバンド)での観測が重要で、その実現のために、高い標高のサイトが強く要望される(ただし、水蒸気量が必ずしもクリティカルでない観測も多くある)。
- EELT/METISとの競合により計画延伸は望ましくはないが、標高の高いサイトに建設されるなら優位性は十分ある。

対象	観測内容	北/南	補償光学の性能	赤外・紫外線	延伸
原始惑星円盤内の物質	円盤内ダストの空間的 多様性・その時間進化 (撮像)	どちらでも可	MIR AOが効け ば良い	中間赤外線	望ましく ない
ダスト凝縮・核 形成	終焉を迎える星周囲の ダスト・電離ガス・原 子ガス・分子ガスの分 布(中分散面分光)	どちらでも可	極限的性能は必 要ない	近・中間赤外 線	望ましく ない
晩期型巨星星周 ダスト	晩期型星周囲のダスト の成長過程(中分散面 分光)	どちらでも可	MIR AOが効け ば良い	中間赤外線	望ましく ない
水・有機物の探 査とその生成・ 進化	星間・星周環境に存在 する分子ガスの中分 散・高分散分光	南にメリット あり	極限的性能は必 要ない	近・中間赤外 線	望ましく ない

恒星物理

- 北天特有の天体はないが、突発現象が北天であった場合対応できるELTがあることが望ましい。
- 明るい天体に対して高空間分解能を実現できる補償光学と近・中間赤外線観測が重要
- 計画延伸の影響は、EELTとの競合、WFIRSTとの連携の観点で大きい

対象	観測内容	北/南	補償光学の性能	赤外・紫外線	延伸
恒星風速度場	赤外線高空間分解能・高波長分解能観測	-	重要	近・中間赤外線が重要	-
ダスト流速	ダスト散乱光の高波長分解能偏光観測	-		-	-
星周ガス・ダスト	広視野面分光	-	重要	-	-
Ia型超新星伴星候補天体	可視中分散分光観測	-	-	-	JWST/WFIRSTとの連携
連星中性子星合体(重力波天体追跡)	可視・近赤外線分光観測	突発現象は北にも出現	-	-	EELTと競合
超新星爆発メカニズム(爆発形状)	可視・近赤外線分光観測、高空間分解能観測	突発現象は北にも出現	重要	-	EELTと競合
超新星ダスト	紫外・可視・赤外分光観測(減光の測定)	突発現象は北にも出現	-	紫外線観測も有効	-
初代星探査	可視高分散分光	EELTとの競合	-	-	EELTと競合

星惑星系形成

- これまでの資産蓄積という意味では北天に利がある一方、南天にはより多くの(比較的未開拓な)星形成領域が存在。
- 補償光学は重要。近赤外線での高コントラスト観測では致命的。但し、熱赤外線領域では高ストレールは比較的容易に達成される筈。
- 標高が低いサイトでは、 $>2.3\mu\text{m}$ (COバンド含む)の観測に影響。有機分子の観測への影響は甚大。
- 計画延伸の影響は、JWSTとの連携(特に赤外線高分散分光による相補観測)の観点で甚大。

対象	観測内容	北/南	補償光学の性能	赤外・紫外線	延伸
個々の星の誕生過程および質量決定	中間赤外線撮像、近-中間赤外線分光/分光撮像	特になし	比較的重要	近赤外線	--
集団としての星生成	塵に埋もれた密集領域での赤外線測光	特になし	重要	近～中間赤外線	JWSTとの連携に難
惑星系形成の黎明	赤外線撮像・分光	特になし	非常に重要	近～中間赤外線	JWSTとの連携に難
ガス惑星の形成	高コントラストでの原始惑星系円盤撮像・中間赤外分光	特になし	非常に重要	近～熱赤外線	EELTとの競合に難
残骸円盤 - 地球型惑星形成期以降の星周環境	高コントラストでの撮像、低分散分光	特になし	比較的重要	中間赤外線	JWSTとの連携に難
惑星分布から探る形成過程	高コントラストでの惑星直接撮像	特になし	非常に重要	近赤外線	EELTとの競合に難
原始惑星系円盤における有機高分子の成長 - 生命系形成の黎明	赤外線高分散分光	特になし	比較的重要	熱赤外線	JWSTとの連携に難

系外惑星

- 基本的に南北どちらでも観測は可能:
ただし 他のELTとターゲットが競合しない北天が望ましい
- 補償光学の性能は重要: 特に高コントラスト撮像・惑星の直接分光が 主な観測手法。感度・分光スリットロスに影響
- 標高が低いサイトでは赤外域の観測効率低下が懸念される
- 計画延伸の影響大: 観測衛星による惑星サンプルを早い者勝ちで観測 するため、他ELTが先行すると影響大。望遠鏡だけでなく、(極限) 補償光学がいつ稼働するかが問題。

対象	観測内容	北/南	補償光学の性能	赤外・紫外線	延伸
若い惑星 褐色矮星の大気	AO+高コントラスト中分散分光	どちらでも可能。ただし南のほうがベター	スリットロスへの影響大	近赤外	影響大
ホット・スーパーアースの大気	主星高分散分光	どちらでも可能	影響限定的	-	影響大
高密度スーパーアースの表層環境	AO+高コントラスト撮像	どちらでも可能	コントラスト・感度への影響大	近赤外	影響大
地球型惑星に於ける生命居住可能性・バイオマーカー検出	AO+高コントラスト高分散分光	どちらでも可能	コントラスト・感度への影響大	近赤外	影響大

太陽系天体

- 太陽系天体の多くは黄道面上にあるため、黄道が高い「低緯度地域」であれば北天南天の差異は少。ただターゲットが競合しない北天が魅力的。また近地球天体には全天をまたいで移動するものがあり追うには北天も。
- 補償光学の性能は近赤外の高コントラスト観測やスリットロスに重要, ただし熱赤外の観測では影響少ないか
- 標高が低いサイトでは熱赤外域の観測効率低下が大いに懸念される
- 計画延伸の影響: 主要天体は他のELTが先行し突発天体にも対応できない

対象	観測内容	北/南	補償光学の性能	赤外・紫外線	延伸
彗星・氷衛星の微量有機物ガス輝線	近赤外・中間赤外高分散分光	どちらでも可能	影響大	近・中間赤外	EELTとの競合に難
小天体反射光の含水鉱物・水分子	可視・近赤外低分散分光	どちらでも可能	影響大	近赤外	EELTとの競合に難
小天体熱放射	中間赤外撮像・分光	どちらでも可能	影響小	中間・遠熱赤外	EELTとの競合に難
惑星の水循環・メタン起源の解明	中間赤外高分散分光	どちらでも可能	影響大	中間赤外	EELTとの競合に難
惑星大気循環	近赤外高分散分光	どちらでも可能	影響有	近赤外	EELTとの競合に難
惑星間塵と黄道光	近赤外・中間赤外低分散分光	どちらでも可能	影響有	近・中間赤外	EELTとの競合に難
系外惑星との関連	可視・近赤外線 分光モニター・可視偏光	どちらでも可能	影響有	近赤外	EELTとの競合に難

◆ 観測領域（南天・北天）の影響

- ◆ 近傍銀河や銀河系内天体の観測で、南・北それぞれにメリットがある。
- ◆ 多くの分野で南・北ともに天体があり、どちらでもよい。
- ◆ ELTが北半球にも欲しいというニーズは広範にある。
- ◆ その他の観点 ALMAと重なるの出る程度の緯度がのぞましい。

◆ 補償光学の性能

- ◆ 補償光学は広範なテーマで重要性が高い。
- ◆ 必要な性能は空間分解能、感度、コントラスト等、少しずつ異なる。
極限補償光学が必要なケース、中間赤外補償光学が必要なケースなども。

⇒それぞれサイトの影響の定量的な分析が必要。

◆ 標高の影響⇒赤外線 (>3um)、紫外線観測に強く影響

- ◆ 特に系内の星間物質・星惑星形成領域・恒星、太陽系内天体で影響大。
- ◆ 標高が低い場合に、中間赤外での優位性が落ちることから装置が搭載されないという判断が下されることへの懸念。

◆ 計画延伸の影響

- ◆ 影響大というテーマが多い。特にE-ELTとの競合への懸念が強い。
- ◆ スペースミッションとの連携についてはさらに検討必要。

◆ そのほかの観点

- ◆ (極限) 補償光学が早く実現すれば優位性あり。
- ◆ 高い標高に建設すれば中間赤外ではE-ELTの後でも優位性あり。