

精密分光観測で拓かれるサイエンス ～キューサー吸収線研究における新展開～

三澤 透
(信州大学)



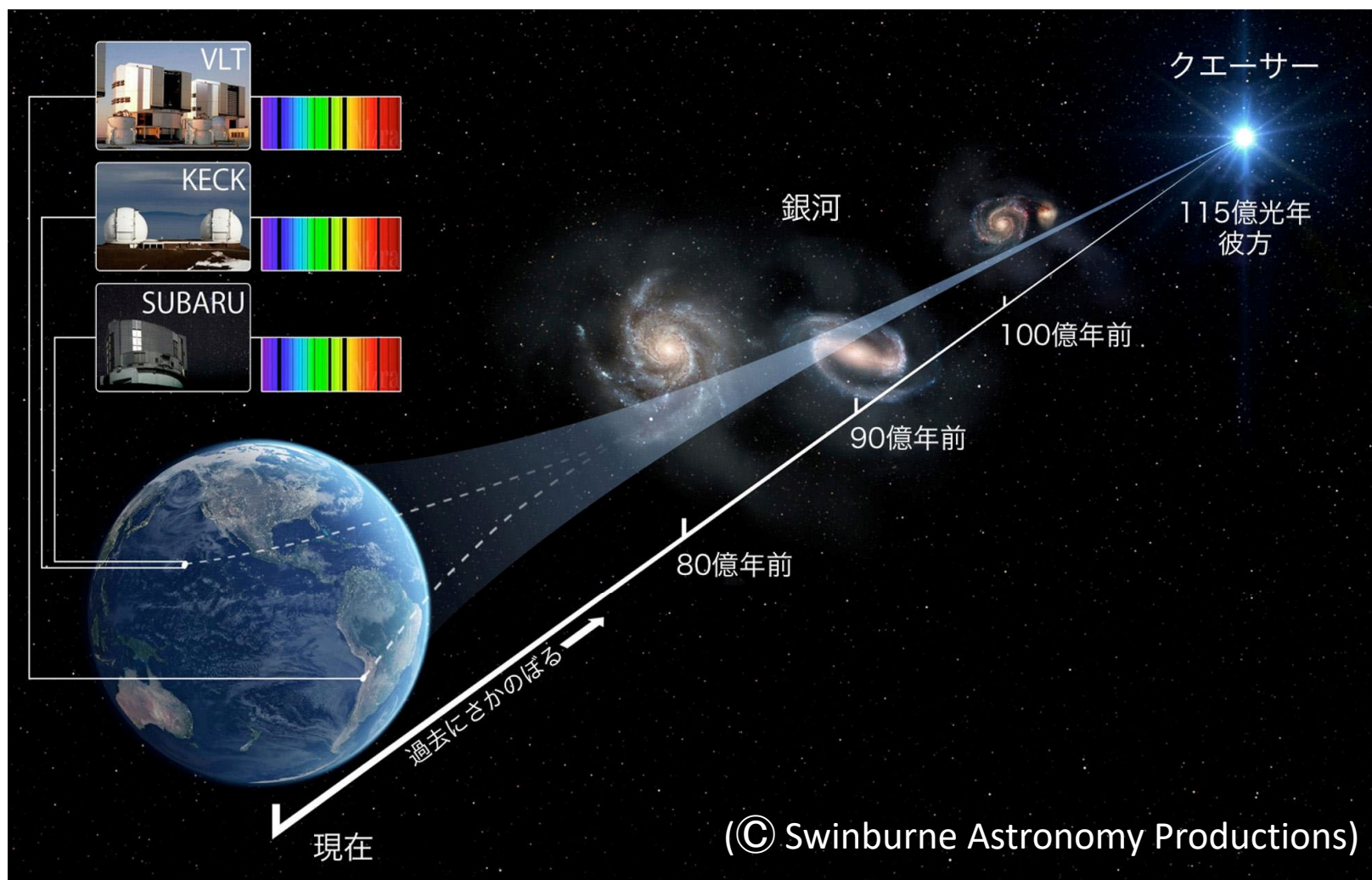
目次

- クエーサー吸収線研究の歴史と課題
- 高分散分光観測装置の将来計画
- 2030年代のサイエンス（QAL関連）
- まとめ

キューサー吸収線研究の歴史と課題

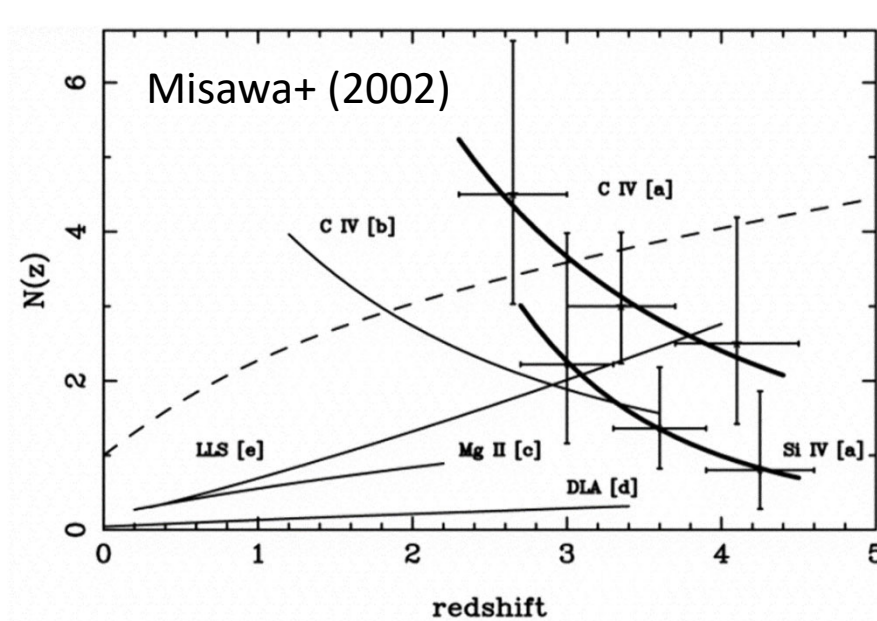
クエーサー吸収線 (QALs)

遠方クエーサーのスペクトルに見られる一連の吸収線。銀河、銀河間ガス、クエーサーアウトフローなど、視線上のあらゆる天体が吸収体となりうる



低分散分光観測（ $R \sim$ 数千）

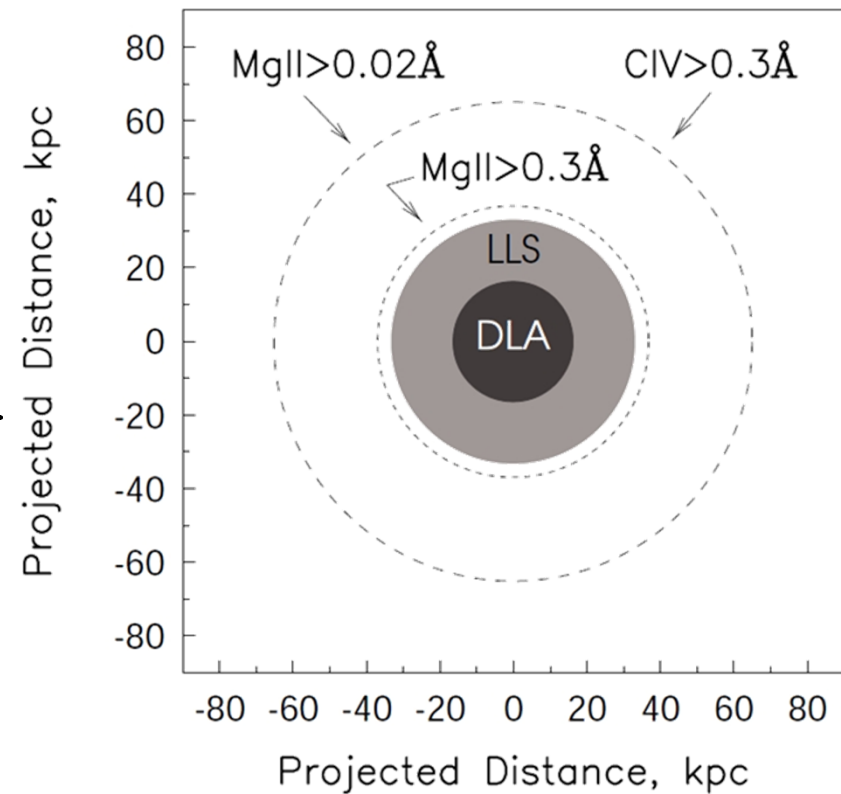
単位赤方偏移あたりの**吸収線検出率** (dN/dz) と銀河の光度関数を比較することで、一様内部分布を仮定したCGMサイズを推定することが可能 (e.g., Steidel 1990, Lanzetta+1995).



吸収体としての銀河

Schechter function $\times$ Holmberg radius

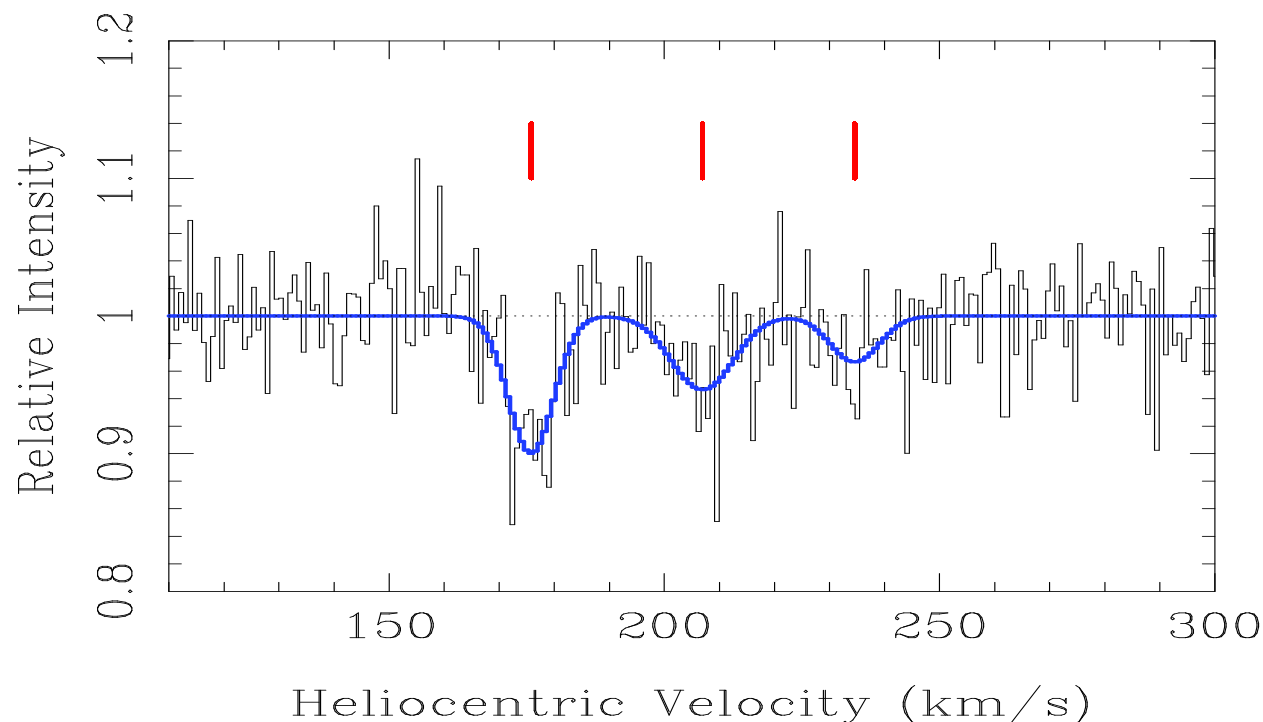
$$\phi_G = f(L) \quad R \propto L^{5/12}$$



Steidel (1993)

高分散分光観測（R～数万）

吸収線フィットにより、吸収体の赤方偏移(z_{abs}), 柱密度($\log N$), ドップラーパラメーター(b)などの吸収線パラメーターの定量評価が可能.



Voigt Profile (natural + Doppler broadening)

$$\tau(\lambda) = N \frac{\pi e^2}{m_e c} \frac{f \lambda_0^2}{c} \frac{1}{\sqrt{\pi} b^2} \frac{\gamma_i}{\pi} \int_{-\infty}^{+\infty} \frac{e^{-v^2/b^2} dv}{(\lambda - \lambda_0 - \lambda_0 v/c)^2 + \gamma_i^2}$$

クエーサー吸収線研究の課題

- 分光器の LSF と同程度の線幅を持つ吸収線がある
- 一部の吸収線が 非対称的なプロファイル を持つ
 - 吸収線が完全に分離・分解されていない
- AGNアウトフロー起源の吸収線の 視線速度 が変化しない
 - 波長校正の精度が足りていない
 - 長期的に安定した波長校正精度が維持されていない

次世代クエーサー吸収線研究において、

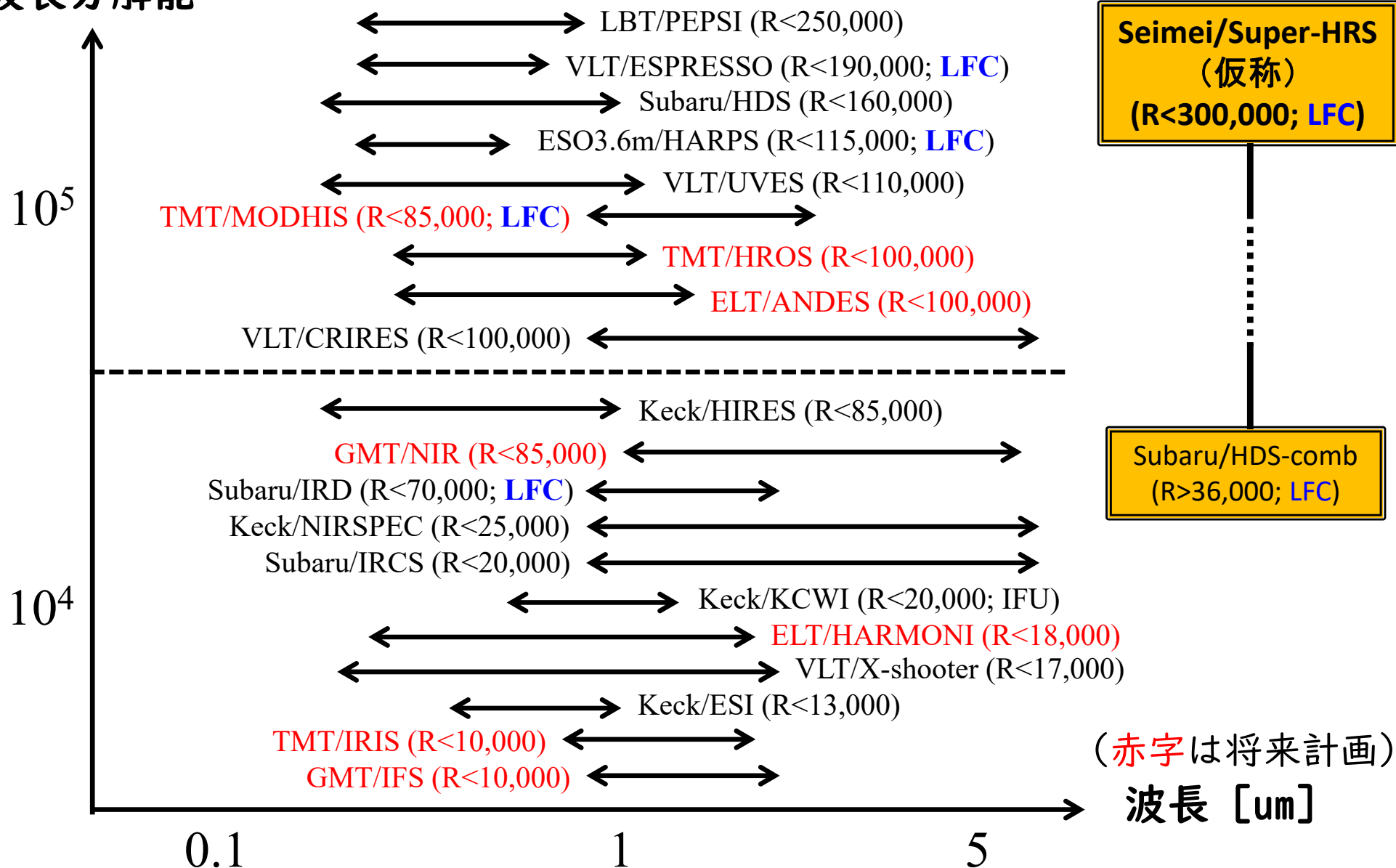
1. 超高波長分解能 (≥ 10 万)
2. 超精密波長測定精度 (≤ 1 km/s)
3. 超長期安定性 ($\geq$ 数年間)

を兼ね備えた高分散分光器が望まれる

高分散分光観測の現状と将来計画

高分散分光器の現状と将来計画

波長分解能



2030年代のQAL関係サイエンスの例

	IGM/CGM	AGN	galaxy	cosmology	others
超高分散	極低温ガスの検出		同位体による吸収線の分離		
精密波長測定 長期安定性		AGNアウトフローの加速減速の追跡		- 宇宙加速膨張の直接的検証 - 微細構造定数の変動	
超高S/N	原始ガスの検出		ホスト銀河探査(撮像)		遠方宇宙における有機物探査
大規模 サーベイ	- IGMトモグラフィ - 宇宙再電離		ホスト銀河探査(撮像)		
他波長	WHIM (X線)	AGNアウトフローの多波長観測 (X線~MIR)		遠方宇宙におけるCMB温度測定 (MIR)	

クエーサー吸収線を用いた 2030年代のサイエンス

テーマ ① 極低温ガスの検出

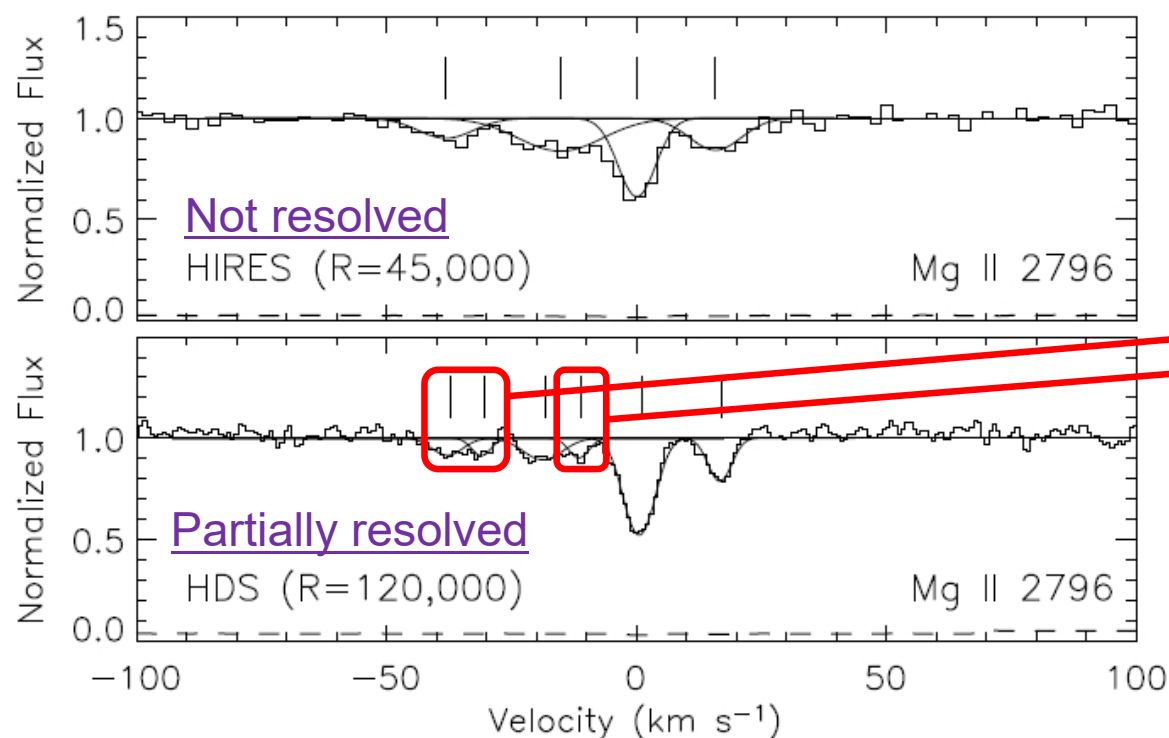
テーマ① 極低温ガスの検出

クエーサー吸収線で線幅 $< 1 \text{ km/s}$ の極低温ガスを捉える

$R \sim 1\text{-}3,000$ ($\sim 1990\text{s}$) : 吸収線の number count (dN/dz)

$R \sim 40\text{-}50,000$ (1990s $\sim$) : 吸収線の line parameters (z , N , b)

$R > 100,000$ (2000s $\sim$) : cold gas ($T < 1000 \text{ K}$)

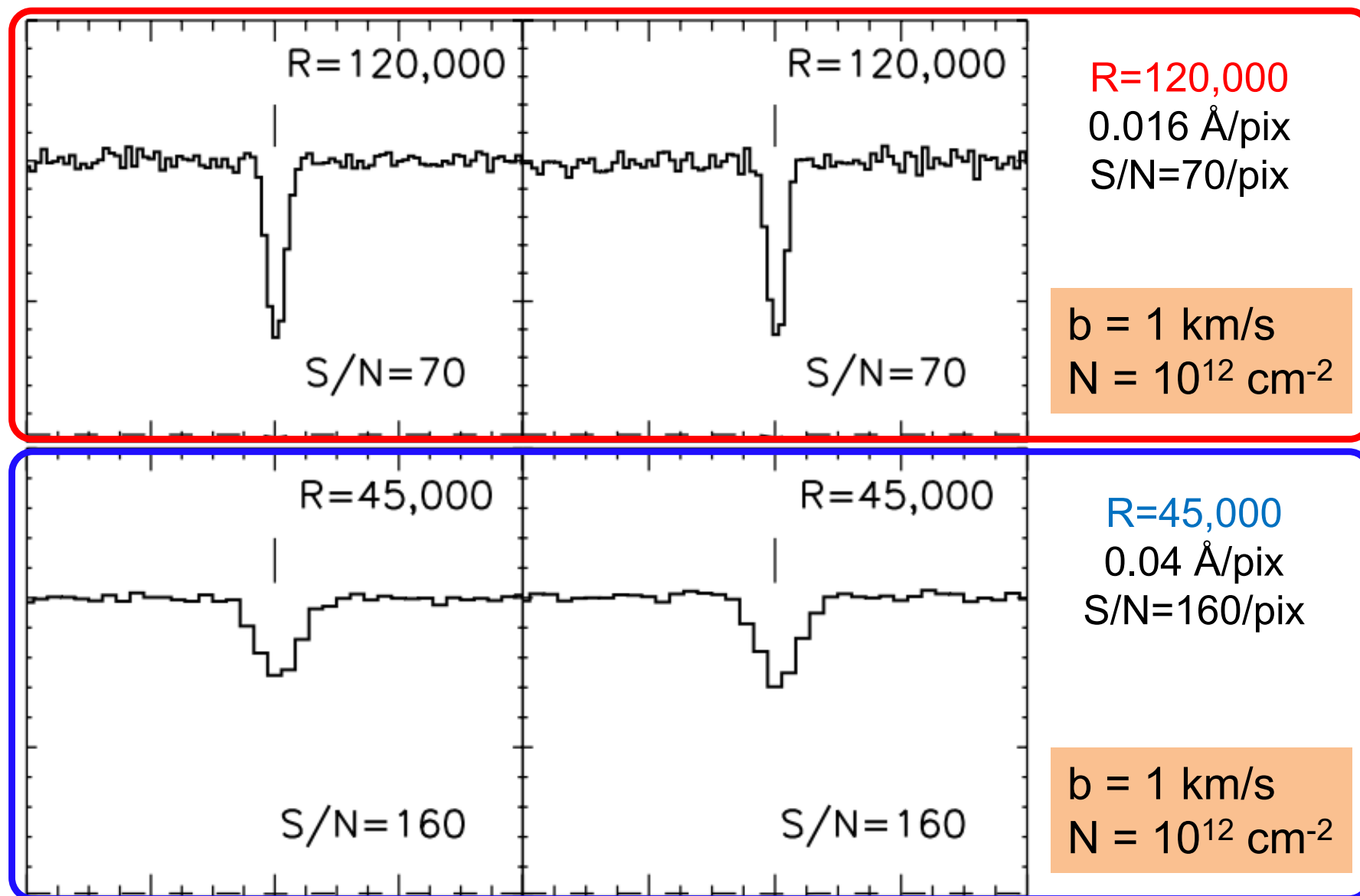


極低温ガスの存在

$b \sim 1 \text{ km/s}$
($T \sim 1500 \text{ K}$)

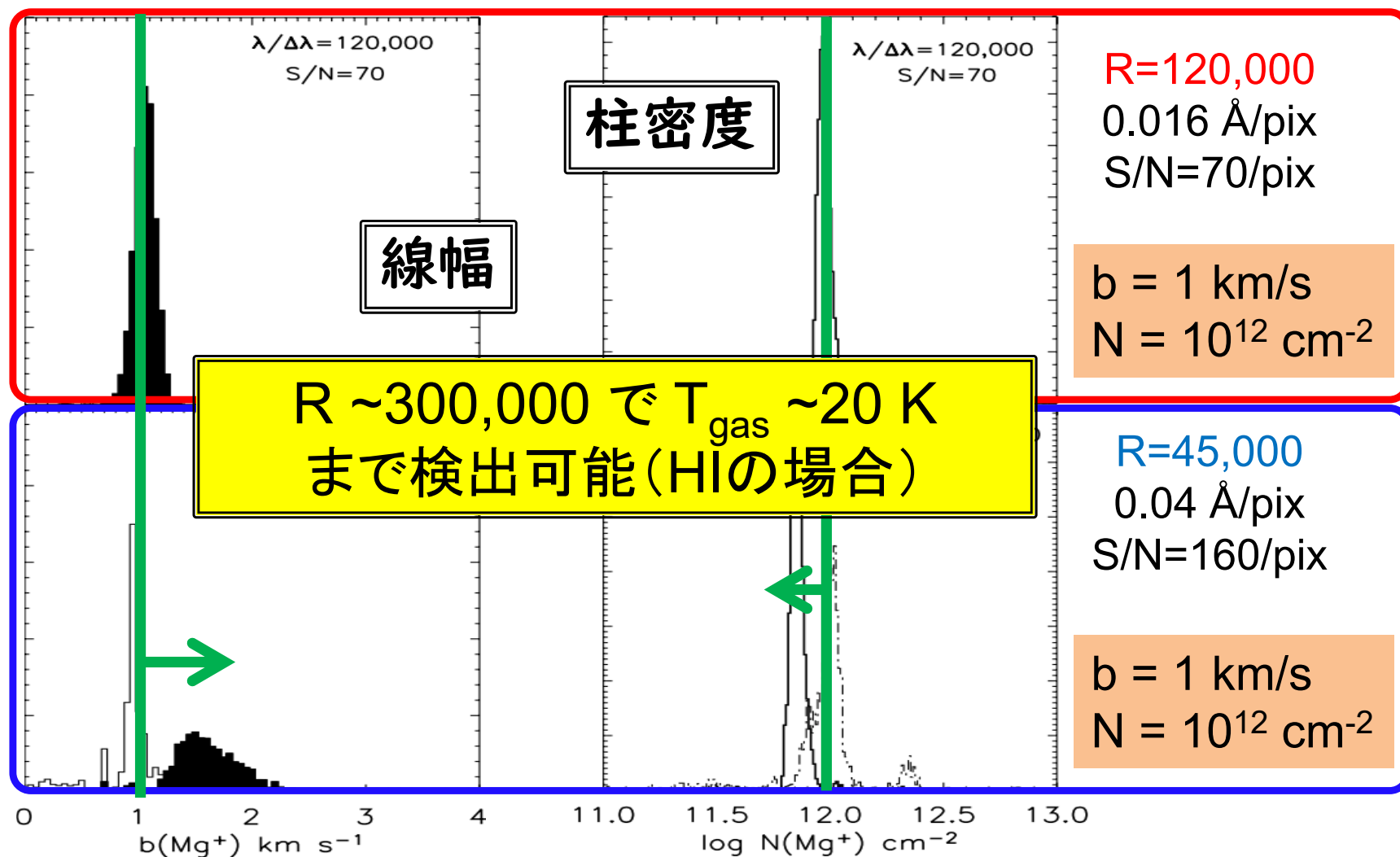
Narayanan et al. (2006)

R=120,000 vs. R=45,000



R=120,000 vs. R=45,000

波長分解能が不十分だと線幅を過大評価, 柱密度を過小評価する



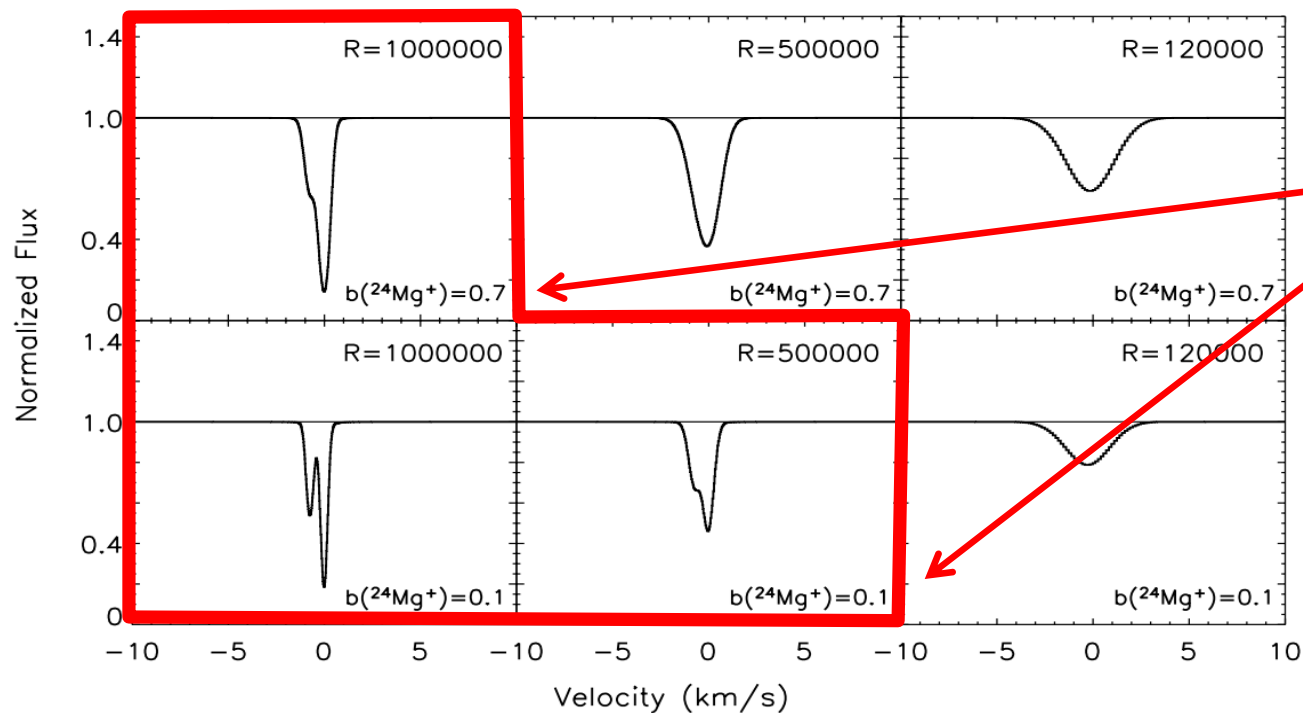
テーマ ② 同位体の検出

テーマ② 同位体の検出

超高分散分光によりMgII 吸収線を同位体に分離できる

同位体	起源	存在比*	波長 (対 ^{24}Mg)	速度 (対 ^{24}Mg)
^{24}Mg	大質量星	78.99 %	—	—
^{25}Mg	中間質量星	10.00 %	-0.0014 Å	-0.1500 km/s
			-0.0061 Å	-0.6540 km/s
^{26}Mg		11.01 %	-0.0080 Å	-0.8577 km/s

(* Solar abundance)

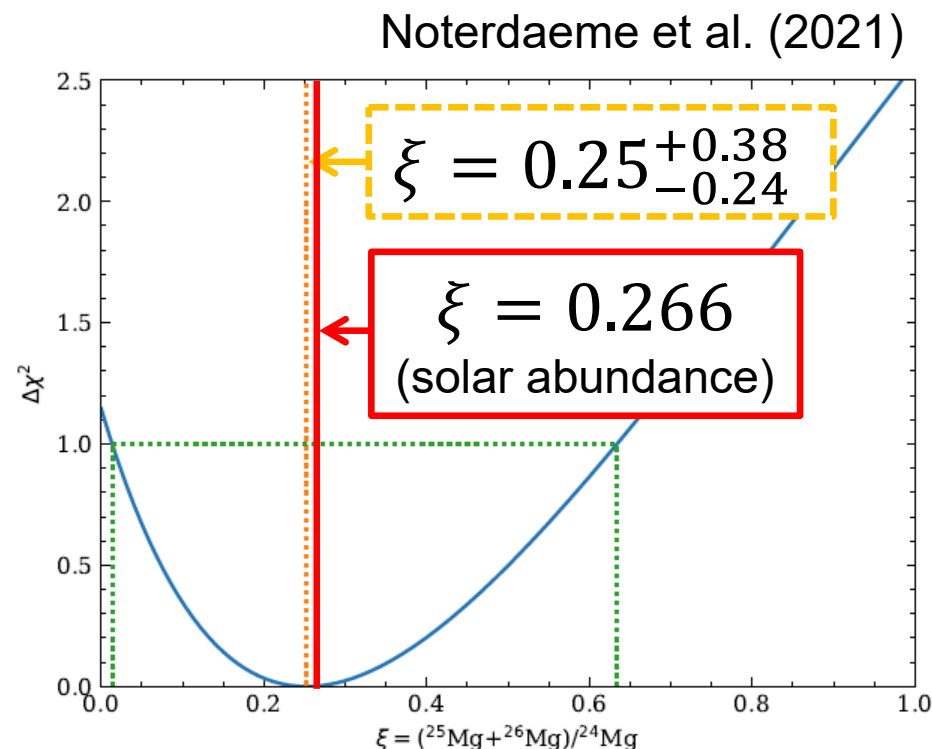
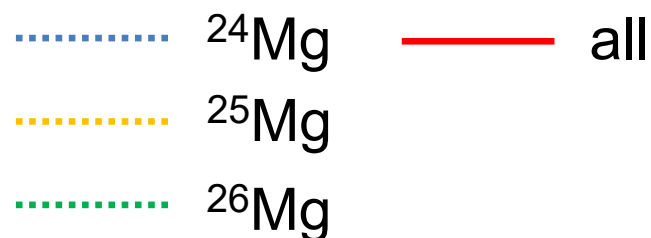
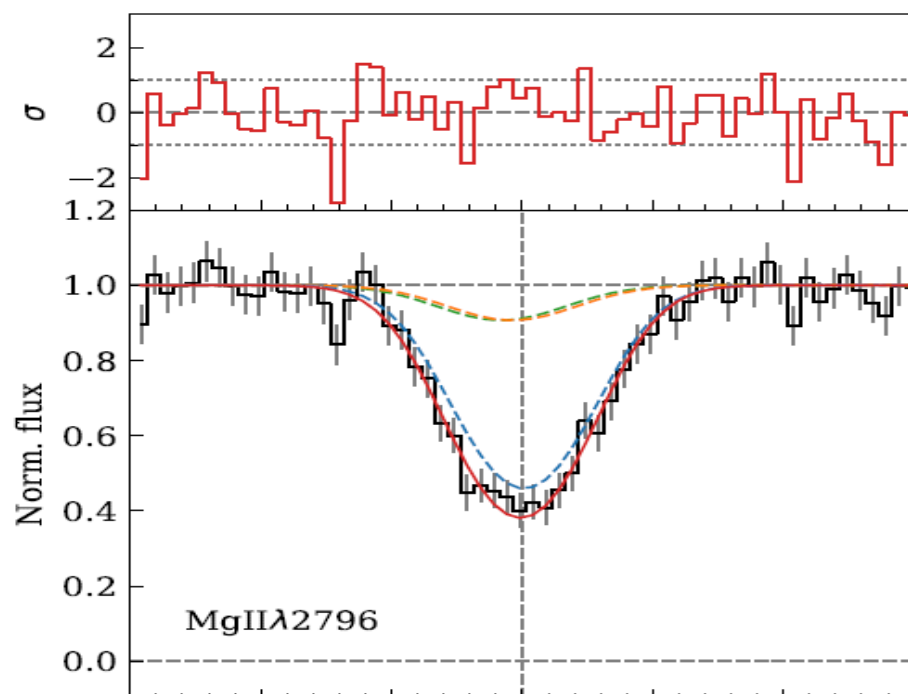


吸収線自身も
じゅうぶん細い
必要がある
($b < 0.7$ km/s,
 $T_{\text{gas}} < 700$ K)

Narayanan et al. (2006)

同位体比 $(^{25}\text{Mg}+^{26}\text{Mg})/^{24}\text{Mg}$ の評価

VLT/ESPRESSO による観測 (cold gas at $z\sim 0.45$, HE0001-2340)
($R\sim 139000$, $S/N\sim 25@379-525\text{nm}$, $\sim 45@525-788\text{nm}$)



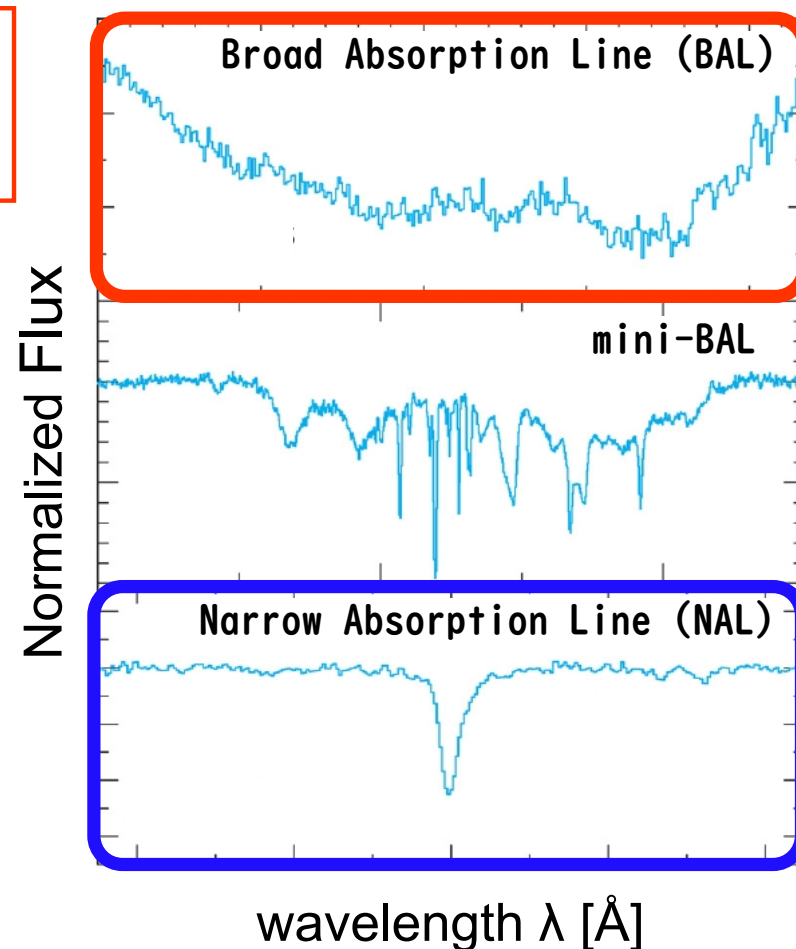
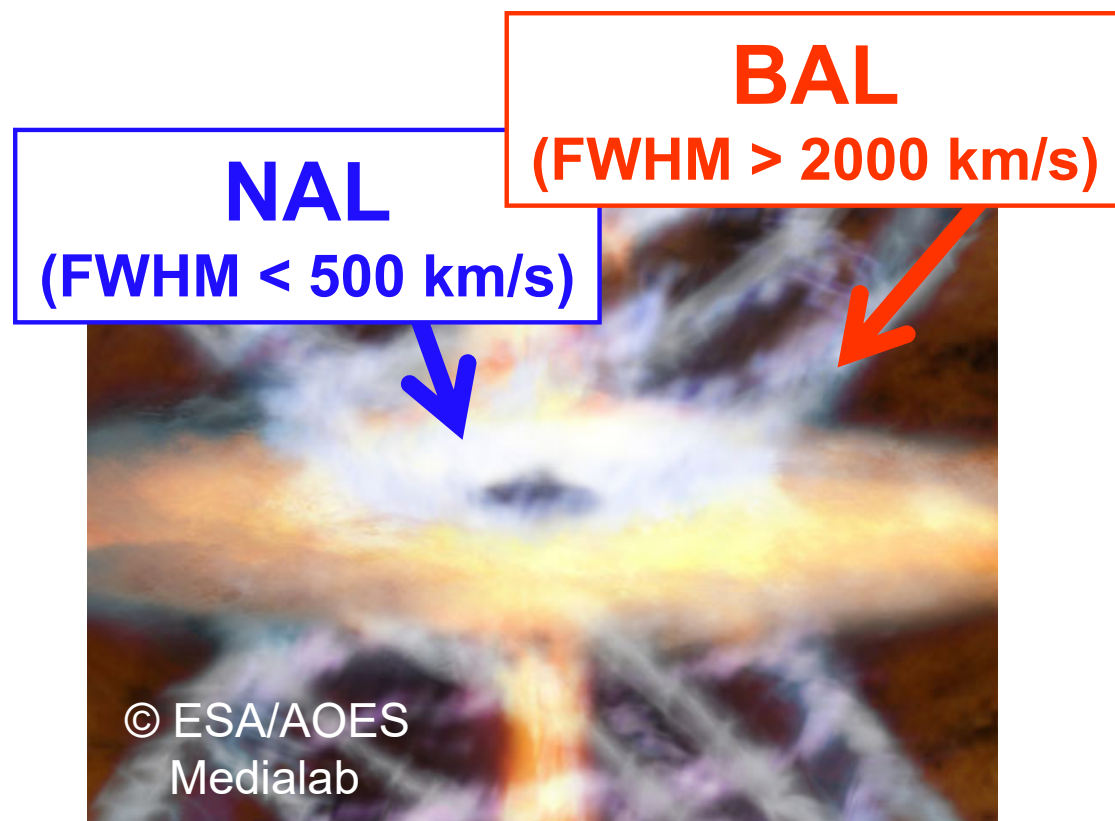
$$\xi = (^{25}\text{Mg} + ^{26}\text{Mg})/^{24}\text{Mg}$$

Solar abundance と無矛盾

テーマ ③
AGNアウトフローの加減速の追跡

テーマ③ AGNアウトフローの加減速の追跡

クエーサー降着円盤から噴き出すガス流 (AGN outflow) による紫外吸収線の速度変化 (加速・減速傾向) を直接捉える

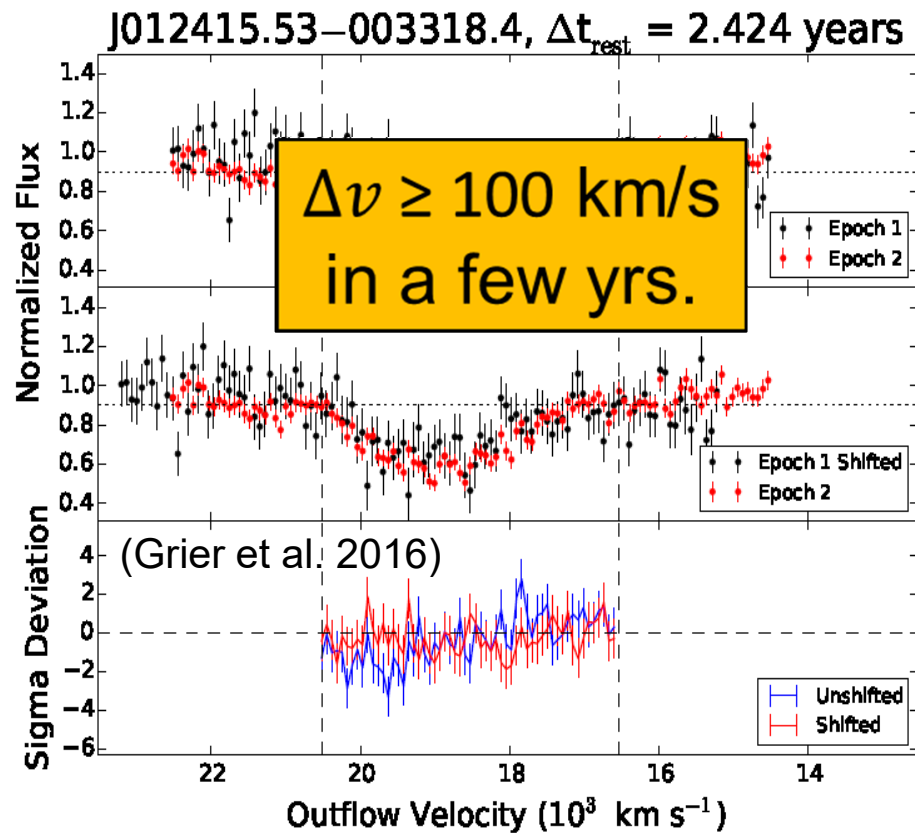


いずれも輻射圧で加速されている

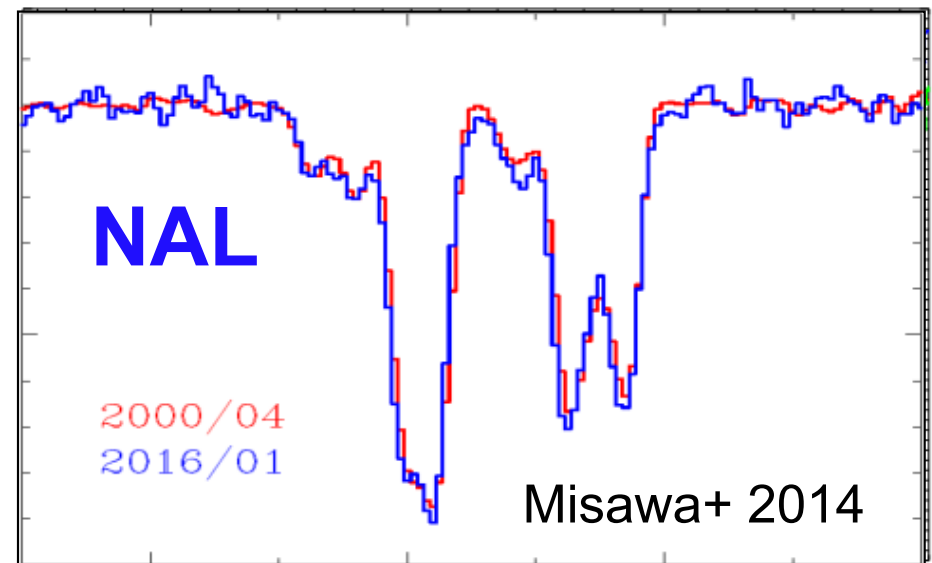
NAL ~~BAL~~の速度変化調査

21/34

AGN outflow の速度変化が検出されたのはBALに対する数例のみ
(e.g., Joshi et al. 2014, Grier et al. 2016, Ye et al. 2024).



NALは微小な速度変化に敏感

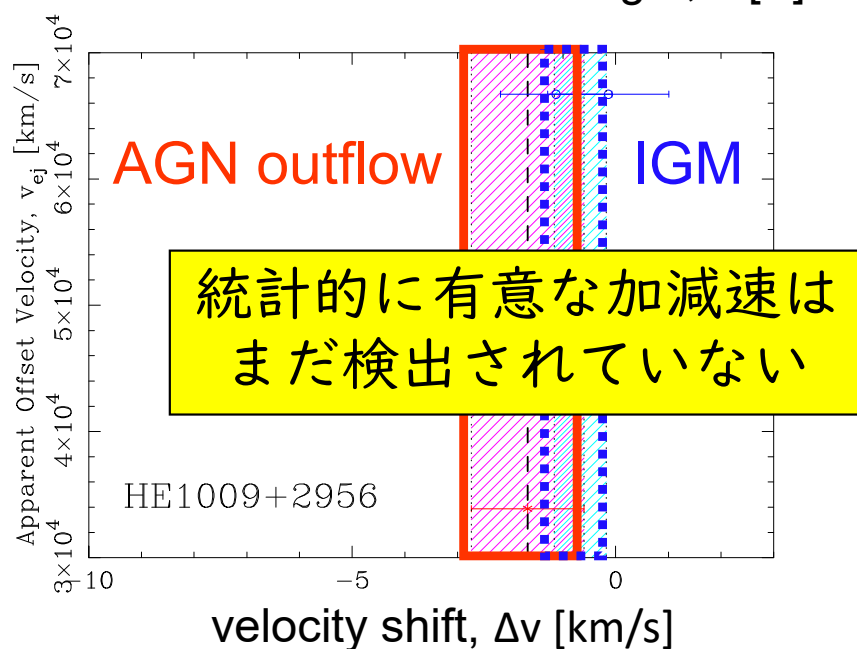
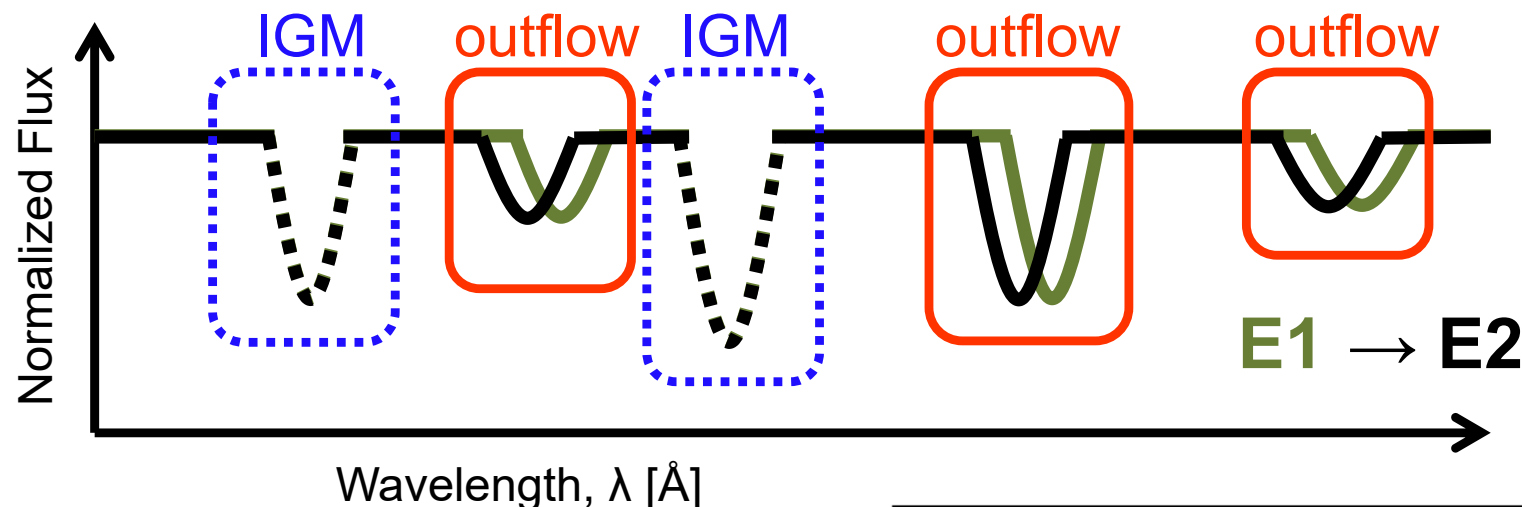


BALの速度変化は吸収線の形状変化による影響を排除できない

銀河間ガス(IGM)による吸収線との比較

22/34

波長校正に由来する系統誤差を取り除くため、IGM吸収線との相対的な位置の変化をモニターする必要がある



Quasar	$\Delta v_{outflow} - \Delta v_{IGM}$ (km s ⁻¹)
HE 0130-4021	-0.54 ± 1.02
Q0450-1310	+0.40 ± 0.54
HE 0007-4834	± 0.72
HE 0007-4834	± 1.18
Q1107+4847	-2.16 ± 1.69
HS 1700+6416	+1.06 ± 0.79

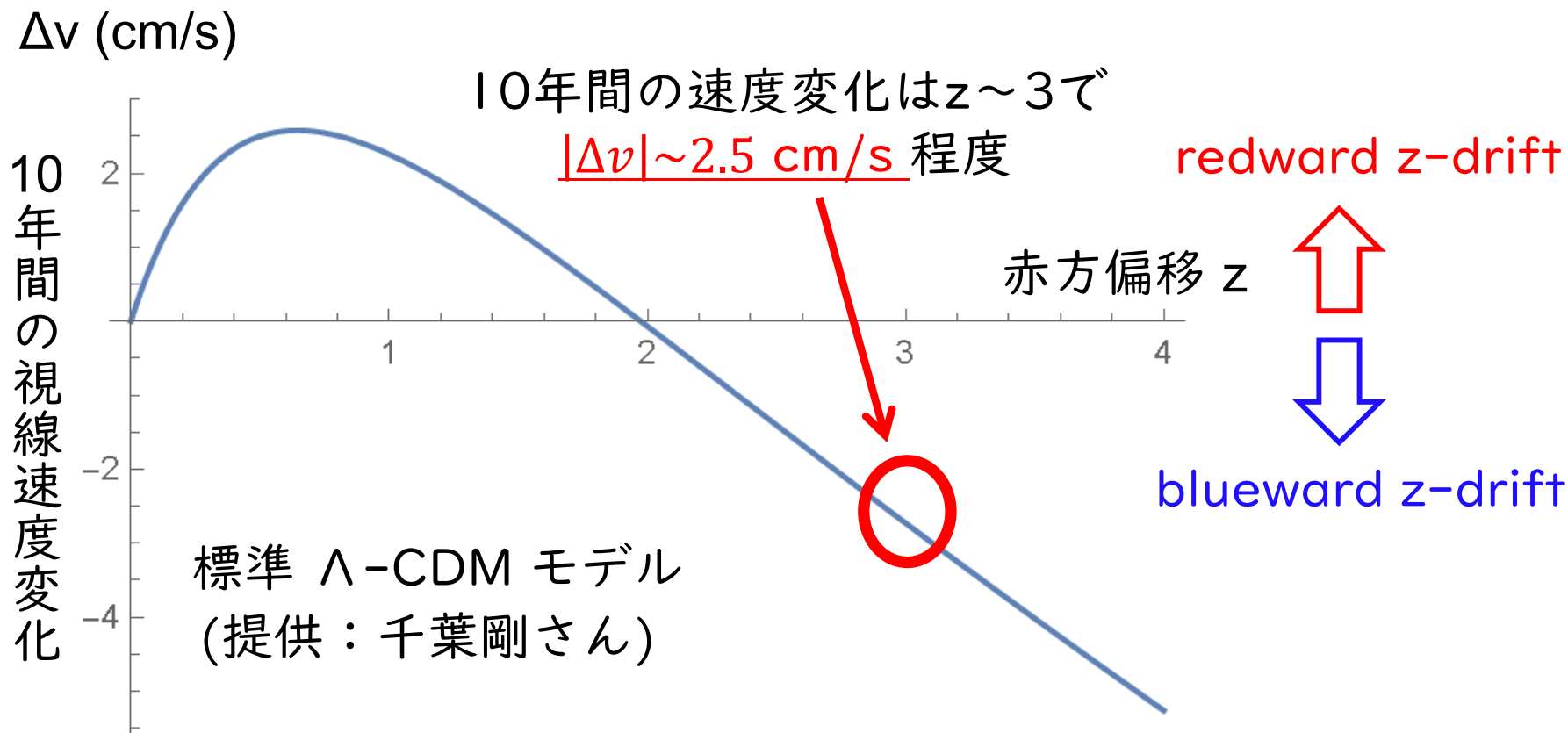
$\sigma(\Delta v) \sim 1 \text{ km/s}$

Misawa+ 2019

テーマ ④
宇宙加速膨張の直接的検証

テーマ④ 宇宙加速膨張の直接的検証

クエーサー吸収線で宇宙の加速膨張を直接捉える



Sandage-Loeb test
 (redshift drift)

$$\Delta v \equiv \frac{c\Delta z}{1+z} = cH_0\Delta t \left[1 - \frac{H(z)/H_0}{1+z} \right]$$

何をどうやって観測すればよい？

【観測対象】 (Liske et al. 2008)

- ハッブル・フローを再現する (in shallow potential)
- 吸収線の線幅がそこそこ小さい (e.g., $b \sim 20\text{-}30 \text{ km/s}$)
- 吸収線の数が多い (especially at higher z)
- 観測対象が明るい (e.g., $m < 16.5$)
- 幅広い赤方偏移領域に分布

⇒ **Ly α forest** が理想的なターゲット

【観測装置】 (Liske et al. 2006)

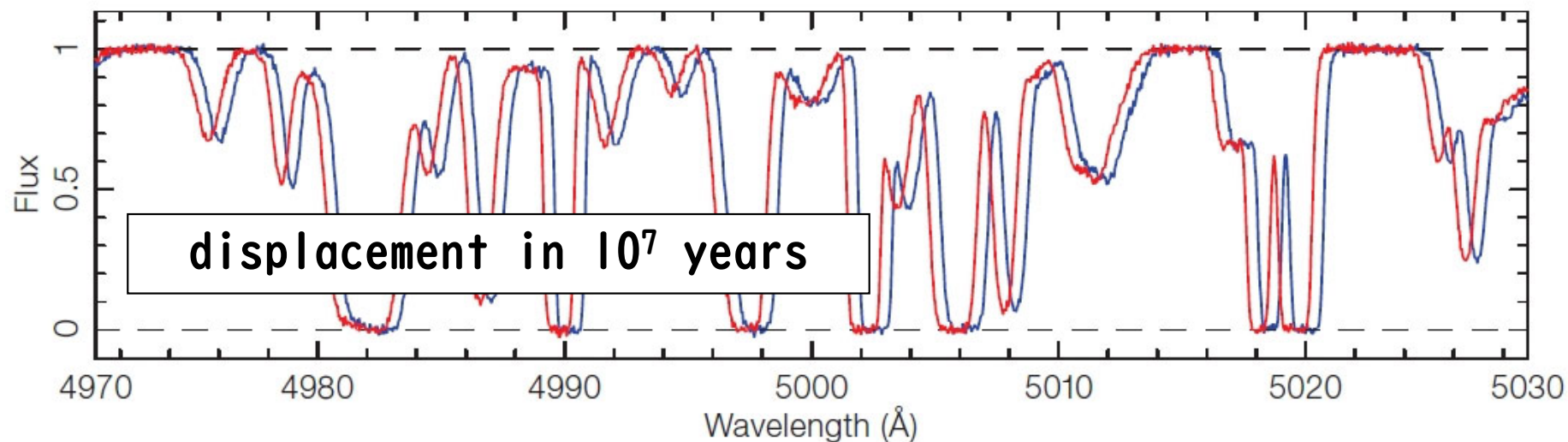
- 波長分解能が高い ($R > 30,000$ であれば Ly α は分解可能)
- 波長領域が広い (e.g., $\lambda = 4000\text{-}6800\text{\AA}$ for $z_{\text{abs}} = 2.3\text{-}4.6$)
- 高効率 (c.f., HDS $\sim 10\%$, IRD $\sim 3\%$, UVES $\sim 10\%$)
- 安定性 (高い波長校正精度, 数十年に渡る長期安定性)

⇒ 既存の高分散分光器の性能 + 高い安定性 (LFC)

Lya forest

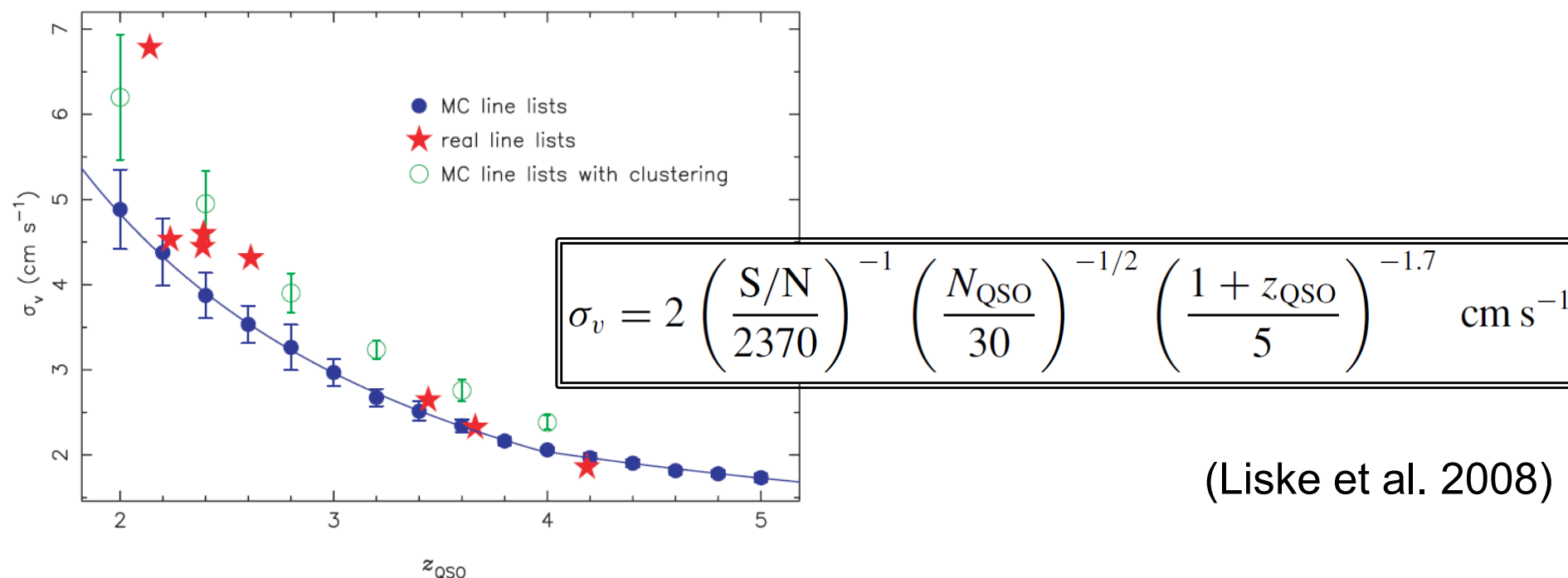
重力ポテンシャルの小さい (Cosmic flow の影響を受けやすい)
銀河間物質 (IGM) にある中性水素 HI ガスによる吸収線
小さな波長シフトを測定するための最も有望なターゲット

Pasquini et al. (2005)



- ~ 100 Ly α forest per unit redshift with $\log N_{\text{HI}} > 13$
- $N_{\text{line}} \propto (1+z)^{2.2}$ (Kim et al. 2001)
- z-pathlength between Lyb and Ly α is $\Delta z = 0.156(1+z_{\text{em}})$ (Liske+ 2008)

測定誤差の見積もり



- ignoring systematic errors (i.e., perfect wavelength calib.)
- performing Monte Carlo simulations
- $R > 30,000$, $\Delta\lambda = 0.0125 \text{ \AA/pixel}$
- same S/N for all quasar spectra
- using spectra between Ly β and Ly α

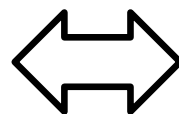
$\Rightarrow$ S/N ~ 13000 in total is necessary for $\sigma_v \sim 2 \text{ cm/s}$

テーマ ⑤
微細構造定数の変動検証

テーマ⑤ 微細構造定数の変動検証

基礎物理定数（万有引力定数 G , 真空中の光速 c , 素電荷 e , プランク定数 h など）は本当に全宇宙で不変か？

現代物理学は、これらの物理量は空間や時間に関係なく一定であるという仮定に基づいている



大統一理論（GUT）、超対称理論（SUSY）、超弦理論などの最新の物理理論は、これらの物理量の変化を許容している

微細構造定数 α :

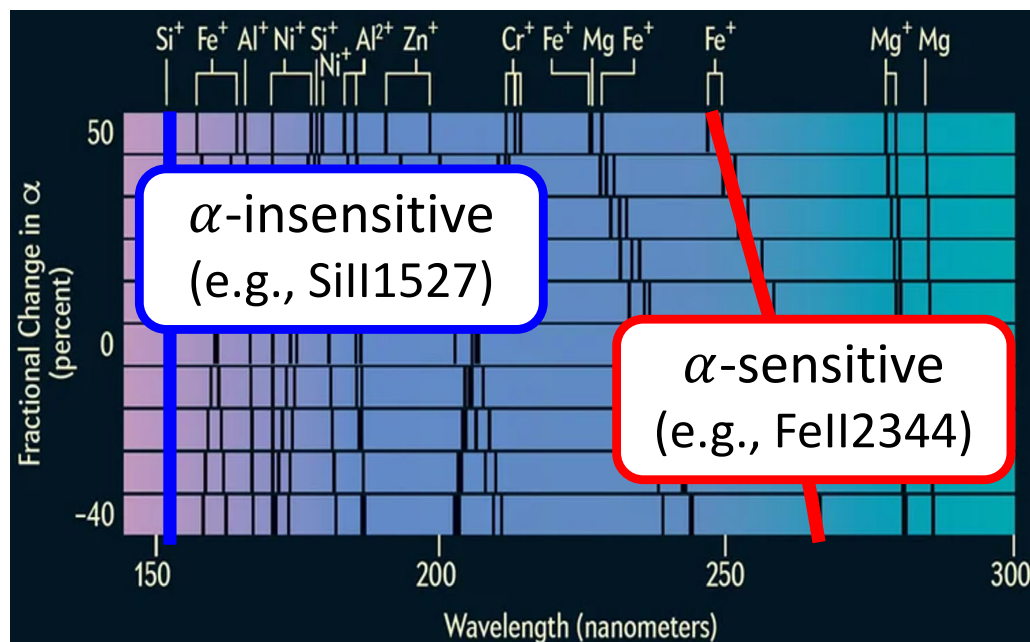
荷電粒子間の電磁相互作用の強さを定量化する基本的な物理定数。 α の変化は遷移波長のシフトとして測定される。

$$\alpha = \frac{1}{4\pi\epsilon_0} \frac{e^2}{\hbar c} \sim \frac{1}{137}$$

クエーサー吸収線を用いた検証方法

微細構造の変動 $\Delta\alpha/\alpha$ に対する波数 ω ($\equiv 1/\lambda$; 波長の逆数) の依存性は、個々の吸収線に対応する q -value に依存する
 → 複数の吸収線を同時に検出して比較するのが効果的

$$\omega_{\alpha} = \omega_0 + 2q \frac{\Delta\alpha}{\alpha}$$



(Credit: Alison Kendall; John K. Webb)

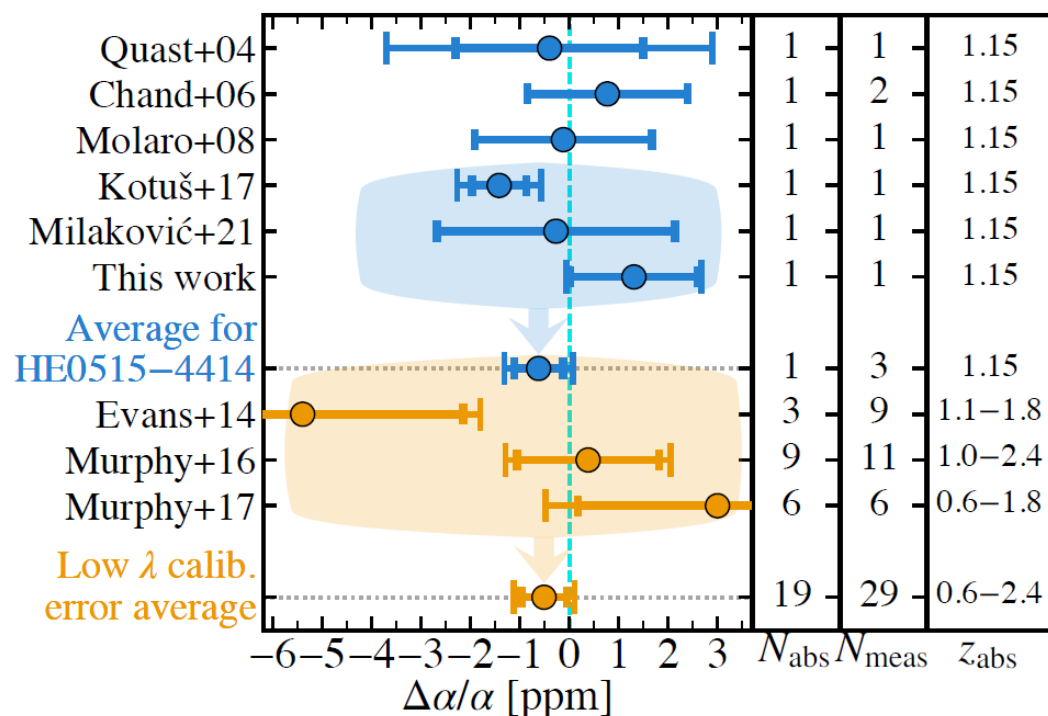
遷移名	q -value (cm^{-1})	引用
Fe II 1608	-1030 ± 300	Dzuba et al. (2002)
Fe II 1611	1560 ± 500	Dzuba et al. (2002)
Ni II 1710	-20 ± 250	Porsev et al. (2007)
Ni II 1742	-1400 ± 250	Porsev et al. (2007)
Ni II 1752	-700 ± 250	Porsev et al. (2007)
Si II 1808	520 ± 30	Porsev et al. (2007)
Al III 1855	458 ± 2	Dzuba & Flambaum (2009)
Al III 1863	224 ± 1	Dzuba & Flambaum (2009)
Si II 1527	50 ± 30	Porsev et al. (2007)
Zn II 2026	2488 ± 25	Savukov & Dzuba (2008)
Zn II 2063	1585 ± 25	Savukov & Dzuba (2008)
Cr II 2056	-1030 ± 150	Porsev et al. (2007)
Cr II 2062	-1168 ± 150	Porsev et al. (2007)
Cr II 2066	-1360 ± 150	Porsev et al. (2007)
Fe II 2344	1540 ± 400	Dzuba et al. (2002)

(LEE, 修士論文 2024)

測定精度の向上が課題

現在の測定精度は $\Delta\alpha/\alpha \sim 10^{-6}$ レベル。今後は $\sim 10^{-7}$ レベルの観測データを大量に確保し、統計処理を経て $\Delta\alpha/\alpha \sim 10^{-7}$ レベルを目指す。

(Murphy et al. 2022)



VLT/ESPRESSO の結果 (HE0515-4414) と
先行研究 (橙色) を統計的に統合した結果：

$$\Delta\alpha/\alpha = -0.5 \pm 0.5_{\text{stat}} \pm 0.4_{\text{sys}} \text{ ppm}$$

必要な波長校正精度

$$\frac{\Delta\nu}{c} = \frac{\Delta\lambda}{\lambda} \sim 2q\lambda \frac{\Delta\alpha}{\alpha}$$

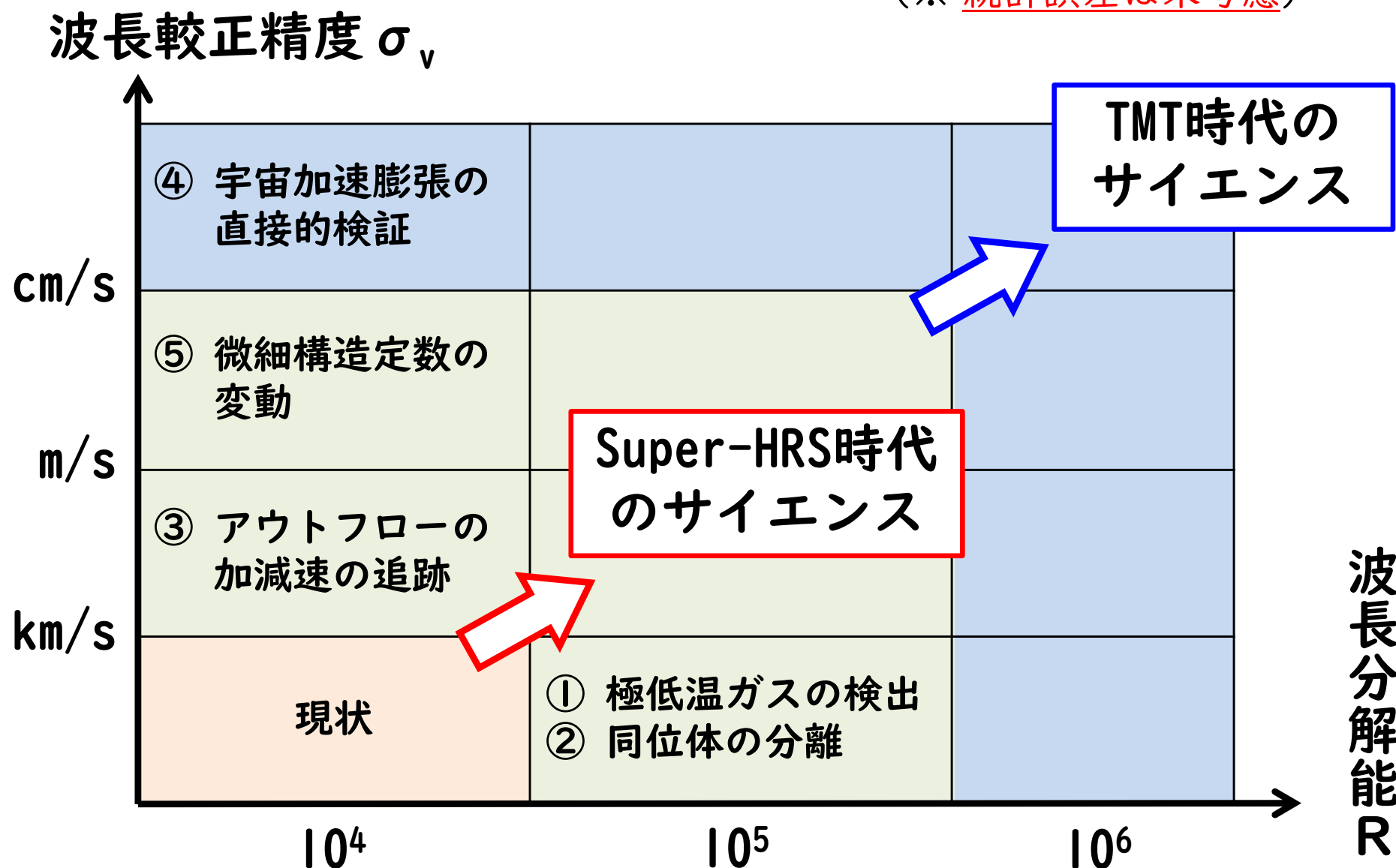
$\sim 12 \text{ m/s}$

$$\left[\begin{array}{l} \Delta\alpha/\alpha = 10^{-6} \\ q = 1,000 \text{ cm}^{-1} \\ \lambda = 2,000 \text{ \AA} \\ \text{(典型的な値を仮定)} \end{array} \right]$$

まとめ

2030年代のQAL関連サイエンスの展望

(※ 統計誤差は未考慮)



まとめ

- クエーサー吸収線研究の歴史, 現状, 課題
- 次世代超精密分光器に期待すること
 - 超高波長分解能 (≥ 10 万)
 - 超精密波長測定精度 (≤ 1 km/s)
 - 超長期安定性 ($\geq$ 数年間)
- 2030年代のQAL関連のサイエンス
 - テーマ① 極低温ガスの検出
 - テーマ② 同位体の検出
 - テーマ③ AGNアウトフローの加減速の追跡
 - テーマ④ 宇宙観測膨張の直接的検証
 - テーマ⑤ 微細構造定数の変動検証