

Detecting the blah blah blah

Prepared for:

Daniel Jacobs, Adam Beardsley, & Judd Bowman

Arizona State University

School of Earth and Space Exploration

Prepared By:

Tyler Cox

Arizona State University

School of Earth and Space Exploration

Astrophysics Senior Thesis

December 10th 2019

Abstract

The Subaru Strategic Exploration of Exoplanets and Disks (SEEDS) collaboration is conducting high-contrast observations of exoplanets and disks using the 188 actuator AO system (AO188), classical Lyot coronagraph, and near infrared differential imaging science camera (HiCIAO) on the Subaru Telescope. This work supports the SEEDS project by conducting an analysis of the importance of field rotation for observations acquired in angular differential mode (ADI). ADI suppresses optical speckle features by fixing the telescope point spread function (PSF) with respect to the science camera detector, while allowing the field with any companions to rotate freely. In post processing, the sequence of images are registered and combined to produce a reference PSF that is subtracted from each image. The final images are de-rotated to realign the field with a fixed position angle. We find that increasing field rotation does influence sensitivity and that doubling the amount of field rotation in an observation can reduce the minimum angular separation at which companions can be detected by $0.1''$ and increase the sensitivity of an observation by factors of 2–4 at separations of $0.2''$ – $0.4''$. These results emphasize the importance of conducting ADI observations during transit when the rotation rate of the target is maximized.

Contents

I. Contents	ii
II. List of Figures	iii
1 Introduction	1
1.1 The Early Universe	1
1.2 The Epoch of Reionization	1
1.3 Intensity Mapping Experiments	1
1.3.1 The Hydrogen Epoch of Reionization Array	1
1.3.2 SPHEREx	3
2. Modeling the Intergalactic Medium	5
2.1. 21cm Fluctuations	5
2.2. Ly α Emission	8
2.2.1 Galactic	9
2.2.2 Diffuse	11
2.2.3 Scattered	12
3. Cross-Correlation Studies	14
3.1. Cross-Power Spectrum	14
3.2. Observational Uncertainties	14
3.3. Foreground Contamination	14
4. Conclusions	14
References	15
Appendix	18

List of Figures

1.	Epoch of Reionization Timeline	2
2.	Epoch of Reionization Timeline	2
3.	HERA Layout	4
4.	HERA Field of View	4
5.	SPHEREx	6
6.	Resolution and redshift of intensity mapping experiments	7

Acknowledgements

First and foremost, I would like to thank my research advisors, Adam Beardsley and Danny Jacobs.

I would also like to thank my second committee member, Judd Bowman.

I would also like to thank my friends and colleagues, who's endless encouragement and blah helped to. In particular, I would like to thank Shane Bechtel, Lily Whitler.

Most importantly, none of this could have been done without the love and support of my family. To my sister, thank you for keeping me humble. To my Mom and Dad, thank you for all you've done.

1 Introduction

1.1 The Early Universe

Immediately following the Big Bang, the Universe was primarily composed of a hot plasma of fundamental particles. In its early state, it was much too hot and dense to form the atoms that form the complex structures the astronomers observe today. Photons that were emitted during this early period scattered off free particles, leaving the Universe opaque to electromagnetic radiation. This lasted until roughly 400,000 years after the Big Bang, at which time the Universe had expanded and cooled sufficiently for electrons to bind to atomic nuclei forming the first atoms of Hydrogen and Helium. Once formed, photons were able to freely propagate through the intergalactic medium (IGM) as cosmic microwave background radiation.

The Cosmic Microwave Background (CMB)

Much of the history of the Universe after ~ 1 billion years the Big Bang is observable as well. Optical and infrared observatories such as those done with the Hubble Space Telescope (HST) allows astronomers to regularly observe redshift galaxies out to $z \sim 4$ and has even observed a few objects at $z > 7$. While some objects have been observed at high redshifts, little is

1.2 The Epoch of Reionization

1.3 Intensity Mapping Experiments

1.3.1 The Hydrogen Epoch of Reionization Array

Nam dui ligula, fringilla a, euismod sodales, sollicitudin vel, wisi. Morbi auctor lorem non justo. Nam lacus libero, pretium at, lobortis vitae, ultricies et, tellus. Donec aliquet, tortor sed accumsan bibendum, erat ligula aliquet magna, vitae ornare odio metus a mi. Morbi ac orci et nisl hendrerit mollis. Suspendisse ut massa. Cras nec ante. Pellentesque a nulla. Cum sociis natoque penatibus et magnis dis parturient montes, nascetur ridiculus

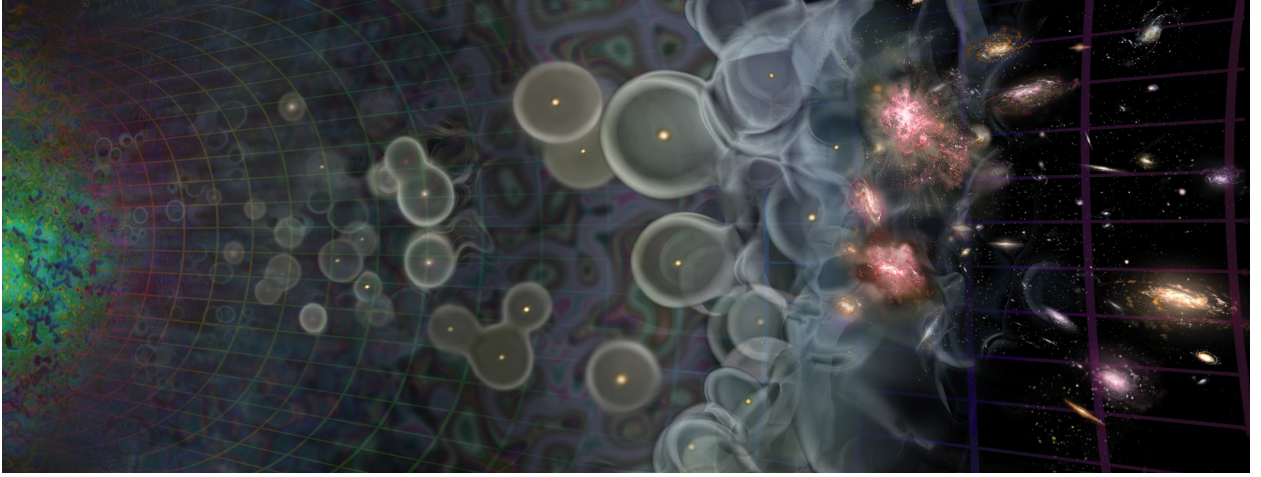


Figure 1. Timeline of the history of the Universe. To the left, is the CMB. To the right, are the stars and galaxies that exist today.

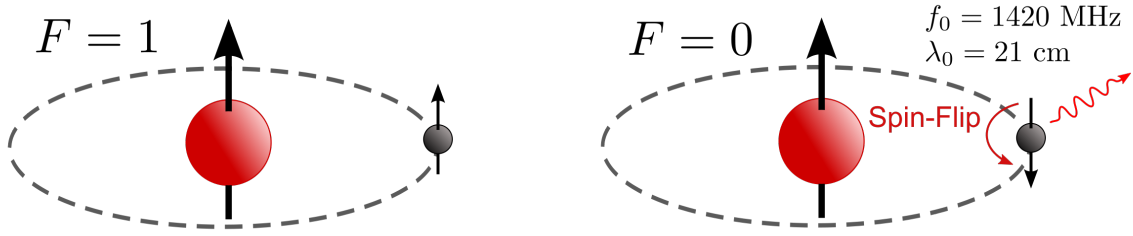


Figure 2. Depiction of the spin flip energy transition of neutral hydrogen

mus. Aliquam tincidunt urna. Nulla ullamcorper vestibulum turpis. Pellentesque cursus luctus mauris.

Nulla malesuada porttitor diam. Donec felis erat, congue non, volutpat at, tincidunt tristique, libero. Vivamus viverra fermentum felis. Donec nonummy pellentesque ante. Phasellus adipiscing semper elit. Proin fermentum massa ac quam. Sed diam turpis, molestie vitae, placerat a, molestie nec, leo. Maecenas lacinia. Nam ipsum ligula, eleifend at, accumsan nec, suscipit a, ipsum. Morbi blandit ligula feugiat magna. Nunc eleifend consequat lorem. Sed lacinia nulla vitae enim. Pellentesque tincidunt purus vel magna. Integer non enim. Praesent euismod nunc eu purus. Donec bibendum quam in tellus. Nullam cursus pulvinar lectus. Donec et mi. Nam vulputate metus eu enim. Vestibulum pellentesque felis eu massa.

Quisque ullamcorper placerat ipsum. Cras nibh. Morbi vel justo vitae lacus tincidunt ultrices. Lorem ipsum dolor sit amet, consectetur adipiscing elit. In hac habitasse platea dictumst. Integer tempus convallis augue. Etiam facilisis. Nunc elementum fermentum wisi. Aenean placerat. Ut imperdiet, enim sed gravida sollicitudin, felis odio placerat quam, ac pulvinar elit purus eget enim. Nunc vitae tortor. Proin tempus nibh sit amet nisl. Vivamus quis tortor vitae risus porta vehicula.

Fusce mauris. Vestibulum luctus nibh at lectus. Sed bibendum, nulla a faucibus semper, leo velit ultricies tellus, ac venenatis arcu wisi vel nisl. Vestibulum diam. Aliquam pellentesque, augue quis sagittis posuere, turpis lacus congue quam, in hendrerit risus eros eget felis. Maecenas eget erat in sapien mattis porttitor. Vestibulum porttitor. Nulla facilisi. Sed a turpis eu lacus commodo facilisis. Morbi fringilla, wisi in dignissim interdum, justo lectus sagittis dui, et vehicula libero dui cursus dui. Mauris tempor ligula sed lacus. Duis cursus enim ut augue. Cras ac magna. Cras nulla. Nulla egestas. Curabitur a leo. Quisque egestas wisi eget nunc. Nam feugiat lacus vel est. Curabitur consectetur.

Suspendisse vel felis. Ut lorem lorem, interdum eu, tincidunt sit amet, laoreet vitae, arcu. Aenean faucibus pede eu ante. Praesent enim elit, rutrum at, molestie non, nonummy vel, nisl. Ut lectus eros, malesuada sit amet, fermentum eu, sodales cursus, magna. Donec eu purus. Quisque vehicula, urna sed ultricies auctor, pede lorem egestas dui, et convallis elit erat sed nulla. Donec luctus. Curabitur et nunc. Aliquam dolor odio, commodo pretium, ultricies non, pharetra in, velit. Integer arcu est, nonummy in, fermentum faucibus, egestas vel, odio.

1.3.2 SPHEREx

SPHEREx looks at things!

Nam dui ligula, fringilla a, euismod sodales, sollicitudin vel, wisi. Morbi auctor lorem non justo. Nam lacus libero, pretium at, lobortis vitae, ultricies et, tellus. Donec aliquet, tortor sed accumsan bibendum, erat ligula aliquet magna, vitae ornare odio metus a mi. Morbi ac orci et nisl hendrerit mollis. Suspendisse ut massa. Cras nec ante. Pellentesque

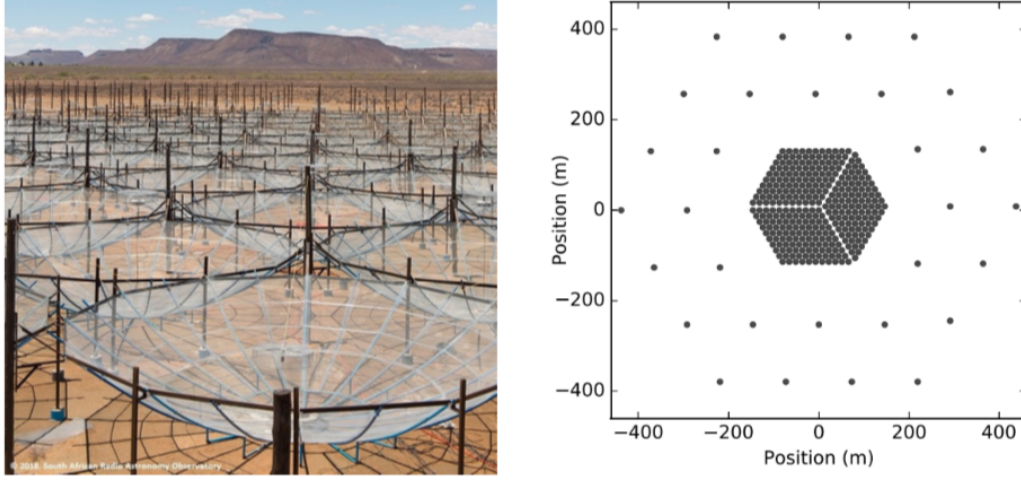


Figure 3. Picture

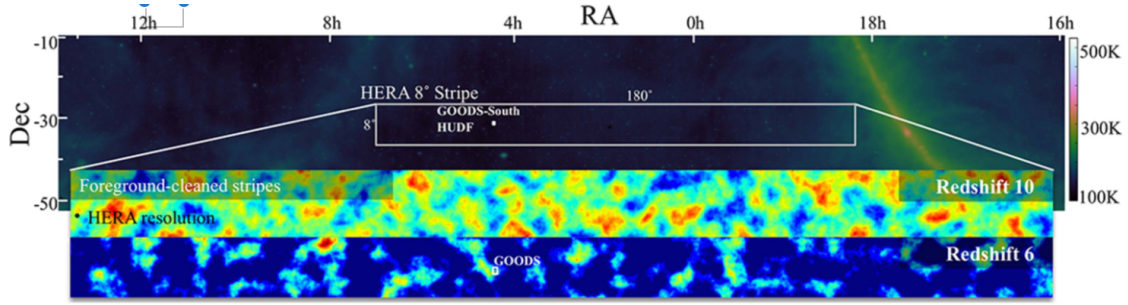


Figure 4. Picture

a nulla. Cum sociis natoque penatibus et magnis dis parturient montes, nascetur ridiculus mus. Aliquam tincidunt urna. Nulla ullamcorper vestibulum turpis. Pellentesque cursus luctus mauris.

Nulla malesuada porttitor diam. Donec felis erat, congue non, volutpat at, tincidunt tristique, libero. Vivamus viverra fermentum felis. Donec nonummy pellentesque ante. Phasellus adipiscing semper elit. Proin fermentum massa ac quam. Sed diam turpis, molestie vitae, placerat a, molestie nec, leo. Maecenas lacinia. Nam ipsum ligula, eleifend at, accumsan nec, suscipit a, ipsum. Morbi blandit ligula feugiat magna. Nunc eleifend consequat lorem. Sed lacinia nulla vitae enim. Pellentesque tincidunt purus vel magna. Integer non enim. Praesent euismod nunc eu purus. Donec bibendum quam in tellus. Nullam cursus

pulvinar lectus. Donec et mi. Nam vulputate metus eu enim. Vestibulum pellentesque felis eu massa.

Quisque ullamcorper placerat ipsum. Cras nibh. Morbi vel justo vitae lacus tincidunt ultrices. Lorem ipsum dolor sit amet, consectetur adipiscing elit. In hac habitasse platea dictumst. Integer tempus convallis augue. Etiam facilisis. Nunc elementum fermentum wisi. Aenean placerat. Ut imperdiet, enim sed gravida sollicitudin, felis odio placerat quam, ac pulvinar elit purus eget enim. Nunc vitae tortor. Proin tempus nibh sit amet nisl. Vivamus quis tortor vitae risus porta vehicula.

Fusce mauris. Vestibulum luctus nibh at lectus. Sed bibendum, nulla a faucibus semper, leo velit ultricies tellus, ac venenatis arcu wisi vel nisl. Vestibulum diam. Aliquam pellentesque, augue quis sagittis posuere, turpis lacus congue quam, in hendrerit risus eros eget felis. Maecenas eget erat in sapien mattis porttitor. Vestibulum porttitor. Nulla facilisi. Sed a turpis eu lacus commodo facilisis. Morbi fringilla, wisi in dignissim interdum, justo lectus sagittis dui, et vehicula libero dui cursus dui. Mauris tempor ligula sed lacus. Duis cursus enim ut augue. Cras ac magna. Cras nulla. Nulla egestas. Curabitur a leo. Quisque egestas wisi eget nunc. Nam feugiat lacus vel est. Curabitur consectetur.

Suspendisse vel felis. Ut lorem lorem, interdum eu, tincidunt sit amet, laoreet vitae, arcu. Aenean faucibus pede eu ante. Praesent enim elit, rutrum at, molestie non, nonummy vel, nisl. Ut lectus eros, malesuada sit amet, fermentum eu, sodales cursus, magna. Donec eu purus. Quisque vehicula, urna sed ultricies auctor, pede lorem egestas dui, et convallis elit erat sed nulla. Donec luctus. Curabitur et nunc. Aliquam dolor odio, commodo pretium, ultricies non, pharetra in, velit. Integer arcu est, nonummy in, fermentum faucibus, egestas vel, odio.

2. Modeling the Intergalactic Medium

2.1. 21cm Fluctuations

Nam dui ligula, fringilla a, euismod sodales, sollicitudin vel, wisi. Morbi auctor lorem

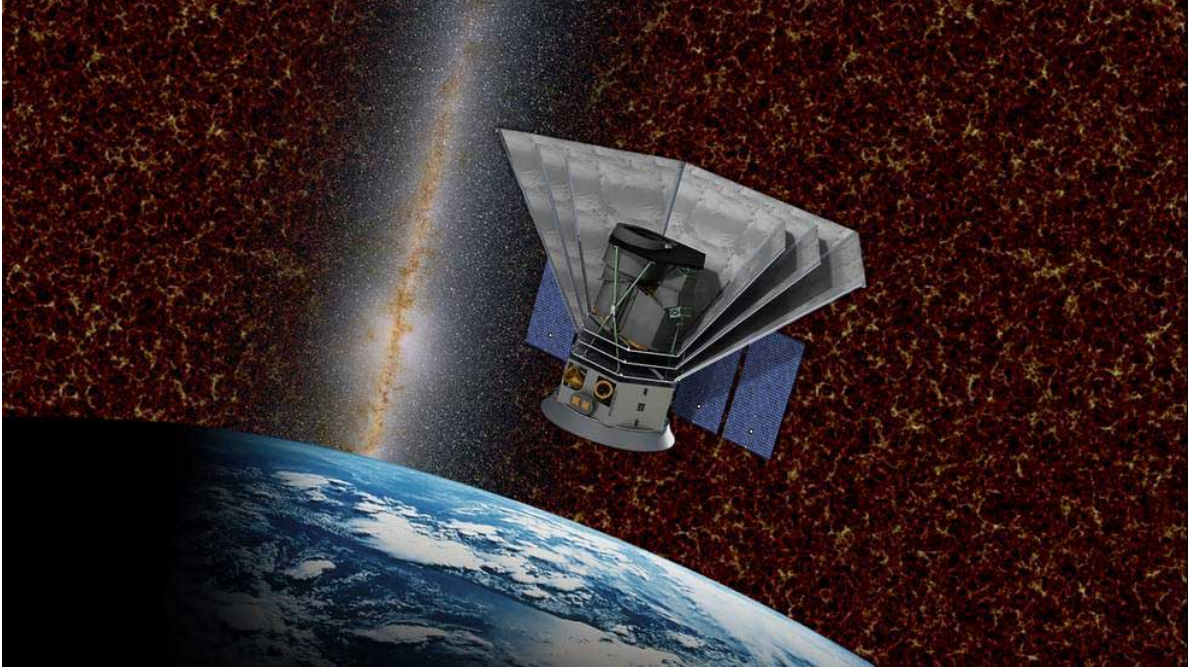


Figure 5. Simulated image of the SPHEREx probe.

non justo. Nam lacus libero, pretium at, lobortis vitae, ultricies et, tellus. Donec aliquet, tortor sed accumsan bibendum, erat ligula aliquet magna, vitae ornare odio metus a mi. Morbi ac orci et nisl hendrerit mollis. Suspendisse ut massa. Cras nec ante. Pellentesque a nulla. Cum sociis natoque penatibus et magnis dis parturient montes, nascetur ridiculus mus. Aliquam tincidunt urna. Nulla ullamcorper vestibulum turpis. Pellentesque cursus luctus mauris.

Nulla malesuada porttitor diam. Donec felis erat, congue non, volutpat at, tincidunt tristique, libero. Vivamus viverra fermentum felis. Donec nonummy pellentesque ante. Phasellus adipiscing semper elit. Proin fermentum massa ac quam. Sed diam turpis, molestie vitae, placerat a, molestie nec, leo. Maecenas lacinia. Nam ipsum ligula, eleifend at, accumsan nec, suscipit a, ipsum. Morbi blandit ligula feugiat magna. Nunc eleifend consequat lorem. Sed lacinia nulla vitae enim. Pellentesque tincidunt purus vel magna. Integer non enim. Praesent euismod nunc eu purus. Donec bibendum quam in tellus. Nullam cursus pulvinar lectus. Donec et mi. Nam vulputate metus eu enim. Vestibulum pellentesque felis eu massa.

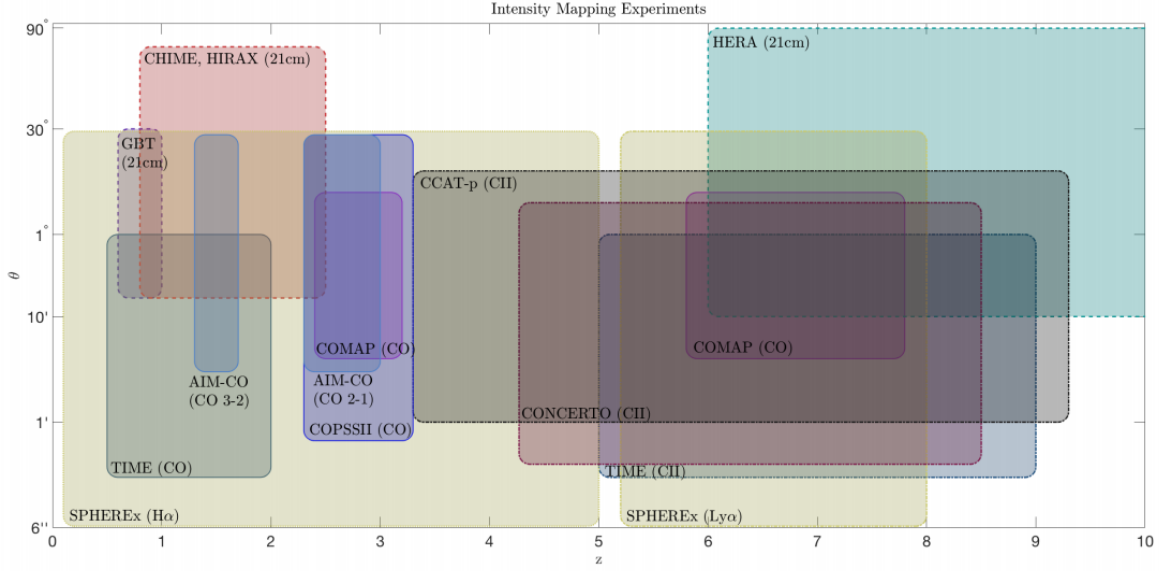


Figure 6. The power spectrum estimated after flagging a contiguous block of two channels.

Quisque ullamcorper placerat ipsum. Cras nibh. Morbi vel justo vitae lacus tincidunt ultrices. Lorem ipsum dolor sit amet, consectetur adipiscing elit. In hac habitasse platea dictumst. Integer tempus convallis augue. Etiam facilisis. Nunc elementum fermentum wisi. Aenean placerat. Ut imperdiet, enim sed gravida sollicitudin, felis odio placerat quam, ac pulvinar elit purus eget enim. Nunc vitae tortor. Proin tempus nibh sit amet nisl. Vivamus quis tortor vitae risus porta vehicula.

Fusce mauris. Vestibulum luctus nibh at lectus. Sed bibendum, nulla a faucibus semper, leo velit ultricies tellus, ac venenatis arcu wisi vel nisl. Vestibulum diam. Aliquam pellentesque, augue quis sagittis posuere, turpis lacus congue quam, in hendrerit risus eros eget felis. Maecenas eget erat in sapien mattis porttitor. Vestibulum porttitor. Nulla facilisi. Sed a turpis eu lacus commodo facilisis. Morbi fringilla, wisi in dignissim interdum, justo lectus sagittis dui, et vehicula libero dui cursus dui. Mauris tempor ligula sed lacus. Duis cursus enim ut augue. Cras ac magna. Cras nulla. Nulla egestas. Curabitur a leo. Quisque egestas wisi eget nunc. Nam feugiat lacus vel est. Curabitur consectetur.

Suspendisse vel felis. Ut lorem lorem, interdum eu, tincidunt sit amet, laoreet vitae, arcu. Aenean faucibus pede eu ante. Praesent enim elit, rutrum at, molestie non, nonummy vel,

nisl. Ut lectus eros, malesuada sit amet, fermentum eu, sodales cursus, magna. Donec eu purus. Quisque vehicula, urna sed ultricies auctor, pede lorem egestas dui, et convallis elit erat sed nulla. Donec luctus. Curabitur et nunc. Aliquam dolor odio, commodo pretium, ultricies non, pharetra in, velit. Integer arcu est, nonummy in, fermentum faucibus, egestas vel, odio.

2.2. Ly α Emission

Nam dui ligula, fringilla a, euismod sodales, sollicitudin vel, wisi. Morbi auctor lorem non justo. Nam lacus libero, pretium at, lobortis vitae, ultricies et, tellus. Donec aliquet, tortor sed accumsan bibendum, erat ligula aliquet magna, vitae ornare odio metus a mi. Morbi ac orci et nisl hendrerit mollis. Suspendisse ut massa. Cras nec ante. Pellentesque a nulla. Cum sociis natoque penatibus et magnis dis parturient montes, nascetur ridiculus mus. Aliquam tincidunt urna. Nulla ullamcorper vestibulum turpis. Pellentesque cursus luctus mauris.

Nulla malesuada porttitor diam. Donec felis erat, congue non, volutpat at, tincidunt tristique, libero. Vivamus viverra fermentum felis. Donec nonummy pellentesque ante. Phasellus adipiscing semper elit. Proin fermentum massa ac quam. Sed diam turpis, molestie vitae, placerat a, molestie nec, leo. Maecenas lacinia. Nam ipsum ligula, eleifend at, accumsan nec, suscipit a, ipsum. Morbi blandit ligula feugiat magna. Nunc eleifend consequat lorem. Sed lacinia nulla vitae enim. Pellentesque tincidunt purus vel magna. Integer non enim. Praesent euismod nunc eu purus. Donec bibendum quam in tellus. Nullam cursus pulvinar lectus. Donec et mi. Nam vulputate metus eu enim. Vestibulum pellentesque felis eu massa.

Quisque ullamcorper placerat ipsum. Cras nibh. Morbi vel justo vitae lacus tincidunt ultrices. Lorem ipsum dolor sit amet, consectetur adipiscing elit. In hac habitasse platea dictumst. Integer tempus convallis augue. Etiam facilisis. Nunc elementum fermentum wisi. Aenean placerat. Ut imperdiet, enim sed gravida sollicitudin, felis odio placerat quam, ac pulvinar elit purus eget enim. Nunc vitae tortor. Proin tempus nibh sit amet nisl. Vivamus

quis tortor vitae risus porta vehicula.

Fusce mauris. Vestibulum luctus nibh at lectus. Sed bibendum, nulla a faucibus semper, leo velit ultricies tellus, ac venenatis arcu wisi vel nisl. Vestibulum diam. Aliquam pellentesque, augue quis sagittis posuere, turpis lacus congue quam, in hendrerit risus eros eget felis. Maecenas eget erat in sapien mattis porttitor. Vestibulum porttitor. Nulla facilisi. Sed a turpis eu lacus commodo facilisis. Morbi fringilla, wisi in dignissim interdum, justo lectus sagittis dui, et vehicula libero dui cursus dui. Mauris tempor ligula sed lacus. Duis cursus enim ut augue. Cras ac magna. Cras nulla. Nulla egestas. Curabitur a leo. Quisque egestas wisi eget nunc. Nam feugiat lacus vel est. Curabitur consectetur.

Suspendisse vel felis. Ut lorem lorem, interdum eu, tincidunt sit amet, laoreet vitae, arcu. Aenean faucibus pede eu ante. Praesent enim elit, rutrum at, molestie non, nonummy vel, nisl. Ut lectus eros, malesuada sit amet, fermentum eu, sodales cursus, magna. Donec eu purus. Quisque vehicula, urna sed ultricies auctor, pede lorem egestas dui, et convallis elit erat sed nulla. Donec luctus. Curabitur et nunc. Aliquam dolor odio, commodo pretium, ultricies non, pharetra in, velit. Integer arcu est, nonummy in, fermentum faucibus, egestas vel, odio.

2.2.1 Galactic

Nam dui ligula, fringilla a, euismod sodales, sollicitudin vel, wisi. Morbi auctor lorem non justo. Nam lacus libero, pretium at, lobortis vitae, ultricies et, tellus. Donec aliquet, tortor sed accumsan bibendum, erat ligula aliquet magna, vitae ornare odio metus a mi. Morbi ac orci et nisl hendrerit mollis. Suspendisse ut massa. Cras nec ante. Pellentesque a nulla. Cum sociis natoque penatibus et magnis dis parturient montes, nascetur ridiculus mus. Aliquam tincidunt urna. Nulla ullamcorper vestibulum turpis. Pellentesque cursus luctus mauris.

Nulla malesuada porttitor diam. Donec felis erat, congue non, volutpat at, tincidunt tristique, libero. Vivamus viverra fermentum felis. Donec nonummy pellentesque ante. Phasellus adipiscing semper elit. Proin fermentum massa ac quam. Sed diam turpis, mo-

lestie vitae, placerat a, molestie nec, leo. Maecenas lacinia. Nam ipsum ligula, eleifend at, accumsan nec, suscipit a, ipsum. Morbi blandit ligula feugiat magna. Nunc eleifend consequat lorem. Sed lacinia nulla vitae enim. Pellentesque tincidunt purus vel magna. Integer non enim. Praesent euismod nunc eu purus. Donec bibendum quam in tellus. Nullam cursus pulvinar lectus. Donec et mi. Nam vulputate metus eu enim. Vestibulum pellentesque felis eu massa.

Quisque ullamcorper placerat ipsum. Cras nibh. Morbi vel justo vitae lacus tincidunt ultrices. Lorem ipsum dolor sit amet, consectetur adipiscing elit. In hac habitasse platea dictumst. Integer tempus convallis augue. Etiam facilisis. Nunc elementum fermentum wisi. Aenean placerat. Ut imperdiet, enim sed gravida sollicitudin, felis odio placerat quam, ac pulvinar elit purus eget enim. Nunc vitae tortor. Proin tempus nibh sit amet nisl. Vivamus quis tortor vitae risus porta vehicula.

Fusce mauris. Vestibulum luctus nibh at lectus. Sed bibendum, nulla a faucibus semper, leo velit ultricies tellus, ac venenatis arcu wisi vel nisl. Vestibulum diam. Aliquam pellentesque, augue quis sagittis posuere, turpis lacus congue quam, in hendrerit risus eros eget felis. Maecenas eget erat in sapien mattis porttitor. Vestibulum porttitor. Nulla facilisi. Sed a turpis eu lacus commodo facilisis. Morbi fringilla, wisi in dignissim interdum, justo lectus sagittis dui, et vehicula libero dui cursus dui. Mauris tempor ligula sed lacus. Duis cursus enim ut augue. Cras ac magna. Cras nulla. Nulla egestas. Curabitur a leo. Quisque egestas wisi eget nunc. Nam feugiat lacus vel est. Curabitur consectetur.

Suspendisse vel felis. Ut lorem lorem, interdum eu, tincidunt sit amet, laoreet vitae, arcu. Aenean faucibus pede eu ante. Praesent enim elit, rutrum at, molestie non, nonummy vel, nisl. Ut lectus eros, malesuada sit amet, fermentum eu, sodales cursus, magna. Donec eu purus. Quisque vehicula, urna sed ultricies auctor, pede lorem egestas dui, et convallis elit erat sed nulla. Donec luctus. Curabitur et nunc. Aliquam dolor odio, commodo pretium, ultricies non, pharetra in, velit. Integer arcu est, nonummy in, fermentum faucibus, egestas

vel, odio.

2.2.2 Diffuse

Nam dui ligula, fringilla a, euismod sodales, sollicitudin vel, wisi. Morbi auctor lorem non justo. Nam lacus libero, pretium at, lobortis vitae, ultricies et, tellus. Donec aliquet, tortor sed accumsan bibendum, erat ligula aliquet magna, vitae ornare odio metus a mi. Morbi ac orci et nisl hendrerit mollis. Suspendisse ut massa. Cras nec ante. Pellentesque a nulla. Cum sociis natoque penatibus et magnis dis parturient montes, nascetur ridiculus mus. Aliquam tincidunt urna. Nulla ullamcorper vestibulum turpis. Pellentesque cursus luctus mauris.

Nulla malesuada porttitor diam. Donec felis erat, congue non, volutpat at, tincidunt tristique, libero. Vivamus viverra fermentum felis. Donec nonummy pellentesque ante. Phasellus adipiscing semper elit. Proin fermentum massa ac quam. Sed diam turpis, molestie vitae, placerat a, molestie nec, leo. Maecenas lacinia. Nam ipsum ligula, eleifend at, accumsan nec, suscipit a, ipsum. Morbi blandit ligula feugiat magna. Nunc eleifend consequat lorem. Sed lacinia nulla vitae enim. Pellentesque tincidunt purus vel magna. Integer non enim. Praesent euismod nunc eu purus. Donec bibendum quam in tellus. Nullam cursus pulvinar lectus. Donec et mi. Nam vulputate metus eu enim. Vestibulum pellentesque felis eu massa.

Quisque ullamcorper placerat ipsum. Cras nibh. Morbi vel justo vitae lacus tincidunt ultrices. Lorem ipsum dolor sit amet, consectetur adipiscing elit. In hac habitasse platea dictumst. Integer tempus convallis augue. Etiam facilisis. Nunc elementum fermentum wisi. Aenean placerat. Ut imperdiet, enim sed gravida sollicitudin, felis odio placerat quam, ac pulvinar elit purus eget enim. Nunc vitae tortor. Proin tempus nibh sit amet nisl. Vivamus quis tortor vitae risus porta vehicula.

Fusce mauris. Vestibulum luctus nibh at lectus. Sed bibendum, nulla a faucibus semper, leo velit ultricies tellus, ac venenatis arcu wisi vel nisl. Vestibulum diam. Aliquam pellentesque, augue quis sagittis posuere, turpis lacus congue quam, in hendrerit risus eros eget

felis. Maecenas eget erat in sapien mattis porttitor. Vestibulum porttitor. Nulla facilisi. Sed a turpis eu lacus commodo facilisis. Morbi fringilla, wisi in dignissim interdum, justo lectus sagittis dui, et vehicula libero dui cursus dui. Mauris tempor ligula sed lacus. Duis cursus enim ut augue. Cras ac magna. Cras nulla. Nulla egestas. Curabitur a leo. Quisque egestas wisi eget nunc. Nam feugiat lacus vel est. Curabitur consetetuer.

Suspendisse vel felis. Ut lorem lorem, interdum eu, tincidunt sit amet, laoreet vitae, arcu. Aenean faucibus pede eu ante. Praesent enim elit, rutrum at, molestie non, nonummy vel, nisl. Ut lectus eros, malesuada sit amet, fermentum eu, sodales cursus, magna. Donec eu purus. Quisque vehicula, urna sed ultricies auctor, pede lorem egestas dui, et convallis elit erat sed nulla. Donec luctus. Curabitur et nunc. Aliquam dolor odio, commodo pretium, ultricies non, pharetra in, velit. Integer arcu est, nonummy in, fermentum faucibus, egestas vel, odio.

2.2.3 Scattered

Nam dui ligula, fringilla a, euismod sodales, sollicitudin vel, wisi. Morbi auctor lorem non justo. Nam lacus libero, pretium at, lobortis vitae, ultricies et, tellus. Donec aliquet, tortor sed accumsan bibendum, erat ligula aliquet magna, vitae ornare odio metus a mi. Morbi ac orci et nisl hendrerit mollis. Suspendisse ut massa. Cras nec ante. Pellentesque a nulla. Cum sociis natoque penatibus et magnis dis parturient montes, nascetur ridiculus mus. Aliquam tincidunt urna. Nulla ullamcorper vestibulum turpis. Pellentesque cursus luctus mauris.

Nulla malesuada porttitor diam. Donec felis erat, congue non, volutpat at, tincidunt tristique, libero. Vivamus viverra fermentum felis. Donec nonummy pellentesque ante. Phasellus adipiscing semper elit. Proin fermentum massa ac quam. Sed diam turpis, molestie vitae, placerat a, molestie nec, leo. Maecenas lacinia. Nam ipsum ligula, eleifend at, accumsan nec, suscipit a, ipsum. Morbi blandit ligula feugiat magna. Nunc eleifend consequat lorem. Sed lacinia nulla vitae enim. Pellentesque tincidunt purus vel magna. Integer non enim. Praesent euismod nunc eu purus. Donec bibendum quam in tellus. Nullam cursus

pulvinar lectus. Donec et mi. Nam vulputate metus eu enim. Vestibulum pellentesque felis eu massa.

Quisque ullamcorper placerat ipsum. Cras nibh. Morbi vel justo vitae lacus tincidunt ultrices. Lorem ipsum dolor sit amet, consectetur adipiscing elit. In hac habitasse platea dictumst. Integer tempus convallis augue. Etiam facilisis. Nunc elementum fermentum wisi. Aenean placerat. Ut imperdiet, enim sed gravida sollicitudin, felis odio placerat quam, ac pulvinar elit purus eget enim. Nunc vitae tortor. Proin tempus nibh sit amet nisl. Vivamus quis tortor vitae risus porta vehicula.

Fusce mauris. Vestibulum luctus nibh at lectus. Sed bibendum, nulla a faucibus semper, leo velit ultricies tellus, ac venenatis arcu wisi vel nisl. Vestibulum diam. Aliquam pellentesque, augue quis sagittis posuere, turpis lacus congue quam, in hendrerit risus eros eget felis. Maecenas eget erat in sapien mattis porttitor. Vestibulum porttitor. Nulla facilisi. Sed a turpis eu lacus commodo facilisis. Morbi fringilla, wisi in dignissim interdum, justo lectus sagittis dui, et vehicula libero dui cursus dui. Mauris tempor ligula sed lacus. Duis cursus enim ut augue. Cras ac magna. Cras nulla. Nulla egestas. Curabitur a leo. Quisque egestas wisi eget nunc. Nam feugiat lacus vel est. Curabitur consectetur.

Suspendisse vel felis. Ut lorem lorem, interdum eu, tincidunt sit amet, laoreet vitae, arcu. Aenean faucibus pede eu ante. Praesent enim elit, rutrum at, molestie non, nonummy vel, nisl. Ut lectus eros, malesuada sit amet, fermentum eu, sodales cursus, magna. Donec eu purus. Quisque vehicula, urna sed ultricies auctor, pede lorem egestas dui, et convallis elit erat sed nulla. Donec luctus. Curabitur et nunc. Aliquam dolor odio, commodo pretium, ultricies non, pharetra in, velit. Integer arcu est, nonummy in, fermentum faucibus, egestas

vel, odio.

3. Cross-Correlation Studies

3.1. Cross-Power Spectrum

$$\langle \tilde{\delta}_i(\mathbf{k}) \tilde{\delta}_j(\mathbf{k}') \rangle = (2\pi)^3 \delta_D(\mathbf{k} - \mathbf{k}') P_{ij}(\mathbf{k}) \quad (1)$$

$$\Delta^2(k) = \frac{k^3}{2\pi^2} P(k) \quad (2)$$

3.2. Observational Uncertainties

$$2\sigma_{21,\text{Ly}\alpha}^2 = P_{21,\text{Ly}\alpha}^2 + (P_{21} + P_F + \sigma_{21}^2) (P_{\text{Ly}\alpha} + \sigma_{\text{Ly}\alpha}^2) \quad (3)$$

$$P_F = \sum_j \epsilon_j^2 A_j \left(\frac{l}{2\pi q} \right)^{n_j} \left(\frac{\nu_p}{\nu_i} \right)^{m_j} \quad (4)$$

3.3. Foreground Contamination

$$k_{\parallel} \leq \sin(\theta_0) \frac{H_0 E(z) D_M(z)}{c(1+z)} k_{\perp} \quad (5)$$

4. Conclusions

This is where my smart words go. I'll say very smart things here. 21cmFAST

References

- Ali, Z. S., Parsons, A. R., Zheng, H., et al. 2015, ApJ, 809, 61, doi: [10.1088/0004-637X/809/1/61](https://doi.org/10.1088/0004-637X/809/1/61)
- Bowman, J. D., Rogers, A. E. E., Monsalve, R. A., Mozdzen, T. J., & Mahesh, N. 2018, Nature, 555, 67, doi: [10.1038/nature25792](https://doi.org/10.1038/nature25792)
- DeBoer, D. R., Parsons, A. R., Aguirre, J. E., et al. 2017, PASP, 129, 045001, doi: [10.1088/1538-3873/129/974/045001](https://doi.org/10.1088/1538-3873/129/974/045001)
- Fan, X., Carilli, C. L., & Keating, B. 2006, Annual Review of Astronomy and Astrophysics, 44, 415, doi: [10.1146/annurev.astro.44.051905.092514](https://doi.org/10.1146/annurev.astro.44.051905.092514)
- Furlanetto, S. R., Oh, S. P., & Briggs, F. H. 2006, PhR, 433, 181, doi: [10.1016/j.physrep.2006.08.002](https://doi.org/10.1016/j.physrep.2006.08.002)
- Gallerani, S., Salvaterra, R., Ferrara, A., & Choudhury, T. R. 2008, MNRAS, 388, L84, doi: [10.1111/j.1745-3933.2008.00504.x](https://doi.org/10.1111/j.1745-3933.2008.00504.x)
- Hopkins, P. F., Richards, G. T., & Hernquist, L. 2007, ApJ, 654, 731, doi: [10.1086/509629](https://doi.org/10.1086/509629)
- Liu, A., & Tegmark, M. 2011, PhRvD, 83, 103006, doi: [10.1103/PhysRevD.83.103006](https://doi.org/10.1103/PhysRevD.83.103006)
- Liu, A., Tegmark, M., Morrison, S., Lutomirski, A., & Zaldarriaga, M. 2010, MNRAS, 408, 1029, doi: [10.1111/j.1365-2966.2010.17174.x](https://doi.org/10.1111/j.1365-2966.2010.17174.x)
- Loeb, A. 2006, Scientific American, 295
- Malhotra, S., & Rhoads, J. E. 2004, ApJL, 617, L5, doi: [10.1086/427182](https://doi.org/10.1086/427182)
- Mason, C. A., Treu, T., Dijkstra, M., et al. 2018, ApJ, 856, 2, doi: [10.3847/1538-4357/aab0a7](https://doi.org/10.3847/1538-4357/aab0a7)

- Mellema, G., Koopmans, L. V. E., Abdalla, F. A., et al. 2013, *Experimental Astronomy*, 36, 235, doi: [10.1007/s10686-013-9334-5](https://doi.org/10.1007/s10686-013-9334-5)
- Morales, M. F., & Wyithe, J. S. B. 2010, *ARA&A*, 48, 127, doi: [10.1146/annurev-astro-081309-130936](https://doi.org/10.1146/annurev-astro-081309-130936)
- Oh, S. P. 2002, *MNRAS*, 336, 1021, doi: [10.1046/j.1365-8711.2002.05859.x](https://doi.org/10.1046/j.1365-8711.2002.05859.x)
- Park, H., Shapiro, P. R., Komatsu, E., et al. 2013, *ApJ*, 769, 93, doi: [10.1088/0004-637X/769/2/93](https://doi.org/10.1088/0004-637X/769/2/93)
- Parsons, A. R., Pober, J. C., Aguirre, J. E., et al. 2012, *ApJ*, 756, 165, doi: [10.1088/0004-637X/756/2/165](https://doi.org/10.1088/0004-637X/756/2/165)
- Parsons, A. R., Backer, D. C., Foster, G. S., et al. 2010, *AJ*, 139, 1468, doi: [10.1088/0004-6256/139/4/1468](https://doi.org/10.1088/0004-6256/139/4/1468)
- Pritchard, J. R., & Loeb, A. 2012, *RPPh*, 75, 086901, doi: [10.1088/0034-4885/75/8/086901](https://doi.org/10.1088/0034-4885/75/8/086901)
- Richards, G. T., Strauss, M. A., Fan, X., et al. 2006, *AJ*, 131, 2766, doi: [10.1086/503559](https://doi.org/10.1086/503559)
- Roy, A., Lapi, A., Spergel, D., & Baccigalupi, C. 2018, *Journal of Cosmology and Astro-Particle Physics*, 2018, 014, doi: [10.1088/1475-7516/2018/05/014](https://doi.org/10.1088/1475-7516/2018/05/014)
- Tegmark, M. 1997, *PhRvD*, 55, 5895, doi: [10.1103/PhysRevD.55.5895](https://doi.org/10.1103/PhysRevD.55.5895)
- Tegmark, M., Hamilton, A. J. S., Strauss, M. A., Vogeley, M. S., & Szalay, A. S. 1998, *ApJ*, 499, 555, doi: [10.1086/305663](https://doi.org/10.1086/305663)
- Tingay, S. J., Goeke, R., Bowman, J. D., et al. 2013, *PASA*, 30, e007, doi: [10.1017/pasa.2012.007](https://doi.org/10.1017/pasa.2012.007)
- Trac, H., & Cen, R. 2007, *ApJ*, 671, 1, doi: [10.1086/522566](https://doi.org/10.1086/522566)

van Haarlem, M. P., Wise, M. W., Gunst, A. W., et al. 2013, A&A, 556, A2, doi: [10.1051/0004-6361/201220873](https://doi.org/10.1051/0004-6361/201220873)

Zaldarriaga, M. 1997, PhRvD, 55, 1822, doi: [10.1103/PhysRevD.55.1822](https://doi.org/10.1103/PhysRevD.55.1822)

Zheng, H., Tegmark, M., Buza, V., et al. 2014, MNRAS, 445, 1084, doi: [10.1093/mnras/stu1773](https://doi.org/10.1093/mnras/stu1773)

Appendix

This is where appendix-y things go