

Proyecto:

Cosmología Computacional y Observacional

Investigador Principal:
Jaime Ernesto Forero Romero, PhD

1 de junio de 2014

Índice

1. Título del proyecto	3
2. Investigador principal	3
3. Conformación del equipo de investigaciónn	3
4. Antecedentes y resultados previos del equipo de investigación	4
5. Temática de investigación	4
6. Resumen ejecutivo	4
7. Palabras clave	6
8. Planteamiento del problema	6
9. Justificación	7
10. Marco conceptual	7
10.1. Teoría	7

10.2. Simulaciones	8
10.3. Observaciones	10
11.Estado del arte	10
11.1. Teoría	10
11.2. Simulaciones	10
11.3. Observaciones	10
12.Objetivos	10
12.1. Objetivos espe	11
13.Metodología	11
14.Resultados esperados de la investigación	11
15.Resultados esperados - Productos	11
15.1. Productos resultado de actividades de Generación Nuevo Co- nocimiento	11
15.1.1. Artículos de investigación A1, A2, B y C	11
15.2. Productos resultado de actividades de Desarrollo Tecnológico e Innovación	11
15.3. Productos resultado de actividades de Apropiación Social del Conocimiento	11
15.3.1. Estrategias pedagógicas para el fomento de la CTI . . .	11
15.3.2. Comunicaciónn social del conocimiento	11
15.3.3. Circulación de conocimiento especializado	11
15.4. Productos de actividades relacionadas con la Formación de Recurso Humano para la CTI	11
16.Trayectoria del equipo de investigación	11
17.Posibles evaluadores	11
18.Cronograma	12
19.Impacto ambiental	12
20.Bibliografía	13

1. Título del proyecto

Cosmología Computacional y Observacional

2. Investigador principal

Jaime Ernesto Forero Romero, PhD. Profesor asistente Universidad de los Andes.

3. Conformación del equipo de investigaciónnn

- Un profesor de planta del grupo de Astrofísica de la Universidad de los Andes: Jaime Ernesto Forero Romero.
- Dos estudiantes de doctorado en el departamento de Física de la Universidad de los Andes: Felipe Gómez (Físico) y otro por definir.

Con el apoyo de los siguientes asesores internacionales:

- Stefan Gottloeber, PhD. Científico en el Leibniz Institute for Astrophysics, Alemania.
- Changbom Park, PhD. Miembro permanente del Korean Institute for Advanced Studies, Corea del Sur.
- Robert Cahn, PhD. Científico en el Lawrence Berkeley National Laboratory, Estados Unidos.

Adicionalmente el proyecto cuenta con el soporte del siguiente personal de apoyo de la Universidad de los Andes

- Ingeniero de cómputo del departamento de Física.
- Ingeniero de cómputo de alto rendimiento en el Departamento de Servicios de Tecnología de la Información.

4. **Antecedentes y resultados previos del equipo de investigación**
5. **Temática de investigación**
6. **Resumen ejecutivo**

La cosmología observacional entró en una época dorada con la medición de las anisotropías de la radiación cósmica de fondo (Premio Nobel de Física 2006) y la medición de la expansión acelerada del Universo (Premio Nobel de Física 2011).

Hoy en día una de las fronteras de la investigación en **Cosmología Observacional** es la obtención de mejores mediciones de la historia de expansión acelerada del Universo y así inferir cotas sobre uno de los posibles responsables de este efecto: la Energía Oscura. Una de las técnicas observacionales que se utiliza con ese propósito es la detección del pico de Oscilaciones Acústicas de Bariones (OAB) que requiere la medición de las *posiciones* de millones de galaxias [4]. Otros métodos usan información sobre las *velocidades* peculiares (i.e. velocidades que no están asociadas al flujo de Hubble) de las galaxias y las distorsiones que estas generan en las observaciones para cuantificar el crecimiento de estructura a gran escala [14].

En todos estos esfuerzos observacionales para medir el Universo las **simulaciones computacionales** juegan un rol fundamental, especialmente en los métodos que usan las velocidades peculiares. Las simulaciones son utilizadas para traducir las premisas teóricas en cantidades observables. Es decir, son un puente entre la teoría y la observación.

Las simulaciones de formación de estructura a gran escala en el Universo han llegado a un gran punto de madurez durante los últimos treinta años de investigación en el tema dando nacimiento a un área de investigación conocida como **Cosmología Computacional**. Hoy en día se utilizan las mismas simulaciones al momento de planear una nueva campaña observacional; el fin principal es asegurarse de que los efectos físicos que se esperan medir están al alcance del instrumento y de los métodos estadísticos para analizar los datos.

La presente propuesta tiene como objetivo hacer uso de los fondos para hacer investigación en Cosmología Computacional y Cosmología Observacional.

En el frente de cosmología computacional proponemos realizar una serie de simulaciones de la distribución de materia en el Universo a gran escala sin precedentes en el país. Para la preparación de estas simulaciones haremos uso de las máquinas de las Instalaciones para Cómputo de Alto Rendimiento de la Universidad de los Andes, las cuales serán instaladas y puestas en funcionamiento durante el segundo semestre del 2014.

Vamos a usar estas simulaciones de manera principal para fundamentar nuestro trabajo en Cosmología Observacional en dos colaboraciones internacionales.

La primera colaboración, con el Lawrence Berkeley National Laboratory, se trata de contribuir en la preparación del experimento DESI (Dark Energy Spectroscopic Instrument). DESI es una colaboración internacional de más de 100 científicos que construirá el experimento de siguiente generación para medir la historia de expansión del Universo haciendo un mapa de la distribución de 25 millones de galaxias, 10 veces más de lo que ha sido observado hasta la fecha [10]. En particular, esperamos durante la duración del presente proyecto con COLCIENCIAS aportar al diseño y optimización de la estrategia de las observaciones.

La segunda colaboración, con el Korean Institute for Advanced Studies (KIAS), trata de la restricción de parámetros cosmológicos a partir de la anisotropía de la distribución de galaxias. En una primera etapa esperamos usar las simulaciones para optimizar los métodos estadísticos de medición del efecto buscado. En una segunda etapa vamos a aplicar este conocimiento sobre los datos observacionales del proyecto SDSS-III (Sloan Digital Sky Survey), algo posible gracias a la participación de KIAS en ese proyecto.

Los proyectos posibles con la serie de simulaciones que vamos a realizar abren la puerta a otro tipo de estudios sobre la estructura del Universo a gran escala [7, 8] y la cuantificación de la abundancia de eventos de colisiones extremas en el Universo [6, 5]. Adicionalmente, estos datos se harán disponibles a toda la comunidad (colombiana e internacional) para realizar diferentes tipos de estudios y análisis [13]. En el curso de este proyecto también vamos a organizar una escuela internacional de un mes, con expertos internacionales, para formar recurso humano en Colombia y en la región que esté en capacidad de utilizar recursos computacionales avanzados para resolver problemas en cosmología computacional y observacional.

7. Palabras clave

Astrofísica — Cosmología — Materia oscura — Energía oscura — Galaxias — Computación de alto rendimiento

8. Planteamiento del problema

La pregunta principal que queremos responder es la siguiente: ¿cómo se distribuye la materia en el Universo a gran escala? Más precisamente, queremos cuantificar los cambios en esta distribución en función del tiempo y de los parámetros cosmológicos que describen el Universo. Con esto esperamos contribuir a colaboraciones internacionales sobre cosmología observacional.

De partida nos ubicamos dentro de lo que se conoce como el modelo estándar de la cosmología. En este modelo el contenido de materia en el Universo está dominado por la materia oscura. Adicionalmente, hay un componente, conocida como la constante cosmológica (la densidad de energía asociada al espacio vacío), que explica la expansión acelerada del Universo. En este modelo la materia bariónica es la minoría en el contenido de materia energía del Universo. La repartición de estas tres componentes en términos de fracciones de la densidad total corresponden aproximadamente a un 5 % para los bariones, un 25 % para la materia oscura y un 70 % para la constante cosmológica. Adicionalmente, en este modelo consideramos que la teoría que describe la interacción gravitacional es la Relatividad General de Einstein.

En este contexto, la herramienta principal para responder nuestra pregunta original son las simulaciones numéricas. Los métodos computacionales permiten simular grandes volúmenes del Universo para seguir la evolución temporal de la distribución de materia. Este ejercicio se puede hacer para diferentes valores de los parámetros cosmológicos y medir las consecuencias de los cambios en diferentes universos ficticios.

El avance en los métodos computacionales ha estado en gran parte motivado por los avances en técnicas observacionales que permiten hacer mapas del Universo a grandes escalas. Estos mapas se construyen a partir de mediciones de los espectros de millones de galaxias. Normalmente, estas campañas observacionales son llevadas a cabo por grandes colaboraciones internacionales y cuentan con científicos capaces de realizar los estudios de Universos simulados.

La presente propuesta busca entonces reponder a la pregunta sobre la

estructura del Universo a gran escala a partir de simulaciones computacionales, teniendo en mente la aplicación del conocimiento adquirido a datos observacionales y la planeación de futuras observaciones.

9. Justificación

Los principales factores que hacen necesaria y pertinente la realización de este proyecto.

10. Marco conceptual

El principal elemento conceptual de este proyecto es la **Cosmología vista a partir de la estructura del Universo a gran escala**. Este elemento central se divide en tres temas: teoría, simulaciones y observaciones.

10.1. Teoría

Desde el punto de vista teórico hay dos observables principales que dependen de los parámetros cosmológicos: la historia de expansión del Universo y el crecimiento de la estructura a gran escala. Ambos pueden ser medidos a partir de la distribución de galaxias en el Universo.

La **historia de expansión** del Universo, medida por la constante de Hubble dependiente del redshift $H(z)$, depende directamente del contenido de materia y energía del Universo. Este contenido se puede separar en las siguientes componentes: la densidad de materia bariónica (Ω_b), la densidad de materia oscura (Ω_{dm}) y la densidad de energía oscura (Ω_{DE}), la cual puede variar en el tiempo dependiendo del valor de la constante w en la ecuación de estado, Ω_{DE} donde

$$\Omega_{DE}(z) = \Omega_{DE,0}(1+z)^{3(1+w)}. \quad (1)$$

Para esto hemos usado el resultado de un Universo plano con $\Omega_b + \Omega_{dm} + \Omega_{DE} = 1$ y w constante en el tiempo. También hemos tomado Ω_{DE} de manera general para una Energía Oscura sin asumir que se trata de una constante cosmológica, Ω_Λ con $w = -1$.

Hoy en día estos parámetros cosmológicos están acotados observacionalmente cerca a los siguientes valores $\Omega_b = 0,05$, $\Omega_{dm} = 0,25$, $\Omega_{DE} = 0,70$ y

$w = -1$. De estos parámetros los que más interés generan actualmente son Ω_{DE} y w porque están relacionados con la expansión acelerada del Universo, algo que puede corresponder a una simple constante cosmológica o puede ser la evidencia de que Relatividad General no es la teoría correcta para la gravedad [11].

Por otro lado, el **crecimiento de estructura a gran escala** depende principalmente de las fluctuaciones iniciales en el campo de densidad de materia en las épocas tempranas del Universo y de la teoría de la gravedad que hace que esas fluctuaciones se amplifiquen generando la variedad de estructura que observamos en el Universo. En este contexto la cantidad central es el contraste de densidad $\delta(\mathbf{x}, t) \equiv \rho(\mathbf{r}, t)/\bar{\rho}(r) - 1$ de la materia oscura. En el régimen lineal de crecimiento está dado por la siguiente ecuación diferencial

$$\ddot{D} + 2H(z)\dot{D} - \frac{3}{2}\Omega_m H_0^2(1+z)^3 D = 0, \quad (2)$$

donde H_0 es la constante de Hubble en el presente y $D(t)$ es la función de crecimiento. Incluso en el régimen no lineal el contraste de densidad también depende de esta función $D(t)$.

Lo interesante en este caso es que diferentes modelos de la gravedad (entre ellos la Relatividad General) hacen predicciones sobre el comportamiento de esta función $D(t)$. De esta manera una estrategia posible para probar teorías de gravedad modificada es medir al mismo tiempo la historia de expansión y la historia de crecimiento de estructuras para ver si dan valores consistentes de $H(z)$ y de w [11].

10.2. Simulaciones

Aunque la descripción analítica esbozada anteriormente permite acercarse a varios fenómenos del crecimiento de estructura, una descripción detallada solamente ha sido posible a través de las simulaciones computacionales. Las simulaciones buscan seguir la evolución del campo de densidad de materia oscura en función del tiempo.

En el caso de simulaciones en la cosmología estándar Λ Cold Dark Matter (Λ CDM) se sigue una aproximación en la cual solamente se simula la componente oscura y no la bariónica, dado que la primera domina la dinámica del sistema. Luego de esto se toma un volumen computacional que represente una región del universo con distribución de materia oscura se discretizada

en partículas computacionales con posiciones y velocidades que pueden evolucionar en el tiempo. Esta forma general de realizar los cálculos ha sido perfeccionada durante los últimos treinta años de investigación en el tema de formación de estructura en un Universo domiado por la materia oscura [3, 9, 15]. Aunque es posible incluir una descripción del gas bariónico y de los procesos asociados a las formación estelar, nosotros centraremos nuestra discusión en torno a las simulaciones que solamente incluyen la materia oscura, dado que son suficientes para los objetivos de nuestro proyecto.

Como en todo experimento numérico hay dos cantidades centrales para la descripción del sistema: las condiciones iniciales y las reglas para la evolución temporal del sistema. Las condiciones iniciales están definen las posiciones y velocidades iniciales de las partículas computacionales. En este caso los desplazamientos de las partículas con respecto a una distribución homogéna de partículas están relacionados con las fluctuaciones tempranas en el campo de densidad y se pueden describir estadísticamente a través del espectro de potencias. Una vez las posiciones iniciales están determinadas se determinan las velocidades iniciales, usualmente a través de la aproximación de Zeldovich aunque es posible imponer estas condiciones iniciales a través de otras aproximaciones perturbativas [16].

La simulación sigue entonces la evolución de las posiciones y velocidades de las partículas durante la historia del Universo. En el rango de evolución no lineal se forman sobre-densidades de materia oscura que reciben el nombre de halos, en los centros de estos halos las galaxias deberian formarse y evolucionar. En este punto es posible entonces pasar a una descripción de la distribución de la simulación en términos de las posiciones, velocidades y masas de estos **halos de materia oscura**, que son la cantidades de interés al momento de vincular las predicciones de los modelos con las observaciones. Estos halos sirven en las construcción de **catálogos ficticios** que se son comparables con mapas de la distribución de galaxias en el Universo.

Para la a relización de simulaciones que incluyan efectos de diferentes modelos de energía oscura hay tres posibilidades: campos homogéneos de energía oscura, campos inhomogéneos de energía oscura y modelos con de inhomogeneidad a gran escala [1]. En este proyecto nos centraremos en los modelos homogéneos de energía oscura que se pueden incluir en simulaciones hechas con la maquinaria Λ CDM a través de una parametrización para la evolución del término $\Omega_{DE}(z)$.

10.3. Observaciones

Las observaciones del Universo a gran escala empezaron a tener un rol central en la astronomía observacional y en la cosmología con dos colaboraciones: el Sloan Digital Sky Survey (SDSS) [17] y el Two Degree Field Galaxy Redshift Survey (2dFGRS) [2]. El objetivo principal de estas campañas observacionales fue el de tomar espectros de cerca de un millón de galaxias del Universo local sobre una gran área del cielo. A partir de estas observaciones de la estructura del Universo a gran escala se pueden inferir diferentes parámetros cosmológicos.

Dentro de las mediciones más importantes a partir de estas dos misiones ha sido el de la densidad de materia cosmológica Ω_m [12] y el pico en la función de correlación correspondiente a la Oscilación Acústica de Bariones (OAB) [4].

11. Estado del arte

A continuación revisamos el estado del arte de las tres temáticas planteadas en el Marco Conceptual

11.1. Teoría

11.2. Simulaciones

11.3. Observaciones

12. Objetivos

Objetivos generales

- Cuantificar la influencia de los parámetros cosmológicos en la estructura del Universo a gran escala.
- Contribuir al diseño de un experimento de siguiente generación para la medición de la historia de la expansión del Universo.

- 12.1. Objetivos espe
- 13. Metodología
- 14. Resultados esperados de la investigación
- 15. Resultados esperados - Productos
 - 15.1. Productos resultado de actividades de Generación Nuevo Conocimiento
 - 15.1.1. Artículos de investigación A1, A2, B y C
 - 15.2. Productos resultado de actividades de Desarrollo Tecnológico e Innovación
 - 15.3. Productos resultado de actividades de Apropiación Social del Conocimiento
 - 15.3.1. Estrategias pedagógicas para el fomento de la CTI
 - 15.3.2. Comunicaciónn social del conocimiento
 - 15.3.3. Circulación de conocimiento especializado
 - 15.4. Productos de actividades relacionadas con la Formación de Recurso Humano para la CTI
- 16. Trayectoria del equipo de investigación
- 17. Posibles evaluadores

Octavio Valenzuela. Email `octavio at astro unam mx` (UNAM, México)

Nelson Padilla. Email `npadilla at astro puc cl` (PUC, Chile)

Patricia Tissera. Email `patricia at iafe uba ar` (UBA, Argentina)

18. Cronograma

19. Impacto ambiental

En la Tabla 1 presentamos un resumen del presupuesto detallado solicitado a Colciencias. Los ítems que destacan son los siguientes

- Apoyo para la pasantía de un estudiante de doctorado en el Lawrence Berkeley Laboratory por un período de seis meses.
- Apoyo para la visita de colaboración de un asistente postdoctoral en el Lawrence Berkeley Laboratory por dos períodos de dos meses.
- Apoyo a viajes cortos (2 semanas) para un profesor, durante los tres años del proyecto.
- Compra de una cuchilla de procesadores y almacenamiento de 1TB con backup.

	Actividad	Costo año 1	Costo año 2	Costo año 3
1.	Viaje a una escuela internacional de formación Estudiantes de Doctorado #1 y #2		8.000	8.000
1.	Viaje a un congreso nacional para los Estudiantes de Doctorado #1 y #2		2.000	2.000
2.	Compra de almacenamiento. 2TB con backup	10.000		
3.	Pasantía Estudiante de Doctorado #2. (6 meses)			36.000
4.	Viajes Investigador postdoctoral (1 meses)		10.000	10.000
5.	Viajes internacionales profesor (1 mes)		10.000	10.000
6.	Publicaciones		7.000	7.000
	Total Anual	10.000	37.000	73.000
	Total Proyecto	120.000		

Contrapartidad Universidad de los Andes

	Actividad	Costo año 1	Costo año 2	Costo año 3
1.	Viaje a una escuela internacional de formación Estudiantes de Doctorado #1 y #2	8.000		
1.	Viaje a un congreso nacional para los Estudiantes de Doctorado #1 y #2	2.000		
5.	Viajes internacionales profesor (4 semanas)	10.000		
6.	Publicaciones	7.000		
2.	Salario Básico Jaime E. Forero-Romero (2014)	20.000	20.000	20.000
3.	Pasantía Estudiante de Doctorado #1 (1 mes)	36.000	36.000	
4.	Salario Básico Técnico DSIT (2014)	5.000	5.000	5.000
5.	Visita y Curso de Stefan Gottloeber (1 meses)	8.000		
	Total Anual	96.000	61.000	25.000
	Total Proyecto	185.000		

La dedicación al proyecto es de 15 % del tiempo para profesores. El costo mensual del salario se compone de un valor básico (X.XXX) más un factor prestacional (X.XXX) Se asumen incrementos salariales anuales del 4 %.

La dedicación al proyecto es de 15 % para los técnicos encargados de mantener e instalar los recursos de computación de alto rendimiento.

20. Bibliografía

Referencias

- [1] M. Baldi. Dark Energy simulations. *Physics of the Dark Universe*, 1:162–193, November 2012.

- [2] M. Colless, G. Dalton, S. Maddox, W. Sutherland, P. Norberg, S. Cole, J. Bland-Hawthorn, T. Bridges, R. Cannon, C. Collins, W. Couch, N. Cross, K. Deeley, R. De Propriis, S. P. Driver, G. Efstathiou, R. S. Ellis, C. S. Frenk, K. Glazebrook, C. Jackson, O. Lahav, I. Lewis, S. Lumsden, D. Madgwick, J. A. Peacock, B. A. Peterson, I. Price, M. Seaborne, and K. Taylor. The 2dF Galaxy Redshift Survey: spectra and redshifts. *MNRAS*, 328:1039–1063, December 2001.
- [3] M. Davis, G. Efstathiou, C. S. Frenk, and S. D. M. White. The evolution of large-scale structure in a universe dominated by cold dark matter. *ApJ*, 292:371–394, May 1985.
- [4] D. J. Eisenstein, I. Zehavi, D. W. Hogg, R. Scoccimarro, M. R. Blanton, R. C. Nichol, R. Scranton, H.-J. Seo, M. Tegmark, Z. Zheng, S. F. Anderson, J. Annis, N. Bahcall, J. Brinkmann, S. Burles, F. J. Castander, A. Connolly, I. Csabai, M. Doi, M. Fukugita, J. A. Frieman, K. Glazebrook, J. E. Gunn, J. S. Hendry, G. Hennessy, Z. Ivezic, S. Kent, G. R. Knapp, H. Lin, Y.-S. Loh, R. H. Lupton, B. Margon, T. A. McKay, A. Meiksin, J. A. Munn, A. Pope, M. W. Richmond, D. Schlegel, D. P. Schneider, K. Shimasaku, C. Stoughton, M. A. Strauss, M. Subbarao, A. S. Szalay, I. Szapudi, D. L. Tucker, B. Yanny, and D. G. York. Detection of the Baryon Acoustic Peak in the Large-Scale Correlation Function of SDSS Luminous Red Galaxies. *ApJ*, 633:560–574, November 2005.
- [5] J. G. Fernández-Trincado, J. E. Forero-Romero, G. Foex, T. Verdugo, and V. Motta. The Abundance of Bullet Groups in Λ CDM. *ApJL*, 787:L34, June 2014.
- [6] J. E. Forero-Romero, S. Gottloeber, and G. Yepes. Bullet Clusters in the MARENOSTRUM Universe. *ApJ*, 725:598–604, December 2010.
- [7] J. E. Forero-Romero, Y. Hoffman, S. Gottloeber, A. Klypin, and G. Yepes. A dynamical classification of the cosmic web. *MNRAS*, 396:1815–1824, July 2009.
- [8] Y. Hoffman, O. Metuki, G. Yepes, S. Gottloeber, J. E. Forero-Romero, N. I. Libeskind, and A. Knebe. A kinematic classification of the cosmic web. *MNRAS*, 425:2049–2057, September 2012.

- [9] A. Klypin, A. V. Kravtsov, O. Valenzuela, and F. Prada. Where Are the Missing Galactic Satellites? *ApJ*, 522:82–92, September 1999.
- [10] M. Levi, C. Bebek, T. Beers, R. Blum, R. Cahn, D. Eisenstein, B. Flaugher, K. Honscheid, R. Kron, O. Lahav, P. McDonald, N. Roe, D. Schlegel, and representing the DESI collaboration. The DESI Experiment, a whitepaper for Snowmass 2013. *ArXiv e-prints*, August 2013.
- [11] M. J. Mortonson, D. H. Weinberg, and M. White. Dark Energy: A Short Review. *ArXiv e-prints*, December 2014.
- [12] J. A. Peacock, S. Cole, P. Norberg, C. M. Baugh, J. Bland-Hawthorn, T. Bridges, R. D. Cannon, M. Colless, C. Collins, W. Couch, G. Dalton, K. Deeley, R. De Propris, S. P. Driver, G. Efsthathiou, R. S. Ellis, C. S. Frenk, K. Glazebrook, C. Jackson, O. Lahav, I. Lewis, S. Lumsden, S. Maddox, W. J. Percival, B. A. Peterson, I. Price, W. Sutherland, and K. Taylor. A measurement of the cosmological mass density from clustering in the 2dF Galaxy Redshift Survey. *Nature*, 410:169–173, March 2001.
- [13] K. Riebe, A. M. Partl, H. Enke, J. Forero-Romero, S. Gottloeber, A. Klypin, G. Lemson, F. Prada, J. R. Primack, M. Steinmetz, and V. Turchaninov. The MultiDark Database: Release of the Bolshoi and MultiDark cosmological simulations. *Astronomische Nachrichten*, 334:691–708, August 2013.
- [14] R. Scoccimarro. Redshift-space distortions, pairwise velocities, and nonlinearities. *PRD*, 70(8):083007, October 2004.
- [15] V. Springel, S. D. M. White, A. Jenkins, C. S. Frenk, N. Yoshida, L. Gao, J. Navarro, R. Thacker, D. Croton, J. Helly, J. A. Peacock, S. Cole, P. Thomas, H. Couchman, A. Evrard, J. Colberg, and F. Pearce. Simulations of the formation, evolution and clustering of galaxies and quasars. *Nature*, 435:629–636, June 2005.
- [16] M. White. The Zel’dovich approximation. *MNRAS*, 439:3630–3640, April 2014.
- [17] D. G. York, J. Adelman, J. E. Anderson, Jr., S. F. Anderson, J. Annis, N. A. Bahcall, J. A. Bakken, R. Barkhouser, S. Bastian, E. Berman,

W. N. Boroski, S. Bracker, C. Briegel, J. W. Briggs, J. Brinkmann, R. Brunner, S. Burles, L. Carey, M. A. Carr, F. J. Castander, B. Chen, P. L. Colestock, A. J. Connolly, J. H. Crocker, I. Csabai, P. C. Czarpata, J. E. Davis, M. Doi, T. Dombeck, D. Eisenstein, N. Ellman, B. R. Elms, M. L. Evans, X. Fan, G. R. Federwitz, L. Fiscelli, S. Friedman, J. A. Frieman, M. Fukugita, B. Gillespie, J. E. Gunn, V. K. Gurbani, E. de Haas, M. Haldeman, F. H. Harris, J. Hayes, T. M. Heckman, G. S. Hennessy, R. B. Hindsley, S. Holm, D. J. Holmgren, C.-h. Huang, C. Hull, D. Husby, S.-I. Ichikawa, T. Ichikawa, Ž. Ivezić, S. Kent, R. S. J. Kim, E. Kinney, M. Klaene, A. N. Kleinman, S. Kleinman, G. R. Knapp, J. Korienek, R. G. Kron, P. Z. Kunszt, D. Q. Lamb, B. Lee, R. F. Leger, S. Limmongkol, C. Lindenmeyer, D. C. Long, C. Loomis, J. Loveday, R. Lucinio, R. H. Lupton, B. MacKinnon, E. J. Mannery, P. M. Mantsch, B. Margon, P. McGehee, T. A. McKay, A. Meiksin, A. Merrelli, D. G. Monet, J. A. Munn, V. K. Narayanan, T. Nash, E. Neilsen, R. Neswold, H. J. Newberg, R. C. Nichol, T. Nicinski, M. Nonino, N. Okada, S. Okamura, J. P. Ostriker, R. Owen, A. G. Pauls, J. Peoples, R. L. Peterson, D. Petravick, J. R. Pier, A. Pope, R. Pordes, A. Prossapio, R. Rechenmacher, T. R. Quinn, G. T. Richards, M. W. Richmond, C. H. Rivetta, C. M. Rockosi, K. Ruthmansdorfer, D. Sandford, D. J. Schlegel, D. P. Schneider, M. Sekiguchi, G. Sergey, K. Shimasaku, W. A. Siegmund, S. Smee, J. A. Smith, S. Snedden, R. Stone, C. Stoughton, M. A. Strauss, C. Stubbs, M. SubbaRao, A. S. Szalay, I. Szapudi, G. P. Szokoly, A. R. Thakar, C. Tremonti, D. L. Tucker, A. Uomoto, D. Vanden Berk, M. S. Vogeley, P. Waddell, S.-i. Wang, M. Watanabe, D. H. Weinberg, B. Yanny, N. Yasuda, and SDSS Collaboration. The Sloan Digital Sky Survey: Technical Summary. *AJ*, 120:1579–1587, September 2000.