



Fecha de presentación del Informe: Día Mes Año

Datos generales del Proyecto

Código del proyecto: 7924			
Título del proyecto: Campos Vectoriales en Modelos Cosmológicos Inflacionarios			
Facultad o Instituto Académico: Ciencias Naturales y Exactas			
Departamento o Escuela: Física			
Grupo (s) de investigación: Gravitación			
Investigadores ¹	Nombre	Tiempo asignado	Tiempo dedicado
Investigador Principal	Cesar Alonso Valenzuela Toledo	10	10
Coinvestigadores	Josué Motoa Manzano	20	20
	Juan Carlos Bueno Sánchez	10	10
Otros participantes			

¹ Todas las personas relacionadas en el informe y que participen en el proyecto deben haber suscrito el acta de propiedad intelectual de acuerdo con los formatos establecidos.

1. Resumen.

El estudio de las propiedades estadísticas de las anisotropías en la radiación cósmica de fondo (RCF), es un problema fundamental en cosmología, ya que su estudio permite discriminar entre los diferentes modelos cosmológicos inflacionarios propuestos para la formación de las estructuras a gran escala. En el contexto de la cosmología estándar, los modelos cosmológicos más aceptados son aquellos que suponen que la función de distribución de las fluctuaciones primordiales (estudiadas desde el punto de vista teórico a través de la perturbación primordial en la curvatura ζ y desde el punto de vista observacional a través del contraste en la temperatura de la RCF $\delta T/T_0$) es adiabática, casi gaussiana, invariante de escala y además preserva la isotropía y la homogeneidad estadísticas. No obstante, existen indicaciones observacionales que sugieren que el espectro de perturbaciones impreso en el fondo cósmico de microondas presenta desviaciones significativas con respecto a la gaussianidad, homogeneidad e isotropía estadística [1,2]. Tales observaciones constituyen las ya bien conocidas anomalías de la radiación cósmica de fondo [1,2]. La relevancia de las anomalías del fondo cósmico en el desarrollo de este proyecto radica en que, según se ha especulado con base en el análisis de los datos observacionales, algunas de ellas podrían ser explicadas si se incluyen campos vectoriales en la dinámica inflacionaria. En este sentido, durante el desarrollo del proyecto se estudiaron diversos modelos inflacionarios con campos vectoriales [3,4,5]; en algunos casos se analizó si es posible obtener un periodo inflacionario [5], en otra situación se estudiaron sus simetrías [4] y en otros casos se analizaron desviaciones del comportamiento gaussiano e isótropo en la distribución de las fluctuaciones de la *perturbación primordial en la curvatura* ζ [3]. El resultado mas importante del proyecto de investigación corresponde al artículo de la referencia [3], donde se presenta un método de evaluación de los efectos de los campos vectoriales en las *funciones de correlación*. Particularmente, en este trabajo se calcularon las funciones de correlación de dos y tres puntos la *perturbación primordial en la curvatura*. En concreto, se utilizó el espectro de potencias de la perturbación en la curvatura parametrizado de la siguiente forma: $P_{\zeta}(\vec{k}) \equiv P_{\zeta}(k) \left[1 + g_{\zeta}(k) (\hat{n} \cdot \hat{k})^2 \right]$, donde g_{ζ} es el *parámetro de anisotropía estadística* y $\hat{n}$ un vector unitario que apunta en la *dirección preferencial* y luego, utilizando el formalismo δN , se calculó el parámetro de no gaussianidad f_{NL} en el bispectro B_{ζ} y se determinaron los efectos de *dependencia de escala* y de *forma* parametrizados a través de $g_{\zeta}(k)$. Los resultados de este trabajo indican que los efectos de los campos vectoriales en las funciones de dos y tres puntos son muy pequeños, prácticamente indetectables cuando se consideran los valores observados para el parámetro g_{ζ} .

Abstrac:

The study of the statistical properties of the anisotropies in the cosmic microwave background (CMB) is a fundamental problem in modern cosmology because its study allow us to discriminate between the diferent cosmological inflationary models proposed to explain the large-scale structure of the universe that we observe today. The simplest and most accepted standard cosmological inflationary models, are those in which the distribution function of the primordial fluctuations (which are studied from theoretical point of view through the primoridal curvature perturbation ζ and from observational point of view through the contrast in the temperatura of CMB $\delta T/T_0$) is almost adiabatic, almost gaussian, and almost scale invariant, whereas it preserves the statistical homogeneity and isotropy. Sin embargo, observaciones recientes sugest que el espectro de las perturbaciones primordiales impreso en el CMB presentar pequeñas desviaciones con respecto a la gaussianidad, la isotropía estadística y la homogeneidad estadística [1,2]. These observations constitute the well known “cosmic anomalies” [1,2] and are a powerful motivation to include vector fields in the dynamics of inflation because they allow us to explain some of those anomalies, for example, the generation of statistical anisotropy in virtue of the existence of preferred directions which are inherent to the nature of these fields. In this sence, in this project, we studied some cosmological inflationary models that include vector fields [3,4,5]. We analized if this models are able to support an inflationary period [5], we studied their simmetries [4] and the possible deviation of the gaussianity, of the statistical isotropy and of the scale invariance of the distribution function of the primordial curvature perturbation [3]. In Ref. [3] we estimate the scale and shape dependent effects on the non-Gaussianity (NG) parameters due to the scale dependent statistical anisotropy in the distribution of the fluctuations. For concreteness, we use a power spectrum (PS) of the fluctuations of the quadrupolar form: $P_{\zeta}(\vec{k}) \equiv P_{\zeta}(k) \left[1 + g_{\zeta}(k) (\hat{n} \cdot \hat{k})^2 \right]$, where $g_{\zeta}(k)$ is the only quantity which parametrizes the level of statistical anisotropy and $\hat{n}$ is a unitary vector which points towards the preferred direction. Then, we evaluate the contribution of the running of $g_{\zeta}(k)$ on the NG parameters by means of the δN formalism. We focus specifically on the details for the f_{NL} NG parameter, associated with the bispectrum B_{ζ} , but the structure of higher order NG parameters is straightforward to generalize. Although the level of statistical anisotropy in the PS is severely constrained by recent observations, the importance of statistical anisotropy signals in higher order correlators remains to be determined, this being the main task that we address here. The precise measurement of the shape and scale dependence (or running) of statistical parameters such as the NG parameters and the statistical anisotropy level could provide relevant elements for model building and for the determination of the presence (or nonpresence) of inflationary vector fields and their role in the inflationary mechanism.

2. Síntesis del proyecto:

El principal objetivo del proyecto era estudiar los descriptores estadísticos de la perturbación primordial en la curvatura ζ , para modelos cosmológicos inflacionarios que incluyen campos vectoriales en su dinámica, y que exhiben violaciones de la isotropía estadística e incluyen dependencia de la escala. Como prueba de la verificación del cumplimiento del objetivo principal del proyecto se presentan los artículos titulados “*Scale and shape dependent non-Gaussianity in the presence of inflationary vector fields*” y que fue publicado en la revista *Physical Review D*; “*de Sitter symmetries and inflationary scalar-vector models*”, el cual se encuentra actualmente en proceso de revisión en la revista *Universitas Scientiarum* y “*On the coupling of vector fields to the gauss-bonnet invariant*”, que está en la etapa final de escritura. A continuación se presenta un resumen de los principales resultados contenidos en estos artículos.

1. La cuantificación precisa de los descriptores estadísticos de las anisotropías en la radiación cósmica de fondo, tales como el nivel de anisotropía estadística g_ζ y los niveles de no gaussianidad en el bispectro f_{NL} y en el trispectro τ_{NL} , brindan información importante que permite acercarnos al modelo teórico ideal que describe la evolución del universo hasta nuestros días. En este sentido es posible que cada una de estas cantidades presente una contribución anisótropa (debido, por ejemplo, a la presencia de un campo vectorial en la dinámica inflacionaria) o lo que se conoce como dependencia de la “escala” o de la “forma”, las cuales son características que pueden ser cuantificadas. Es así como en la referencia [RBV], se utilizó el formalismo δN para calcular el nivel de no-gaussianidad f_{NL} en el bispectro B_ζ y cuantificar su dependencia de escala y de forma debida a la dependencia de escala del parámetro de anisotropía estadística g_ζ (dado que, en general, f_{NL} tiene una dependencia implícita con g_ζ). De manera genérica, se calcularon los efectos debidos a la presencia de campos vectoriales como fuente de la perturbación primordial en la curvatura ζ , los cuales se pueden observar en las funciones de correlación de ζ . En el artículo [RBV] se presenta un método de evaluación de los efectos de los campos vectoriales en las funciones de correlación. Particularmente, en este trabajo se calculan las funciones de dos y tres puntos. En estas funciones se puede evaluar las desviaciones con respecto al comportamiento isótropo por medio del parámetro de anisotropía estadística g_ζ y de un vector unitario $\mathbf{n}$ que viene determinado por la dirección del campo vectorial. Los resultados de este trabajo indican que los efectos de los campos vectoriales en las funciones de dos y tres puntos son muy pequeños, prácticamente indetectables cuando se consideran los valores observados para el parámetro g_ζ ($g_\zeta = 0,002 \pm 0,016$, 68 % de nivel de confianza [1]). Se plantean diferentes posibilidades para explorar efectos relacionados con la anisotropía estadística originada por campos vectoriales y se dejan como perspectivas para posibles trabajos futuros. Entre estas perspectivas se cuentan: una parametrización diferente de las funciones de correlación con respecto a diferentes parámetros de anisotropía estadística, la inclusión de efectos relacionados con un campo pseudoescalar (violación de paridad) y la inclusión de efectos relacionados con la presencia de campos vectoriales de gauge no Abelianos.
2. En el artículo de la referencia [4] se estudia la correspondencia entre una teoría de campos en el espacio de De Sitter en D dimensiones y una teoría dual conforme en un espacio euclidiano en $(D-1)$ dimensiones. Se investigó la forma en la que se establece esta correspondencia para un sistema compuesto por un campo escalar y un campo vectorial acoplados, propagándose en el espacio de De Sitter y se analizaron algunas

condiciones necesarias (mas no suficientes) para las cuales la simetría conforme es preservada en la teoría dual en $(D-1)$ dimensiones, haciendo posible el establecimiento de la correspondencia. En particular, se calculó el peso conforme de los campos involucrados, el cual será utilizado en un trabajo posterior para calcular las funciones de correlación de dichos campos y de la perturbación primordial en la curvatura ζ siguiendo la metodología propuesta en la referencia [Biageti]. En el modelo estudiado, el campo escalar es responsable de la expansión acelerada del universo y el campo vectorial es parcialmente responsable de la perturbación primordial en la curvatura, lo cual permite estudiar varias características importantes tales como la violación a la isotropía, la violación a la paridad, el origen de los campos magnéticos primordiales, etc.

3. Como parte de la investigación de la física de modelos cosmológicos inflacionarios que incluyen campos vectoriales, se estudió en el artículo de la referencia [5] la dinámica inflacionaria de un campo vectorial masivo acoplado no mínimamente al invariante de Gauss-Bonnet (GB). En este caso se investigó si era posible que el campo vectorial obtuviera un espectro de perturbaciones independiente de la escala y que al mismo tiempo pudiera contribuir a la perturbación en la curvatura en una época posterior. Se encontró que para satisfacer estas dos condiciones simultáneamente es necesario que la constante de acople entre el campo vectorial y el invariante de Gauss-Bonnet sea extremadamente pequeña (para mas detalles ver Ref. [3]) y por lo tanto este modelo resulta poco atractivo en el ámbito de la cosmología inflacionaria.

3. Productos:

Cantidad y tipo de productos pactados en el *Acta de Trabajo y Compromiso* y productos finalmente presentados

TIPO DE PRODUCTOS	No. de PRODUCTOS PACTADOS		No. de PRODUCTOS PRESENTADOS	
Productos de nuevos conocimientos				
Artículo completo publicado en revistas A1 o A2	0		2	
Artículo completo publicados en revistas B	1		0	
Artículo completo publicados en revistas C				
Libros de autor que publiquen resultados de investigación				
Capítulos en libros que publican resultados de investigación				
Productos o procesos tecnológicos patentados o registrados				
· Prototipos y patentes				
· Software				
Productos o procesos tecnológicos usualmente no patentables o protegidos por secreto industrial				
Normas basadas en resultados de investigación				
Formación de recursos humanos	No. de estudiantes vinculados	No. de tesis	No. De estudiantes Vinculados	No. De tesis
Estudiantes de pregrado	2	0	2	2
Semillero de Investigación				
Estudiantes de maestría	1	0	1	0
Estudiantes de doctorado				
Productos de divulgación				



TIPO DE PRODUCTOS	No. de PRODUCTOS PACTADOS		No. de PRODUCTOS PRESENTADOS	
Publicaciones en revistas no indexadas				
Ponencias presentadas en eventos (congresos, seminarios, coloquios, foros)	No. de ponencias nacionales 1	No. de ponencias internacionales 1	No. de ponencias nacionales 1	No. de ponencias internacionales 1
Propuesta de investigación				
Propuestas presentadas en convocatorias externas para búsqueda de financiación.	1		1	

Detalle de productos

RESULTADOS	INDICADOR DE CUMPLIMIENTO	DESCRIPCIÓN DEL RESULTADO OBTENIDO	ANEXO SOPORTE
Formación de Recurso Humano: Maestría	Compromiso adquirido: 1 Compromiso alcanzado: 0	Sr. Josué Motoa Manzano quien se encuentra matriculado en el programa de Maestría en Física de la Universidad del Valle y su tesis está orientada por el profesor César Alonso Valenzuela Toledo y codirigida por el Profesor Juan Pablo Beltrán Almeida (Anexo 1).	Anexo 1
Formación de Recurso Humano: Pregrado	Compromiso adquirido: 2 Compromiso alcanzado: 2	1. Sr. Harold Edinson Viveros Delgado graduado del programa de Física y cuya tesis fue dirigida por el profesor César Alonso Valenzuela Toledo . Trabajo de investigación: Magnetogénesis primordial (Anexo 2). 2. Sr. Juan Pablo Hoyos Daza graduado del programa de Física y cuya tesis fue dirigida por el profesor César Alonso Valenzuela Toledo y codirigida por el Profesor: Juan Pablo Beltrán Almeida . Trabajo de investigación: Simetrías en grandes estructuras del Universo (Anexo 3).	Anexo 2 Anexo 3
Generación de Nuevo Conocimiento	Compromiso adquirido: 1 Compromiso alcanzado: 2	1. Artículo publicado en la revista: <i>Physical Review D</i> [3] (Anexo 4). 2. Artículo enviado para publicación [4] (Anexos 5 y 6). 3. Artículo en preparación [4] (Anexo 7).	Anexo 4 Anexo 5 Anexo 6 Anexo 7
Divulgación del Conocimiento: Charlas	Compromiso adquirido: 2 Compromiso alcanzado: 2	1. Campos vectoriales en Cosmología por César A. Valenzuela-Toledo - charla presentada en el V Congreso Colombiano de Astronomía y Astrofísica – COCOA 2014, San Juan de Pasto - Colombia, 3 de Diciembre de 2014 (Anexo 8). 2. On the coupling of vector fields to the Gauss-Bonnet invariant por César A. Valenzuela-Toledo - poster presentado en el GR100 in Rio , Rio de Janeiro – Brasil, 29 de Julio de 2015 (Anexo 9)	Anexo 8 Anexo 9

4. Impactos actual o potencial:

El proyecto se enmarca dentro de la ciencias básicas y por ende busca estudiar y/o dar respuesta a preguntas o problemas fundamentales y por lo tanto sus impactos se ven reflejados esencialmente en dos aspectos: primero, en la generación de nuevo conocimiento, lo cual permite incrementar la productividad investigativa de los grupos de investigación involucrados y en general de las universidades locales, siendo este factor muy importante ya que influye positivamente en la visibilidad internacional y, segundo, en la formación de nuevos investigadores.

TIPO DE IMPACTO	DESCRIPCIÓN DEL IMPACTO	PROYECCIÓN DEL IMPACTO
IMPACTOS EN EL CONOCIMIENTO DEL CAMPO DE ESTUDIO, LA CIENCIAS Y LA TECNOLOGÍA	Se ha publicado un en la revista Physical Review D [3]. Un artículo adicional fue enviado para su publicación a la revista Universitas Scientiarum [4] y uno mas se encuentra en su etapa final de escritura [5].	Se espera la publicación de por lo menos otro artículo, de otro lado se espera que los artículos publicados sean ampliamente citados por la comunidad científica nacional e internacional. También se pretende incrementar la productividad académica de la comunidad científica local.
APROPIACION SOCIAL DE CONOCIMIENTO	Trabajos presentados en eventos científicos y académicos donde se presentan los principales resultados, en total se han presentado 2 trabajos entre charlas y carteles (Anexos 8,9).	Fortalecimiento de la comunidad científica local y concientizar a la comunidad de la importancia de hacer investigación en Ciencias Básicas, para esto se continuará participando en eventos académicos de impacto nacional e internacional.
FORMACIÓN DE RECURSO HUMANO	Estuvieron vinculados al proyecto dos estudiantes del programa de pregrado en Física (los cuales ya se graduaron) y un estudiante de Maestría en Física.	Este grupo de estudiantes y graduados está contribuyendo al fortalecimiento gradual de la comunidad científica local y a la apropiación social del conocimiento. Se espera que su impacto en la sociedad se vaya incrementando a medida que avanzan en su formación.

5. REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- [1] P.A.R. Ade et al. [Planck Collaboration], Planck 2015 results. XVI. Isotropy and statistics of the CMB, arXiv:1506.07135 [astro-ph.CO]; J. Kim and E. Komatsu, *Limits on anisotropic inflation from the Planck data*, Phys. Rev. D 88, **101301** (2013) [arXiv:1310.1605 [astro-ph.CO]].
- [2] L. Perivolaropoulos, *Large Scale Cosmological Anomalies and inhomogeneous Dark Energy*, Galaxies **2**, 22 (2014).
- [3] J. P. Beltrán Almeida, Y. Rodríguez and C. A. Valenzuela-Toledo, *Scale and shape dependent non-Gaussianity in the presence of inflationary vector fields*, Phys. Rev. D 90, **103511** (2014) [arXiv:1405.7374 [astro-ph.CO]].
- [4] J. Motoa-Manzano, J. P. Beltrán Almeida and C. A. Valenzuela-Toledo, *de Sitter symmetries and inflationary scalar-vector models*. Submitted to **Universitas Scientiarum**.
- [5] J. C. Bueno-Sánchez and C. A. Valenzuela-Toledo, *On the Coupling of Vector Fields to the Gauss-Bonnet Invariant*.

6. LISTA DE ANEXOS

1. Carta oficial que indica que el Sr. Josué Motoa Manzano se encuentra matriculado en el programa de Maestría en Física de la Universidad del Valle.
2. Acta de sustentación de la tesis del Sr. Harold Edinson Viveros Delgado.
3. Acta de sustentación de la tesis del Sr. Juan Pablo Hoyos Daza.
4. Copia artículo publicado en la revista: Physical Review D.
5. Copia artículo enviado a la revista Universitas Scientiarum.
6. Soporte de artículo enviado a la revista Universitas Scientiarum.
7. Copia Artículo en preparación.
8. Soporte charla 01.
9. Soporte charla 02.

Firma del investigador principal

VoBo. Vicedecano de Investigaciones



VICERRECTORIA DE INVESTIGACIONES
División de Proyectos

**FORMATO PARA LA ELABORACIÓN
DE INFORMES FINALES -
PROYECTOS DE INVESTIGACIÓN**