

ANÁLISIS HISTÓRICO EN TORNO A LA CONTROVERSIA
EDDINGTON-CHANDRASEKHAR

BRAYAN ESTIVEN MORENO CASTRO

UNIVERSIDAD PEDAGÓGICA NACIONAL

FACULTAD DE CIENCIA Y TECNOLOGÍA

DEPARTAMENTO DE FÍSICA

BOGOTÁ, D.C

COLOMBIA

2026

ANÁLISIS HISTÓRICO EN TORNO A LA CONTROVERSIA
EDDINGTON-CHANDRASEKHAR

BRAYAN ESTIVEN MORENO CASTRO

TRABAJO DE GRADO PRESENTADO PARA OPTAR AL TÍTULO DE
LICENCIADO EN FÍSICA

DIRECTOR: FRANCISCO JAVIER OROZCO GONZÁLEZ

UNIVERSIDAD PEDAGÓGICA NACIONAL
FACULTAD DE CIENCIA Y TECNOLOGÍA
DEPARTAMENTO DE FÍSICA

LÍNEA DE INVESTIGACIÓN:
LA ENSEÑANZA DE LAS CIENCIAS DESDE UNA PERSPECTIVA CULTURAL
BOGOTÁ, D.C
COLOMBIA
2026

AGRADECIMIENTOS

A mi director de trabajo de grado, por su paciencia infinita y su rigor al cuestionar cada coma, cada fuente, cada idea preconcebida. Sin su brújula crítica, este viaje histórico habría sido un archipiélago de datos sin conexión.

A los magos de Bogotá (sí, ustedes), que sin saberlo me enseñaron que la ciencia y el misterio no son enemigos, sino lentes distintos para un mismo universo.

A los Mamos de la Sierra Nevada de Santa Marta, guardianes del Corazón del Mundo. Ustedes que leen en las aguas lo que nosotros apenas susurramos, que saben del latido de la tierra antes que de las ecuaciones del cielo. Sin sus ceremonias, sin su mirada puesta en mí desde antes de nacer, mi pierna no cantaría a 144000 Hz ni mis manos sabrían donde sembrar. Este trabajo, que habla de estrellas que colapsan y renacen, también es suyo. Porque me enseñaron que el límite no es el final, sino el umbral.

Y, finalmente, a la física misma: por ser un refugio en un mundo que a menudo prefiere las respuestas fáciles a las preguntas incómodas. Este trabajo no cierra un debate, sino que abre una ventana a quienes vendrán después, con mejores herramientas y más valentía.

Brayan Estiven Moreno Castro

Bogotá, bajo la misma Luna que vio arder a Eddington y soñar a Chandrasekhar

DEDICATORIA

A las estrellas que no temieron brillar en medio de la oscuridad:

A mis padres, cuyo sacrificio silencioso fue el combustible que mantuvo encendida mi curiosidad, incluso cuando el camino se nubló de incertidumbres y fracturas.

A los maestros que me enseñaron que la física no solo se escribe con ecuaciones, sino con preguntas que desafían dogmas.

Y a Subrahmanyan Chandrasekhar, cuya tenacidad frente al desdén de los gigantes de su tiempo me recordó que hasta las estrellas colapsadas renacen en luz.

"Y de Leví dijo:

*Tu Tumim y tu Urim sean para tu varón piadoso,
a quien pusiste a prueba en Masah,
con quien luchaste en las aguas de Meribá;
el que dijo de su padre y de su madre: "Nunca los he visto",
y no reconoció a sus hermanos, ni conoció a sus propios hijos.*

*Porque ellos guardaron tu palabra
y cumplieron tu pacto.*

*Enseñarán tus juicios a Jacob,
y tu ley a Israel."*

Deuteronomio 33:8-10

Contenido

INTRODUCCIÓN	8
PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA Y JUSTIFICACIÓN	9
PREGUNTAS ORIENTADORAS	11
OBJETIVOS	11
Objetivo General	11
Objetivos específicos.....	11
ANTECEDENTES.....	12
METODOLOGÍA.....	13
CAPÍTULO 1: Las controversias científicas y su rol en el conocimiento científico: el origen de esta travesía.....	14
1.1 El papel de las controversias científicas en la historia de las ciencias.....	14
1.2 Algunos ejemplos de controversias en la historia de la ciencia	16
1.2.1 La interpretación de la mecánica cuántica	16
1.2.2 La deriva continental.....	17
1.2.3 La aceptación y producción de la penicilina	17
1.3 El papel pedagógico de las controversias científicas.....	18
1.3.1 Las controversias científicas como escenario pedagógico.....	20
CAPITULO 2.....	25
Dos vidas, dos mundos: Eddington, Chandrasekhar y el escenario de la controversia .	25
2.1 La Relación entre Gran Bretaña e India a Principios del Siglo XX: dominación, transformación y resistencia.....	26
2.2 El joven Chandrasekhar (del carácter y la importancia de la ciencia hindú)	28
2.3 Aspectos biográficos, históricos y culturales de Arthur Eddington	32
2.4 Concepciones filosóficas de Sir Arthur Eddington	34
2.5 El encuentro en Cambridge	35
CAPITULO 3.	37
La controversia Eddington-Chandrasekhar	37
3.1 El descubrimiento de las estrellas enanas blancas	37
3.2 El descubrimiento de la masa límite.....	38

3.3 Las enanas blancas de Eddington	41
3.4 La teoría de Chandrasekhar para el límite de masa	42
3.4.1 Degeneración relativista en configuraciones estelares	45
3.4.2 La teoría de Chandrasekhar (1934)	46
3.5 El ataque de Eddington: La álgida reunión de enero de 1935.....	52
3.6 Síntesis de las posturas de Eddington y Chandrasekhar, que producen la controversia.	53
CAPITULO 4. Análisis histórico y consideraciones socio-epistémicas de la controversia Eddington-Chandrasekhar	56
4.1 La sociología de la ciencia	56
4.2 El Ethos científico de Merton en la sociología de la ciencia	58
4.3 La autoridad científica como obstáculo y facilitador.....	59
4.4 Análisis comparativo: normas Mertonianas vs la realidad de la controversia.....	60
4.5 El porqué del uso del ethos Mertoniano en la controversia Eddington- Chandrasekhar	61
4.6 Análisis de la controversia Eddington-Chandrasekhar	62
Reflexiones finales	64
La ciencia como proceso histórico y problemático	64
Demarcación, racionalidad y límite de la falsación	65
El papel pedagógico de la controversia Eddington-Chandrasekhar en la enseñanza de las ciencias	65
Aportes específicos de la monografía.....	66
Limitaciones de la investigación	67
Referencias.....	68

INTRODUCCIÓN

A lo largo de la historia la enseñanza tradicional de la física se ha centrado en la transmisión de leyes, fórmulas y modelos teóricos que en principio parecen incuestionables; ya que se ha generado una concepción reduccionista de la ciencia. Dicha imagen contribuye a que la comprensión de la naturaleza del conocimiento científico sea limitada y sesgada. No obstante, se ha privado de una dimensión histórica, social y cultural necesaria.

En este contexto surge la presente monografía, orientada hacia la investigación de la controversia astrofísica entre Arthur Eddington y Subrahmanyan Chandrasekhar en torno a la naturaleza del límite de masa de las estrellas enanas blancas.

El primer apartado se titula “ El papel de las controversias en la enseñanza de las ciencias”, este desarrolla ideas en torno al florecimiento de las más prolíficas controversias que se han generado en la historia de la ciencia occidental; partiendo de unos planteamientos acerca del porqué y el para qué del estudio epistemológico de las controversias científicas, siguiendo la estructura del pensamiento de la línea de investigación a la cual pertenece mi monografía, toco aspectos acerca de la enseñanza de la astronomía en las escuelas Latinoamericanas, entre otros aspectos como los lineamientos curriculares del Ministerio de Educación Nacional sobre la didáctica de la astronomía.

Desde la perspectiva de la recontextualización de saberes, el desarrollo de los trabajos de exponentes como (Ayala, 2006), (Castillo, Juan , 2008), (Granés S. &., 1997) y finalmente (Orozco, 2005).

El segundo apartado se titula “ Dos vidas, dos mundos: Eddington, Chandrasekhar y el escenario de la controversia”. Este es una especie de análisis biográfico de fuentes primarias como (Venkataraman, 1992). En donde adicional a destacarse aspecto históricos y culturales se hacen alusión a aspectos poco revelados por la historia ortodoxa, como por ejemplo las cartas y correspondencia privada que Chandrasekhar mantuviera con su padre y con astrónomos como Jeans o Milne. En torno a Eddington se ha usado como fuente primaria a (Chandrasekhar S. , 1983).

El tercer apartado se titula “ La controversia entre Eddington y Chandrasekhar”. En él se da una síntesis teórica del estudio de la controversia y su abordaje disciplinar, obteniendo un compendio de análisis históricos de las obras originales de A. Eddington y S. Chandrasekhar.

El último apartado se titula "Análisis histórico y consideraciones socio-epistémicas de la controversia Eddington-Chandrasekhar". El cual aborda aspectos como la controversia Eddington-Chandrasekhar vista desde la óptica de la sociología de la ciencia con fundamentos teóricos como los de Merton y Popper. Se estudia el problema de la demarcación y la epistemología de la controversia en cuestión.

PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA Y JUSTIFICACIÓN

La precisión con que se abordan los estudios astrofísicos ha tenido desde hace casi 100 años un auge relativamente enriquecedor, con estandartes como Albert Einstein, Edwin Hubble, etc. El desarrollo de la Cosmología moderna brinda un abanico de cuestiones que subyacen a las preguntas más primigenias de la civilización. ¿Qué es la vida? ¿De dónde viene el ser humano?, ¿Cuál es el futuro de la actividad intelectual humana? ¿Está la civilización humana evolucionando o por el contrario se halla en una etapa de involución?

Teniendo en cuenta que este tipo de temáticas no se abordan usualmente en las clases de física de las instituciones escolares de básica o media se hace evidente lo que menciona la maestra Paula Cardona en su trabajo titulado "¿Astrofísica en la escuela?: Una propuesta para la enseñanza de la física de agujeros negros en la educación media". (Cardona Torres, 2023):

La astronomía es una de las ciencias que, en la actualidad, ha tomado mucha relevancia por los numerosos hallazgos que se han hecho durante el último siglo. Tales avances, inevitablemente resuenan dentro del aula y se convierten en un campo de estudio que tiene un gran atractivo en la escuela lo cual desde la experiencia como docente de física se ha evidenciado. Sin embargo, la enseñanza de esta ciencia carece de espacios que permitan abordar las preguntas y/o reflexiones que tienen los estudiantes respecto a ciertos fenómenos astronómicos y que como lo menciona (Percy, J 2018) "Nuestros estudiantes están influenciados por la astronomía que ellos aprenden fuera del aula, mucho más que por la astronomía que aprenden de nosotros".

El problema de la diversificación de verdades entre lo que los estudiantes conocen a través de otros escenarios no académicos pero que son agentes de cultura (como las redes sociales, documentales de TV). Sobre lo que enseñan y trabajan las escuelas en relación con los temas más recientes como supernovas, agujeros negros, galaxias y modelos cosmológicos.

Por otro lado, considerando los lineamientos del Ministerio de Educación Nacional (MEN) en el campo de las ciencias y la educación ambiental, es importante que los estudiantes adquieran la capacidad de explicar eventos, contar historias y explicar temas científicos relevantes. Sin embargo, faltan abordajes de temas relacionados con la astronomía y la astrofísica más allá de la presentación de algunos elementos básicos de los cometas, la Tierra, la teoría del Big Bang y el sistema solar (MEN, 1998). Además, destacando que usualmente las temáticas relacionadas con la astronomía en las instituciones escolares, se abordan principalmente desde el ámbito de las Ciencias Sociales en lugar de ser abordados desde las ciencias naturales o específicamente desde la física (Pulido, 2016).

Por lo tanto, la controversia Eddington-Chandrasekhar puede ser una manera de abordar la actividad científica en el desarrollo de teorías astrofísicas reconociendo el contexto y los elementos disciplinares y culturales que aparecieron en ella.

Reconocer el conocimiento como una actividad humana, un proceso en un espacio y tiempo definidos, y sobre esta base orientar la educación científica desde una perspectiva que facilite la transición de una forma de ver el mundo a otra (Ayala M. M., 2013), Permite imaginar la recontextualización del conocimiento como una actividad de investigación, realizada en este caso por egresados de la formación según su propio enfoque e intereses, y, además, entre autores que buscan elementos para formular la pregunta problema.

Permitiendo de esta manera reconocer que la historia debe ser permanentemente reconstruida, lo mismo que las líneas de desarrollo que se puedan establecer, aunque es importante tener en cuenta que se tiene la opción de lecturas diferentes del pasado, pues éstas dependen de las posturas que se asuman en el presente y por tanto de las intencionalidades que animan su reconstrucción (Ayala M. M., 2006).

Respecto a los análisis históricos en la enseñanza de las ciencias autores como (Granés J. , 1997) proponen que estos análisis permiten:

“Identificar las problemáticas que originalmente motivaron la elaboración de un conocimiento particular y, en muchas ocasiones, las contradicciones y los debates entre posiciones contrapuestas; problemáticas y debates que, en general, no aparecen en los libros de texto”.

Y es este caso de la controversia Eddington-Chandrasekhar porque por ella se desarrolló un conocimiento particular sobre las estrellas enanas blancas, que significó un antes y un después para los trabajos de los dos físicos en cuestión.

A partir de la reflexión del trabajo de los científicos, se pueden establecer criterios de la perspectiva de la recontextualización de saberes. El estudio de los textos originales de Chandrasekhar y Eddington permite identificar problemas en la enseñanza de las ciencias.

Otro aspecto importante es la formación de maestros de ciencias, donde se ve a la historia y filosofía de las ciencias para incidir sobre la imagen de la ciencia de los maestros, dado el papel que esta orienta su labor pedagógica.

Lo anterior permite construir un par de preguntas que orientaren la investigación

PREGUNTAS ORIENTADORAS

- ¿Qué aspectos históricos, culturales y disciplinares permiten generar la controversia entre Eddington y Chandrasekhar?
- A partir del análisis histórico-crítico de la controversia Eddington-Chandrasekhar, ¿qué reflexiones para la enseñanza de la física se pueden derivar?

OBJETIVOS

Objetivo General

Analizar de manera histórica, sociológica la controversia Eddington-Chandrasekhar, para comprender cómo la autoridad científica y los marcos conceptuales influyen en la aceptación de nuevas teorías y de ello se derivan implicaciones pedagógicas para la enseñanza de las ciencias en la formación de docentes.

Objetivos específicos

Caracterizar el papel de las controversias científicas en la historia de las ciencias a partir de algunos ejemplos

Reconstruir el contexto histórico, cultural y biográfico de Eddington y Chandrasekhar, atendiendo a sus trayectorias personales, para evidenciar cómo estos factores configuraron sus posiciones en la controversia.

Abordar la controversia Eddington-Chandrasekhar desde una mirada disciplinar y sociológica a través de la mirada de Merton.

ANTECEDENTES

Los antecedentes revisados constituyen un punto de referencia a nivel conceptual y metodológico bajo el cual se construye este trabajo de grado. Todos los antecedentes permiten articular de manera coherente tres dimensiones fundamentales para el trabajo: la dimensión disciplinar de la astrofísica de las enanas blancas, la dimensión histórico-epistemológica de las controversias científicas y la dimensión pedagógica bajo la recontextualización de saberes científicos en la enseñanza de la física.

En primer lugar, el trabajo de María Camisassa (2019) *sobre Estrellas enanas blancas y procesos físicos y aplicaciones* aporta las bases disciplinares para conceptualizar el trasfondo del problema físico que se analiza en esta monografía. Ese antecedente permite anclar la controversia Eddington-Chandrasekhar en una comprensión precisa de la física estelar.

En segundo lugar, la tesis de Sakura Gooneratne (2005) *Chandrasekhar, Eddington and the mass limit*, ofrece un recuento histórico detallado de la controversia entre ambos científicos, incorporando las posturas teóricas, el contexto institucional.

Por su parte, el trabajo de Lina del Pilar Hernández (2019), *Estudio histórico de la recepción de las teorías de la relatividad en Colombia desde la perspectiva de la recontextualización de saberes*, ofrece un marco metodológico y conceptual con el fin de abordar la relación entre la historia de la ciencia y la enseñanza de la física. Su enfoque en la recontextualización de saberes permite pensar como los conocimientos científicos se transforman y se adaptan a contextos educativos específicos.

Finalmente, el trabajo de Ferney León Borja (2016). *Estudio histórico-epistemológico del movimiento en la perspectiva newtoniana*, contribuye a consolidar la orientación referente a los análisis histórico-epistemológicos de esta monografía. Dado que la investigación muestra cómo el análisis detallado de un concepto físico desde una perspectiva histórica y epistemológica permite desnaturalizar los contenidos escolares y revisar los procesos de construcción de conocimiento científico.

En síntesis, los antecedentes seleccionados se complementan entre sí: mientras Camisassa (2019) aporta solidez disciplinar en el estudio de las enanas blancas, Gooneratne (2005) proporciona la reconstrucción histórica específica de la controversia, Hernández (2019) ofrece el marco de recontextualización de saberes para la enseñanza y León Borda (2016) consolida la perspectiva histórico-epistemológica aplicada a la didáctica de la física. Sobre estos preceptos, este trabajo de grado se propone articular dichas contribuciones en un estudio que integra historia, filosofía, sociología y pedagogía de la ciencia en torno a la controversia Eddington-Chandrasekhar, brindando así un aporte original a la formación de docentes de física en Colombia.

METODOLOGÍA

El presente trabajo de grado está inmerso y enmarcado bajo un enfoque cualitativo de investigación documental, con un alcance interpretativo y crítico. Se han adoptado tres dimensiones analíticas:

- *Análisis histórico:* Es una reconstrucción del contexto bajo el cual surge la controversia Eddington-Chandrasekhar, considerando factores de índole cultural, política y aspectos biográficos que rodearon a Arthur Eddington y Subrahmanyan Chandrasekhar. Se han consultado fuentes primarias (cartas, correspondencia, archivos de la Royal Astronomical Society) y secundarios (biografías, estudios especializados).
- *Análisis crítico:* Es un examen de las posturas epistemológicas y filosóficas que subyacen y enriquecen los argumentos de Eddington y Chandrasekhar. Se han identificado supuestos, contradicciones y cambios de paradigma. Este análisis está sustentado en los planteamientos de (Kuhn, 1970), (Popper, K, 1959) y la tradición moderna de la filosofía de la ciencia.
- *Análisis sociológico:* Se aplica el marco teórico del *ethos* científico de Robert K. Merton (universalismo, comunalismo, desinterés, escepticismo organizado) con el objetivo de comprender cómo las normas sociales, la autoridad científica y las jerarquías institucionales influyen en el desarrollo y la recepción de la controversia Eddington-Chandrasekhar. Se han incorporado a la vez elementos de la sociología del conocimiento y los estudios de la ciencia, tecnología y sociedad (CTS).

Finalmente, se deriva una reflexión pedagógica final que vincula los hallazgos del análisis con la enseñanza de las ciencias, en específico, para la formación de docentes de física en el contexto colombiano. Esta reflexión se establece bajo el argumento de la perspectiva de recontextualización de saberes y de la historia de las ciencias como herramienta didáctica.

CAPÍTULO 1

Las controversias científicas y su rol en el conocimiento científico: el origen de esta travesía.

Este capítulo aborda el papel que desempeñan las controversias científicas en la construcción y evolución del conocimiento en ciencias. Se parte de la consideración de que la ciencia no es solo un cuerpo de saberes acumulados, sino como una actividad humana dinámica, caracterizada por disputas, tensiones y procesos de negociación entre diferentes interpretaciones y paradigmas.

Esta perspectiva es crucial para comprender la controversia específica de este trabajo de grado; la controversia Eddington-Chandrasekhar, la cual sirve como caso ejemplar de cómo los factores culturales, sociales e institucionales impactan en el desarrollo de la ciencia.

Este capítulo inicia con la definición conceptual de lo que constituye una controversia científica, seguido de un recorrido histórico con ejemplos emblemáticos que ilustran los mecanismos de las controversias científicas y sus inherentes efectos.

Al final, se reflexiona acerca de la importancia de incorporar la historia de estas controversias en la enseñanza de las ciencias para promover una alfabetización científica crítica y contextualizada. La estructura del capítulo permite prepararse para el análisis detallado que se ejecutará en los capítulos posteriores, colocando la controversia Eddington-Chandrasekhar en un marco amplio y enriquecedor.

1.1 El papel de las controversias científicas en la historia de las ciencias.

El propósito de este apartado es mostrar que la ciencia no avanza de manera lineal ni acumulativa, sino a través de disputas, tensiones y rupturas que permiten cuestionar las ideas establecidas y abrir espacio a nuevas propuestas. Por ello se presentan diversas concepciones de controversias científicas, se analizan sus características y se discute su relevancia en los procesos de cambio de paradigma. -esto sienta las bases para comprender, en capítulos posteriores, la controversia Eddington-Chandrasekhar como un caso ejemplar de cómo los conflictos epistémicos y las luchas de poder moldean el devenir de la ciencia.

De acuerdo con (Harker D. , 2015), una controversia científica es una situación en la cual intervienen los miembros de la comunidad científica, aquellos realizan intensos debates en torno a la validez de las teorías, resultados experimentales, los métodos y las

posteriores interpretaciones. Aquellas disputas surgen por una evidente contradicción, manejos tradicionales diversos y valores epistémicos encontrados y no menos importante; por la necesidad de una emergencia de paradigmas alternativos, según lo evidenciado en (Kuhn, 1970).

En coherencia con lo anterior, una controversia científica también se puede definir como un conflicto epistemológico en el cual distintos actores dentro de la comunidad científica disputan la legitimidad de sus teorías e interpretaciones. Es decir, no se trata solo de un desacuerdo puntual, sino de un enfrentamiento entre maneras diferentes de entender, explicar y justificar un problema científico.

Esta segunda formulación complementa la primera al subrayar que la controversia no es únicamente técnica, sino profundamente ligada a cómo cada grupo concibe lo que se cataloga como conocimiento válido.

Profundizando en esta línea, (V. Laiviere, 2009) argumenta que estas no solo involucran discrepancias técnicas, sino que también se ejecutan en contextos históricos y sociales específicos, donde se movilizan recursos teóricos, retóricos y experimentales con el fin de obtener su validación.

Por otro lado, (Kuhn, 1970) muestra que las controversias son parte crucial de los procesos de cambio de paradigma en torno a la ciencia. De acuerdo con Kuhn, las controversias emergen cuando el paradigma dominante comienza a mostrar sus limitaciones, propiciando ciertas crisis que permiten que las nuevas teorías compitan hasta que alguna de ellas predomine.

Una controversia científica se puede establecer como un proceso complejo en el que se articulan varios aspectos cruciales. Como primera medida, siempre existe un objeto de disputa, ósea, el fenómeno particular, el modelo explicativo sobre el cual gira el desacuerdo. Este objeto puede ser, por ejemplo, la formulación de un modelo teórico-como el tratado en este trabajo de grado, el límite de masa de las enanas bancas propuesto por Chandrasekhar-. No obstante, dicho objeto no es estático, ya que a medida que la controversia avanza, lo que inicialmente parece una discusión, avanza convirtiéndose en el cuestionamiento de supuestos más profundos.

En segundo lugar, la controversia se caracteriza por la presencia de evidencias alternativas y marcos teóricos que están en competencia. Puesto que no es simplemente de una ausencia de datos aislados, sino de un conjunto de datos, cálculos o experimentos con los que cada parte de la controversia justifica su postura. Las evidencias han de ser sólidas en el sentido argumentativo y también en su pertinencia para la comunidad científica, no obstante, se articulan desde marcos conceptuales diferentes, lo cual conlleva a interpretaciones que divergen en torno a un mismo fenómeno.

Se asocia a lo anterior, los criterios de validación científica - reproducibilidad, coherencia con teorías vigentes, capacidad predictiva, plausabilidad física- éstos se vuelven un

objeto de discusión a lo largo de la controversia, ya que no sólo se debate la validez de una hipótesis, sino lo que cuenta como “buena evidencia” y los estándares que han de aplicarse con el fin de juzgar la legitimidad de las teorías propuestas.

En tercer lugar, toda controversia estudiada implica una pluralidad de actores y unas marcadas asimetrías de poder. Dado que no se reduce al refinamiento entre dos individuos, sino a que se involucran científicos, grupos de investigación, asociaciones científicas, y todos ellos poseen intereses, posiciones y jerarquías que difieren. Los actores se ven involucrados en redes de colaboración, escuelas de pensamiento y paradigmas tradicionales que están condicionados a la manera en que los argumentos son recibidos. Por lo tanto, las controversias poseen una marcada dimensión social, institucional y retórica, ya que se desarrollan en espacios públicos (congresos, publicaciones), acumulan material argumentativo y están atravesadas por aspectos epistémicos a la vez que por factores sociales y culturales. Como indica (Bloor, 1991), los hechos científicos y las teorías no se desarrollan ni consolidan en espacios vacíos, sino en el marco de comunidades que están negociando constantemente sus criterios de validez, sus jerarquías institucionales de credibilidad y sus maneras de argumentación.

1.2 Algunos ejemplos de controversias en la historia de la ciencia

En este apartado se muestran algunos ejemplos de controversias que la ciencia nos presenta a lo largo de la historia puesto que ellas son un claro ejemplo de la influencia de las controversias en la historia de la ciencia

Se muestran como ejemplo los siguientes hechos que han sido catalogadas como importantes controversias históricas a lo largo de la historia de la ciencia:

1.2.1 La interpretación de la mecánica cuántica

En los albores de principios de la primera década del siglo XX se desarrolló la mecánica cuántica, se fundamentaron las sus bases de conocimiento; no obstante, esta controversia gira en torno al carácter ontológico en cuanto a su origen y al epistémico alrededor de las interpretaciones que hay acerca de esta enigmática categoría de la naciente física moderna.

Los actores en esta controversia son el físico germano Albert Einstein y el danés Niels Bohr. El primero cuestiona su marcada naturaleza probabilística y la aparente pérdida del determinismo, (con Ernest Mach como uno de sus pioneros). Cuestionamientos enclaustrados en su icónica frase “Dios no juega a los dados”.

No obstante, Bohr defendió la interpretación de la escuela de la cual pertenecía, la escuela de Copenhague. Él acepta que la complementariedad y la incertidumbre eran esenciales para comprender el comportamiento de los átomos y que las limitaciones en el conocimiento humano impedían una descripción meramente objetiva.

El contexto del debate se radica alrededor de las famosas conferencias de Solvay. Allí se evidenciaron las tensiones filosóficas inherentes al auge y progreso de la ciencia en ese entonces y dio cabida a investigaciones posteriores acerca de los fundamentos epistemológicos y físicos de la teoría cuántica, según se evidencia en (D. C. Cassidy, 1992).

A pesar de los posteriores experimentos comprobatorios que se hicieron alrededor del respaldo a la interpretación convencional; la controversia aún se mantiene vigente en círculos académicos acerca de la naturaleza de la realidad y el papel de la observación en la ciencia.

1.2.2 La deriva continental

En el otoño de 1912 Alfred Wegener propuso la hipótesis de la deriva continental. Dicha hipótesis gira en torno al planteamiento de que los continentes se desplazaban de manera lenta sobre la superficie terrestre, desafiando el concepto de las tierras estáticas.

Wegener recolecta evidencias de carácter paleontológico y geográfico, como la concordancia entre fósiles y formaciones geológicas en continentes separados, dándole sustento a la mencionada hipótesis.

Sin embargo, la carencia de una explicación satisfactoria y sustancial acerca del mecanismo de desplazamiento ocasionó incredulidad y escepticismo entre la comunidad de geólogos y físicos de la época. Dado que aquellos defendían las existentes teorías en torno a un planeta estático y las fuerzas geodinámicas conocidas. (N. Oerkes, 1999).

Hubo que esperar varias décadas para que apareciera una formulación de la teoría de tectónica de placas y el reconocimiento del fenómeno de expansión del fondo oceánico. Concepciones que fueron aceptadas, significando el paradigma más importante de la geología moderna.

Este ejemplo de cambio en un paradigma, nos muestra como la ciencia puede rechazar inicialmente algunas ideas innovadoras debido a limitaciones de carácter técnico, hasta que las nuevas evidencias y metodologías explicativas logran la aceptación total.

1.2.3 La aceptación y producción de la penicilina

En 1928 Alexander Fleming descubrió la penicilina, aquello fue un avance icónico en la medicina, a pesar del escepticismo inicial con el que fue acogido. Fleming evidenció que

la colonia del hongo *Penicillium notatum* inhibía el crecimiento bacteriano de un cultivo, mostrando características esenciales para considerarlo como un agente terapéutico contra las infecciones bacterianas.

No obstante, por la pureza y la creciente producción del antibiótico se constituyó en un reto. Científicos como Howard Florey, Ernst Chain y Norman Heatley en la década de 1940 perfeccionaron los procedimientos industriales que se venían ejecutando, en pro de la obtención de penicilina y su inherente uso clínico durante la Segunda Guerra Mundial.

Esta controversia suscita una muestra de cómo los hallazgos científicos requieren de un desarrollo tecnológico acorde y de ser validado (en este caso) clínicamente para obtener la aceptación; mostrando un marcado carácter de interdisciplinariedad en la transformación del conocimiento en una práctica médica, según lo recogido en (R. Jenkins, L. Smith & D. Patel, 2010).

La aceptación de la penicilina y su posterior éxito forjó un cambio de paradigma en la medicina, hecho por el cual Fleming, Florey y Chain fueron laureados con el Premio Nobel de Medicina en 1945.

1.3 El papel pedagógico de las controversias científicas

Bajo la perspectiva de la enseñanza de las ciencias, el análisis de controversias permite a los estudiantes la adquisición de nociones acerca de la ciencia, vista como un proceso dinámico atravesado por incertidumbres, vicisitudes y debates constructivos, y no solo como conjunto cerrado de hechos. Esto enriquece el acervo intelectual y el pensamiento crítico, a la vez que la comprensión de la ciencia como una práctica histórica y social. Con base en la argumentación postulada en (Osborne, M. Monk & J., 1997).

Las controversias científicas han suscitado y suscitan un rol de catalizadores primarios para el progreso y renovación del conocimiento humano. No son simples desacuerdos de carácter científico; sino espacios donde convergen y fluyen aspectos epistemológicos, factores sociales y culturales que retan y enriquecen el desarrollo científico. Según (Kuhn T. S., 1962).

Como muestra del acervo y valoración que posee la ciencia en los amplios ámbitos culturales, se evidencia como una manifestación de los valores, creencias y tensiones sociales de su época, ejecutando un diálogo constante a través de la cultura humanística.

En (Snow, 1959) se propone que la sociedad occidental se ha dividido en dos grupos antagónicos: por una parte, los científicos (la cultura científica) y del otro lado los intelectuales humanistas (cultura de las letras). Entre ambas perspectivas existe lo que

Snow denomina un “abismo de incomprensión mutua” e incluso de hostilidad, impidiendo el diálogo y la colaboración efectiva. Esta división no solo es cultural sino problemática para la humanidad, puesto que la falta de entendimiento entre ambas culturas es un obstáculo hacia la solución de problemas globales.

La división tiene profundas implicaciones para la educación científica, puesto que la comprensión integral que es sumamente necesaria se hace difícil, generando obstáculos para la alfabetización científica y la participación ciudadana en temas técnicos y ambientales. (Snow, 1959), (Miller, 1998).

Los valores de la ciencia, tanto propios como contextuales entran a jugar un papel destacado en la comprensión de los contextos y aspectos de la ciencia, consecuencia del carácter humano de la actividad científica.

A partir de lo establecido en (Granés J. , 1997) y (Harker D. , 2015), una controversia científica ha de ser narrada y posteriormente transmitida, con propósitos divulgativos para la cultura científica. Esta transmisión ha de ser manifestada a detalle con el objetivo de evitar una visión linealizada sobre la producción científica. Ha de requerir de una adaptación con el fin de llevar la divulgación a la sociedad. Si se busca alguna estrategia al respecto, la más viable es una simplificación de la controversia enfocada en fragmentos y en el resumen de los hechos históricos que la llevaran a cabo.

Como labor propia de la actividad científica, esta simplificación es de extremo cuidado porque los fragmentos seleccionados pueden conducir a una pseudo historia que deforma la imagen de la ciencia.

En el contexto de la enseñanza de la física, las controversias científicas permiten que los estudiantes comprendan la ciencia como una práctica dinámica, marcada por incertidumbres y no como un conjunto de leyes incuestionables. Al reconstruir disputas históricas, el aula pasa de ser un espacio de transmisión de fórmulas a convertirse en un escenario donde se analizan argumentos, se comparan interpretaciones. Esto es favorable puesto que los estudiantes se ven obligados a justificar la aceptación y el rechazo de determinadas explicaciones, en lugar de la repetición memorística de la información.

Las controversias científicas son puentes entre la física y las humanidades, dado que ayudan a superar la brecha señalada por la tesis de las dos culturas de Snow. Al evidenciar como cada controversia posee valores, creencias y tensiones sociales, es allí donde los docentes muestran que la física no está aislada de la cultura, sino que dialoga con ella y la transforma, contribuyendo con este enfoque a una alfabetización científica en la que los estudiantes se posicionen como ciudadanos críticos capaces de participar en debates públicos acerca de temas de carácter científico.

Con el fin de llevar las controversias científicas al aula de clase, se propone diseñar un conjunto esquemático de estrategias pedagógicas que se articulan para aprovechar la riqueza histórica, conceptual y social. Una primera estrategia radica en el estudio de casos históricos como la controversia Eddington-Chandrasekhar y se proponen actividades en las que los estudiantes han de analizar fragmentos de documentos originales (cartas, publicaciones) y ejerzan una postura argumentativa desde las posiciones en cuestión. A esta se le suma el juego de roles, donde se le asigna a los estudiantes papeles protagónicos como Eddington, Chandrasekhar y otros exponentes de la ciencia, con el objetivo de escenificar los debates simulados en clase; de esta manera no solo los argumentos científicos son trabajados, sino también los intereses personales e institucionales que atañen a la controversia.

Otra línea de trabajo trascendental es el análisis comparativo de fuentes primarias y secundarias, en las cuales los estudiantes puedan contrastar la forma en que la controversia aparece simplificada en los libros de texto con la expresión más sofisticada en que se presenta en las fuentes primarias. Dicho ejercicio fortalece el pensamiento crítico y las subyacentes habilidades de investigación, ya que exige de simplificar y sintetizar cada fuente. Vinculado con ello, se resalta la escritura argumentativa que permite pedir a los estudiantes que redacten ensayos breves donde defiendan una postura sobre la controversia y se apoyen en evidencia histórica documentada, para después someter estos textos a una discusión y crítica grupal, donde se promueva su construcción y se justifiquen los argumentos.

Bajo una visión didáctica, las controversias brindan un contexto personalizado para trabajar la argumentación científica. Dado que se presentan a los puntos de vista históricos, se les permite tomar postura y construir argumentos propios y someterlos a la crítica con sus pares.

1.3.1 Las controversias científicas como escenario pedagógico

Estudiar controversias históricas en el aula de clase suscita una metodología pedagógica valiosa en pro de desmitificar la ciencia y mostrar su naturaleza humana y social. Que están en constante construcción y en una evidente fluctuación (cambios ocasionados por los anteriores factores en mención).

Las controversias muestran que la ciencia no es para nada un conjunto inmutable de certezas, sino un proceso tangible y palpable ajeno a una concepción estática de la enseñanza de las ciencias. Que ha recibido y se ha servido de factores epistémicos y no epistémicos, como la autoridad, la política y la cultura. (Ayala M. M., 2006). (Matthews, 1994).

Las controversias científicas, en síntesis, se convirtieron en escenarios en los que la autoridad, el poder y las normas sociales desempeñan un papel crucial en la aceptación o desdén de ideas, como muestran los casos históricos estudiados por (R.K. Merton, 1973); (B. Latour, 1987).

A menudo imaginamos a la ciencia como un proceso ordenado, donde el conocimiento se acumula de manera lineal. No obstante, la realidad es mucho más compleja en términos epistémicos. Las controversias son momentos en que la comunidad científica se enfrenta a preguntas sin respuesta o a teorías conflictivas y a datos que desafían el consenso existente.

Las controversias son sucesos complejos que no tienen una linealidad plausible ya que las hipótesis y las teorías son puestas a prueba no solo desde el punto de vista epistémico como la lógica o los hechos científicos; sino mediante factores no epistémicos como las influencias sociales, culturales y políticas.

Estas disputas traen consigo el acceso al avance de la ciencia: al cuestionar los supuestos existentes, se abren caminos para nuevas ideas y paradigmas.

(Granés S. &, 1997) señala que las controversias no son simplemente conflictos de las ideas científicas abstractas, sino que en ellas confluyen múltiples dimensiones epistemológicas, sociales, políticas e incluso personales.

Las controversias son un contexto para educar sobre la naturaleza de las ciencias, son un recurso para enseñar la naturaleza de la ciencia. A través del estudio investigativo de estos conflictos, podemos mostrar como es el funcionamiento y la operación real de la ciencia. No es una actividad puramente objetiva o racional, sino un proceso lleno de tensiones y discusiones, donde los errores y las revisiones son parte integral del avance.

Como ejemplo, en (Ayala, 2006) se muestra que, el caso de enseñar que las ciencias no siempre ofrecen respuestas inmediatas o definitivas. Los resultados no son claros o nítidos y las interpretaciones pueden estar sujetas a las influencias de factores no epistémicos. Este enfoque le da utilidad al combatir la imagen de la ciencia con una entidad impersonal y perfecta, con el fin de mostrar a los estudiantes y al público en general que los científicos son personas con limitaciones que trabajan en un entorno de consistente incertidumbre y debate.

Desde las nociones de Thomas Kuhn, sabemos que los grandes avances científicos no son dados de manera progresiva en un campo de acción como en este caso el de las controversias. Sino que a menudo surgen tras períodos de crisis y controversia, cuando las teorías existentes ya no son capaces de explicar las nuevas observaciones o experimentos. Las controversias actúan como catalizadores para estos momentos de

cambios motivando positivamente a los científicos a revisar los supuestos fundamentales y a proponer nuevos paradigmas que reemplacen a los antiguos.

El estudio histórico de las controversias (dicho sea de paso, el análisis histórico) proporciona una excelente estrategia pedagógica para desarrollar la cultura científica en el público en general y en los estudiantes en particular.

Como el episodio de la disputa entre Edison y Tesla sobre las corrientes eléctricas (AC/DC) o la lucha de Rosalind Franklin por el reconocimiento en la estructura del ADN, son conceptualizaciones en la ciencia para mostrar un marco más humano y social, y mostrar cómo las decisiones científicas tienen implicaciones que van más allá de los laboratorios.

Retomando las disertaciones de (Kuhn, 1970), las controversias científicas están estrechamente ligadas con los cambios de paradigma. La estructura de las revoluciones científicas a menudo se desarrolla en momentos de crisis y debate, cuando las teorías que ya están establecidas ya no pueden explicar nuevas observaciones, debido a que estos conflictos empujan a la comunidad científica a reconsiderar sus supuestos y abrirse a las nuevas ideas.

A lo largo de la historia las controversias han revelado las limitaciones de las teorías predominantes, lo que genera la necesidad de un cambio radical en la forma en la que entendemos ciertos fenómenos. Kuhn, en su obra "La estructura de las revoluciones científicas" se refiere a transformaciones fundamentales en la visión científica del mundo, en la que los marcos conceptuales nuevos desplazan a una teoría o un conjunto de principios.

La crisis científica se desencadena por inconsistencias o anomalías dentro de un paradigma científico que posea cierto rigor. Estos conflictos ponen a prueba hasta qué punto llegan las teorías actuales, lo que genera que las anomalías se acumulen en el espacio de las controversias. Los fenómenos no pueden explicarse adecuadamente con las teorías existentes. Y las controversias científicas obligan a enfrentarse a la posibilidad de que el marco teórico vigente ya no sea adecuado y merezca adaptarse.

Como ejemplo se destaca la controversia entre Isaac Newton y los filósofos naturales partidarios de Aristóteles. Dichas teorías dominaron la ciencia durante siglos, y al surgir anomalías en las observaciones de los movimientos planetarios y en la mecánica clásica, la controversia generó un ambiente propicio para la revolución científica newtoniana, fue la génesis de un nuevo paradigma.

El cuestionamiento del paradigma existente es un estadio de la cultura científica donde una controversia alcanza un punto crítico y se empieza a cuestionar la validez del paradigma dominante. Tiene especial valor el cuestionamiento de las debilidades de las

teorías establecidas, ya que fueran a los científicos a reconsiderar a incluso reconstruir los supuestos y los métodos que hasta ese momento tienen una vigencia incuestionable. Lo anterior se considera el primer paso hacia un cambio de paradigma, ya que pone en duda la "normalidad" del conocimiento aceptado y genera nueva actividad en el espacio de las controversias.

En el contexto de la controversia, hay una necesidad de pensar de manera creativa para resolver los problemas de las teorías existentes que están sin respuesta. Al ser las controversias las que revelan las limitaciones del conocimiento actual, forman oportunidades para que se propongan nuevos enfoques. Estas nuevas ideas han de ser radicales y a menudo generar resistencias y son las que casi siempre generan cambios de paradigma.

Kuhn llamaba ciencia normal a cuando los científicos trabajan dentro de un marco aceptado, resolviendo los "rompecabezas" científicos. No obstante, cuando los marcos teóricos ya no son suficientes las resoluciones de paradigmas y las controversias generan una presión para abandonar el paradigma anterior y darle puerta al nuevo. La ciencia no se estanque y avanza de manera significativa.

Las controversias científicas abren espacios para la validación de comunidades científicas emergentes. Puesto que cuando un grupo de investigadores propone un nuevo paradigma, no es suficiente con formular una teoría distinta, sino que se debe hacer un ejercicio de convencimiento a los colegas, en el enfoque más adecuado con el propósito de resolver los problemas que la ciencia enfrente en ese momento. Dicho proceso de validación nunca es inmediato; ya que quienes impulsan las nuevas concepciones suelen hallarse con una fuerte oposición por parte de las tradiciones ya establecidas.

En su obra, (Kuhn, 1970) señala que la ciencia lleva u progreso de manera cíclica, y se alterna entre períodos de "ciencia normal", en los que la investigación se desarrolla dentro de un paradigma estable y momentos de crisis bajo los cuales este marco comienza a mostrar sus límites. Es por ello que en dichos contextos de crisis donde emergen las controversias, puesto que se ponen en cuestión los supuestos básicos del paradigma que está vigente y se acumulan anomalías que son difíciles de explicar. La controversia aquí manda el punto de ruptura entre la ciencia normal y la transformación del marco conceptual.

Para entender las controversias científicas como procesos sociales es menester una renuncia al análisis en términos de ideas puramente científicas. Ya que están influenciadas por factores no epistémicos, como las jerarquías institucionales, las trayectorias personales y las tensiones entre la ciencia y la sociedad. El cambio de paradigma no se reduce a la acumulación y análisis de nuevos datos o experimentos, sino que incluye los conflictos internos dentro de la comunidad científica y las disputas

personales sobre quién tiene autoridad para definir qué cuenta como conocimiento legítimo.

Bajo esta línea de análisis, la tesis de las dos culturas propuesta por (Snow, 1959) muestra una brecha cultural profunda que va más allá de las discrepancias de contenido entre ciencia y humanidades. Esta brecha implica formas de comprender el mundo y de valorar el conocimiento, que generan mutuas incomprensiones y estereotipos. Esta división cultural contribuye a explicar muchas de las resistencias y malentendidos que se encuentran en controversias como la de Eddington y Chandrasekhar, puesto que no solo se enfrentan unas teorías físicas alternativas, sino también unos estilos cognitivos diferentes y concepciones que divergen en cuanto a qué es una buena teoría.

Por lo tanto, la controversia Eddington-Chandrasekhar no se puede reducir a un mero choque de argumentos científicos. Sino que debe analizarse como un fenómeno insertado en un entramado social, cultural y a la vez histórico, en el cual la identidad de los científicos las jerarquías de poder y las tradiciones heredadas han de desempeñar un papel primario y crucial. Sólo a partir de esta perspectiva es razonable comprender la complejidad del proceso por el cual una idea inicialmente marginada (como el límite de masa de Chandrasekhar), se termina transformando en un pilar de la astrofísica contemporánea.

CAPITULO 2

Dos vidas, dos mundos: Eddington, Chandrasekhar y el escenario de la controversia

Las controversias científicas no se reducen a un mero desacuerdo técnico, sino que se erige como una construcción compleja atravesada por dimensiones históricas, culturales y sociales. A partir de esta concepción, el presente capítulo propone un análisis que ubica la controversia Eddington-Chandrasekhar en su contexto original, entendiéndola como un fenómeno científico y sociocultural acorde a su época.

A continuación, se abordarán los elementos no estrictamente disciplinares que hacen eco para una comprensión integral de dicha controversia, preparando así el terreno para los capítulos posteriores.

La brecha cultural identificada por Snow no solo es el motor de afectación de la percepción pública de la ciencia, sino que también es condicional de las dinámicas internas de la comunidad científica, específicamente en contextos donde confluyen tradiciones intelectuales distintas.

Un ejemplo paradigmático de este aspecto de intersección entre factores culturales y desarrollo científico se encuentra en la emergencia de la física moderna de la India durante las primeras décadas del siglo XX. Así, científicos como Subrahmanyan Chandrasekhar no solo debían sortear las complejidades técnicas de teorías revolucionarias, sino también las tensiones culturales propias de una sociedad colonial en transición con Gran Bretaña; allí los valores tradicionales brahmánicos se entrelazaban con la influencia científica británica. El análisis de su formación y contexto biográfico permite comprender que las posteriores bases intelectuales se configuraron a partir de comprender los aspectos culturales, familiares e históricos.

2.1 La Relación entre Gran Bretaña e India a Principios del Siglo XX: dominación, transformación y resistencia

La relación entre Gran Bretaña e India a inicios del siglo XX era la de un imperio poderoso y su joya más preciada. El Raj Británico, sistema de gobierno directo de la Corona, se sustentaba en una premisa de superioridad racial y cultural. Desde 1858, cuando la administración británica asumió directamente el control del territorio tras la rebelión de los cipayos, la India había sido gobernada como una pieza clave del Imperio Británico. Este dominio no se limitó a la esfera política, sino que penetró profundamente en las estructuras sociales, económicas, culturales y educativas del subcontinente (Gulabray V. S., 2024).

Sin embargo, este período no fue solo de dominación unilateral, sino el momento donde se forjó el movimiento nacionalista que acabaría con el propio imperio gracias al surgimiento de poderosos movimientos de resistencia y afirmación nacional.

La estructura de poder del Raj era piramidal y excluyente. El Virrey (desde 1910, Jorge V, quien ostentaba el título de Emperador de la India) y el Indian Civil Service (ICS), un cuerpo administrativo compuesto casi exclusivamente por británicos, ejercían el control absoluto, el cual se mantenía a través de una elaborada burocracia colonial y un ejército compuesto en gran parte por soldados indios bajo mando británico. La exclusión sistemática de los indios de los puestos de decisión generó un profundo resentimiento. La política británica de "divide y vencerás", buscaba debilitar la solidaridad nacional exacerbando las divisiones religiosas entre hindúes y musulmanes.

El nacionalismo indio crecía de manera acelerada. El Partido del Congreso Nacional Indio, fundado en 1885, se transformó de un foro de diálogo en un instrumento de movilización política. Tras la Primera Guerra Mundial, en la que más de un millón de indios fueron enviados al frente, el incumplimiento de las promesas británicas de autogobierno generó frustración y radicalización. La aprobación de las Leyes Rowlatt (1919), que permitían detenciones sin juicio, provocó amplias protestas, brutalmente reprimidas en la masacre de Amritsar. A partir de este punto, líderes como Mahatma Gandhi impulsaron estrategias de desobediencia civil bajo la consigna de swaraj (autogobierno). (Gopal, 2019).

La sociedad india de principios del siglo XX estaba marcada por profundas jerarquías raciales y de castas, reforzadas tanto por las estructuras tradicionales como por la administración colonial. Los británicos mantuvieron una distancia social estricta respecto a la población local, consolidando un orden racial que se legitimaba bajo la ideología del orientalismo, donde el “otro” —el indio— era visto como atrasado y necesitado de tutela (Gulabray V. S., 2024).

Culturalmente, los británicos operaban bajo el manto del "Minuto sobre la Educación" de Thomas Macaulay (1835), cuyo objetivo declarado era formar "una clase de personas, indias en sangre y color, pero inglesas en gustos, opiniones, moral e intelecto". Se impuso una narrativa de superioridad occidental, tachando de bárbaras prácticas indias como el sati mientras se ignoraban sus ricas tradiciones filosóficas.

La respuesta india fue un vigoroso renacimiento cultural y una resistencia simbólica. Swami Vivekananda, tras su impactante discurso en el Parlamento de las Religiones de Chicago en 1893, defendió con orgullo la espiritualidad india frente al materialismo occidental. Rabindranath Tagore, primer no europeo en ganar el Nobel de Literatura en 1913, encarnó esta síntesis. Mientras su obra bebía de fuentes universales, fue un crítico feroz del nacionalismo estrecho, advirtiendo que “una nación que pierde su alma no puede ganar su libertad”

Pero la herramienta de resistencia cultural más potente la popularizó Gandhi: el Swadeshi. Al impulsar el uso del Khadi (tela hilada a mano) y el boicot a los textiles británicos, transformó un simple acto económico en un poderoso símbolo de dignidad y autosuficiencia. La rueca se convirtió, como dijo Gandhi, en "el símbolo de la unidad de la vida india", un recordatorio tangible de la identidad que el Raj intentaba erosionar.

Por otra parte, el sistema educativo fue la piedra angular del proyecto colonial de Macaulay. Diseñado para crear una élite subordinada, priorizaba el inglés y un plan de estudios centrado en Europa, marginando las lenguas y el conocimiento indígenas. El sistema educativo fue uno de los instrumentos más poderosos del dominio británico. Las reformas de Thomas Macaulay en el siglo XIX habían impuesto el inglés como lengua de instrucción, con el propósito de formar “una clase de personas, indias por sangre y color, pero inglesas en gustos, opiniones y moral” (Guha, 2019). Las universidades de Calcuta, Madrás y Bombay consolidaron este modelo.

La gran paradoja de este sistema fue que, al educar a una élite en las ideas de la Ilustración, les proporcionó las herramientas intelectuales para su propia liberación. Jóvenes indios formados en la historia de la Revolución Francesa o las obras de John Stuart Mill y John Milton comenzaron a aplicar los conceptos de libertad, democracia y autodeterminación a su propia situación. Jawaharlal Nehru, producto ejemplar de esta educación en Harrow y Cambridge, se convirtió en el arquitecto secular de la India moderna. Como él mismo reflexionó, fue en las cárceles británicas donde leyó "historias de otras naciones que habían luchado por la libertad", encontrando paralelismos con la lucha india.

Conscientes de esto, los nacionalistas fundaron instituciones educativas alternativas. Tagore estableció Visva-Bharati en 1921 como un "nido mundial" donde el Este y el Oeste pudieran encontrarse en igualdad de condiciones. Del mismo modo, la fundación de la Banaras Hindu University (1916) y la Aligarh Muslim University (1920) demostró el deseo de definir una educación propia, que reivindicara el legado indígena sin renunciar al conocimiento moderno.

En síntesis, se puede decir que, a principios del siglo XX, la relación entre Gran Bretaña e India era una madeja de contradicciones. El Raj, empeñado en mantener el control, implementó políticas educativas, divisivas, represivas—que, irónicamente, forjaron la conciencia y las herramientas para su desmantelamiento. El sistema diseñado para crear "ingleses morenos" creó a los líderes de la independencia. La imposición cultural provocó una reafirmación más vigorosa de la identidad india.

2.2 El joven Chandrasekhar (del carácter y la importancia de la ciencia hindú)

La década comprendida entre 1920 y 1930 es sin lugar a duda la década dorada de la física, ya que en este periodo de tiempo se comprende el nacimiento de la mecánica cuántica. A partir de esta abundancia en la producción de conocimiento en torno a la física, se destacan los trabajos de los físicos hindúes que presidieron a Chandrasekhar, destacándose los siguientes sucesos en la física hindú del siglo XX:

1. La fórmula de ionización de Saha (1920)
2. La estadística de Bose (1924)
3. El efecto Raman (1928)

4.El límite de Chandrasekhar (1934/1935)

Los primeros tres descubrimientos fueron hechos netamente en tierras hindúes, mientras que el cuarto fue hecho por Chandrasekhar en sus tiempos de estudiante de doctorado en Cambridge, Inglaterra. No obstante, su notable pasión por la física lo motivo a pensar en el problema incluso cuando era estudiante en la India.

Subrahmanyam Chandrasekhar nació en Lahore el 19 de octubre de 1910. Su padre, C. Subrahmanyam Iyer, conocido popularmente como C.S. Iyer, era un funcionario del gobierno, y como consecuencia de su trabajo se acento en diferentes lugares de la India. Cuando su hijo nació se encontraba en Lahore.

Por cierto, Lahore era parte de la India, o India Británica, como a ciertos historiadores les gusta catalogarla. No fue sino hasta 1947 que Lahore pasó a integrar el estado de Pakistán.

El padre del señor C.S. Iyer era Chandrasekhara Iyer quien oficiaba como profesor en el colegio de la señora A.V. Narasinha Rao en Vishakapatnam. El hermano mayor de C.S. Iyer era C.V. Raman, famoso por el descubrimiento que lleva su nombre, quien fuera galardonado con el premio Nobel de física en 1930.

El efecto Raman es ampliamente estudiado en el campo de la espectroscopia, y demuestra la existencia de efectos cuánticos en la dispersión de la luz en las moléculas. En primer plano pudiera pensarse que, siendo su tío un premio Nobel, Chandrasekhar fuera influenciado por él, pero no fue del todo así puesto que en algunos periodos de sus vidas sus relaciones interpersonales fueron caóticas.

aman hizo su descubrimiento en Calcuta en febrero de 1928. En los primeros días de marzo viajó al sur para dar una conferencia sobre su descubrimiento en Bangalore. Conferencia que quedaría como precedente en la historia de la física hindú. De camino a Bangalore, se detuvo a visitar a su hermano (padre de Chandrasekhar) en Madras, sobre esta visita, Chandrasekhar expresa en (Venkataraman, 1992).

“Tengo un recuerdo vívido de un día a principios de marzo de 1928, cuando el profesor Raman visitó nuestra casa en Madras en su camino a Bangalore, donde el 16 de marzo, iba a dar el discurso anunciando el descubrimiento de lo que pronto se llamaría el efecto Raman. Recuerdo bien que mostraba dispositivos de los primeros espectros Raman jamás tomados y el estado de euforia en el que se encontraba. En esa ocasión, alguien llamó la atención sobre el descubrimiento del efecto Compton unos años antes, y Raman respondió:” ¡Ah, pero mi efecto jugará un papel muy importante para la química y la estructura molecular!” Esa declaración fue realmente profética.”

Su madre, Sitalaksmi se cazó a los diecisiete años, una mujer talentosa que a pesar de no completar sus estudios hizo traducciones de varios autores. La familia de

Chandrasekhar se componía de tres niños y seis niñas. Las dos primeras hijas del matrimonio; Rajalakshmi y Balaparvathi nacieron antes que Chandrasekhar. Como él fue el primer hijo varón recayó sobre él la responsabilidad del cuidado familiar y heredó el nombre de su abuelo. Posteriormente nacerían Vishwanathan, Banakrishnan, Ramanathu, y sus hermanas menores, cuyos nombres abreviados eran Savada, Vidya, Savitri y Sundari.

Su relación con Banakrishnan fue excelente, y su fructífera correspondencia en años posteriores daría cuenta de ello. También le escribió muchas cartas a su padre, tanto de aspectos de su vida como de sus trabajos astrofísicos.

A pesar de nacer en el norte de la India, Chandrasekhar creció principalmente en el sur, en Madras. Su abuelo pertenecía a la secta brahmánica shivaista, cuyo asentamiento principal está en la India meridional. Fue educado en los valores tamiles que resaltaban influencias de la colonia británica, que desde mediados del siglo XIX había penetrado en la cultura secular de la India.

Chandrasekhar no asistió al jardín infantil, ni a la escuela primaria. Él y todos sus hermanos recibieron su educación primaria en casa. Después de unos años de clases particulares, fue admitido al segundo curso en la Escuela Secundaria Hindú de Madras. La matemática fue su asignatura predilecta, sobresaliendo por su talento para ella, en (Wali K. , 2010), se encuentra que su tío C. Ramawamy dice lo siguiente:

“ El rendimiento de Chandrasekhar en la escuela, especialmente en matemáticas, fue por lo menos tres años superior al de su clase. Sus compañeros de clase eran conscientes de sus posibilidades y reconocieron que era un genio entre ellos”.

El mismo Chandrasekhar en (Chandrasekhar, 1930) dice

“Recuerdo muy bien un día de 1920 (cuando apenas tenía diez años), mi madre me llamó la atención sobre un artículo de un periódico el día de la muerte de Ramanujan con el comentario de que un indio muy grande había muerto en la flor de la vida”.

Aquí se deduce el sentimiento, un tanto patriótico de unidad y apañe que sentía Chandrasekhar por los intelectuales compatriotas suyos, además de provenir de una familia de aristócratas brahmanes, su potencial como hombre de ciencia se ve contrastado por su personalidad, puesto que durante toda su vida fue absolutamente abstemio y vegetariano.

Chandrasekhar decía que su fidelidad a la cultura hindú era parte de su honestidad, a pesar de vivir muchos años en Cambridge y posteriormente en Chicago.

Chandrasekhar no llegó a conocer a su abuelo Ramanathan Chandrasekhar puesto que nació siete meses después de su muerte. Ramanathan era profesor de matemáticas y

escribió varios libros. Su hijo Subhamayan Ayyar (padre de Chandrasekhar), se graduó en la universidad de Madras, el Presidency College y fue funcionario del gobierno en el servicio de ferrocarriles de la India.

Importante mención merece el hecho de que su madre moriría pocos meses después de su viaje a Cambridge, la enfermedad de ella estuvo a punto de arruinar su viaje, pero ella, consciente del alto potencial de su hijo le insistió que se marchara.

En (Lopez, 2015) encontramos el siguiente apartado escrito por Chandrasekhar:

“Aunque mi madre no estudio más allá de la escuela secundaria, aprendió bien el inglés. De hecho, tradujo algunas obras de Ibsen al tamil. Uno de los libros que tradujo, y que tuvo buenas ventas, fue *la casa de las muñecas*... Desde entonces, Ibsen es uno de mis escritores favoritos.”

Un gran momento para la historia de la física hindú ocurrió en enero de 1929. El congreso Indio de Ciencia celebró su reunión anual en Madras y Raman presidía el congreso. El profesor S. N. Bose famoso por su estadística que trabajara en conjunto con Albert Einstein, era el presidente de la sección de física y es aquí cuando el joven Chandrasekhar presentó quizá su primera ponencia sobre un problema relacionado con el interior de las estrellas.

Como estudiante, recibió como premio el famoso libro de Eddington, *The Internal Constitution of Stars*. Este acontecimiento marcaría el rumbo de sus posteriores investigaciones en Cambridge y su eventual y famosa controversia, que es el tema central de este trabajo de grado.

Un nuevo tipo de estrella llamada enana blanca había sido descubierto en esa época. Un hombre en Inglaterra llamado R. H. Fowler ¹parecía haber explicado este nuevo aspecto de la astrofísica, pero esta cuestión requería de los artilugios de la mecánica cuántica.

En 1928 el físico alemán Arnold Sommerfeld hizo una visita a Madras. Su primera parada fue el Presidency College, donde estaba estudiando el joven Chandrasekhar, y dio una conferencia sobre los nuevos y emocionantes desarrollos de la física. Después de la conferencia Chandrasekhar tuvo algunas conversaciones con Sommerfeld.

Luego de aprobar con muchos honores y distinciones sus estudios, su padre le pidió que se uniera al servicio de gobierno a lo cual Chandrasekhar se negó rotundamente, diciendo que su mente estaba en la ciencia.

¹ R. H. Fowler (1899-1944) fue un astrofísico británico conocido por sus trabajos en la física estadística y la astrofísica teórica. Desarrolló en 1922 la teoría de la degeneración de Fermi aplicada a las enanas blancas.

En (Chandrasekhar, 1931) se cita textualmente a Chandrasekhar acerca del papel de la ciencia en la sociedad hindú de ese entonces

“ Los últimos veinte años fueron una época en la que los científicos de la más alta estatura y calibre caminaron por los pasillos de la ciencia, y plantea una interesante cuestión histórica. Este fue un periodo de tiempo que no fue exclusivo de la ciencia de ninguna manera: también fue el momento en que grandes líderes nacionales como Mahatma Gandhi, Motilal y Jawaharlal Nehru, Sardar Patel, Rajendra Prasad y muchos otros de talla comparable lanzaron la lucha de la India por su independencia. Y, por supuesto, también estaba Rabiendranath Tagore, que con sus escritos y sus canciones inspiró a generaciones enteras de indios. Podría seguir añadiendo a la lista. Las primeras décadas de este siglo fueron una época en la que el aire era más vigorizante y el viento era más fresco de lo que nunca había sido o ha sido. El espíritu nacional era elevado en todos los niveles de la actividad humana; y el desarrollo de la ciencia era sólo una parte de esa actividad.”

Alrededor de 1983, Subrahmanyan Chandrasekhar fue laureado con el premio Nobel de física, “ por sus estudios teóricos de los procesos físicos importantes para la estructura y la evolución de las estrellas”. Luego de casi cincuenta años, se reconoció su trabajo sobre el límite de masa de las enanas blancas.

Aquella ceremonia en Estocolmo fue marcada por un profundo matiz: el joven científico indio de 19 años que llegó a Cambridge y fue silenciado por la autoridad de Eddington, En su discurso de aceptación, Chandrasekhar no hizo mención explícita de la controversia, no obstante, reflexionó sobre la “inmensa responsabilidad moral” de los físicos teóricos y de la necesidad inherente de combinar rigor matemático con intuición física. Dicha distinción no solo avaló su trabajo científico, sino que a la vez configuró históricamente la más grande injusticia de la astrofísica del siglo XX.

2.3 Aspectos biográficos, históricos y culturales de Arthur Eddington

Arthur Stanley Eddington nació en 1882 en Inglaterra, su formación científica empezó en 1899, bajo la dirección de Schuster y Lamb en el Owen's College de Manchester. Luego de ser laureado allí en física, se trasladó al Trinity College de Cambridge en octubre de 1902 y permaneció en Cambridge toda su vida.

En los años que vivió en Greenwich trabajando en el Real Observatorio, se dedicó a la astronomía práctica. Al regresar a Cambridge a asumir la dirección de la cátedra Plumian en 1913, fue elegido miembro del Trinity College.

La consabida teoría cuántica había comenzado a principios de siglo, no obstante, fue hasta que Eddington inició su vida laboral que se desarrolló en gran medida. Puesto que la teoría cuántica llegó en 1926, es cuando Eddington tuvo un efecto considerable en su pensamiento. Aunque nunca llegó a trabajar de manera activa en las técnicas asociadas con esta nueva disciplina.

Paralelamente, surge la teoría especial de la relatividad en el año 1905 y coincide con el inicio de su trabajo en Greenwich. Su marcado interés por la astronomía lo llevó inherentemente a investigar la naciente teoría de la gravitación de Einstein en 1915. Sus trabajos teóricos en astronomía culminaron con un tratamiento extenso y profundo sobre la constitución interna de las estrellas, al que se dedicó desde principios de la década de los años veinte.

Su estudio de la constitución interna de las estrellas fue su puente para investigar en mecánica cuántica, y durante los años treinta se dedicó al extenso problema de hacer compatible la relatividad general y la mecánica cuántica. Esto bajo una perspectiva diferente a la de los físicos cuánticos de ese entonces, puesto que Eddington propuso una nueva teoría algebraica en la que se vio obligado a interpretar ciertos números de elementos que aparecían en la teoría algebraica como los valores de ciertas constantes naturales.

La diferencia entre Eddington y los referentes de la cuántica de ese entonces no puede ser sobreestimada. Dado que en la nueva teoría cuántica de finales de los años veinte y principios de los treinta, el alcance del conocimiento no fue más a fondo de la determinación de Dirac de los niveles de energía del átomo de hidrógeno.

A Eddington no le interesaban los problemas complicados. Por ello trabajó incansablemente en el problema de las constantes naturales. Por ejemplo, el conjunto más apremiante de constantes era el espectro de masas de las partículas elementales. Esto no fue conocido en la época de Eddington,

La visión ortodoxa afirmaba que estas constantes se determinaban experimentalmente, mientras que Eddington creía que estaban determinadas por los métodos de observación empleados y que estos mismos determinan la naturaleza del álgebra. En sus últimos años, Eddington dejó claro que, por muy sugerentes que fueran los números que el álgebra arrojaba, se necesitaban más ideas físicas para justificar una identificación. Desde 1936 hasta su muerte en 1944, se dedicó a su llamada teoría estadística, que proporcionaba la justificación que idéntica ciertos números con constantes físicas.

Desde esta perspectiva, un relato en torno al trabajo de Eddington tiene que ser necesariamente un relato de la física teórica en la primera mitad del siglo XX. Poseía un estilo de trabajo riguroso y metódico, con una habilidad notable de comunicación de conceptos complejos al público general y a la comunidad científica.

La histórica expedición del eclipse solar de 1919, en la que Eddington jugó un papel crucial, marcó un antes y un después en la historia contemporánea de la física. Este evento no solo confirmó la teoría de la relatividad general de Einstein, sino también comprender el significado último del universo.

2.4 Concepciones filosóficas de Sir Arthur Eddington

Eddington combinaba de una manera elegante el idealismo de Berkeley y Hegel. Decía que el mundo visible y tangible consiste únicamente en “ideas de la mente”, y en otras ocasiones afirmaba que el conocimiento teórico es un sistema autónomo y autocontenido que se desarrolla según su propia naturaleza lógica. (Kilmister, 1966). Insistía en que el ámbito de la ciencia física es “subjetivo” y que encontramos lo “objetivo” principalmente, si no únicamente, en los ámbitos de la vida, la conciencia y el espíritu.

Esta perspectiva es influenciada por la filosofía de Kant, dado que algunos contemporáneos suponían que Kant era un berkeleyano, y Hegel pensó que era un hegeliano. Desde un punto de vista kantiano, existen límites definidos en torno al conocimiento científico y existe un ámbito extra científico ya familiarizado. (Kilmister, 1966).

Hasta aquí Eddington estaría de acuerdo, en líneas generales, respecto al aspecto extra científico. A pesar de todas las diferencias entre la Prusia Oriental del siglo XVIII y la Inglaterra del siglo XX, existe una fuerte similitud entre la fe religiosa en la que Kant fue educado y que influenció el pensamiento de Eddington, con la fe de los cuáqueros.²

Resulta conveniente que, desde la perspectiva kantiana, se tomen en consideración dos de sus puntos de vista. El primero es que la experiencia sensorial y el pensamiento son inseparables en el uso dentro de la esfera científica, pero son distintos en clase; en contra de los preceptos de Leibniz y Hume. Eddington nunca consideró esta cuestión, sin embargo, lo tomó como una clase de pensamiento o sensación que mantenía la distinción en la mente a lo largo de todo. (Ritchie, 1947). El segundo punto lo expresó Kant en su icónica frase “la razón solo tiene visión de aquello que produce según un plan propio”.

² Movimiento cristiano protestante originado en Inglaterra en el siglo XVII.

De esto se rescata que no podemos ver que el conocimiento científico no es solo limitado, sino que también está constituido por condiciones epistémicas, ósea, las condiciones bajo las cuales se obtiene la experiencia y opera el pensamiento, son la obtención y la operación, que son dos ámbitos diferentes de un mismo proceso.

Eddington propone la noción del “número cósmico”, que es el número de partículas últimas en el universo material entero, por el cual el diámetro de todo el sistema de galaxias y el carácter del electrón y el protón se obtienen de manera mutua. (Ritchie, 1947). Puesto que el carácter de todo depende de sus relaciones con otras cosas, entonces debe haber alguna relación universal capaz de expresar matemáticamente dichas nociones. Los intentos de expresar la relación están ligados a la especulación.

Eddington parece haber simplificado esta problemática, en el sentido que considera solo la relación entre las unidades más pequeñas y el cosmos entero. Él afirma que, en torno a la relación del reino de la ciencia física con que yace fuera de él; este es el reino del encuentro entre personas y de este encuentro surge la noción de obligación moral, de deber y de la noción de la conciencia específica de la presencia de Dios. En su conferencia Swartmore-Science and the Unseen World, afirma habla como un miembro de la sociedad de cuáqueros y estaba exento de ser malinterpretado, no obstante, una parte de la audiencia era de mentalidad secular y usó de manera incauta la palabra “místico” para esta última concepción del entendimiento moral y sobre Dios.

No obstante, Eddington hace la transición de la ciencia a la religión de una manera rápida. Dado que muchos pensadores científicos de la época suponen que el reino de la ciencia es autosuficiente y no hay nada fuera de él. Estos pensadores son o bien positivistas o bien de la escuela de pensamiento que quiere convertir la ciencia en política, dado que quieren cambiar el mundo y no entenderlo.

2.5 El encuentro en Cambridge

En el momento en que Chandrasekhar llegó a Cambridge sucedió el encuentro concreto entre dos tradiciones intelectuales completamente distintas: por un lado, está la ciencia practicada en la periferia colonial India, mientras que en el otro lado está la amplia cultura académica consolidada en la metrópoli británica.

Los procesos de emancipación cultural y búsqueda de conocimiento se enraízan con un entorno donde la formación científica. Chandrasekhar se inserta en un sistema universitario con una autopercepción como el legítimo centro de conocimiento y producción de él a nivel europeo. Esta transición geográfica fue también una transición simbólica: un joven físico hindú debe demostrar la solidez de sus ideas en un entorno regido por las normas, jerarquías y prácticas ajenas.

Bajo un marco intelectual, Chandrasekhar desarrolló una consigna de fidelidad al formalismo matemático y a las teorías recientes en física que estaban en auge, como la mecánica cuántica y la relatividad. Le importaba menos la “elegancia” intuitiva propia de los resultados que la coherencia interna y su posterior anclaje en marcos teóricos sólidos. Sin embargo, al obtener el límite de masa para las enanas blancas, no lo consideró una anomalía perturbadora sino una consecuencia de la combinación de las herramientas teóricas disponibles en ese entonces.

En contraparte, la tradición en la que Eddington estaba circunscrito posicionaba en un lugar central a los criterios filosóficos y estéticos en torno a la evaluación de las teorías físicas. Según él, una teoría física aceptable debía no solo ajustarse a las observaciones y los formalismos, sino también equilibrarse con una concepción de orden y racionalidad inherente a la elegancia del universo. La noción de estrellas que colapsan sin límite o que dieran lugar a estados de la materia “demasiado extraños” parecía compleja de conciliar con su concepción de una naturaleza inteligible y “bien comportada”.

El encuentro entre Chandrasekhar y Eddington en Cambridge resultó, por lo tanto, en un choque de estilos cognitivos y tradiciones científicas. Mientras que el primero suscitaba el impulso innovador que emergía desde las márgenes del imperio británico en la colonia hindú, aportando nuevas herramientas teóricas; el segundo representaba la autoridad consolidada que busca preservar la continuidad en la imagen del universo. Ésta marcada asimetría se manifestó no solo en el plano intelectual, sino en las posteriores relaciones de poder; mientras Chandrasekhar estaba dependiendo del reconocimiento institucional, Eddington contaba con el prestigio absoluto necesario para interferir en la opinión de la comunidad científica.

Desde esta noción, el “choque de tradiciones” en Cambridge no basta con considerarlo solo como una disputa de diferencias metodológicas, sino que trasciende a tensiones vinculadas con la procedencia geográfica, la pertenencia cultural y las marcadas jerarquías dentro del mundo académico.

No obstante, la autoridad de Chandrasekhar, a pesar de su brillantez, surgía desde una posición históricamente sub alternizada y Eddington se proyectaba desde el centro mismo de la autoridad científica de Cambridge. La desigualdad estructural contribuye a que la controversia se torne en un debate desequilibrado, donde la tradición dominante retrasó durante años el reconocimiento pleno de los aportes del joven astrofísico.

CAPITULO 3

La controversia Eddington-Chandrasekhar

La presente sección se centra en el análisis de la controversia científica que enfrentó a Arthur Eddington y Subrahmanyan Chandrasekhar durante las décadas de 1920 y 1930. Esta controversia no solo giró en torno a diferencias disciplinares relacionadas con el límite máximo de masa que puede tener una estrella enana blanca, sino que también ejemplificó tensiones profundas entre paradigmas científicos, perspectivas filosóficas y contextos culturales diversos. A partir del estudio sistemático de sus posturas, correspondencias y decretos de la comunidad científica, este capítulo está encaminado a comprender cómo influyen los elementos epistémicos, académicos y sociales en el desarrollo de la ciencia.

3.1 El descubrimiento de las estrellas enanas blancas

El acontecimiento inicial en el estudio de las estrellas enanas blancas se sitúa en la predicción de Friedrich W. Bessel³ en 1844 acerca de la compañera de la estrella Sirio, cuya existencia mostró una irregularidad entorno al movimiento de su estrella principal.

Dicha compañera fue observada por primera vez en 1862 por Alvan Clark a partir de las pruebas de su nuevo telescopio, y se evidenció que presentaba una masa muy similar a la del sol, a pesar de una luminosidad 6,45 veces inferior, lo que sugería un objeto extraordinariamente compacto. (Clark, 1862).

Fue en 1915 cuando (Adams, 1915) obtuvo el espectro fotográfico de Sirio B en el Observatorio Mount Wilson y descubrió que su temperatura elevada en la superficie se debía a una luminosidad mucho mayor (1/1360 veces la del sol). Lo que implicaba densidades del orden de $6 \times 10^4 \text{ gr/cm}^3$.

A partir de lo recogido en (W. S. Adams, 1914) , Arthur Eddington afirmó que tales densidades no eran físicamente imposibles, ya que a temperaturas extremas la ionización total del gas estelar permitía un empaquetamiento muy denso de iones y electrones. Propuso medir el corrimiento al rojo gravitacional de las líneas espectrales de Sirio B y predijo un desplazamiento de -20 km/s . Dicha predicción fue confirmada

³ Friedrich W. Bessel (1784-1846). Destacado astrónomo y matemático alemán del siglo XIX, conocido por sus aportes en medir con paralaje la distancia entre el sol y la estrella 61 Cygni.

experimentalmente por Adams, quien obtuvo un corrimiento de -19 km/s , lo cual sustentó simultáneamente la teoría general de la relatividad.

Eddington señaló que, una vez agotada la fuente termonuclear, en las enanas blancas, la falta de presión para equilibrar la gravedad implicaría procesos de enfriamiento y contracción, sin embargo; al disminuir la temperatura perderían la energía necesaria para dicha contracción, sugiriendo un ciclo sin solución energética plausible.

El aporte clave de Fowler en 1926 fue reconocer que un gas de electrones degenerados no tiene cambios en la presión aún a temperatura residual; dado que por el principio de exclusión de Pauli⁴ se obligan a ocupar nuevos niveles de energía. Con ello él demostró que las enanas blancas podían enfriarse sin expandirse, resolviendo el enigma de Eddington.

Por lo tanto, en la franja entre 1862 y 1926 se consolidó la comprensión de las estrellas enanas blancas como objetos ultradensos que se sostienen en su equilibrio a través de la presión degenerada y los efectos relativistas. Este período, por lo general denominado de “*descubrimiento temprano*” edificó las bases para que Chandrasekhar formulase en 1930 su límite máximo de masa y desatara la famosa controversia con Eddington acerca de la existencia de singularidades en las enanas, según lo recogido en (Chandrasekhar, 1931).

3.2 El descubrimiento de la masa límite

En Julio de 1930, (Chandrasekhar, 1931) cruzaba el océano indico y advertía que la combinación de la relatividad especial y la estadística de Fermi-Dirac predecía un límite en la masa admisible de una enana blanca, haciendo señalamiento a la existencia de una masa límite a la estabilidad estelar.

Desde sus primeros encuentros con R. H. Fowler en octubre de 1930, Chandrasekhar mostró dos trabajos: una versión no relativista del límite de masa y un segundo estudio que ajustaba la ecuación de estado degenerada con la velocidad de la luz; derivaba en un máximo de 1,44 masas solares. (Chandrasekhar, 1931).

La derivación formal de estas formulaciones combinó la ecuación de estado para electrones relativistas degenerados.

⁴ Dos fermiones no pueden ocupar exactamente el mismo estado cuántico al mismo tiempo. En el caso de los electrones en un átomo, no pueden tener los cuatro números cuánticos idénticos

Poco después de estos acontecimientos es que se encuentra con el artículo de Fowler sobre la materia densa. Misma época de cuando llega a Cambridge y ya había publicado seis artículos, tres de los cuales iban a ser publicados en revistas científicas británicas, los cuales fueron influenciados por el abordaje de la estadística de Fermi y Dirac al problema de la degeneración de electrones.

A partir de su estudio del trabajo de Sommerfeld fue que incursiono en la investigación académica a su arribo a Cambridge, panorama que le abriría las puertas a sus investigaciones acerca de la distribución de un gas de electrones degenerado. Mantuvo correspondencia académica con Fowler, a quien enviaría sus primeros artículos y quien era un experto en la estadística de Fermi y Dirac y la mecánica estadística que se impartía en el instituto de física de Cambridge y quien hizo comentarios acerca de los artículos y se iba a encargar de su posterior publicación en la Royal Astronomical Society.

El suceso cumbre que catalizo el descubrimiento de Chandrasekhar fue el artículo de Fowler sobre la aplicación de la degeneración de los electrones para explicar la estabilidad estructural de las enanas blancas.

Según una referencia que Chandrasekhar hizo de Stoner en su artículo de 1930, este no incluía las correcciones relativistas sugeridas por Anderson. Esto sustenta la idea de que a pesar de que Chandrasekhar fue consciente de la aplicación de la degeneración de electrones a las enanas blancas; el gas denso poseía efectos relativistas, conclusión que fue independiente de los trabajos de Anderson y Stoner. Estos acontecimientos fueron recogidos en el archivo personal de Chandrasekhar (Chandrasekhar, 1930)

En sus artículos sobre las enanas blancas y la estadística de Fermi y Dirac, (Chandrasekhar, 1929) Chandrasekhar no cita ninguno de los artículos de Anderson, sobre investigaciones similares. Según él, cuando casi había terminado de escribir el artículo, se encuentra con un artículo de un alemán, Wilhelm Anderson, que se trataba del mismo problema tratado matemáticamente igual, así que Chandrasekhar tuvo la satisfacción de saber que pudo hacerlo independientemente.

En la carta que Chandrasekhar escribiera a su padre, (Chandrasekhar, 1930) relata que se encuentra trabajando en el problema de la carga eléctrica en el interior de las enanas blancas. Para esta época se evidencia una extensión de su trabajo sobre la estadística de Fermi y Dirac a la teoría de las enanas blancas.

La estructura interna de las estrellas se describe a partir de la teoría de los politropos. A partir de las ecuaciones diferenciales de Lane-Emden, un politropo es una estrella (cuerpo auto-gravitante esféricamente simétrico). Eddington creía que el equilibrio radiativo en las estrellas era indefinido (las estrellas podían tener cualquier masa), no obstante Chandrasekhar mostró que las enanas blancas tienen un límite de masa cuando la relatividad general es aplicada, rompiendo la incidencia del modelo politrópico simple.

Chandrasekhar encuentra que las enanas blancas serian politropos de índice $3/2$, esto lo hace basándose en los estudios previos de Fowler sobre las enanas blancas.

Gracias a las conclusiones suscitadas en un artículo de Stoner de 1929, Anderson le informa a Stoner de la importancia de los efectos relativistas a alta densidad para electrones degenerados, y la resolución conjunta del asunto se publica en 1930. Para esta fecha Chandrasekhar ignoraba los efectos relativistas necesarios para producir la masa límite.

Para que consecuentemente resultara el descubrimiento de la masa límite en 1930, se seguiría un conducto investigativo el cual iniciaría con las investigaciones de Fowler, después Chandrasekhar lo extendería e incluiría la nueva estadística de Fermi y Dirac para posteriormente aplicarla al modelo politrópico de las enanas blancas.

Según una carta de Chandrasekhar a su padre escrita el 30 de abril de 1931, obtenemos la siguiente apreciación textual de la situación. (Chandrasekhar, 1931).

“ Sobre las observaciones de W. Anderson sobre mi artículo. Su inglés es bastante engañoso. Se limita a llamar la atención sobre el hecho mediante difíciles líneas de razonamiento -lo que él llama ionización mecánica- y llega a mi conclusión final. Por supuesto no hay nada como la prioridad en estas cosas. Surgen en cosas ‘grandes’. Ni Anderson ni yo creemos que la idea sea fundamental. Es simplemente una consecuencia que hemos notado de diferentes líneas de razonamiento que se desprende de las concepciones existentes sobre el esquema de las cosas”.

Esta postura de Chandrasekhar es bastante liberal en cuanto al crédito que él y Anderson se llevarían por el descubrimiento, puesto que trabajaron individualmente y ninguno de los dos se adjudicó el descubrimiento como propio. Anderson lo atribuye a lo que él denomina “ionización mecánica”. En el momento en que Chandrasekhar escribe su artículo sobre la masa límite de las enanas blancas, la fórmula de Stoner-Anderson ya ha sido establecida y es utilizada por astrofísicos como Eddington y Milne sin ninguna crítica abierta acerca de su utilidad en la degeneración relativista de electrones. Asimismo, Chandrasekhar utiliza la formula y cita a Stoner y Anderson en su artículo, a pesar de que en principio su enfoque es desde un punto de vista politrópico no utilizado con anterioridad en ninguna investigación.

Antes de su arribo a Inglaterra, Chandrasekhar ya poseía sólidos conocimientos en torno a la mecánica cuántica, y comenzó su propia investigación sobre la naturaleza estadística de los electrones. Fue en este viaje donde se preguntó por primera vez si los efectos relativistas especiales podrían entrar en juego a densidades tan altas.

En (Wali K. , 2010) encontramos que Chandrasekhar en esta época ya había desarrollado la aplicación de Fowler de la degeneración de electrones en enanas blancas utilizando el

politropo de Eddington para construir un modelo estelar para enanas blancas, encontrando que la densidad central dentro de las enanas blancas era casi seis veces la densidad estelar promedio de estrellas en la secuencia principal.

Chandrasekhar llegó a Cambridge siendo admitido para hacer una investigación doctoral con Fowler como su supervisor en septiembre de 1930. No se esperó mucho al arribar para presentarle a él dos documentos que había completado en su viaje, "La densidad de las estrellas enanas" del que Chandrasekhar recuerda que Fowler dijo que estaba "bastante bien", pero que se lo iba a mostrar a Milne. Este fue una reelaboración de la fórmula no relativista de Stoner para una densidad límite utilizando la teoría politrópica de Eddington en lugar del equilibrio cinético-gravitacional de Stoner como base. Y el segundo documento titulado "La masa máxima de las enanas blancas ideales". Donde introdujo el concepto de degeneración relativista.

El punto de partida para Chandrasekhar es suponer una estrella enana blanca degenerada donde la presión de radiación se toma como cero, por lo que la presión principal que mantiene la estructura estelar contra el colapso gravitacional será la presión del gas degenerado.

3.3 Las enanas blancas de Eddington

El aporte hecho por Arthur Eddington a la astrofísica, y más en específico a las enanas blancas, está consignado en su libro de 1926 *"The Internal Constitution of the Stars"*. Allí se encuentra su trabajo más prolífico que sentó las bases para sus argumentos en la controversia con Chandrasekhar.

Citando lo contenido en (Ritchie, 1947):

" Si la materia estelar a la densidad del platino conserva aún la compresibilidad de un gas perfecto, la densidad límite debe ser mucho mayor. Por lo tanto, es posible que la materia en las estrellas alcance densidades sin precedentes en la experiencia terrestre. Inversamente, si podemos descubrir en el universo materia de densidad alta, será la confirmación más contundente posible de nuestra conclusión de que en las estrellas enanas ordinarias la materia aún está lejos de la densidad máxima y, por lo tanto, se comporta como un gas perfecto".

Se evidencia que la búsqueda empieza en que, las enanas blancas plantean una cuestión particular. Son objetos extraños que persisten en mostrar un tipo de espectro completamente disonante de su luminosidad.

La masa de la enana blanca compañera de Sirio, se deduce a partir de su órbita como estrella binaria. Se ha sugerido que la luz es reflejada por Sirio, siendo su compañera enana blanca, Sirio B, una estrella con poca luz propia. Cuando Sirio B se enfría y la densidad ordinaria asociada a los sólidos, se expande y realiza trabajo en contra de la gravedad. La estrella necesita energía para poder enfriarse, por lo tanto, Sirio B tendría que expandir alrededor de 10 veces su radio, con lo cual el 90% aproximadamente de su energía gravitacional perdida debe ser reemplazada.

Encontramos en (Eddington, 1926, pág. 169):

“ La densidad de la compañera de Sirio, puede someterse a una prueba observacional crucial: el tercer efecto de Einstein o desplazamiento de las líneas espectrales hacia el rojo. Si la alta densidad es correcta, este efecto será muy grande, ya que es proporcional a M/R , que es 31 veces mayor para la estrella que para el sol. El desplazamiento predicho equivale a un desplazamiento Doppler de 20 km/s, y no hay temor de confundirlo con fuentes diversas de desplazamiento espectral.

En una estrella aislada no habría medio de separar el efecto Einstein de un desplazamiento Doppler genuino debido a la velocidad de la línea de visión; pero para esta estrella conocemos la velocidad en la línea de visión por la observación del propio Sirio. La observación consiste en medidas diferenciales de los espectros de Sirio y su compañera: la pequeña diferencia de movimiento orbital entre ellos es conocida y puede tenerse en cuenta”

Las consecuencias de lo anterior no se deben tomar a la ligera, puesto que su trasfondo es crucial. Se ha llevado a cabo una nueva prueba de la teoría de la relatividad general de Einstein y se confirma que la materia de las enanas blancas es extremadamente alta, lo cual da cabida a la formulación que Chandrasekhar hace en torno a la masa límite de estas estrellas.

3.4 La teoría de Chandrasekhar para el límite de masa

A continuación, se presenta la derivación original que Subrahmanyan Chandrasekhar efectuó en 1931 para establecer la existencia de una masa límite en las enanas blancas. Se parte de la ecuación de equilibrio hidrostático y de la estadística de Fermi-Dirac para

un gas de electrones degenerado. Este modelo politrópico relaciona la presión y la densidad en el interior de estas estrellas compactas.

El desarrollo siguiente muestra cómo, al establecer primero el régimen no relativista, y luego incorporar los efectos relativistas, se llega a un valor crítico de aproximadamente 1.44 masas solares, más allá del cual la presión de degeneración es insuficiente para contrarrestar la gravedad.

Esta derivación no solo constituye los fundamentos disciplinares de la controversia, sino que también muestra el marcado rigor matemático con el que Chandrasekhar las concepciones de Eddington.

Usamos la siguiente fórmula para representar la presión total:

$$P = P_r + P_g$$

Dónde:

$$P_r = (1 - \beta)P$$

$$P_g = \beta P$$

β = Relación entre la presión de desgasificación y la presión de radiación

En ese momento: $\beta = 1$, a medida que dejamos de lado la presión y tomamos la estrella como un caso ideal.

Es un gas de electrones completamente degenerado:

$$P_e = \left(\frac{\pi}{60}\right) \left(\frac{h^2}{m}\right) \left(\frac{3n}{\pi}\right)^{5/3}$$

Y el número de electrones se determina por:

$$n = \frac{\rho}{\mu H (1 + f)}$$

Donde:

ρ Es la densidad del material estelar

f Es la relación entre el número de iones y el número de electrones

H Es la masa del átomo de hidrógeno

μ Es el peso molecular (2.5) para el material ionizado por completo

Por lo tanto:

$$P_g = \left(\frac{\pi}{60}\right) \left(\frac{h^2}{m}\right) \left(\frac{3}{\pi H}\right)^{5/3} \rho^{5/3} [\mu^{5/3} (1+f)^{5/3}] \lambda$$

$$P_g = 9.845 \times 10^{12} \left[\frac{\rho}{\mu(1+f)} \right]^{5/3}$$

Sustituyendo:

$$K = \frac{9.845 \times 10^{12}}{\mu(1+f)^{5/3}}$$

Y la presión total queda:

$$P = K \rho^{5/3}$$

Aplicando la teoría de las esferas de gas politrópico donde $\gamma = 5/3$, obtenemos:

$$\left(\frac{GM}{M'}\right)^{1/2} \left(\frac{R'}{R}\right)^{-3/2} = \frac{\left(\frac{5}{2K}\right)^{3/2}}{4\pi G}$$

Insertando valores de $M' = 2.7176$ y $R' = 6.3571$ y tomando la masa solar como

$M_{\odot} = 1.985 \times 10^{33}$ obtenemos:

$$\left(\frac{M}{M_{\odot}}\right) R^3 = \frac{2.14 \times 10^{28}}{\mu^5}$$

O:

$$R^6 \rho = \frac{1.014 \times 10^{61}}{\mu^5}$$

$$\rho = 2.162 \times 10^6 \left(\frac{M}{M_{\odot}} \right)^2$$

Lo cual significa que, a masas superiores a la masa solar, se obtiene una densidad considerablemente alta con respecto a la densidad de las esferas de gas politrópico.

3.4.1 Degeneración relativista en configuraciones estelares

Cuando la densidad en el interior de una enana blanca alcanza valores críticos, los electrones se ven forzados a ocupar niveles de energía cercanos al límite de Fermi, con velocidades cercanas a la de la luz. En este régimen ultra relativista, la ecuación de estado del gas degenerado cambia abruptamente: la presión ya no escala con la densidad a la potencia 5/3, sino que la hace con una dependencia más suave, que es proporcional a $\rho^{4/3}$. Dicha variación, en apariencia sutil, conlleva consecuencias profundas en torno a la estabilidad estelar, puesto que conduce a la aparición de una masa máxima más allá de la cual el equilibrio hidrostático es imposible.

En este apartado se muestra el desarrollo de la teoría de Chandrasekhar para este caso límite, empleando la función de Emden y la ecuación diferencial que describe la estructura de la estrella, pasando por la expresión cuantitativa del límite de masa. Así, se evidencia cómo la relatividad se incorpora en la mecánica estadística de los electrones degenerados.

Continuación:

La densidad obtenida previamente fue:

$$\rho = 2.162 \times 10^6 \left(\frac{M}{M_{\odot}} \right)^2$$

Para el caso degenerado donde el número de electrones por centímetro cúbico es más grande que 6×10^{29} , la presión del gas será:

$$P = \left(\frac{1}{8}\right) \left(\frac{3}{\pi}\right)^{1/3} (hc)(n)^{4/3}$$

Donde h es la constante de Planck y c es la velocidad de la luz.

Así:

$$n = \frac{\rho}{\mu H(1+f)}$$

Y obtenemos:

$$P = K \rho^{4/3}$$

Donde $K = 3.619 \times 10^{14}$

Aplicando la teoría de las esferas de gas politrópico, obtenemos:

$$\left(\frac{GM}{M'}\right)^2 = \frac{(4K)^3}{4\pi G}$$

Para un caso ideal con degeneración extrema, el límite superior de la masa de una enana blanca ideal es:

$$M = 1.822 \times 10^{33}$$

$$M = 0.91 M_{\odot}$$

3.4.2 La teoría de Chandrasekhar (1934)

Para un material estelar con una temperatura específica T y una densidad ρ podemos definir de manera abstracta una cantidad denominada β que denota la razón entre la presión del gas y la presión total, que es la suma del gas cinético y la presión de radiación.

Así:

$$\frac{\left(\frac{960}{r^4}\right) (1-\beta)}{\beta} > 1$$

La densidad del material y su temperatura son las de un gas perfecto en el sentido clásico

Si β_ω es tal que la relación anterior es una igualdad, entonces en configuraciones estelares en las que $(1-\beta)$ es siempre mayor que $(1-\beta_\omega)$, el material estelar continúa siendo un gas perfecto por alta que sea la densidad. No es necesario introducir la degeneración en las ecuaciones.

Si $(1-\beta) > (1-\beta_\omega)$, las ecuaciones politrópicas de Eddington ya no son suficientes y debe tenerse en cuenta la ecuación de estado para materia degenerada.

La ecuación de estado para materia degenerada puede escribirse de la siguiente manera:

$$P = \frac{\pi m^4 e^5}{3h^3} f(x)$$

$$\rho = \frac{8\pi m^3 c^3 \mu m_H}{3h^3} x^3 = Bx^3$$

Donde:

$$f(x) = [x(x^2+1)^{1/2}(2x^2-3) + 3\sinh^{-1}x]$$

Función de Emden

La presión para un gas clásico puede ser escrita como:

$$P = \frac{1}{3} \frac{\pi m^4 c^5}{3h^3} \left[\left(\frac{960}{\pi^4} \right) \left(\frac{1-\beta_1}{\beta_1} \right) \right] (2x^4)$$

Para una configuración completamente colapsada con $\beta=1$, la presión de radiación es cero.

Si introducimos la función φ definida como:

$$\rho = \frac{\rho_c}{(1 - 1/y_0^2)^{3/2}} \left(\frac{\varphi^2 - 1}{y_0^2} \right)^{3/2}$$

Donde:

$$y_0^2 = x_0^2 + 1$$

$$\rho_c = \rho_{central} = Bx^3$$

Así, la estructura de las configuraciones está completamente especificada por la solución de la siguiente ecuación diferencial:

$$\left(\frac{1}{\eta}\right) \frac{d}{d\eta} \left(\frac{\eta^2 d\varphi}{d\eta} \right) = -\left(\varphi^2 - \frac{1}{y_0^2}\right)^{3/2}$$

Con $\varphi^2=1$, $\eta=0$ y $\varphi(\eta_1)=\frac{1}{y_0}$

La ecuación diferencial es exacta, para un y_0 específico o densidad central, la estructura está completamente determinada y en particular su masa.

Si $y_0 \rightarrow \infty$, $\varphi \rightarrow A$ la función de Emden . La masa de esas configuraciones tiende a un único límite. Esta masa es llamada M_3 o masa límite. Las configuraciones como masa menor a M_3 tendrán un radio finito.

Cuando β_1 en la envoltura que, en el núcleo, solo son posibles dos configuraciones colapsadas. Un compuesto tiene $(1-\beta)$ que es siempre menor que el valor $(1-\beta_1)$ que tiene en el estado completamente gaseoso.

La naturaleza de las curvas de masa constante puede predecirse de inmediato. Si la masa es menor que M_3 en el estado completamente colapsado ha de tener un radio único.

β_{M_3} puede ser especificado como:

$$\left(\frac{960}{\pi^4}\right) \left(\frac{1-\beta_{M_3}}{\beta_{M_3}}\right) = 1$$

Si $\beta_{M_3}=\beta_0$ cuando $(1-\beta_\omega)>(1-\beta_0)$

Para estrellas con $M_3 < M \leq M$ cuando $(1-\beta) < (1-\beta_\omega)$ la configuración tiene una masa $M = M_3 \beta^{-3/2}$ cuando $y_0 \rightarrow \infty$,

Así:

$$M = M_3 \beta^{*-3/2}$$

Donde:

$$\beta = \left(\frac{\pi^4}{960} \right) [\beta^\dagger / (1 - \beta^\dagger)]^{1/3}$$

Donde $\beta^\dagger$ es el valor en el estado gaseoso completo.

$\beta^* = \beta^\dagger = \beta_\omega$ es una solución y $\beta^* = 1$ cuando $\beta^\dagger = \beta_0$

Y así obtenemos:

$$M = M_3 \beta^{-3/2}$$

Lo que Chandrasekhar hizo básicamente fue encontrar la ecuación diferencial con la cual daba soluciones exactas que pudieran ser trazadas para mostrar la relación masa-radio para diferentes configuraciones. Así:

$$\left(\frac{1}{\eta} \right) \frac{d}{d\eta} \left(\frac{\eta^2 d\varphi}{d\eta} \right) = - \left(\varphi^2 - \frac{1}{y_0^2} \right)^{3/2}$$

Vemos que si $\varphi \rightarrow \theta_3$, $y_0 \rightarrow \infty$, y a la misma vez el radio tiende a cero.

Podemos ver que:

$$M \rightarrow -4\pi \left(\frac{2A^2}{\pi G} \right)^{3/2} \frac{1}{B^2} \left(\xi^2 \frac{d\theta_3}{d\xi} \right)$$

Donde la constante de degeneración relativista es:

$$K_2 = \left(\frac{3}{\pi} \right)^{1/3} \frac{hc}{8} (\mu H)^{4/3}$$

Está relacionado con A y B por la relación:

$$K_2 = \frac{2A^2}{B^{4/3}}$$

Lo que Chandrasekhar encontró fue que allí estaba la masa límite

$$M_{limit} = 0.197 \left(\frac{hc}{G} \right)^{3/2} \frac{1}{(\mu_e H)^2} = 5.76 \mu_e^{-2} M_{\odot}$$

Con lo cual encontró que es aproximadamente:

$$M_{limit} = 1.44 M_{\odot}$$

Chandrasekhar compara este valor con la masa límite de Stoner de 2.2×10^{33} o $1.09 M_{\odot}$. Concluyendo que el sonado "acuerdo" entre el cálculo preciso basado en la teoría de los politropos y la forma más cruda de la teoría es bastante enigmática dado que en el caso no relativista correspondiente, las desviaciones eran bastante serias.

Ya en el caso relativista de la utilización de la estadística de Fermi y Dirac en los gases politrópicos el factor de casi 2 había disminuido.

En el objetivo de la consecución de la masa límite, es de vital importancia reconocer la contribución de Stoner, no obstante, existe una diferencia epistemológica en el tratamiento de las investigaciones y en las posteriores suposiciones que se tomaron en cuenta.

Para Chandrasekhar el tratamiento metodológico se construye en torno al modelo politrópico estándar empleado por astrofísicos como Eddington y Milne, a pesar que Stoner hace uso de lo que Milne y Chandrasekhar describirían como un método más crudo y aproximado que utiliza la contracción gravitacional como fuente principal de energía para establecer el equilibrio.

Como problema adicional a esta cuestión, se suscitó el de la distribución de la densidad en los modelos estelares, modelos que tendrían su sustento teórico con el diagrama que construyeran Hertzsprung y Russell.

Chandrasekhar descubrió que la densidad en el interior de la estrella cambia a medida que se avanza en el exterior, siendo el centro más denso que en la envoltura exterior.

Chandrasekhar tiene una significativa concordancia con la que hizo Milne, donde la densidad varía con la profundidad, a pesar de que su método tiene demarcadas claramente las densidades, tanto internas como superficiales. Por otro lado, Stoner enfatiza la hipótesis de una distribución de densidad uniforme con base en el modelo estándar de Eddington, aunque en la perspectiva histórica Stoner comenzó su investigación a partir de la teoría de la estrella líquida de Jeans.

Faltaba una concordancia entre las dos partes para que la naturaleza aproximada de los cálculos fuera enfática, lo que suscitó en el principal problema para la consecución de un valor límite para la masa.

En (Milne, 1931) se presenta el ataque que hicieron Milne y Chandrasekhar del artículo de Stoner. No obstante, el trabajo de Chandrasekhar recibe una dura crítica de Milne quien refiere proponer un tratamiento algebraico en lugar de solo dar soluciones numéricas.

En (Chandrasekhar, 1930),pág. 293 Chandrasekhar escribe:

“Poco después de mi llegada a Cambridge, entregue a R.H. Fowler dos artículos en los que daba cuenta de mis resultados sobre las estrellas degeneradas. En el primero de ellos, había aplicado la teoría de los politropos a estrellas enanas blancas no relativistas; y en el segundo, había deducido mi masa límite. Fowler remitió ambos documentos a Milne. Con respecto al primero de ellos, Milne escribió a Fowler que se superponía con algunos de sus propios trabajos y que él (Fowler) le comunico a la Philosophical Magazine, pero Milne no parecía pensar que mi segundo artículo valiera la pena publicarse en ese estado, y Fowler tampoco hizo nada al respecto. Dado que ni Fowler ni Milne tomarían medidas para publicar este breve artículo, lo envié al Astrophysical Journal por mi cuenta unos dos meses después”.

Chandrasekhar se arma de suspicacia al reconocer que ni Fowler ni Milne muestran interés en su segundo artículo sobre la masa límite. Suscitando la creencia de que “ni Fowler ni Milne querían aceptar el hecho de que había una masa límite máxima”.

La mayoría de los artículos de Chandrasekhar publicados en el MNRAS fueron comunicados por Milne a la RAS. Sencillamente carecía de verdadera confianza de su

rigor matemático y conceptual, y prefirió que Chandrasekhar ampliara el tratamiento de su tema, puesto que esperaba más exactitud en los resultados de Chandrasekhar.

3.5 El ataque de Eddington: La álgida reunión de enero de 1935

La polémica que tomó auge en la reunión de la Royal Astronomical Society en enero de 1935, en la cual Eddington tachó de “absurda” la idea de un límite de masa para las enanas blancas, se fundamenta en una larga trayectoria de estudios acerca de estos objetos compactos.

Posterior a la presentación de Chandrasekhar; (Eddington, 1935a) tomó la palabra y comenzó su discurso rechazando categóricamente la existencia de la degeneración relativista: explicó que a pesar de que la fórmula para la presión de electrones en degeneración ordinaria $P \propto \rho^{5/3}$ era válida, la versión relativista se torna excesivamente compleja y dificultosa, sugiriendo que Chandrasekhar había unido soluciones mecánica-relativistas con ecuaciones cuánticas no relativistas de forma incoherente.

(Eddington, 1935a) sostuvo que la teoría de la degeneración relativista estructuraba la resolución de Fowler, dado que combinaba elementos dispares de la relatividad y la mecánica cuántica sin hacerlos compatibles; y como consecuencia invalidando así la fórmula y con ella la existencia del límite máximo de masa propuesto.

Durante su ataque, (Eddington, 1995b) presentó argumentos difusos y solapados que combinaban física clásica como cuántica; negando el principio de exclusión de Pauli y la estadística de Fermi Dirac aplicándolas al contexto de la relatividad, con la evidente intención de desacreditar la fórmula relativista de degeneración.

A pesar de que Eddington no discutió argumentos matemáticos erróneos en la formulación relativista, expresó desdén y desconfianza hacia sus fundamentos físicos, dado que veía que la combinación entre relatividad especial y mecánica cuántica estaba imperfecta y anticipaba que una teoría completa llegaría a corregir y compensar esos efectos relativistas.

En sus argumentos Eddington confundió la interacción eléctrica entre electrones con el principio de exclusión de Pauli, aduciendo que ambas limitaban la proximidad electrónica de manera similar, haciendo difícil la comprensión correcta de los fundamentos estadísticos y cuánticos. (Eddington, 1995b). Desplegó un ataque sostenido en contra de la degeneración relativista, calificándola de especulación sin fundamento entre la comunidad científica. Lo que acarreó a que la aceptación general del límite de

Chandrasekhar fuera tardía y vista con desdén y escepticismo acrítico durante muchos años. (Kilmister, 1936).

3.6 Síntesis de las posturas de Eddington y Chandrasekhar, que producen la controversia.

El siguiente cuadro comparativo evidencia las principales posturas entre Eddington y Chandrasekhar entorno a la controversia que lleva sus nombres, cada postura muestra cómo cada parte tenía concepciones distintas e inherentes acerca de la cuestión de la controversia.

Postura de Eddington	Postura de Chandrasekhar
1. “La naturaleza no permite colapsos infinitos”. Eddington creía en el equilibrio eterno: una estrella siempre encontraría una manera de evitar el colapso gravitacional, incluso si superaba cierta masa. Aquí evidencio que la postura de Eddington es muy mecanicista, al afirmar el que la naturaleza (concebida desde una visión clásica en la física) no permite colapsos infinitos. Ya que él era un acérrimo defensor de las posturas de la filosofía natural de Ernest Mach e incluso compagina argumentos con Albert Einstein.	1. ‘La relatividad cambia todo’ Chandrasekhar aplicó la relatividad especial a los electrones degenerados: a altas densidades, los electrones se mueven cerca de la velocidad de la luz, y su presión ya no puede resistir la gravedad.
2. “La presión de los electrones no es suficiente”. Según la teoría de la presión de degeneración de electrones (sin relatividad), los electrones frenarían la gravedad. Para Eddington, esto funcionaba sin límite de masa. Esto es crucial ya que Eddington se rige por un modelo estadístico politrópico que no cuenta con argumentos relativistas (aún). Ni siquiera la ecuación del gas ideal es suficiente para describir lo que sucede en el interior de las estrellas. Para más información consultar (Eddington, 1926).	2. “Sin límites, la física es inconsistente”. Demostró que, sin el límite, se violaría el principio de exclusión de Pauli (los electrones no pueden ocupar ese mismo estado cuántico). La física cuántica exige un colapso. Dado que Chandrasekhar tiene mucha influencia de la escuela cuántica Germana (Heisenberg, Weinberg, etc.) sus consideraciones sobre los electrones están ligadas a una exigencia del cumplimiento del principio de exclusión de Pauli.

3. Ataque a la relatividad estelar Eddington desconfiaba de aplicar la relatividad especial a las enanas blancas. Decía que Chandrasekhar mezclaba “física exótica” (la relatividad) con problemas clásicos. En una conferencia en 1935 en la Royal Astronomical Society, Eddington declaró que el límite de Chandrasekhar era “un juego matemático sin relación con la realidad”.	3. “Eddington está atrapado en la física clásica”. Chandrasekhar argumentó que Eddington ignoraba la síntesis entre relatividad y cuántica, necesaria para entender objetos ultra densos como las enanas blancas. Más que estar en detrimento de la física clásica, Chandrasekhar provee un auge entre el tratamiento de la relación de la cuántica y la relatividad únicamente en enanas blancas. No obstante Eddington se encasilla en el mecanicismo de Ernest Mach.
4. Si hay un límite, ¿dónde están las estrellas colapsadas? En esa época no se conocían los agujeros negros ni las estrellas de neutrones. Para Eddington la ausencia de observaciones era prueba de que el límite no existía. Aquí evidencio que Eddington tuvo cierta reticencia a considerar que la “ausencia de evidencia, e evidencia de ausencia”. Este viejo adagio, en el caso de la controversia Eddington-Chandrasekhar nos sugiere que alrededor de 1926 la astrofísica se vio volcada en su progreso gracias a la sólida negación de Arthur Eddington.	4. “La ausencia de evidencia no es evidencia de ausencia”. Chandrasekhar señaló que los instrumentos de la época no podían detectar objetos colapsados. (Hoy llamados agujeros negros) Al final de su prolífica obra, Chandrasekhar escribe sobre la existencia de los agujeros negros, sin embargo, para la época de la controversia no se habían teorizado aún. Por eso es que sus novedosas consideraciones eran vistas como “ideas raras” por personajes como Sir Arthur Eddington.

Tabla 1. Comparación de posturas entre Eddington y Chandrasekhar

La controversia entre Eddington y Chandrasekhar es un hito trascendente en la física y la astrofísica moderna, ya que es fundamental para la comprensión de la estructura y evolución de las estrellas enanas blancas. La disputa en torno al límite de máximo de masa de las enanas blancas constituyó un gran desafío para las teorías clásicas y abrió la puerta hacia la integración de la mecánica cuántica y la relatividad general a partir de la descripción de los cuerpos compactos, proponiendo las bases para posteriores desarrollos de la física nuclear (como los trabajos de Enrico Fermi) y la física relativista. (Chandrasekhar, 1931), (Kippenhahn, 1990). El análisis técnico de esta controversia revela no solo diferencias conceptuales, sino también la complejidad inherente a la transición entre el paradigma científico.

Incluso más allá de la disputa técnica, la controversia reflejó las tensiones socioculturales en la primera mitad del siglo XX. Puesto que Eddington, al ser una figura emblemática y una autoridad consolidada en la Royal Astronomical Society; simbolizaba una visión institucional vigorizante y arcaica que favorecía la continuidad y estabilidad del conocimiento. Por el lado de Chandrasekhar, el joven físico indo-británico, representaba no solo el acople de nuevas ideas sino también la diversidad cultural emergente en el campo científico en cuestión, incorporando desde su posición una perspectiva distinta en torno al paradigma y desafiaba las jerarquías establecidas en la comunidad científica. (Raynaud, 2015).

La controversia no solo refleja un enfrentamiento técnico entre Eddington y Chandrasekhar, sino también revela profundas diferencias sobre la naturaleza del conocimiento científico. Mientras Chandrasekhar abogaba por el rigor matemático y la evidencia empírica para establecer límites físicos, Eddington adoptaba una postura más escéptica y especulativa, poniendo en entre dicho el alcance y la interpretación de las teorías físicas en contextos extremos. La tensión resalta la importancia de considerar las bases epistemológicas de los debates científicos, en cuanto influyen en la recepción y validación del conocimiento. (B. Latour, 1987), (Raynaud, 2015).

La evolución del conocimiento científico no solo depende de argumentos técnicos sino también de luchas de poder y la influencia hegemónica de las partes en cuestión de disputa. Eddington, al tener status y prestigio, ejerció un papel decisivo en la configuración del consenso científico en la Royal Astronomical Society; mostrando que la ciencia es de por sí una práctica cultural y social en la cual las jerarquías de poder y las reputaciones pueden determinar el vaivén de las ideas innovadoras como la de Chandrasekhar. (Eddington, 1926), (Kohlstedt, 2011).

Desde la perspectiva educativa, la controversia Eddington-Chandrasekhar propone la necesidad de mostrar que la ciencia no es solo un conjunto estático de hechos sino un proceso humano complejo, subsanado por conflictos y revisiones. Enseñar mediante controversias científicas promueve una alfabetización crítica capaz de formar ciudadanos reflexivos y comprometidos con la comprensión profunda y contextualizada de la ciencia.

CAPITULO 4

Análisis histórico y consideraciones socio-epistémicas de la controversia Eddington-Chandrasekhar

La cuestión fundamental en torno a este capítulo posee una simpleza característica: ¿cómo distinguimos la ciencia consolidada de las ideas innovadoras? Puesto que la controversia Eddington Chandrasekhar muestra que el límite no siempre es distinguible. Por lo tanto, si al principio Eddington calificó esto como una especulación inverosímil – el límite de Chandrasekhar- terminó siendo una contribución radical y revolucionaria que transformó la astrofísica moderna.

Este capítulo examina los criterios de negociación de esta demarcación bajo los rigurosos matices de la comunidad científica y el cómo los factores como la autoridad, el prestigio y las normas institucionales afectan decisoriamente al momento de catalogar la legitimidad de la ciencia.

La autoridad científica no es simplemente un atributo individual, sino que es un fenómeno social que condiciona la aceptación y difusión de teorías científicas, como ejemplo, en la controversia Eddington-Chandrasekhar.

Esta controversia no se limitó solo a un enfrentamiento técnico sobre la estructura estelar de las enanas blancas, sino que estuvo enmarcada por luchas simbólicas de poder que reflejaron las dinámicas sociales y culturales propias de la comunidad científica británica de principios del siglo XX.

En torno a las anteriores premisas, considero pertinente evaluar la controversia Eddington-Chandrasekhar bajo la mirada de la sociología de la ciencia, en particular, la de R. Merton y los postulados del ethos científico. Para esto, se parte desde los primeros postulados por los cuales R. Merton fue el pionero, hasta la descripción del ethos científico bajo el caso de estudio que compete a esta monografía, pasando por una explicación del porqué de este abordaje.

4.1 La sociología de la ciencia

Las primeras formulaciones de la sociología de la ciencia fueron hechas por (Scheler, 1984), (Mannheim, 1952), y su definición se debe al trabajo de (Merton, 1973) En ellos

encontramos que la sociología de la ciencia continuó reflejando durante muchas décadas el impulso original que le dio su fundador.

Merton comienza a elaborar sus ideas sobre la naturaleza de la actividad científica y su amplia gama de aspectos. Estos a partir de su tesis doctoral sobre los avances de las ciencias experimentales en la Inglaterra del siglo XVII. Empezando por un sólido avance en la metodología de la investigación en el campo de la sociología de la ciencia.

Cuando el sociólogo se enfrenta a un determinado conocimiento debe trazarse las siguientes preguntas:

1. ¿Dónde se encuentra la base existencial de la producción mental? ¿Qué sabe de los autores que se adhieren a un determinado conjunto de conocimientos, ya sea revolucionario o tradicional, desde una perspectiva social o cultural?
2. ¿Qué producciones mentales se están analizando sociológicamente? ¿Qué se somete a análisis, es decir, qué esferas (teorías científicas, ideologías religiosas, políticas, etc.) y qué aspectos (focos de atención, niveles de abstracción, relación teoría-práctica, contenido experimental, etc.) del conocimiento se están abordando?
3. ¿Cómo se relacionan las producciones mentales con la base existencial? ¿Se trata de un vínculo causal-funcional (determinación, condicionamiento, interdependencia funcional, interacción, etc.) o de un vínculo semántico (compatibilidad, armonía, congruencia, analogía, etc.)
4. ¿Por qué están relacionadas? ¿Tanto las funciones manifiestas como las latentes pueden imputarse a estos productos mentales existencialmente condicionados? ¿con qué fin se vinculan los productos mentales a su base existencial? ¿El propósito es producir conocimiento útil, controlar la naturaleza, orientar las acciones o reforzar el poder?
5. ¿Cuándo se manifiestan las relaciones imputadas de la base existencial y el conocimiento? ¿Bajo qué condiciones sociohistóricas puede aparecer un producto mental? ¿Se trata de un conocimiento que es universalizante en su impacto o que se limita a sociedades o culturas particulares?

Para la sociología del conocimiento estas cinco preguntas su enfoque canónico. Merton analizó con profundidad acertada la cuestión de la autonomía del conocimiento científico y en especial, las garantías de su autonomía dentro de las instituciones científicas y dentro de la misma sociedad.

Según está consignado en (Raynaud, 2015), para Merton:

“El ethos de la ciencia es ese complejo de valores y normas en tono afectivo que se considera vinculante para el hombre de ciencia.”. Ya que sus normas no son de naturaleza técnica sino deontológica. Sus valores resultan ser el universalismo,

comunalismo, desinterés y escepticismo organizado. En las críticas planteadas al modelo de Merton se evidencia una tendencia a hallar contraejemplos, objetivo que está destinado a naufragar puesto que el vínculo entre los contraejemplos y las normas del *ethos* científico sigue siendo dilucidado

En las ciencias ninguna norma de comportamiento puede ser refutada simplemente sobre la base de incidentes de comportamiento desviado y tan solo obtiene su invalidez si el comportamiento o tendencia logra obtener la aprobación de la comunidad científica.

4.2 El *Ethos* científico de Merton en la sociología de la ciencia

Robert K. Merton fue un influyente sociólogo que en 1942 planteó una teoría revolucionaria en torno al funcionamiento interno de la ciencia, dado que la comunidad científica operaba bajo un conjunto de normas y valores compartidos que él denomina *ethos* científico. Este *ethos* no es tan solo un conjunto de reglas explícitas sino más bien una especie de cultura implícita que permite a los científicos colaborar y validar mutuamente sus trabajos con el fin de avanzar colectivamente hacia la producción de conocimiento. Merton argumentaba que estas normas constituían la ciencia moderna y que su cumplimiento distinguía la actividad científica de otras de otras formas de conocimiento e investigaciones.

(R. K. Merton, 1942) en su principio de universalismo establece que la verdad científica no posee nacionalidad, género ni privilegios: una hipótesis que se formula correctamente y es respaldada por evidencia explícita debe ser reconocida como tal, sin que tenga validez de qué nacionalidad y entorno cultural provenga. Este principio resultó radical para la época, dado que implica que incluso un científico marginal o de origen humilde puede contribuir al corpus del conocimiento científico. Es por ello que el universalismo no es tan siquiera un ideal ético sino un requisito funcional para que la ciencia actúe como una corporación acumulativa en pro del progreso.

El segundo pilar del *ethos* científico mertoniano (R. Merton, 1973) es el comunalismo, el cual postula que los resultados científicos son propiedad común de la comunidad científica y no una posesión privada de sus descubridores. Dicho principio indica que todo hallazgo debe ser comunicado públicamente, revisado por pares y puesto a disposición para que otros investigadores lo cuestionen, verifiquen o amplíen. En tanto que el comunalismo genera dinámicas donde los científicos están motivados no por una acumulación de secretos sino por el reconocimiento académico derivado de la contribución al conocimiento colectivo. Puesto que sin este principio la ciencia sería fragmentada, con grupos e la comunidad científica que se guarden sus descubrimientos.

El principio del desinterés de Merton establece que, a pesar de que los científicos sean seres humanos con intereses personales; la estructura normativa de la ciencia debe orientarlos hacia la búsqueda de la verdad antes que la ganancia personal. Esto significa

que la comunidad científica desalienta activamente el fraude, la manipulación de datos y los conflictos de intereses que se derivan de ello. El cuarto y último componente del ethos es el escepticismo organizado, que deja los cimientos para cuestionar, verificar y criticar las afirmaciones de la comunidad científica, sin exceptuar a las autoridades y las jerarquías de poder.

4.3 La autoridad científica como obstáculo y facilitador

La autoridad científica es un fenómeno muy paradójico: puesto que puede actuar simultáneamente como catalizador y como obstáculo para el avance del conocimiento. Arthur Eddington evidencia ambas facetas de manera extraordinaria. En cuanto es defensor de la teoría de la relatividad general de Einstein en el contexto británico de post-primera guerra mundial, Eddington usó su autoridad y su jerarquía para contrarrestar el prejuicio nacionalista y la resistencia ideológica de la comunidad científica británica hacia la ciencia de Alemania. Dado que lideró la expedición de 1919 permitió que una teoría revolucionaria fuese adoptada por la comunidad internacional. No obstante, este mecanismo de autoridad se convirtió en una prueba de cierre intelectual cuando Chandrasekhar propuso su límite de masa.

Alrededor de las décadas de 1910 y 1920, Arthur Eddington propició acciones decisivas en la transformación de la relatividad general en cuanto a un conjunto abstracto de ecuaciones matemáticas en una teoría científica legítima. Bajo estos parámetros de contexto, la autoridad de Eddington funcionó como un facilitador. Puesto que poseía múltiples formas de capital: capital intelectual (dominio de las matemáticas de la astrofísica), capital institucional (dado que tenía una posición de director del observatorio de Cambridge), capital social (sus conexiones con otros influyentes científicos), y capital simbólico (su presigio acumulado). Utilizó estas formas de capital para comunicar la relatividad de manera accesible y para organizar la expedición que confirmó experimentalmente las predicciones de Einstein. En ausencia de estas intervenciones activas de Eddington, es plausible que la relatividad hubiese enfrentado mayor resistencia en esa época.

La constante resistencia de Eddington a las ideas innovadoras de Chandrasekhar no fue solo una diferencia intelectual marcada en la legitimidad; sino un ejercicio de poder institucional que usó la autoridad científica para silenciar alternativas. Eddington determinaba qué artículos se publicaban, qué investigadores recibían fondos, etc. Y a pesar de que no lo hizo de manera explícita, su influencia fue sistemática: cualquier científico que quisiera apoyar públicamente a Chandrasekhar enfrentaba la resistencia de Eddington y su autoridad científica. Puesto que esta dinámica de poder demostró que

la autoridad científica actúa como mecanismo de control y exclusión, limitando la diversidad de perspectivas e ideas que la comunidad científica considera con rigor y método.

El caso de Eddington es una evidencia de que la autoridad científica no es intrínsecamente progresista o regresiva; sino que su carácter depende de cómo se ejerza y de los contextos operantes. Dado que, si una autoridad se abre a la evidencia y cuestiona sus propias presuposiciones, puede ser un catalizador de innovación científica. Mientras que una autoridad que se cierra sobre sí misma y que defiende sus ideas previas a toda costa, se convierte en un obstáculo. Lo crucial de este asunto es reconocer que la autoridad científica es siempre un poder social, y como tal, de transparencia y mecanismos de contrapeso que no hagan difícil su degeneración en un autoritarismo científico.

La controversia Eddington-Chandrasekhar muestra que una ciencia evidentemente progresista también requiere no solo de científicos brillantes con autoridad, sino de estructuras institucionales que regulen cómo se ejerce esa autoridad. Cuando la autoridad está acompañada de humildad intelectual, curiosidad genuina y disposición a ser desafiada, las puertas se abren a nuevos paradigmas. Mientras que cuando está acompañada de rigidez ideológica, defensa del ego y resistencia al cambio; esas puertas se cierran.

4.4 Análisis comparativo: normas Mertonianas vs la realidad de la controversia

Para una mejor comprensión del cómo la controversia diverge del ideal del ethos científico, se presenta un análisis comparativo:

Norma Mertoniana	Ideal	Realidad en Eddington-Chandrasekhar
Universalismo	La verdad es independiente del origen	Chandrasekhar fue evaluado diferente por su status colonial
Comunalismo	El conocimiento es compartido y construido colectivamente	Eddington bloqueó la circulación de ideas de Chandrasekhar
Desinterés	Se busca la verdad, no el prestigio personal	Eddington defendió su reputación más que

		explorar nuevas ideas
Escepticismo organizado	Todas las ideas son cuestionadas críticamente	Solo Chandrasekhar fue cuestionado; Eddington fue reverenciado

Tabla 2. El ethos Mertoniano en la controversia Eddington-Chandrasekhar

Dicho análisis revela que la realidad científica es atravesada por dinámicas de poder que contradicen los ideales del ethos científico. La autoridad (que en este caso no es natural), actúa como un filtro que selecciona qué ideas merecen considerarse seriamente.

En cuanto a la validez del ethos de Merton en la controversia Eddington-Chandrasekhar, se evidencia que, en términos generales, este caso de estudio no se adapta al sistema propuesto por Merton.

4.5 El porqué del uso del ethos Mertoniano en la controversia Eddington-Chandrasekhar

A raíz de la elección del marco teórico de (R.K. Merton, 1973) para analizar la controversia Eddington-Chandrasekhar, no se desconocen ni se hacen menos relevantes los desarrollos de la nueva sociología como (B. Latour, 1987) y (Bloor, 1991). Dado que, por el contrario, el marco teórico parte de ellos. (Merton, 1973) adopta un modelo normativo de cómo debería funcionar la ciencia: universalismo, comunalismo, desinterés y escepticismo organizado. No obstante, la nueva sociología hace una descripción de cómo funciona realmente: las negociaciones, los intereses y las jerarquías de poder, Más allá de ser contradictorios, los dos enfoques son complementarios, dado que Merton nos da el deber ser. Latour nos da el ser. Y en el caso de la controversia Eddington-Chandrasekhar es el campo de acción donde ambos enfoques se ejecutan.

El universalismo Mertoniano postula que la verdad científica es independiente del origen, la nacionalidad o la jerarquía científica. En la controversia Eddington-Chandrasekhar, este principio sufre una ruptura teórica. Dado que Chandrasekhar, al ser un joven físico hindú en la Inglaterra colonial, no fue evaluado únicamente por la solidez de sus argumentos.

En cuanto al comunalismo, se establece que los resultados científicos deben ser propiedad común de la comunidad, y su circulación ha de propiciar la difusión. No obstante, la circulación de las ideas de Chandrasekhar fue bloqueada por la autoridad de Eddington, de manera efectiva, ya que sus artículos fueron cuestionados.

El desinterés Mertoniano asume que los científicos están incentivados por la búsqueda de la verdad y no por prestigio personal. A pesar de esto, la actuación de Eddington en la Royal Astronomical Society sugiere lo opuesto, dado que su ataque a Chandrasekhar en enero de 1935 fue una descalificación y no una refutación técnica. Ya que no demostró que el límite de masa fuera incorrecto, sino que se limitó a catalogarlo como “un juego matemático sin relación con la realidad”.

Para cerrar, el escepticismo organizado conlleva a que todas las ideas han de ser sometidas a un escrutinio crítico, sin importar quién las promulgue. De manera categórica Chandrasekhar fue cuestionado con un rigor extremo y a menudo con desdén. Las concepciones de Eddington, por otro lado, se aceptan sin la misma exigencia crítica; atendiendo a su jerarquía de poder en la Royal Astronomical Society.

Más allá de catalogar el ethos Mertoniano como un modelo obsoleto, este trabajo de grado lo resalta como un espejo. Dado que no refleja lo que la ciencia es, sino muestra lo que debería ser, como concepción ideal. La controversia Eddington-Chandrasekhar evoca las tensiones entre el ideal normativo y la práctica real en un caso de estudio. Merton no es la respuesta, es la pregunta bajo la cual se concibe el criterio de análisis.

4.6 Análisis de la controversia Eddington-Chandrasekhar

La controversia Eddington-Chandrasekhar analizada desde sus múltiples dimensiones – epistémica, histórica, social y pedagógica- deja ver que la ciencia no es simplemente el resultado de avances técnicos, sino un entramado de disputas y consensos que son el reflejo de procesos humanos complejos. El recorrido realizado a la largo de este capítulo ha mostrado cómo la autoridad, el contexto sociocultural y el poder institucional influyen en la validación y en qué tanto son legítimas las teorías científicas.

Así pues, el estudio de esta controversia permite reconocer que los grandes debates en torno a la ciencia marcan inflexiones en la historia de la ciencia, y nos invitan a cuestionar la supuesta objetividad absoluta del conocimiento, ubicando cada hallazgo intelectual en circunstancias particulares.

La controversia entre Eddington y Chandrasekhar permite desmitificar la ciencia como una actividad meramente objetiva, mostrando como el conocimiento científico es el resultado de procesos humanos complejos que involucran conflictos, tensiones y transformaciones profundas. Este estudio destacó no solo las diferencias científicas sino también las dimensiones sociales, políticas y culturales que influyeron en su producción y aceptación del conocimiento científico. (B. Latour, 1987), (Kuhn, 1970).

El estudio histórico de esta controversia nos permite notar la importancia de la autoridad científica y las jerarquías de poder institucional, allí donde figuras como Eddington

ejercieron una influencia decisiva que inicialmente generó rechazo y desdén hacia las ideas revolucionarias de Chandrasekhar, mostrando como dichas jerarquías de poder social moldean el avance científico. (Snow, 1959).

Las controversias científicas como la estudiada en esta monografía, acarrearán un papel pedagógico fundamental al mostrar que la ciencia es un entramado de discusiones y reconfiguraciones perpetuas en cuanto se rompa el paradigma; promoviendo en docentes como estudiantes una comprensión crítica y contextualizada de la ciencia.

Superar la barrera de las dos culturas implicadas en la ciencia y las humanidades es clave para una educación científica ejemplar que promueva el pensamiento crítico, interdisciplinar y reflexivo desde una perspectiva social y cultural. (Ayala M. M., 2006), (Snow, 1959).

Es preciso fomentar en la educación científica la narrativa que incluya controversias históricas, con miras a desnaturalizar la imagen idealizada de la ciencia, promoviendo una reflexión epistémica y la adquisición de habilidades críticas que sean imprescindibles para la ciudadanía científica, según lo recogido en (Matthes, 1994).

A partir de (Kuhn, 1970) se deja notar que la controversia Eddington-Chandrasekhar destaca también como los criterios de demarcación en la ciencia son objeto de discusión y cambio al ser sus límites difusos entre lo que es ciencia y no ciencia; aquello implica un enfoque más crítico con el fin de reconocer la provisionalidad del conocimiento científico y su dimensión cultural y social.

El análisis histórico refuerza la idea de que la enseñanza de la física debe incorporar la sociología y la filosofía de la ciencia, dotando a los futuros docentes de herramientas para abordar la ciencia como agente de educación científica con base en (Orozco, 2005).

Es más, la resistencia que tuvo Arthur Eddington a aceptar el límite de masa de las enanas blancas ilustra como la ciencia es configurada dentro de redes comunicativas y sistemas jerárquicos de poder, donde el prestigio y la tradición influyen en la validación del conocimiento. Incluso este caso de estudio muestra el valor de la perseverancia y la rigurosidad científica en torno a la oposición institucional, puesto que las contribuciones de Chandrasekhar a la física moderna pasaron por dificultades en sus inicios.

En suma, el análisis histórico de la controversia Eddington-Chandrasekhar permite contemplar la ciencia como una práctica histórica, contextual y socialmente situada, sentando las bases para propuestas educativas que incorporen esta complejidad inherente.

Reflexiones finales

En el presente trabajo de grado se propuso analizar la controversia entre Arthur Eddington y Subrahmayan Chandrasekhar desde una perspectiva histórica, sociológica, disciplinar y pedagógica. Desde la reconstrucción de este suceso, se buscó comprender cómo la autoridad científica, las normas de la comunidad científica y los marcos conceptuales han influido en la aceptación o el rechazo de nuevas teorías en la astrofísica. Paralelamente se exploró el potencial pedagógico de este caso para la enseñanza de la física y la formación de docentes.

Las presentes reflexiones finales no pretenden repetir capítulo por capítulo lo que se desarrolló, no obstante, pretende integrar los hallazgos dispersos en el documento y dar respuesta a una pregunta de fondo que atraviesa toda la investigación: ¿qué nos enseña la controversia Eddington-Chandrasekhar acerca de la naturaleza de la ciencia y sobre sus formas de enseñanza? Bajo esta idea, las líneas que siguen articulan los resultados disciplinares, históricos, sociológicos y pedagógicos en una visión de conjunto. Para ello dejaré las reflexiones en cuatro aspectos en específico.

La ciencia como proceso histórico y problemático

La primera reflexión crucial es que la reconstrucción de saberes de la controversia Eddington-Chandrasekhar desmonta el imaginario de que la ciencia es un proceso lineal articulado, acumulativo y que está libre de conflictos. Puesto que el estudio detallado de este suceso da cuenta de que el avance de la astrofísica no fue resultado de una simple sucesión de descubrimientos, sino una serie de disputas, resistencias y relecturas posteriores. La propuesta de Chandrasekhar acerca del límite máximo de masa de las enanas blancas no fue aceptada de forma inmediata de una manera procesal, sino desde una perspectiva de especulación que desafiaba el statu quo de las estrellas que defendía Eddington.

Este hecho prospera de manera articulada con las ideas de Thomas Kuhn acerca de las crisis y los cambios de paradigma. Puesto que el caso de estudio muestra cómo, durante un período prolongado, existe un paradigma preponderante, que es la visión clásica del equilibrio estelar, mientras por otro lado está una propuesta emergente de tratar este tema desde una visión más rigurosa con ayuda de la mecánica cuántica y la relatividad. La controversia Eddington-Chandrasekhar evidencia que el tránsito entre paradigmas no se produce aplicando criterios abstractos de racionalidad, sino bajo tensiones y decisiones ambivalentes.

La ciencia, desde esta perspectiva, es una actividad que en esencia es histórica, cuyas teorías nacen y se discuten en contextos concretos.

Demarcación, racionalidad y límite de la falsación

La segunda reflexión gira en torno al problema de la demarcación entre ciencia consolidada e ideas innovadoras. La controversia Eddington-Chandrasekhar evidencia que no es fácil distinguir entre una hipótesis descabellada y una contribución revolucionaria, de una manera directa y en tiempo real. En los años treinta del siglo XX, para los miembros de la Royal Astronomical Society; el límite de masa de Chandrasekhar parecía tener un nivel teórico exagerado, poco compatible con la intuición física que pregonaba Eddington y con su “imagen razonable” del universo. La historia demostraría que esa intuición estaba equivocada.

Este desequilibrio hace replantear las propuestas clásicas de la filosofía de la ciencia, en torno al criterio popperiano de falsación. Puesto que tanto Eddington como Chandrasekhar formulaban teorías y argumentos en un principio susceptibles de contracción empírica. No obstante, durante mucho tiempo no existieron observaciones definitivas y la comunidad científica tuvo que moverse en un terreno de incertidumbre, dado que los juicios sobre la aceptación de las teorías se apoyaban tanto en consideraciones técnicas como expectativas filosóficas y estéticas. La falsación no es suficiente para explicar por qué una teoría se considera especulación en un momento preciso.

La controversia Eddington-Chandrasekhar evidencia que los criterios de racionalidad científica operan desde una manera situada: son dependientes del estado de la instrumentalización y los marcos teóricos disponibles. Dado que la demarcación no es un simple filtro lógico, sino que es un proceso en el que se avalúa el estatuto de las teorías.

El papel pedagógico de la controversia Eddington-Chandrasekhar en la enseñanza de las ciencias

Uno de los aportes más importantes de esta monografía se sitúa en el plano pedagógico, ya que el estudio de caso sobre la controversia Eddington-Chandrasekhar conduce a replantear las maneras en que se enseña la física en escuelas y universidades. Ya que, tradicionalmente la enseñanza de la física presenta teorías y leyes que en la forma final en la que se presentan sus contenidos, están desprovistas de la historia y las implicaciones que dieron lugar a su formulación y aceptación. Esta presentación desprovista de profundidad contribuye a obtener una imagen de la ciencia como un catálogo de verdades definidas, que es poco compatible con la realidad de la práctica científica.

Al usar las controversias científicas en el aula, se abre una visión para mostrar a los estudiantes que la ciencia es un proceso en el cual hay preguntas abiertas, hipótesis en disputa y argumentos en competencia. Al analizar la controversia Eddington-

Chandrasekhar, se trabajó no solo con el contenido disciplinar – estructura estelar, enanas blancas, estadística de Fermi-Dirac, mecánica cuántica, relatividad – sino también con habilidades de argumentación, lectura crítica de fuentes primarias, interpretación de evidencias, identificación de supuestos filosóficos y discusión entre pares. De tal manera, la controversia se convierte en un recurso didáctico potente que fomenta el pensamiento crítico y la alfabetización científica.

Adicionalmente, las controversias ayudan a enlazar la física con otros ámbitos del saber, contribuyendo a superar la brecha que (Snow, 1959) nombra “la tesis de las dos culturas”. Ya que se evidencia que en la controversia intervienen valores, creencias, tensiones coloniales y representaciones sociales de la ciencia, y se abre un espacio para el diálogo multidisciplinar entre física, historia, filosofía y sociología. Con ello se enriquecen las experiencias de aprendizaje y se muestra que el comprender un fenómeno físico no se reduce a la aplicación de fórmulas, sino a situarlo en un plano más amplio en cuanto a significados humanísticos.

En cuanto a la formación de docentes, el trabajar con controversias ofrece la oportunidad única de construir una imagen más compleja y reflexiva de la profesión. Ya que el futuro docente de física aprende a diseñar secuencias didácticas en donde los conceptos se presentan en función de las preguntas que se buscan responder. A partir de lo anterior, la enseñanza de la física abandone el plano donde deja de ser una transmisión de resultados para transformarse en una invitación a participar de forma crítica en la construcción de sentido y significado en torno a la ciencia.

Aportes específicos de la monografía

En primer lugar, bajo un panorama disciplinar e histórico, la monografía ofrece una reconstrucción integrada de la controversia Eddington-Chandrasekhar que no se limita a una cronología histórica y social, sino que articula los elementos biográficos, conceptuales y disciplinares de la que es parte. La vida y la formación de Chandrasekhar en la India colonial y la figura de Eddington como autoridad cuáquera y mediador en la teoría de la relatividad, su contexto en la jerarquía académica en Cambridge y las tensiones imperialistas son puestos en diálogo con el desarrollo disciplinar del límite de masa de las enanas blancas.

En el ámbito sociológico y filosófico, la monografía pone en estudio y análisis el caso específico con marcos teóricos como el *ethos* científico de Merton, los paradigmas de Kuhn y los estudios de la ciencia como práctica social en autores como (Bloor, 1991) y (B. Latour, 1987). Lo anterior conlleva a leer la controversia no solo como un problema disciplinar sobre el límite de masa de las enanas blancas, sino como un campo de prueba para ideas más generales acerca del funcionamiento de la ciencia y el papel que juega

la autoridad, las jerarquías institucionales y las normas establecidas por la comunidad científica en su desarrollo integral.

Y finalmente está la dimensión pedagógica, ya que la presente monografía propone una justificación concisa del uso de las controversias científicas como recurso para la enseñanza de la física y la formación de docentes en la disciplina. Con la revisión de antecedentes y de un análisis propio, se plantean una serie de argumentos a favor de la incorporación de la historia y la filosofía de la ciencia en el aula de clases.

Limitaciones de la investigación

Esta monografía, como toda investigación, posee limitaciones que son importantes de reconocer. En el aspecto histórico, a pesar de que se consultaron fuentes secundarias como (Wali, 2010) y (Venkataraman, 1992), a la vez que documentos primarios y originales; no fue posible acceder de manera exhaustiva a toda la correspondencia original ni a los archivos específicos de la Royal Astronomical Society, lo que habría enriquecido aún más la recontextualización de saberes. En el panorama comparativo, el estudio se centró primordialmente en la controversia Eddington-Chandrasekhar, sin desarrollar a profundidad las anteriores controversias acerca de las enanas blancas que Eddington tuvo con personajes como E. C. Stoner, W. A Fowler y E. A. Milne.

En al ámbito pedagógico, la propuesta se mantiene en un nivel meramente teórico y reflexivo, ya que no se ha diseñado ni aplicado una propuesta didáctica concreta en el aula de clase, ni se han recogido datos empíricos acerca del impacto de trabajar con controversias en estudiantes o docentes en formación. Este es un límite importante, no obstante, es una oportunidad clara para continuar. Ya que, a partir del marco construido, se pueden diseñar y ejecutar secuencias didácticas basadas en controversias científicas.

Referencias

- A. Eddington. (1926). *The Internal Constitution of the Stars*. Cambridge: University Press.
- A. S. Eddington. (1920). *Space, Time and Gravitation*. Cambridge: Cambridge University Press.
- Adams, W. (1915). The physical properties of the companion of Sirius. *Astrophysical Journal*, 42, 179-188.
- Asimov, I. (1977). *Introducción a la ciencia*. Barcelona: Plaza & Janes, S.A. Editores.
- Ayala. (2006). Los análisis histórico-críticos y la recontextualización de saberes científicos-construyendo. 1-8.
- Ayala, M. M. (2006). Los análisis histórico-críticos y la recontextualización de saberes científicos. *Proposiciones*.
- Ayala, M. M. (2013). Enseñanza de las ciencias desde una perspectiva cultural.
- B. Latour. (1987). *Science in Action: How to Follow Scientists and Engineers Through Society*. California: Harvard University Press.
- Bloor, D. (1991). *Knowledge and Social Imagery*. Chicago: University of Chicago Press.
- Cardona Torres, P. A. (2023). *¿Astrofísica en la escuela?: Una propuesta para la enseñanza de la física de agujeros negros en la educación media*. Universidad Pedagógica Nacional, Bogotá.
- Castillo, J. C. (2005). Institucionalización, desarrollo y enseñanza de la física en Colombia. *Universidad Pedagógica Nacional*.
- Castillo, Juan . (2008). La historia de las ciencias y la formación de maestros: la. *Revista Nodos y Nudos*.
- Chandrasekhar. (1929). Chandrasekhar To Father. *Chandrasekhar Archive*.
- Chandrasekhar. (1930). Chandrasekhar Archive. *Chandrasekhar Archive*, 293 first footnote.
- Chandrasekhar. (1930). Letter To Father. *Chandrasekhar Archive*, Box 70/ Folder 6.
- Chandrasekhar. (31 de April de 1931). Letter of 30 April 1931. *Chandrasekhar Archive*.
- Chandrasekhar. (1931). The maximum mass of ideal white dwarfs. *Astrophysical Journal*, 74, 81-82.

- Chandrasekhar. (1931). The Maximum Mass of Ideal White Dwarfs. *Astrophysical Journal*, vol. 74, 81.
- Chandrasekhar, S. (1983). *Eddington The Most Distinguished Astrophysicist*. Cambridge: Cambridge University Press.
- Clark. (1862). Discovery of the comparison to Sirius. En A. Clark, *Discovery of the comparison to Sirius* (págs. 1-3). Nueva York: Proceedings of the American Academy of Arts and Sciences.
- D. C. Cassidy. (1992). *Uncertainty: The life and science of Werner Heisenberg*. Múnich: W.H. Freeman.
- Eddington. (1935a). Relativistic degeneracy. *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society*, 95(6), 673-676.
- Eddington. (1935b). On relativistic degeneracy. *Monthly Notices of The Royal Astronomical Society*, 96(2), 153-159.
- Eddington, A. S. (1926). The Internal Constitution of Stars. En A. S. Eddington, *The Internal Constitution of Stars* (pág. 169). Cambridge: Cambridge University Press.
- Finocchiaro, M. (1989). *The Galileo affair: a documentary history*. California: California Press.
- Gopal, P. (2019). *Insurgent empire: Anticolonial resistance and British dissent*. Nueva Delhi: Verso Books.
- Granés, J. (1997). Del contexto de la producción de conocimientos al contexto de la enseñanza. *Revista Colombiana de Educación*.
- Granés, S. &. (1997). Del contexto de la producción de conocimientos al contexto de enseñanza. *Revista Colombiana de educación*, 4-23.
- Guha, R. (2019). *Ghandi: The Years That Changed The World*. Penguin Random House.
- Gulabray V. S., V. P. (2024). Orientalist scholarship and empire: British intellectual engagement with India. *Shodkosh: Journal of Visual and Performing Arts*, 5*(2) 1521-1528.
- Harker. (2015). *Creating Scientific Controversies*. Cambridge: Cambridge University Press.
- Harker, D. (2015). *Creating Scientific Controversies*. Cambridge: Cambridge University Press.

- K. Harper. (2018). The 1919 Solar Eclipse Expedition: An Icon of Science and Diplomacy. *Journal of the History of Astronomy*, 49(2), 215-237.
- Kilmister. (1936). Eddington and the degeneracy problem. *PROceedings of the Royal Astronomical Society A*, 156(869), 1-15.
- Kilmister, C. W. (1966). *Men of Physics: Sir Arthur Eddington*. London: Pergamon Press Ltd.
- Kippenhahn, R. (1990). *Stellar Structure and Evolution*. Chicago: Springer-Verlag.
- Kohlstedt, S. (2011). The power of scientific networks: Shaping knowledge in the nineteenth century. En S. Kohlstedt, *The power of scientific networks: Shaping knowledge in the nineteenth century* (págs. 49(2), 217-242). History of Science.
- Kuhn. (1970). *The Structure of Scientific Revolutions*. Chicago: University of Chicago Press.
- Kuhn, T. S. (1962). *The Structure of Scientific Revolutions*. Chicago: University of Chicago Press.
- Laudan, L. (1983). *Physics, Philosophy and Psychoanalysis*. Dordrecht, Holland: Library of Congress Cataloging in Publication Data.
- Letter of 30 April 1931. (30 de Abril de 1931). *Chandrasekhar Archive*.
- Lopez, E. B. (2015). *La evolución estelar, Chndarsekhar*. Villanueva, Navarra: National Geographic.
- M. Stanley. (2003). Constructing a 'Revolution in Science': The Campaign to Promote Eddington's Eclipse Expedition in Britain. En M. Stanley, *Constructing a 'Revolution in Science': The Campaign to Promote Eddington's Eclipse Expedition in Britain* (págs. 36(4), 441-259). Cambridge: British Journal for the History of Science.
- Mannheim, K. (1952). *Essays on the Sociology of Knowledge*. London: Routledge and Kegan Paul.
- Matthes, M. R. (1994). *Science Teaching: The Role of History and Philosophy of Science*. Routledge.
- MEN, M. d. (1998). *Serie lineamientos curriculares*. Bogotá D.C.
- Merton, R. K. (1973). *The Sociology of Science. Theoretical and Empirical Investigations*. Chicago: The University of Chicago Press.

- Miller. (1998). The Measurement of Civic Scientific Literacy. En J. D. Miller, *The Measurement of Civic Scientific Literacy* (págs. 2063-223). Chacago: Públic Understanding of Science.
- Milne, E. A. (29 de January de 1931). Letter of 29 January 1931, Milne to Chandrasekhar. *Milne Archive*.
- N. Oerkes. (1999). The rejection of continetal drift. En N. Oerkes, *The rejection of continetal drift*. (págs. 132-164). Nueva York: Historical studies in the Physical and Biological Sciences.
- Orozco, J. (2005). Los estudios histórico-críticos y la enseñanza de las ciencias. *Atajos y desviaciones*.
- Osborne, M. Monk & J. (1997). Placing the History and Philosophy of Science on the Curriculum: A Model for he Development of Pedagogy. En M. Monk, *Placing the History and Philosophy of Science on the Curriculum: A Model for he Development of Pedagogy* (pág. 81). Science Education.
- Pasteur, L. (1922-1939). Euvres de Pasteur. *Masson et Cie*, Vol 6.
- Pulido, A. C. (2016). *Derechos Básicos de Aprendizaje (DBA V.1) Ciencias Sociales*.
- R, Merton. (1973). *The Sociology of Science: Theoretical and Empirical Investigations*. Chicago: University of Chicago Press.
- R. Jenkins, L. Smith & D. Patel. (2010). The penicilin discovery. A medical breakthrough. En L. S. R. Jenkins, *The penicilin discovery. A medical breakthrough* (págs. 123-137). Journal of Medical History.
- R. K. Merton. (1942). Science and JTechnology in a Democratic Order. En R. K. Merton, *Science and JTechnology in a Democratic Order* (págs. 115-126). Journal of Legal and Politicak Sociology.
- R.K. Merton. (1973). *The Sociology of Science: Theoretical and Empirical Investigations*. Chicago: University of Chicago Press.
- Raynaud, D. (2015). *Scientific Controversies: A Socio-Historical PErerspective on the Advancement of Sciencece*. Transaction Publishers.
- Reichenbach, H. (1938). *Experience and prediction*. Chicago: University of Chicago.
- Reichenbach, H. (1973). *Experiencia y predicción: un análisis de los fundamentos y la estructura del conocimiento*. Editorial Tecnos.

- Ritchie, A. (1947). *Reflections on the Philosophy of Sir Arthur Eddington*. Cambridge: Cambridge University Press.
- Scheler, M. (1984). *Problèmes de sociologie de la connaissance*. Paris: Presses Universitaires de Paris.
- Snow. (1959). *The Two Cultures and The Scientific Revolution*. Cambridge: Cambridge University Press.
- Snow, C. P. (1959). *The two cultures and the scientific revolution*. Cambridge: Cambridge University Press.
- V. Laiviere. (2009). Scientific controversies: Theory and practice. En V. Laiviere, *Scientific controversies: Theory and practice* (págs. 39(1), 3-17). Social Studies of Science.
- Venkataraman, G. (1992). *Chandrasekhar and his limit*.
- W. S. Adams. (1914). Photographic observations of Sirius B. *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society*, 74, 45-52.
- Wali. (2010). *A Scientific Autobiography: S. Chandrasekhar*. 76: World Scientific Publishing Co. Pte. Ltda.
- Wali, K. (2010). *A Scientific Autobiography: S. Chandrasekhar*. En K. Wali, *A Scientific Autobiography: S. Chandrasekhar* (pág. 76). Sinpagore: World Scientific Published Co. Pte. Ltda.