

INTRODUCCIÓN A LA ASTROFÍSICA RELATIVISTA

GUSTAVO E. ROMERO
JOSEP M. PAREDES

Departament d'Astronomia i Meteorologia

INTRODUCCIÓN A LA ASTROFÍSICA RELATIVISTA

Gustavo E. Romero
Josep M. Paredes

Departament d'Astronomia i Meteorologia



365

TEXTOS DOCENTS

Publicacions i Edicions



UNIVERSITAT DE BARCELONA



A Paula y Margarita

Índice

PRÓLOGO	11
PREFACIO	13
1. INTRODUCCIÓN	15
2. ESPACIO-TIEMPO Y RELATIVIDAD	19
2.1 Espacio-tiempo	19
2.2 Objetos y estructura sobre la variedad	21
2.3 El grupo de Lorentz	25
2.4 Mecánica relativista	28
2.5 Elementos de relatividad general	31
2.5.1 Agujeros negros	32
3. PARTÍCULAS ELEMENTALES	35
3.1 Leptones	37
3.1.1 Antipartículas	37
3.1.2 Interacciones	38
3.2 Hadrones	40
3.3 Interacciones entre partículas	42
3.4 Decaimiento de partículas	45
3.4.1 Decaimiento electromagnético	45
3.4.2 Decaimientos fuertes	45
3.4.3 Decaimientos débiles	46
3.4.4 Decaimiento del neutrón	47
3.4.5 Decaimiento de mesones	47
3.4.6 Decaimiento de leptones	48
3.5 Propiedades intrínsecas de las partículas: el spin	48
3.6 Colores y QCD	49
4. ACELERACIÓN DE PARTÍCULAS	51
4.1 Aceleradores artificiales	51
4.2 Rayos cósmicos	54
4.2.1 Púlsares	57
4.2.2 Remanentes de supernova	60
Etapas de un remanente de supernova	61
4.3 Mecanismo de aceleración difusivo	64
5. DIFUSIÓN	71
5.1 Ecuación de difusión en una dimensión	72
5.2 Solución general de la ecuación de difusión	74

6. PROCESOS RADIATIVOS I	77
6.1 Conceptos básicos	77
6.2 Radiación térmica	79
6.3 Radiación sincrotrón	81
6.3.1 Radiación sincrotrón de una partícula	81
6.3.2 Una aproximación útil	84
6.3.3 Radiación sincrotrón de una distribución de partículas	85
6.3.4 Absorción de la radiación sincrotrón	86
6.3.5 Límite cuántico	88
6.4 Una aplicación de la radiación sincrotrón: el modelo de Van der Laan	89
6.5 Radiación de curvatura	91
6.6 Radiación Cherenkov	92
6.7 Radiación Compton inversa (IC)	93
6.7.1 La sección eficaz IC	95
6.7.2 Tasa de enfriamiento y espectro de emisión	96
6.8 Radiación por producción de foto-mesones	100
6.9 Formación de pares por interacciones foto-hadrónicas	103
6.10 Producción de pares en tripletes (<i>triplet pair production</i> , TPP)	105
7. PROCESOS RADIATIVOS II	107
7.1 Interacciones de electrones relativistas con materia	107
7.1.1 Bremsstrahlung relativista	107
7.2 Interacciones de protones relativistas con materia	108
7.2.1 Radiación por decaimiento de piones neutros	108
7.2.2 Radiación por aniquilación protón-antiprotón	114
7.2.3 Pérdidas de energía por ionización	115
7.2.4 Interacciones pión-núcleo y pión-pión	116
7.2.5 Interacción neutrón-protón	117
7.2.6 Aniquilación de electrones y positrones	117
8. ABSORCIÓN	121
8.1 Procesos de absorción de energía	121
8.1.1 Creación de pares en un campo coulombiano	121
8.1.2 Absorción por creación de pares en un campo de radiación	122
8.1.3 Absorción en campos magnéticos	123
8.1.4 Interacción Compton directa	124
8.1.5 Debilitamiento de rayos γ por efectos Doppler y gravitacional	125
8.2 Cascadas electromagnéticas	126
8.2.1 Cascadas electromagnéticas en la materia	126
8.3 Cascadas hadrónicas	128
9. DETECTORES	131
9.1 Astronomía γ desde tierra: telescopios Cherenkov	132
9.2 Astronomía γ espacial	136
9.2.1 $30 \text{ MeV} \leq E \leq 300 \text{ GeV}$	136
9.2.2 $1 \text{ MeV} \leq E \leq 30 \text{ MeV}$	138
9.2.3 $E_\gamma \leq 1 \text{ MeV}$	140
9.3 Emisión difusa y detección de fuentes puntuales	141

10. FUENTES DE RAYOS γ	143
10.1 Fuentes pasivas	143
10.2 Fuentes activas	145
10.2.1 Púlsares	146
10.2.2 Remanentes de supernovas	150
10.2.3 Binarias de estrellas tempranas	152
10.2.4 Núcleos galácticos activos (AGNs)	153
10.2.5 Microquásares (Mqs)	157
10.3 Fuentes transitorias de rayos γ	162
10.3.1 Erupciones de rayos gamma (<i>Gamma-Ray Bursts</i> , GRBs)	162
Características fenomenológicas	163
Propiedades espectrales	163
Modelos	165
Colimación	167
Mecanismo central	167
Implicaciones cosmológicas	167
10.4 Fuentes no identificadas de rayos γ	168
11. ASPECTOS COSMOLÓGICOS	171
A. DEDUCCIÓN DE LA INTENSIDAD DE FOTONES IC EN UN CAMPO MONOCROMÁTICO	175
B. FUNCIONES DE GREEN	177
C. LECTURAS SUGERIDAS	179
D. CONSTANTES FÍSICAS	183
BIBLIOGRAFÍA	185

PRÓLOGO

Desde sus orígenes la astronomía ha servido como laboratorio de frontera para contrastar por medio de la observación del cosmos las nuevas teorías y predicciones de la física. El descubrimiento en el siglo XX de agujeros negros, estrellas de neutrones, rayos cósmicos, explosiones de supernova y destellos de rayos gamma, donde se observan fenomenologías en condiciones físicas extremas, imposibles de reproducir en los laboratorios terrestres, permitió poner a prueba las nuevas teorías y leyes de la física. En la astrofísica relativista se combinan los descubrimientos astronómicos más importantes de los últimos 100 años con la física post-Newtoniana. Por ello en la actualidad un alto porcentaje de los artículos científicos que son publicados en el área astronómica tienen relación con la astrofísica relativista. El dinamismo de esta rama de la astronomía atrae actualmente un gran número de jóvenes investigadores.

El primer congreso mundial de astrofísica relativista tuvo lugar en Texas en el año 1963. Casi medio siglo después, este libro de texto, conciso y completo, que introduce al estudiante de lleno en la astrofísica relativista, sus conceptos básicos, y los procedimientos de cálculo que son necesarios para hacer contribuciones en esta rama de la ciencia, viene a ocupar un espacio largamente vacante. El lector encontrará aquí la información esencial para explorar por sí mismo el mundo de la astrofísica de altas energías, y será de gran utilidad para estudiantes avanzados y como referencia para investigadores activos en el área. Es en este último aspecto que difiere de otros libros publicados en inglés.

Los profesores Romero y Paredes son dos expertos reconocidos mundialmente en esta área del conocimiento. Ambos han hecho contribuciones importantes como investigadores y han dictado durante muchos años cursos sobre estos temas en diversas universidades, formando grupos de excelencia en investigación científica en sus respectivos países. Para mí es un gran placer constatar que han decidido dedicar el tiempo necesario para escribir este excelente libro que servirá para el desarrollo futuro de la astrofísica relativista en Hispanoamérica.

Dr. I. F. MIRABEL
Investigador superior del CONICET, Argentina, y
Director de investigaciones científicas de la Comisión de Energía
Atómica y Energías Alternativas de Francia

PREFACIO

El libro que ofrecemos al lector está basado en apuntes y notas para cursos de astrofísica de altas energías que los autores han dictado en las universidades de Barcelona, La Plata, Campinas y en el CBPF (Brasil). Nuestro objetivo ha sido presentar en forma directa y clara los conceptos básicos de esta rama de la astrofísica y proveer al lector con las herramientas para realizar cálculos y estimaciones en el estudio de las fuentes cósmicas de rayos gamma. Los conocimientos requeridos para comprender el libro se limitan a la mecánica y electrodinámica clásica, así como a elementos de mecánica cuántica. Los dos primeros capítulos están destinados a introducir las nociones básicas de relatividad y física de partículas, por lo cual no se requieren conocimientos previos en estos campos.

La astronomía gamma ha tenido un desarrollo explosivo en los últimos años. Cada vez más cursos dedicados a ella se dictan en universidades de habla castellana. Esperamos que el presente libro, el primero escrito sobre esta temática en castellano, sea de utilidad para estudiantes avanzados e investigadores de astronomía y física tanto en España como en América Latina.

Deseamos agradecer a los numerosos alumnos y colegas que han asistido a los cursos y han colaborado activamente, con preguntas y sugerencias, a la mejora del texto. Estamos particularmente agradecidos a los ayudantes de cátedra Anabella Araudo, Mariana Orellana y Gabriela Vila por su ayuda en la preparación de versiones previas que fueron usadas en clase. Nos hemos beneficiado con la discusión y los aportes de un gran número de colegas a lo largo de los años que llevamos enseñando estos temas. Deseamos mencionar aquí a Felix Aharonian, Felix Mirabel, Josep Martí, Stan Owocki, Chuck Dermer, Atsuo Okazaki, Chema Reyes, Paula Benaglia, Marc Ribó, Jorge Combi, Valentí Bosch-Ramon, Dmitri Khangulyan, Santiago Perez Bergliaffa, Leonardo Pellizza, Matías Reynoso, Marina Kaufman Bernadó, Mariana Orellana, Anabella Araudo, Gabriela Vila, Javier Moldón y Sofía Cora.

Un agradecimiento especial es para nuestras familias, a quienes dedicamos la obra.

GUSTAVO E. ROMERO y JOSEP MARIA PAREDES POY
La Plata – Barcelona, enero de 2011.

INTRODUCCIÓN

La astronomía es el estudio de los objetos que forman el Universo a través de la detección y medición de las partículas que estos objetos emiten. Durante la mayor parte de su historia, la astronomía se ha limitado a un tipo muy específico de partículas de origen cósmico: fotones con una longitud de onda en el rango

$$300 \text{ nm} \leq \lambda \leq 1 \text{ } \mu\text{m},$$

lo que corresponde a frecuencias entre 3×10^{14} y 10^{15} Hz. La radiación formada por estos fotones es conocida como “luz visible”.

Recién en la década de 1930, con la detección de ondas de radio de origen cósmico, la ventana electromagnética de observación astronómica se abrió más allá de lo que el ojo humano es capaz de detectar. El uso de radiotelescopios como instrumentos astronómicos no se generalizó y fue funcional hasta la década de 1950.

La detección de fotones de energía mayor que los del rango visible debió esperar aún más, ya que la atmósfera terrestre es opaca a la radiación de frecuencias mayores que 10^{15} Hz. La utilización sucesiva de globos estratosféricos, cohetes de gran altitud y, finalmente, satélites artificiales, proveyó de plataformas sustentables para albergar detectores de fotones muy energéticos.

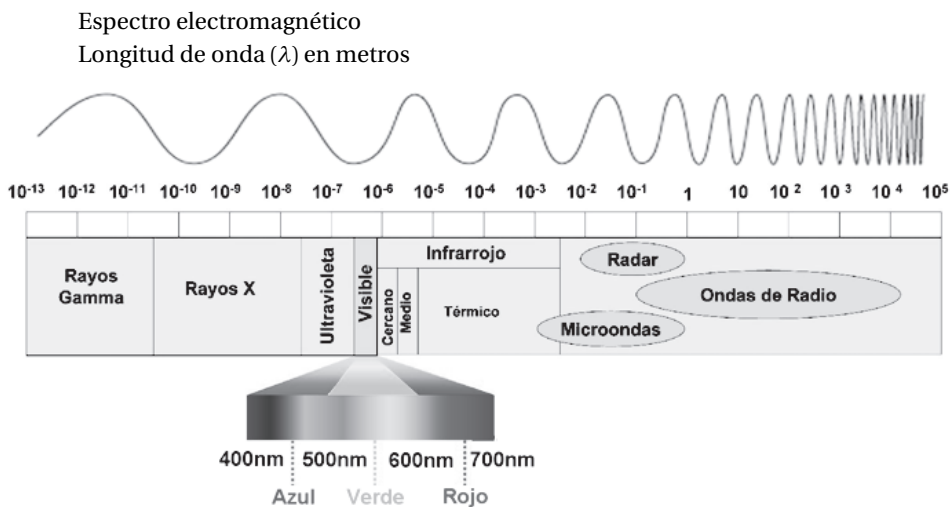


Figura 1.1. Espectro electromagnético, en longitud de onda.

La astronomía de rayos X ($0.1 \text{ keV} \leq E_{\text{ph}} \leq 500 \text{ keV}$) experimentó un rápido desarrollo durante los años sesenta debido a que las facilidades instrumentales estuvieron rápidamente a la altura de los requisitos observacionales primarios. Por el contrario, el desarrollo de la astronomía de rayos γ ($E_{\text{ph}} \geq 500 \text{ KeV}$) fue un proceso lento que tardó décadas en arrojar resultados significativos. Esto se debió, en parte, a dificultades técnicas específicas y al formidable problema de separar las contribuciones producidas en el detector por fuentes

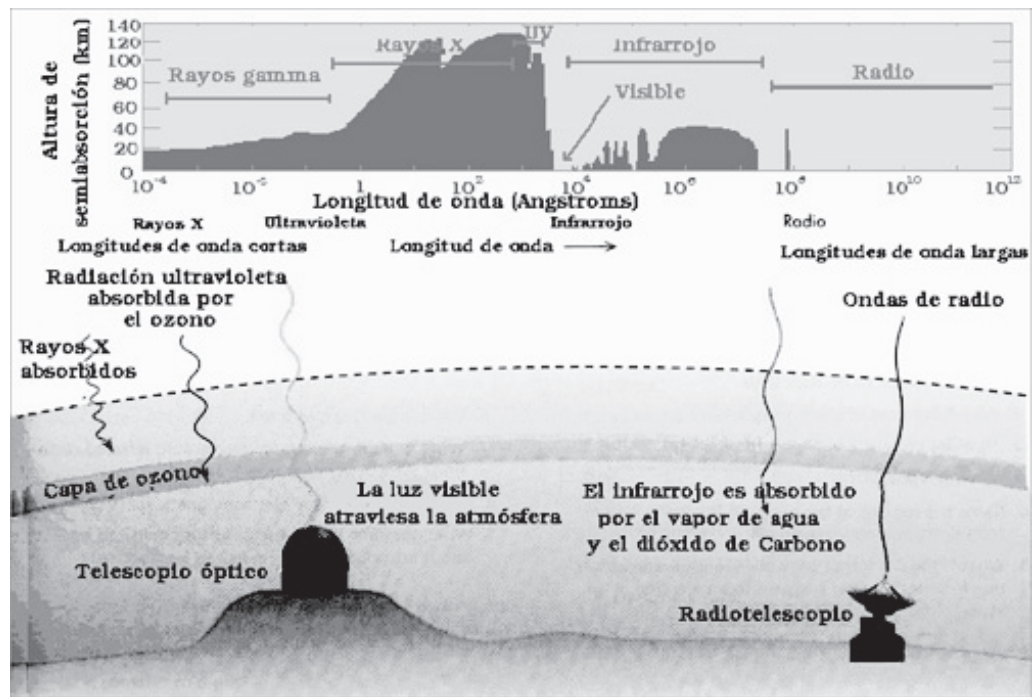


Figura 1.2. Opacidad de la atmósfera a diferentes longitudes de onda.

legítimas de rayos γ de aquellas que tienen un origen puramente local y son debidas a la radiación cósmica universal (formada por partículas cargadas y neutrones relativistas).

A pesar de las dificultades, durante la década de 1990, la astronomía de rayos γ se ha consolidado como una herramienta fundamental para el estudio de los procesos no-térmicos en el Universo. En efecto, este es el único rango del espectro electromagnético libre de contribuciones producidas por plasmas calientes, por lo que la radiación por encima de 1 MeV es debida, casi enteramente, a interacciones de partículas relativistas.

En este libro estudiaremos cómo partículas materiales pueden ser aceleradas hasta velocidades relativistas ($\sim c$) en ámbitos astrofísicos, qué interacciones pueden sufrir esas partículas, qué flujo de radiación γ resulta de esas interacciones, y cómo es posible detectar y medir esa emisión γ una vez que llega a la vecindad del planeta Tierra. Nuestro objetivo será poner las herramientas que nos permitan estudiar y comprender las fuentes cósmicas de rayos γ .

El énfasis del libro ha sido puesto en los procesos físicos subyacentes a la producción, propagación y absorción de radiación de altas energías de origen cósmico. La astrofísica de los objetos que producen esta radiación es discutida en lo referente a sus puntos más fundamentales. Un nivel de detalle demasiado grande en estos aspectos conllevaría el peligro de que el texto quede desactualizado prácticamente al nacer: tal es el dinamismo de este campo de investigación. Para cuestiones históricas y para complementar algunos aspectos discutidos aquí, en especial en los últimos dos capítulos, el lector puede consultar los libros de Cheng & Romero (2004) y Aharonian (2004), así como el clásico libro de Longair (1992). En el apéndice C, brindamos una bibliografía complementaria que puede ser de utilidad al lector que quiera profundizar en estos temas.

Como la radiación γ es el resultado de la interacción de partículas relativistas, comenzaremos repasando las propiedades de sistemas que se mueven a velocidades cercanas a la de la luz. Esto es, comenzaremos con un repaso de la Teoría Especial de la Relatividad y de su concepto central: el espacio-tiempo.

Continuaremos luego introduciendo conceptos básicos de física de partículas (capítulo 3), para entonces estudiar como es posible acelerar partículas hasta velocidades relativistas (capítulo 4). El capítulo 5 estudia la difusión de las partículas por un medio donde pueden sufrir diferentes tipos de pérdidas de energía. Los capítulos 6 y 7 son el núcleo del libro. Están pensados para proporcionar al lector todas las herramientas necesarias para hacer cálculos en esta rama de la astrofísica. En ese sentido van más allá de las presentaciones que pueden encontrarse en otros libros sobre el tema.

El capítulo 8 está dedicado a la absorción de la radiación. Los diferentes tipos de detectores de rayos gamma son discutidos en el capítulo 9. El capítulo 10 presenta una visión de las diferentes clases de fuentes de rayos gamma conocidas. Hemos debido ser restrictivos en la selección del material, ya que una exposición completa requeriría varios volúmenes. El capítulo 11 cierra el libro con una breve mención a aspectos cosmológicos relacionados con la astrofísica relativista. Los apéndices, finalmente, brindan algunas informaciones útiles.

ESPACIO-TIEMPO Y RELATIVIDAD

2.1. Espacio-tiempo

Cuando se observa el mundo, por poca atención que se preste, resulta obvio que en él hay *cosas* y que estas tienen *propiedades*. La característica definitoria de las cosas es que se asocian para formar nuevas cosas. Así, las moléculas forman células, las células organismos, los organismos pueden formar sociedades, etc.

Las propiedades de las cosas son de dos tipos: intrínsecas y relacionales. Las primeras sólo dependen de la cosa en cuestión (por ejemplo, la carga de la partícula) mientras que las segundas dependen también de otras cosas (por ejemplo, la velocidad de la partícula). Cuando las cosas se combinan para formar nuevas cosas, las cosas resultantes pueden tener propiedades emergentes, que las cosas constituyentes no tienen. A su vez, las propiedades emergentes pueden ser intrínsecas o relacionales. Así, por ejemplo un gas puede tener temperatura y presión, propiedades de las que carecen las moléculas constitutivas.

Dada una cosa x llamaremos \mathcal{P} al conjunto de todas sus propiedades:

$$\mathcal{P} = \{p / p_x\}. \quad (2.1)$$

Los elementos de \mathcal{P} pueden ser representados por funciones matemáticas (supuesto metodológico básico de la Ciencia). Llamamos espacio de estados de una cosa x ($S(x)$) al conjunto de funciones (de dominio M) que representan a los elementos de \mathcal{P} . Una ley es una restricción sobre $S(x)$. Nos dice que las propiedades de una cosa no pueden tomar cualquier valor. Llamaremos $S_L(x)$ al conjunto de estados legales de x . Estos son los estados accesibles en principio a la cosa x de acuerdo con las restricciones legales que imperan sobre ella. El estado real de una cosa concreta x es un punto de $S_L(x)$.

Un cambio es un par ordenado de estados de la cosa que cambia:

$$(s_1, s_2) \in E_L(x) = S_L(x) \times S_L(x). \quad (2.2)$$

El conjunto de todos los cambios de una cosa es el espacio de eventos ($E_L(x)$) de esa cosa. Definimos ahora el *espacio-tiempo* de la siguiente manera:

El espacio-tiempo es el conjunto de todos los eventos de todas las cosas.

Todo lo que ha ocurrido, ocurre o ocurrirá a alguna cosa es un punto (elemento) del espacio-tiempo. Un proceso (sucesión de cambios) es una línea (o subconjunto) del espacio-tiempo.

Debemos ahora caracterizar matemáticamente al espacio-tiempo si queremos hacer predicciones precisas sobre ciertos eventos.

Postulado: el espacio-tiempo se representa por una variedad real cuadridimensional diferenciable.

Una variedad real es un concepto que puede ser completamente cubierto por subconjuntos cuyos elementos pueden ser puestos en correspondencia 1 a 1 con subconjuntos de \mathbb{R}^4 (si la variedad es cuatridimensional; \mathbb{R}^n si es n -dimensional). En forma estricta:

M es una variedad real n -dimensional diferenciable si y solo si:

1. M es un conjunto
2. $\exists O/O = \{O_\alpha \subset M\}$.
3. Todo elemento $p \in M$ es tal que $\exists O_\alpha \in O/p \in O_\alpha$.
4. $\forall_\alpha \exists \Phi_\alpha : O_\alpha \rightarrow U_\alpha$, con U_α subconjunto abierto de \mathbb{R}^n .
5. Si existen dos conjuntos O_1 y $O_2/O_1 \cap O_2 \neq \emptyset$ ($\emptyset =$ vacío) $\Rightarrow \exists \Phi_2 \cdot \Phi_1^{-1}$ que ponen en correspondencia 1 a 1 los puntos de $U_1 \subset \mathbb{R}^n$ con los de $U_2 \subset \mathbb{R}^n$.

Vemos de esta definición por qué postulamos una variedad para representar el espacio-tiempo: independientemente de la estructura geométrica de este, podemos adoptar coordenadas (números reales) para describir procesos que ocurren en él y siempre podemos encontrar una transformación apropiada que permita cambiar el sistema de referencia. Esto último es fundamental, ya que los procesos físicos deben ser independientes de la forma en que los describimos en nuestros lenguajes matemáticos.

Dado un elemento $p \in M$ podemos designar distintos sistemas de coordenadas. Por ejemplo,

$$p \longleftrightarrow \{x^\mu\}$$

$$p \longleftrightarrow \{x'^\mu\}$$

$$\Rightarrow \exists \quad x'^\mu = x'^\mu(\{x^\mu\}) \tag{2.3}$$

donde $\mu = 0, 1, 2, 3$. Adoptamos 4 coordenadas porque el mundo parece ser cuatridimensional, pero en principio no hay limitaciones en ese sentido (véase la figura 1.1).

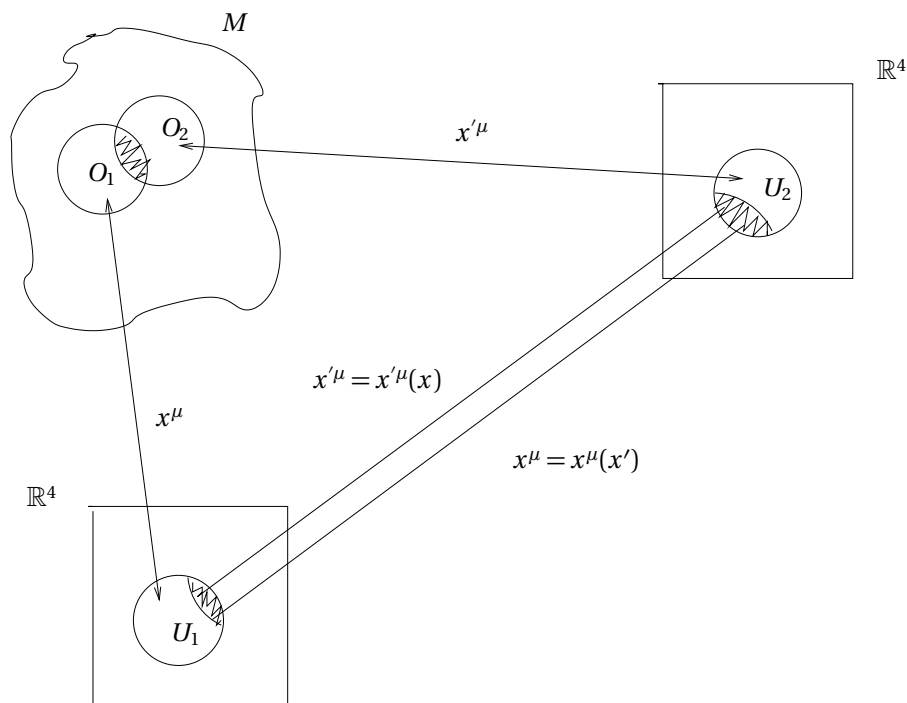


Figura 2.1. Esquema para una variedad cuatridimensional.

Para poder hacer física sobre nuestra variedad (esto es, para poder describir procesos reales) necesitamos definir sobre ella objetos matemáticos que puedan ser utilizados luego para representar objetos físicos y sus propiedades.

2.2. Objetos y estructura sobre la variedad

Los objetos sobre la variedad se definen por sus propiedades de transformación frente a cambios de coordenadas $\{x^\mu\} \longleftrightarrow \{x'^\mu\}$. El objeto más simple es un escalar:

$$\phi(x^\mu) = \phi'(x'^\mu). \quad (2.4)$$

El valor del escalar no cambia cuando el sistema coordenado cambia de $\{x^\mu\}$ a $\{x'^\mu\}$. Notar que la forma ϕ sí puede cambiar.

Introduzcamos ahora un objeto de cuatro componentes A^μ . Si realizamos un cambio de coordenadas $\{x^\mu\} \rightarrow \{x'^\mu\} \Rightarrow$

$$A'^\mu = \sum_{\nu=1}^4 A^\nu \frac{\partial x'^\mu}{\partial x^\nu}. \quad (2.5)$$

De aquí en adelante adoptaremos la convención de la suma de Einstein: se suma sobre índices repetidos (de 0 a 4, o a n , dependiendo de la dimensión de la variedad). Luego la ecuación 2.5 se escribe

$$A'^\mu = A^\nu \frac{\partial x'^\mu}{\partial x^\nu}. \quad (2.6)$$

Un objeto que se transforma de esta manera es un vector contravariante. Un ejemplo de este tipo de objetos es la línea que une dos puntos arbitrariamente próximos de la variedad:

$$dx'^\mu = \frac{\partial x'^\mu}{\partial x^\nu} dx^\nu. \quad (2.7)$$

Los vectores contravariantes se definen por medio de:

$$B'_\mu = \frac{\partial x^\nu}{\partial x'^\mu} B_\nu. \quad (2.8)$$

Un ejemplo es el gradiente de un campo escalar:

$$\frac{\partial \phi}{\partial x'^\nu} = \frac{\partial x^\mu}{\partial x'^\nu} \frac{\partial \phi}{\partial x^\mu}. \quad (2.9)$$

En general, a los vectores sobre la variedad se los llama *tensores de rango 1*. Podemos definir tensores contravariantes (o covariantes) de rango arbitrario:

$$\underbrace{T'^{\dots\mu\dots}}_n = \dots \frac{\partial x'^\mu}{\partial x^\rho} \dots \frac{\partial x^\sigma}{\partial x'^\nu} \dots \underbrace{T_{\dots\sigma\dots}}_m \quad (2.10)$$