

# “El Universo Mecánico”

$$V = - \int K e \frac{q}{r^2} dr$$

J. F. G. H.

11 de agosto de 2020

## Resumen

Síntesis personal y ampliada de la serie de vídeos El Universo Mecánico.



El Universo Mecánico es una serie de vídeos de un curso de Física introductorio insuperable. El presente texto pretende ser un síntesis de las ideas presentadas en esos vídeos, con comentarios y ampliaciones personales.

# Índice

<b>1. Lección 1. <i>El Universo Mecánico.</i></b>	<b>9</b>
1.1. Descripción de la lección . . . . .	9
1.2. Resumen de la lección . . . . .	10
<b>2. Lección 2. La ley de la caída de los cuerpos.</b>	<b>11</b>
2.1. Descripción de la lección . . . . .	11
2.2. Resumen de la lección . . . . .	12
<b>3. Lección 3. Derivadas.</b>	<b>14</b>
3.1. Descripción de la lección . . . . .	14
3.2. Resumen de la lección . . . . .	14
<b>4. Lección 4. La inercia.</b>	<b>15</b>
4.1. Descripción de la lección . . . . .	15
4.2. Resumen de la lección . . . . .	16
<b>5. Lección 5. Vectores.</b>	<b>18</b>
5.1. Resumen de la lección . . . . .	18
5.2. Resumen de la lección . . . . .	18
<b>6. Lección 6. Leyes de Newton</b>	<b>21</b>
6.1. Descripción de la lección . . . . .	21
6.2. Resumen de la lección . . . . .	22
<b>7. Lección 7. Integración.</b>	<b>23</b>
7.1. Descripción de la lección . . . . .	23
7.2. Resumen de la lección . . . . .	23
<b>8. Lección 8. La manzana y la luna.</b>	<b>25</b>
8.1. Descripción de la lección . . . . .	25
8.2. Resumen de la lección . . . . .	26
<b>9. Lección 9. El movimiento en círculos.</b>	<b>27</b>
9.1. Descripción de la lección . . . . .	27

9.2. Resumen de la lección . . . . .	28
<b>10. Lección 10. Las fuerzas fundamentales.</b>	<b>29</b>
10.1. Descripción de la lección . . . . .	29
10.2. Resumen de la lección . . . . .	30
<b>11. Lección 11. Gravedad, Electricidad y Magnetismo.</b>	<b>32</b>
11.1. Descripción de la lección . . . . .	32
11.2. Resumen de la lección . . . . .	33
<b>12. Lección 12. El experimento de Millikan.</b>	<b>34</b>
12.1. Descripción de la lección . . . . .	34
12.2. Resumen de la lección . . . . .	35
<b>13. Lección 13. Conservación de la energía.</b>	<b>36</b>
13.1. Descripción de la lección . . . . .	36
13.2. Resumen de la lección . . . . .	36
<b>14. Lección 14. Energía potencial.</b>	<b>38</b>
14.1. Descripción de la lección . . . . .	38
14.2. Resumen de la lección . . . . .	39
<b>15. Lección 15. Conservación del momento lineal.</b>	<b>40</b>
15.1. Descripción de la lección . . . . .	40
15.2. Resumen de la lección . . . . .	41
<b>16. Lección 16. Movimiento ondulatorio.</b>	<b>42</b>
16.1. Descripción de la lección . . . . .	42
16.2. Resumen de la lección . . . . .	43
<b>17. Lección 17. Resonancia.</b>	<b>45</b>
17.1. Descripción de la lección . . . . .	45
17.2. Resumen de la lección . . . . .	45
<b>18. Lección 18. Ondas y el sonido.</b>	<b>46</b>
18.1. Descripción de la lección . . . . .	46


18.2. Resumen de la lección . . . . .	47
<b>19. Lección 19. Momento angular</b>	<b>48</b>
19.1. Descripción de la lección . . . . .	48
19.2. Resumen de la lección . . . . .	49
<b>20. Lección 20. Pares de torsión y los giroscopios.</b>	<b>50</b>
20.1. Descripción de la lección . . . . .	50
20.2. Resumen de la lección . . . . .	51
<b>21. Lección 21. Las tres leyes de Kepler.</b>	<b>52</b>
21.1. Descripción de la lección . . . . .	52
21.2. Resumen de la lección . . . . .	53
<b>22. Lección 22. El problema de Kepler.</b>	<b>54</b>
22.1. Descripción de la lección . . . . .	54
22.2. Resumen de la lección . . . . .	55
<b>23. Lección 23. Energía y excentricidad.</b>	<b>55</b>
23.1. Descripción de la lección . . . . .	55
23.2. Resumen de la lección . . . . .	56
<b>24. Lección 24. Navegación espacial.</b>	<b>58</b>
24.1. Descripción de la lección . . . . .	58
24.2. Resumen de la lección . . . . .	59
<b>25. Lección 25. De Kepler a Einstein.</b>	<b>60</b>
25.1. Descripción de la lección . . . . .	60
25.2. Resumen de la lección . . . . .	61
<b>26. Lección 26. La armonía de las esferas.</b>	<b>63</b>
26.1. Descripción de la lección . . . . .	63
26.2. Resumen de la lección . . . . .	63
<b>27. Lección 27. Más allá del Universo Mecánico.</b>	<b>65</b>
27.1. Descripción de la lección . . . . .	65

27.2. Resumen de la lección . . . . .	65
<b>28. Lección 28. Electricidad estática o electrostática.</b>	<b>66</b>
28.1. Descripción de la lección . . . . .	66
28.2. Resumen de la lección . . . . .	67
<b>29. Lección 29. El campo eléctrico</b>	<b>67</b>
29.1. Descripción de la lección . . . . .	67
29.2. Resumen de la lección . . . . .	68
<b>30. Lección 30. Potencial y Capacidad.</b>	<b>70</b>
30.1. Descripción de la lección . . . . .	70
30.2. Resumen de la lección . . . . .	71
<b>31. Lección 31. Voltaje, energía y fuerza.</b>	<b>72</b>
31.1. Descripción de la lección . . . . .	72
31.2. Resumen de la lección . . . . .	73
<b>32. Lección 32. La pila o batería eléctrica.</b>	<b>74</b>
32.1. Descripción de la lección . . . . .	74
32.2. Resumen de la lección . . . . .	74
<b>33. Lección 33. Circuitos eléctricos.</b>	<b>75</b>
33.1. Descripción de la lección . . . . .	75
33.2. Resumen de la lección . . . . .	76
<b>34. Lección 34. Imanes y magnetismo.</b>	<b>78</b>
34.1. Descripción de la lección . . . . .	78
34.2. Resumen de la lección . . . . .	78
<b>35. Lección 35. Campos magnéticos.</b>	<b>80</b>
35.1. Descripción de la lección . . . . .	80
35.2. Resumen de la lección . . . . .	80
<b>36. Lección 36. Campos vectoriales y análogos hidrodinámicos.</b>	<b>82</b>

36.1. Descripción de la lección . . . . .	82
36.2. Resumen de la lección . . . . .	82
<b>37. Lección 37. Inducción electromagnética.</b>	<b>84</b>
37.1. Descripción de la lección . . . . .	84
37.2. Resumen de la lección . . . . .	85
<b>38. Lección 38. Corriente alterna.</b>	<b>86</b>
38.1. Descripción de la lección . . . . .	86
38.2. Resumen de la lección . . . . .	87
<b>39. Lección 39. Ecuaciones de Maxwell.</b>	<b>88</b>
39.1. Descripción de la lección . . . . .	88
39.2. Resumen de la lección . . . . .	89
<b>40. Lección 40. Óptica.</b>	<b>91</b>
40.1. Descripción de la lección . . . . .	91
40.2. Resumen de la lección . . . . .	92
<b>41. Lección 41. El experimento de Michelson y Morley.</b>	<b>93</b>
41.1. Descripción de la lección . . . . .	93
41.2. Resumen de la lección . . . . .	94
<b>42. Lección 42. Las transformaciones de Lorentz.</b>	<b>95</b>
42.1. Descripción de la lección . . . . .	95
42.2. Resumen de la lección . . . . .	96
<b>43. Lección 43. Velocidad y tiempo.</b>	<b>97</b>
43.1. Descripción de la lección . . . . .	97
43.2. Resumen de la lección . . . . .	98
<b>44. Lección 44. Masa, momento y energía.</b>	<b>100</b>
44.1. Descripción de la lección . . . . .	100
44.2. Resumen de la lección . . . . .	100

<b>45. Lección 45. Temperaturas y ley de los gases.</b>	<b>101</b>
45.1. Descripción de la lección . . . . .	101
45.2. Resumen de la lección . . . . .	102
<b>46. Lección 46. El motor de la Naturaleza.</b>	<b>104</b>
46.1. Descripción de la lección . . . . .	104
46.2. Resumen de la lección . . . . .	104
<b>47. Lección 47. Entropía.</b>	<b>106</b>
47.1. Descripción de la lección . . . . .	106
47.2. Resumen de la lección . . . . .	106
<b>48. Lección 48. Bajas temperaturas.</b>	<b>107</b>
48.1. Descripción de la lección . . . . .	107
48.2. Resumen de la lección . . . . .	108
<b>49. Lección 49. El átomo.</b>	<b>109</b>
49.1. Descripción de la lección . . . . .	109
49.2. Resumen de la lección . . . . .	110
<b>50. Lección 50. Ondas y partículas.</b>	<b>112</b>
50.1. Descripción de la lección . . . . .	112
50.2. Resumen de la lección . . . . .	113
<b>51. Lección 51. De los átomos a los quarks.</b>	<b>115</b>
51.1. Descripción de la lección . . . . .	115
51.2. Resumen de la lección . . . . .	116
<b>52. Lección 52. El Universo mecano-cuántico.</b>	<b>118</b>
52.1. Descripción de la lección . . . . .	118
52.2. Resumen de la lección . . . . .	118

## Prólogo

n el inicio del siglo XXI, y en cualquier día, los docentes y la sociedad en general se muestra preocupada por la calidad de la educación de tipo matemático y científico. O debería. Se nota una pérdida de interés en ciertos aspectos, si bien hay más recursos que nunca con Internet y divulgación científica por doquier, no parece aún que parezca interesante e importante a la gente. Eso, pese a que los avances de la Tecnología le deben mucho a la Física y las Matemáticas, presentes junto a la Química y la Biología en la vida cotidiana.

El problema ha sido redescubierto varias veces, veinticinco años después del Sputnik y 50 después de la llegada del hombre a la Luna. La necesidad política, social y económica de hoy requiere que la población esté bien formada en aspectos básicos de Ciencia y Tecnología.

El *Universo Mecánico* canaliza esta imperiosa necesidad de una enseñanza científica de calidad, facilitando materiales audiovisuales e impresos que pueden servir como punto de partida para un sólido curso de Introducción a la Física en niveles de educación secundaria o universitaria. El curso tiene usos múltiples, desde educación a distancia “on line”, a emisión en diversos canales y medios audiovisuales o préstamo de materiales.

La serie es además una inapreciable fuente de recursos audiovisuales para uso en el aula: primeros planos de complejos y costosos experimentos, apasionantes y divertidas secuencias animadas de modelos científicos que hacen fácilmente comprensibles conceptos abstractos y procesos matemáticos. Nuevas formulaciones históricas y que proporcionan una base filosófica e intelectual de los principios de la Física.


Este curso es sumamente versátil y tener una incidencia positiva en el proceso de enseñanza-aprendizaje. Los cursos de Física generalmente se dan a dos niveles: uno para satisfacer requisitos científicos de una formación geneneral y otro, más riguroso, para alumnos orientados a es-



pecialidades científicas o técnicas. Estas notas no son excepción. Hay para todos los gustos. Y pretenden ser ampliables en el futuro. La serie de vídeos de estas notas se basan en el Curso de Física del doctor David Goodstein, que se presentó en el Caltech (Instituto de Tecnología de California) en 1979. Fue uno de los 12 proyectos seleccionados para recibir una ayuda del proyecto estatal CPB/Annenberg-USA, en su primer año de vigencia nacional. Varios profesionales y científicos de varios países ayudaron al desarrollo de estos vídeos. La esencia y más allá de sus conceptos serán presentados aquí. En mi caso, creo haberlos visto varias veces antes de comprenderlos (supongo me ha llevado toda la vida) y apreciarlos. Creo los vi en TVE alguna vez, y posiblemente los habré visto varias veces en Youtube. Sin embargo, los conceptos entonces se me escaparon bastante. Es el momento de transmitirlos en formato escrito con anotaciones y ampliaciones personales progresivas. Espero lo disfrutéis como yo. La aventura del conocimiento no tiene fin. . .

## 1. Lección 1. *El Universo Mecánico.*

### 1.1. Descripción de la lección

 La investigación científica comienza con la formulación de excitantes cuestiones. Este prolegómeno o preliminares nos introduce en un mundo aristotélico en conflicto, presenta las ideas y personas que revolucionaron el pensamiento científico desde Copérnico, pasando por la revolución de Newton y sus Principia Mathematica, hasta nuestros tiempos. Un transbordador del pasado al presente, extrapolando a SpaceX, enlaza la Física celeste con la Física en la Tierra.

Los objetivos de esta lección son:

- Definir las unidades de longitud, tiempo y masa. Hoy, circa 2019, hemos modernizado estas definiciones para volverlas más precisas.
- Conocer las unidades del S.I. y algunas unidades angloamericanas o anglosajonas.

- Interpretar los factores de conversión y utilizarlos para pasar de un sistema a otro de unidades.
- Expresar números grandes y pequeños en notación científica.
- Conocer las abreviaturas científicas usuales de las unidades.

## 1.2. Resumen de la lección

En este episodio se nos hace una introducción al universo mecánico. La mecánica es una rama de la ciencia en el campo de la física que estudia el por qué del comportamiento de las cosas, desde la más pequeña partícula hasta el más grande racimo de galaxias. Nos dice que si existe alguna clave para poder entender el universo mecánico, esta se encuentra en el campo de las matemáticas.

Primero menciona la visión aristotélica del mundo, y justo después nos habla como Copérnico revolucionó ese pensamiento diciendo que era la Tierra la que giraba alrededor del sol. A este se sumó Galileo Galilei, que pese a haber sido amenazado por la Iglesia continuó trabajando en sus hipótesis.

Después pasamos a Kepler, un matemático preocupado por todo el asunto del universo. Kepler se introdujo en la cámara secreta del cosmos con sus leyes del movimiento planetario, sin embargo, se vió obligado a permanecer en el umbral del universo mecánico por haber explicado más bien el cómo y el por qué funciona el sistema solar.

Isaac Newton siguió el mismo camino, que después de hacerse la pregunta de porqué si una manzana caía a la tierra de nuevo, por qué la luna no lo hacía, fue reconstruyendo con calma todo el universo mecánico, de modo que obedecía con precisión a las leyes matemáticas y las leyes del movimiento y a su vez tenía la capacidad para poder asumir casi todos los retos de la física. La leyes de Newton fueron un comienzo en la dirección correcta, por ejemplo hoy en día podemos dirigir un proyectil

con precisión matemática, y eso se hace en una parte con un elemento llamado giroscopio.

¿Cómo funciona entonces este instrumento llamado giroscopio dentro del universo mecánico? Pues en gran parte se debe al momento angular. El momento angular es de vital importancia en el universo. Después nos relaciona el movimiento armónico con el movimiento circular, y todo lo que hay que hacer es un pequeño cálculo diferencial.

## 2. Lección 2. La ley de la caída de los cuerpos.

### 2.1. Descripción de la lección

Con el conocimiento convencional que proporciona la visión aristotélica del mundo, cualquiera podría ver que los cuerpos pesados caen con más rapidez que los ligeros. Pero entonces llegó Galileo. Su genio dedujo que la distancia que un cuerpo ha recorrido en su caída en cualquier momento es proporcional al cuadrado del tiempo empleado. De esto, con ayuda de una herramienta matemática denominada derivada, deducimos los conceptos de velocidad y aceleración. Incluso podríamos definir la derivada de la aceleración y más allá. También, recíprocamente integrar la posición o cualquier otra variable dinámica. Finalmente, en tiempos modernos, se conoce lo que se llaman las derivadas e integrales de órdenes no entero. Es lo que se llama cálculo fraccional o más generalmente el cálculo diferentegral.

Los objetivos de esta lección son:

- Definir velocidad media, aceleración media, la velocidad y aceleración instantáneas.
- Identificar que la distancia que un cuerpo recorre al caer en el vacío es proporcional al cuadrado del tiempo empleado.

- Reconocer que todos los cuerpos caen en el vacío con la misma aceleración “constante”.
- Analizar los aspectos significativos del entorno histórico que dieron lugar al descubrimiento de la ley de caída de los cuerpos.
- Utilizar las expresiones algebraicas para resolver problemas que describen el movimiento de cuerpos en caída libre, por ejemplo

$$s = \frac{1}{2}gt^2$$

o bien  $v = gt$  y  $a = g$ .

- Interpretar la derivada como un límite o razón instantánea de cambio.
- Definir el concepto de límite a nivel formal y básico, con sus generalizaciones.
- Definir las derivadas de distinto orden y de orden fraccional. Comentar sus aplicaciones.

## 2.2. Resumen de la lección

El que todos los cuerpos caen con la misma aceleración constante fue uno de los mayores misterios de la física, desde Galileo a Isaac Newton y hasta Albert Einstein. La ley de la gravedad o ley de la caída de los cuerpos dice que la gravedad en todos los cuerpos es siempre el mismo, independientemente de su peso, y hay más, también dice que los cuerpos caen con una aceleración constante. Pero esto solo sucede en el vacío, porque si no, a causa de la resistencia del aire sobre los objetos, estos cuerpos se comportarían de manera diferente. David Scott, astronauta del apolo 15 hizo un experimento, dejó caer una pluma y un martillo, y efectivamente cayeron a la vez, dándole así la razón a Galileo. Si todos los cuerpos caen en el vacío a la misma velocidad, surge otra pregunta, ¿cuál es esa velocidad? La velocidad de un cuerpo al caer acelera, es decir, aumenta durante la caída. Leonardo da Vinci por ejemplo ya había


intentado dar una explicación. Su teoría era que un cuerpo recorrería cayendo mayores distancias en intervalos posteriores, y concluyó con la teoría de que las distancias seguían la ley de los números enteros. Galileo sin embargo, utilizando el mismo método de descripción llegó a la conclusión de que la distancia recorrida en cada intervalo era proporcional a los números impares. Después de un experimento, se ha visto que el intervalo de la distancia total recorrida cayendo es proporcional al cuadrado del tiempo, y de este modo la ley de Galileo se puede escribir en la siguiente ecuación:  $s(t) = ct^2$ , donde  $c$  es la mitad de la aceleración del cuerpo. La velocidad media toma el valor

$$v = \frac{\Delta x}{\Delta t}$$

Al intentar calcular la velocidad instantánea utilizando esta ecuación dividiendo la variación de distancia por la variación de tiempo, se plantea un problema. Tal vez la expresión de velocidad instantánea sea una contradicción. No había modo de en lugar de pedir la velocidad instantánea en un tiempo exacto te pida cuál es la velocidad medie entre el tiempo y un tiempo  $h$ . Mediante una serie de cambios llegamos a la siguiente ecuación: velocidad media infinitesimalmente cambia una cantidad  $v = 2ct + ch$ . Ahora se podría reducir el intervalo hasta llegar al límite y en ese instante habremos calculado una derivada, por lo que  $v(t) = 2ct$ . La derivadas se pueden calcular para casi toda situación en la que haya variación en alguna cantidad cuando otra de las cantidades aumente o disminuya. Para calcular la aceleración se hace lo mismo, llegando así a que  $a(t) = 2c$ . Y así hemos obtenido que el resultado de la gravedad es una aceleración constante. Usando la derivada se ha podido explicar el movimiento de caída de los cuerpos, y como esa aceleración es muy importante, tiene su símbolo propio,  $g = 2c$ . Obtenemos entonces que un cuerpo cae con una aceleración constante con velocidad proporcional al tiempo y recorre una distancia al caer proporcional al cuadrado del tiempo. Este tipo de movimiento se llama movimiento uniformemente acelerado. Una de las tareas de la física es la de encontrar principios sencillos y económicos pero que sean capaces de explicar nuestro mundo, y eso es lo que se acaba de hacer.

## 3. Lección 3. Derivadas.

### 3.1. Descripción de la lección

 La función de las Matemáticas en las Ciencias Físicas es notable. Como concepto teórico y herramienta práctica, la derivada (o la integral, su inversa) ayuda a determinar la velocidad instantánea y la aceleración de un cuerpo que cae. La diferenciación se desarrolla más para calcular cómo una cantidad cualquiera cambia en relación a otra. La regla de la potencia, la regla del producto, la regla de la cadena: con unas cuantas reglas sencillas, diferenciar y derivar una función sencilla y casi cualquier función resulta sencillo y un juego de niños. Los objetivos de esta lección son:

- Definir el concepto de derivada. Comentar sobre sus posibles generalizaciones.
- Interpretar la relación entre tangente y derivada.
- Calcular las derivadas elementales usando reglas de diferenciación elemental.
- Relacionar las derivadas e integrales de diversos tipos de números y cuerpos abstractos. ¿Cómo se deriva un escalar, un vector o una matriz o su determinante?

### 3.2. Resumen de la lección

Desde hace ya muchos siglos los físicos utilizan el lenguaje de las matemáticas, y estas tienen su propio vocabulario y reglas, sin embargo Galileo consideró que las matemáticas griegas eran demasiado sencillas para expresar sus ideas, y por eso creó la cinemática, una rama de la mecánica que trata del movimiento abstracto. Los eruditos necesitaban un lenguaje más sofisticado, y 25 años después de la muerte de Galileo se descubrió ese lenguaje, el cálculo diferencial, y su poder deriva de la idea que lo sustenta, la derivada. La derivada es el ritmo de cambio de

cualquier función en un determinado punto e instante. Pero sin las reglas de diferenciación el concepto de derivada se puede hacer muy complicado. Una derivada en conclusión es lo que le ocurre a un cociente, una razón entre dos número cuando el dividendo y el divisor disminuyen hacia cero. La derivada de una función es la pendiente de su tangente en cada punto. Las matemáticas son un lenguaje que tienen como estructura gramatical un conjunto de reglas que componen y descomponen la tarea que se tiene entre manos. Newton y Leibniz desarrollaron las herramientas del cálculo que permiten diferenciar la función más complicada descomponiéndola en partes sencillas. Una de las reglas básicas de la diferenciación es la regla de la suma, y la regla de la suma dice que la derivada de una suma es la suma de las derivadas. Otra herramienta que se utiliza es la regla del producto, que se utiliza para obtener la derivada del producto de dos soluciones. Estas reglas representan la gramática del cálculo diferencial.

Reglas de derivación discutidas:


$$\frac{d(yz)}{dx} = \frac{dy}{dz}z + y\frac{dz}{dx}$$

$$\frac{d}{dx}(A + B) = \frac{dA}{dx} + \frac{dB}{dx}$$

Existen funciones que no tienen derivadas o que no tienen derivadas en algunos puntos.

## 4. Lección 4. La inercia.

### 4.1. Descripción de la lección

n este tema, se habla del auge y caída de Galileo. Copérnico demostró que la Tierra gira sobre su eje y describe una órbita alrededor del sol. Considerando sus implicaciones, era una suposición más bien peligrosa, en esos tiempos, que provocó preguntas aventuradas del tipo siguiente: ¿Por qué los objetos caen a la Tierra en vez de errar por el espacio? Y en este esquema ¿Dónde estaba

Dios? Arriesgando algo más que su status privilegiado en Roma, Galileo contribuyó a responder a tales preguntas con la formulación de la llamada Ley de Inercia.

Los objetivos de este capítulo son:

- Interpretar la “Ley de Inercia”.
- Explicar situaciones en las que se aplica la Ley de Inercia.
- Distinguir entre las descripciones Aristotélica y Galileana del movimiento.
- Reconocer que la descripción de un movimiento no es la misma cuando este se analiza desde distintos sistemas de referencia.
- Indicar que las trayectorias parabólicas son el resultado de la composición de una velocidad constante y en dirección horizontal y una aceleración en la dirección vertical.
- Apreciar el significado histórico y universalidad de la Ley de Inercia de Galileo.
- Comentar el significado del Principio de Relatividad de Galileo. Comentar sobre el llamado grupo de Galileo en Matemáticas.

## 4.2. Resumen de la lección


Después de recibir noticias sobre el telescopio, Galileo decidió construir uno para ver como funcionaba, y así se le atribuyó su invención. Gracias a este invento, Galileo fue capaz de realizar grandes descubrimientos, como por ejemplo las lunas de Júpiter, las montañas de la luna, las distintas fases de Venus y las manchas sobre la superficie del Sol. Esto significó el comienzo del fin de las ideas de Aristóteles y Ptolomeo. Los objetos pesados acaban cayendo hacia el centro de la Tierra, porque antiguamente ese era el centro del universo, pero, si la Tierra está girando y moviéndose por el espacio, ¿por qué no salen volando las cosas?



Galileo se dedicó a encontrar una respuesta. Antes incluso de la invención del telescopio, ya se había preparado para responder a la pregunta y para poder asentar los fundamentos de su ley caída de los cuerpos, estuvo observando y midiendo el tiempo que tardaban las bolas en rodar por planos inclinados. Esos experimentos le condujeron también a lo que posteriormente se conoció como la ley de inercia. Galileo se dio cuenta de que cuando una bola rodaba hacia abajo por un plano inclinado, después subía por otro plano con cualquier grado de inclinación hasta recuperar su primera altura. Entonces, si el plano era totalmente horizontal y tenía una superficie lisa, la bola no se pararía nunca y continuaría rodando para siempre. Gracias a esto fue capaz de contestar que, como un cuerpo en movimiento horizontal tiende a conservar el movimiento que lleva, en la superficie de la Tierra todas las cosas están en movimiento horizontal exactamente a la misma velocidad que la superficie, y no hay rozamiento que afecte al movimiento de esos cuerpos porque todos se mueven juntos, y así derribó el antiguo dogma aristotélico que decía que era natural a todos los cuerpos tender al reposo. Una generación más tarde René Descartes puso en orden todo esto dando a la ley de inercia su última forma, los objetos en movimiento no tienden por sí mismos hacia el reposo tienen tendencia a continuar como están hasta que algo se interfiera. A veces parece que los objetos están en reposo, pero eso es sólo porque tienen el mismo estado de movimiento que el propio espectador. Si un objeto está en reposo o en movimiento depende completamente del punto de observación. Por lo tanto ni existe el reposo absoluto ni el movimiento absoluto y la tendencia natural de cualquier objeto es la de conservar el movimiento que tiene. Pero, ¿qué pasa con un objeto que no se mueve paralelamente a la superficie, por ejemplo una pelota que se deja caer? Galileo dijo que la pelota continuaría moviéndose horizontalmente con la tierra incluso cuando cae verticalmente hacia su superficie.

## 5. Lección 5. Vectores.

### 5.1. Resumen de la lección

 La Física debe explicar no sólo el porqué y cuánto, sino también dónde y cómo. Los físicos y los matemáticos diseñaron un modo de describir las cantidades que tienen una dirección, un sentido y un módulo. Las leyes que tratan con fenómenos de distancias y velocidades son leyes universales, generalmente covariantes (o contravariantes) e invariantes. Al describir cantidades tales como desplazamiento y velocidad, se expresa universalmente una ley de la Física de una manera que es la misma para todos los sistemas de referencia.

Objetivos:

- Sumar y restar vectores gráficamente. Regla del paralelogramo.
- Indicar las componentes de un vector y usarlas analíticamente.
- Interpretar el producto escalar de dos vectores.
- Describir el producto vectorial de dos vectores.
- Comentar qué tipo de magnitudes existen más allá de vectores: multivectores ( $k$ -vectores), tensores y matrices/hipermatrices, polivectores, twistores, hipertwistores, supertwistores, supervectores, hipersupertwistores,...
- Describir el producto exterior y algunas otras operaciones. Introducción al cálculo de formas diferenciales.
- Multiformas y poliformas. Otras cantidades y números usados en Física ocasionalmente.

### 5.2. Resumen de la lección

Un vector es una magnitud que tiene módulo y dirección, y se representa por una flecha. La dirección de la flecha es la dirección de la

magnitud y su longitud indica su módulo. Los mapas están formados por cuadrículas que nos permiten ubicarnos gracias a las coordenadas. En el siglo XVII, René Descartes y Pierre de Fermat escribieron el capítulo de introducción a los sistemas de coordenadas, que se trataba de un esquema para conectar la geometría con el álgebra. Mientras tanto, John Wallis desarrollaba una teoría con términos semejantes que incluía el número complejo. Para encontrar un barco a la deriva (por ejemplo), existen diversos métodos que se pueden utilizar, por ejemplo la triangulación: se establecen dos ángulos diferentes de recepción de radio, usando antenas direccionales, y se trazan unas líneas rectas hasta su intersección. Pero debido a que la posición del barco, debido a las corrientes y demás variables, no es estable, se necesitaría establecer el rumbo del barco a la deriva, y esto se consigue uniendo los vectores desplazamiento. El álgebra vectorial nació en el siglo XIX, y sus progenitores fueron William Hamilton y Hermann Grassmann. Con la creación de estas matemáticas, Grassmann intentó desarrollar una estructura algebraica en la cual se pudiera basar la geometría de cualquier número de dimensiones. Intentando interpretar matemáticamente la rotación en el espacio en términos físicos, Hamilton buscó una analogía tridimensional de números complejos, pero en lugar de ello encontró un álgebra de objetos de cuatro dimensiones que llamó a cuaternas. Una cuaterna tiene una parte vectorial que es tridimensional y una parte escalar unidimensional. Aún así, aunque la teoría de Hamilton era sencilla, su forma era demasiado complicada. Sin embargo Joseph Williams tomó sus ideas y las aplicó a la física teórica, y con su publicación en el año 1901, los vectores dieron la vuelta al mundo.

Se define el producto escalar:

$$A \cdot B = AB \cos \theta$$

$$|A| = \sqrt{A \cdot A}$$

$$|A \times B| = AB \sin \theta$$

$$A + B = (A_x + B_x)\vec{i} + (A_y + B_y)\vec{j} + (A_z + B_z)\vec{k}$$

$$A \times B = \begin{vmatrix} \vec{i} & \vec{j} & \vec{k} \\ A_x & A_y & A_z \\ B_x & B_y & B_z \end{vmatrix}$$

Los cuaterniones son objetos cuatridimensionales, que compactan los productos escalar y vectorial. Si

$$i^2 = j^2 = k^2 = -1 = (ijk)^2$$

$$ij = -ji, jk = -kj = i, ki = -ik = j$$

] y

$$Q_1 = A_0 1 + A_1 i + A_2 j + A_3 k$$

$$Q_2 = B_0 1 + B_2 i + B_2 j + B_3 k$$

entonces


$$Q_1 Q_2 = A_0 B_0 - A \cdot B + A \times B + A_0 B + B_0 A$$

o

$$Q_1 Q_2 = A_0 B_0 - (A, B) + [A, B] + \begin{vmatrix} A_0 & B_0 \\ -A & B \end{vmatrix}$$

## 6. Lección 6. Leyes de Newton

### 6.1. Descripción de la lección

 ara todos los fenómenos de El Universo Mecánico, Isaac Newton estableció las leyes. Como generalización de la Ley de Inercia de Galileo, la Primera Ley de Newton establece que todo cuerpo permanece en reposo o sigue en movimiento rectilíneo y uniforme a menos que una fuerza actúe sobre él. Su Segunda Ley, la llamada Ley Fundamental de la Dinámica, rompe el paradigma aristotélico. La más profunda de las leyes de Newton indica que, en Mecánica Clásica, la relación de las fuerzas con el momento es la derivada del momento, ímpetu, cantidad de movimiento o impulso. Así, los cambios de movimiento de todos los cuerpos del cosmos recibe una explicación universal. La Tercera Ley de Newton explica el fenómeno de las interacciones entre cuerpos, pues toda fuerza o acción genera una fuerza de reacción igual y de sentido opuesto.

Los objetivos del capítulo son:

- Explicar las definiciones de fuerza y masa y decir en qué consiste la ley del movimiento de Newton.
- Distinguir entre masa y peso.
- Conocer las unidades de masa y fuerza: el kilogramo, el newton, el gramo, la dina.
- Reconocer que las fuerzas siempre se presentan en parejas, como acción y reacción, y actúan sobre cuerpos diferentes, y que nunca pueden actuar como fuerzas de equilibrio de un solo cuerpo, pues estas en general se balancean.
- Comprender que el grado de aplicación de la Segunda Ley de Newton surge de la misma comouna ecuación diferencial.
- Analizar el movimiento de proyectiles como consecuencia de las leyes de Newton.

- Enunciar las limitaciones de las leyes de Newton.

## 6.2. Resumen de la lección

La mecánica se puede resumir en la siguiente ecuación


$$F = ma = \frac{dp}{dt}$$

Isaac Newton ideó la física que conocemos hoy en día en un libro, y comenzó con tres principios, las leyes fundamentales de Newton, y las tres leyes perfeccionadas en su esencia se pueden resumir en la ecuación anterior. Esta ecuación puede conllevar algunas complicaciones, como por ejemplo que es una ecuación vectorial, tanto  $F$  como  $a$  tienen que tener la misma dirección, y otra cosa a tener en cuenta es que la aceleración es la derivada de una derivada. Para todo cuerpo que cae, la aceleración es  $g$ , y hablamos de la fuerza de la gravedad. Cuando un objeto está en movimiento, la única fuerza que actúa sobre él, aparte de la fuerza del aire, es la fuerza de la gravedad. Con su primera ley, Newton adoptó la idea de la inercia. Escribió que todo cuerpo continúa en estado de reposo o movimiento uniforme y rectilíneo a menos que una fuerza sea ejercida sobre él. La segunda ley de Newton indica como una fuerza puede cambiar el movimiento de un objeto, y este cambio es proporcional a la fuerza aplicada. Y por último, la tercera ley dice que por cada acción hay una reacción. Solamente en la componente vertical de aceleración es  $-g$ , porque en dirección horizontal, donde no hay ninguna fuerza, la aceleración es  $\theta$ . En la edad media, para describir la trayectoria de un proyectil, usaban la idea de ímpetu, cuando el ímpetu de un objeto se consumía, este caía directamente a la tierra. Pero más tarde, Galileo observó que los proyectiles describen una trayectoria curva de un cierto tipo, esa curva es una parábola:

$$z = z_0 + v_0t - \frac{1}{2}gt^2$$

## 7. Lección 7. Integración.

### 7.1. Descripción de la lección

ewton y Leibniz desarrollaron el cálculo infinitesimal de forma independiente. Y produjeron el mayor avance científico en más de 2000 años. Desde la Edad de Oro de la Grecia Antigua, hasta la Europa de finales del siglo XVII, la diferencia la marcaron estos dos genios y polímatas. Newton y Leibniz llegaron a la conclusión de que diferenciación e integración son procesos inversos o recíprocos. Su apasionante descubrimiento intelectual, reflejó dramáticamente los tiempos que corrían, terminando en un controvertido enfrentamiento personal.

Los objetivos del capítulo son:

- Definir la integración como el proceso de obtención de la primitiva de una derivada.
- Comprender la relación existente entre integración y medida de áreas.
- Exponer el Segundo Teorema Fundamental del Cálculo.
- Aplicar el Segundo Teorema Fundamental del Cálculo a problemas sencillos.

### 7.2. Resumen de la lección

Con el cálculo diferencial conseguimos reducir el cálculo de una variación de magnitudes a un problema geométrico, sin embargo no todas las cuestiones geométricas implican movimiento, como por ejemplo cosas fijas en la propia tierra. Antiguamente se podía calcular exactamente el área de un cuadrado o un triángulo, pero el problema llegaba cuando había que calcular el área de una superficie curva. Lo que intentaron los griegos fue aproximar la figura rellenándola con polígonos inscritos intentando llenarla por completo, y a este método le llamaron el método del

agotamiento, sin embargo, era aproximado. Posteriormente, Arquímedes consiguió llegar a que el área formada por una curva de parábola desde 0 hasta  $t$  era

$$A(t) = \frac{t^3}{3}$$

Después, Kepler consiguió calcular áreas y volúmenes de 92 figuras curvas, pero no fue capaz de encontrar un método general. Justo después, Pierre de Fermat y René Descartes consiguieron combinar álgebra y geometría, haciendo posible describir figuras geométricas con ecuaciones algebraicas. Más tarde, Newton descubrió su propio cálculo, al que llamó método de las fluxiones. Newton vio que el reino de cambio de una función da la pendiente de su gráfica, y se dio cuenta de que la pendiente genera una nueva magnitud, la fluxión. Hoy en día la fluxión de Newton es conocida como derivada. Con esto, Newton fue capaz de explicar el movimiento de los cuerpos en el espacio. Por otro lado, Leibniz llegó a la idea del cálculo de las áreas imaginando una red de pequeños rectángulos, supone que disminuyen de tamaño y suma sus áreas, su suma finalmente se aproxima a un límite que es igual al área bajo la región gráfica de una función, y este es el proceso de integración. Sin embargo, tanto Newton como Leibniz vieron la conexión que existía entre integración y diferenciación. Integración y diferenciación son procesos inversos. Al partir de una función e integrarla para obtener su función área y luego hallar la derivada de la función área, el resultado es la función de partida, y a esto se le llama primer teorema fundamental del cálculo.

$$\int_a^b F'(x)dx = \int_a^b \frac{dF}{dx}dx = F(b) - F(a)$$

El segundo teorema fundamental del cálculo se enuncia diciendo que una función es igual a la integral de su derivada más constante. Newton y Leibniz vieron que este segundo teorema también tiene consecuencias importantes en la mecánica de los cuerpos en movimiento.

$$\int F'(x)dx = F(x) + C$$



## 8. Lección 8. La manzana y la luna.

### 8.1. Descripción de la lección

Los primeros pasos consolidados hacia el espacio exterior se dieron en el tercer tercio del siglo XX. Al buscar una explicación a las leyes de Kepler del movimiento planetario, Newton descubrió que la gravedad describe la fuerza entre dos partículas cualesquiera del Universo. Desde un huerto inglés a Cabo Cañaveral y más allá. La Ley de Gravitación Universal enunciada por Newton revela por qué una manzana cae al suelo pero la Luna “no”.

Los objetivos del capítulo son:

- Reconocer que entre dos objetos cualesquiera del Universo hay una fuerza universal de atracción. Es directamente proporcional al producto de masas e inversamente proporcional al cuadrado de las distancias que las separa.
- Entender la dependencia funcional de la fuerza gravitacional con la masa y la distancia.
- Usar las ecuaciones y expresiones

$$F = G \frac{Mm}{r^2}$$

$$F = ma$$

$$a = \frac{GM}{r^2}$$

- Reconocer que, para velocidades suficientemente pequeñas, el tiempo que tarda un proyectil en caer a Tierra es independiente de su velocidad horizontal, pero para altas velocidades horizontales, hay que tener en cuenta el efecto de la curvatura terrestre.
- Describir el movimiento orbital en términos de la Ley de Inercia y la Ley de Gravitación Universal, LI y LLGU respectivamente.

## 8.2. Resumen de la lección

La teoría del movimiento aristotélico y geocéntrico de epiciclos y deferentes se resumen así como su imagen visual y la pugna con el modelo heliocéntrico copernicano.

La historia comienza con Copérnico y su teoría de que es la Tierra la que gira alrededor del Sol, después pasaríamos a Galileo con su ley de inercia, y a continuación a Kepler, con sus tres leyes que describen el firmamento con una precisión sin precedentes. Es entonces cuando llega Newton, al que le toca explicar el por qué de todos los sucesos que habían observado anteriormente. Newton suponía que cada par de partículas de materia del universo se atraen mutuamente, y la fuerza de atracción es directamente proporcional a cada masa e inversamente proporcional al cuadrado de la distancia entre las dos. De aquí obtenemos la siguiente fórmula:


$$\vec{F}_N = -G_N \frac{Mm}{r^2} \vec{e}_r$$
$$g = G \frac{M_T}{R_T^2}$$

Acabamos llegando a la conclusión de que cada cuerpo atrae al otro como si toda su masa estuviera concentrada en su centro de masa. Ya antes, Galileo había descubierto que todos los cuerpos caen con la misma aceleración constante, pero es Newton con su ley de la gravedad, quien explica este fenómeno. Ahora bien, por qué entonces la luna no caía. Newton argumentaba imaginando por ejemplo que alguien disparaba un cañón desde un punto alto sobre la superficie de la Tierra, la bala acababa cayendo uno segundo más tarde, cosa que ya sabía por el descubrimiento de Galileo, pero Newton se dio cuenta de que si el proyectil fuese disparado lo suficientemente rápido tardaría más de un segundo en llegar al suelo, es más, la superficie de la tierra se iría curvando por debajo de la bala, e imaginó que la bala alcanzaría un movimiento tan rápido que esta se mantendría cayendo, es decir, se mantendría en órbita. Newton fue capaz de explicar las 3 leyes de Kepler e introdujo correcciones. Y explicó cómo era posible que la Tierra se moviera en órbitas elípticas, al igual que otros planetas u objetos celestes. Newton unificó gravitación

terrestre y celeste. Introdujo la fuerza gravitacional universal. Esta es la razón que dió acerca de por qué la luna no caía. La luna cumple la misma ecuación que, por ejemplo, una manzana que cae al suelo, y haciendo los cálculos encontramos que, debido a que el radio a tener en cuenta es mayor, debería de caer más lentamente. Newton sabía que la luna tendría una órbita casi circular, y que tardaba aproximadamente un mes en dar una vuelta completa, además, según el principio de inercia la luna opone resistencia a moverse en un círculo y tiende a marchar recto en la dirección de la tangente a la circunferencia. En conclusión, la ley de Newton explica por qué los cuerpos caen con la misma aceleración cuando están cerca de la superficie de la tierra, y esa ley combinada con el principio de inercia explica también la órbita de la luna y los movimientos de todos los cuerpos celestes.

## 9. Lección 9. El movimiento en círculos.

### 9.1. Descripción de la lección

 l primigenio ideal platónico, con las derivadas de funciones vectoriales. Según Platón, los astros son cuerpos celestes que giran alrededor de la Tierra en absoluta perfección, describiendo círculos perfectos a velocidad uniforme. Incluso en este mundo imperfecto, el movimiento circular uniforme tiene un sentido matemático perfecto.

Los objetivos del capítulo son:

- Interpretar las medidas en el movimiento circular uniforme.
- Describir las relaciones entre radio, velocidad y aceleración en el movimiento circular uniforme (MCU).
- Describir las relaciones entre radio, velocidad y aceleración en el MCU:

- Usar en la resolución de problemas las expresiones:

$$a = \frac{v^2}{R}$$

$$a = \omega^2 R$$

$$a = \frac{4\pi^2 R}{T^2}$$

## 9.2. Resumen de la lección

Platón dijo que el círculo era ideal y sostuvo que todas las otras formas geométricas eran representaciones inferiores e imperfectas. Dijo que el movimiento circular describe el firmamento y no solamente el movimiento circular, sino el movimiento circular uniforme. Cada cuerpo celeste sería un punto moviéndose en un círculo a ritmo constante, o visto de otro modo, el vector forma un ángulo que crece a ritmo constante, y a ese ritmo se le llama velocidad angular del objeto

$$\omega = \frac{2\pi}{T}$$

El movimiento circular tiene realmente dos componentes sagrados, el vector original es la suma de ambos, y por ese motivo el movimiento circular puede ser expresado por una ecuación vectorial:

$$r(t) = R \cos \omega t \vec{i} + R \sin \omega t \vec{j}$$

El movimiento de los planetas vistos sobre el fondo de las estrellas era mucho más complicado, porque los planetas parecían contradecir la idea del movimiento circular uniforme, y los seguidores de Platón intentaban hacer compatible el comportamiento observado con la idea platónica. Uno de estos intentos lo realizó Apolonio de Perga, mediante el invento llamado epiciclo, que decía que los planetas se movían en pequeños círculos ligados a un círculo mayor que también giraba. Esta combinación de movimientos circulares puede generar distintas formas. Si se mira desde la tierra, el planeta observado parece comportarse de forma

extraña. Si el deferente y el epiciclo giran con velocidades iguales la figura que se obtiene es otro círculo cuyo centro está desplazado de la posición que ocupa la tierra. Y por último, si el epiciclo gira exactamente al doble de velocidad que el deferente el resultado es otra curva regular, una elipse. La elipse sería más tarde reconocida como la verdadera forma de la órbita de un planeta alrededor del sol. Posteriormente, Copérnico dijo que el universo tenía planetas girando alrededor del sol y la luna giraba alrededor de la Tierra con un movimiento circular casi uniforme. Más tarde, Isaac Newton explicó por qué esa teoría era válida comenzando con su teoría de la luna. En el movimiento circular uniforme, la velocidad es perpendicular al radio vector y la aceleración es perpendicular al vector velocidad, entonces, la aceleración tiene la dirección del radio vector pero sentido opuesto. Llegamos entonces a una relación entre radio, velocidad y aceleración:


$$a = \frac{v^2}{R} = \omega^2 R$$

Fue entonces cuando Newton entendió que cualquier cuerpo que se mueve con movimiento circular uniforme está siendo acelerado permanentemente. A esta aceleración la llamó aceleración centrípeta. Según la segunda ley de Newton, se requiere una fuerza para producir esa aceleración continua, y en el caso de un cuerpo en órbita, dicha fuerza es la gravedad.

$$v = \sqrt{\frac{GM}{r}}$$

## 10. Lección 10. Las fuerzas fundamentales.

### 10.1. Descripción de la lección

 todos los fenómenos físicos de la Naturaleza se explican mediante cuatro fuerzas fundamentales. A saber: la gravitación universal, dos fuerzas nucleares llamadas fuerza débil y fuerza fuerte que actúan solamente a nivel del núcleo atómico, y el

electromagnetismo. La gravitación y el electromagnetismo son fuerzas de largo alcance. Las fuerzas nucleares explican el cambio de sabor o tipo de materia, la radiactividad y la estabilidad de protones, neutrones y núcleos, mientras que la fuerza del electromagnetismo explica la estabilidad de los átomos y los fenómenos de interacción eléctrica y magnética de la materia, de la que también forma parte la luz. La gravitación explica el movimiento de cuerpos cósmicos.

Los objetivos del capítulo son:

- Identificar las 4 fuerzas fundamentales. Hablar de las posibles quintas fuerzas y del campo de Higgs.
- Describir el experimento de Cavendish para determinar la constante de gravitación universal  $G_N$ .
- Comparar y contrastar las fuerzas electromagnéticas y las gravitacionales.
- Conocer que todas las fuerzas de contacto proceden de fuerzas electromagnéticas residuales, que actúan de diferentes y complejos modos. Comentar el significado de las fuerzas de Van der Waals.
- Aplicar las Leyes de Newton para resolver problemas de planos inclinados y poleas.
- Reconocer que la fuerza de rozamiento estático, máxima, y la fuerza de rozamiento dinámico o cinético son proporcionales a las componentes normales de las fuerzas, y a la superficie en cuestión.
- Aplicar las Leyes de Newton a problemas de movimiento circular.

## 10.2. Resumen de la lección

Toda partícula de materia todo desde el borde exterior de la galaxia más lejana al núcleo de un átomo está sujeto a cuatro fuerzas fundamentales. En el corazón del átomo residen dos fuerzas fundamentales, que reciben el nombre de fuerza nuclear fuerte y fuerza nuclear débil. La

fuerza nuclear fuerte mantiene unidos a los protones y neutrones dentro del núcleo, y por otro lado, la débil, aunque sus efectos sean sutiles, son muy evidentes, por ejemplo en la muerte violenta de grandes estrellas o en la desintegración de isótopos radioactivos. Otra fuerza fundamental que nos puede resultar más familiar es la fuerza de la gravedad, de la que no se sabía mucho antes de la ley de Newton. Newton explicó el cómo y el por qué de la gravedad en el universo, desde un objeto que cae al suelo hasta la luna. Pero Newton no fue el único que avanzó en la ciencia en lo tocante a la luna, Henry Cavendish calculó el verdadero peso de la Tierra y lo hizo midiendo la constante de la ley universal de la gravedad de Isaac Newton. Mediante un experimento no solo calculó la masa de la Tierra, sino también calculó la constante gravitatoria:

$$\vec{F} = m\vec{g} = -G_N \frac{M_1 M_2}{r^2} \vec{e}_r$$

$G_N = 6,674 \cdot 10^{-11} Nm^2/kg^2$ . Cavendish pesó la Tierra.

La cuarta fuerza fundamental es la electricidad. Estudiando los efectos de la electricidad Benjamin Franklin tuvo la idea de que la electricidad era una especie de fluido, un fluido eléctrico contenido en cada cuerpo ordinario. Si el cuerpo contenía demasiado fluido, decía que estaba cargado positivamente, y por el contrario, si no contenía mucho, estaba cargado negativamente. Aunque su idea no fue del todo certera. En su nivel más fundamental la electricidad es la fuerza entre cargas positivas y negativas. Igual que toda la materia es neutra, conteniendo cargas positivas y negativas eléctricamente equilibradas, también está compuesta de átomos. El núcleo del átomo está hecho de protones, que están cargados positivamente, de neutrones, que no tienen carga, y de electrones, con carga negativa, que giran en órbita alrededor del núcleo. La fuerza eléctrica es:


$$\vec{F}_e = K_e \frac{Q_1 Q_2}{r^2} \vec{e}_r$$

$K_e = K_C = 9 \cdot 10^9 Nm^2/C^2$ . La fuerza eléctrica es atractiva o repulsiva. Las cargas pueden ser tanto positivas como negativas, dos cargas de signo contrario se atraen, mientras que, por el contrario, dos cargas de mismo signo se repelen. La fórmula de la fuerza eléctrica es muy similar

a la de la fuerza gravitatoria, y siendo así, algunos científicos se plantearon se podría haber una fuerza que ella sola explicase la naturaleza fundamental de todas las cosas del universo. Una de las personas que se dedicó a estudiar esto fue Einstein. Igual que la gravedad liga a los planetas a sus círculos preestablecidos, la electricidad liga a los átomos y las moléculas dentro de los líquidos y los sólidos para así constituir todas las cosas, desde los más complejos organismos hasta la sal común. La fuerza eléctrica, además, debe estar ligada o relacionada con la fuerza nuclear débil. Otra forma de fuerza eléctrica es la fricción y otra es por ejemplo la viscosidad. En conclusión hay que mencionar que las fuerzas fundamentales de la naturaleza son las mismas para todo el universo, y que es gracias a Newton por el que conocemos la física como es hoy en día. Según la Mecánica de Newton debemos entender cuáles son las fuerzas y qué es la materia o la masa.

## 11. Lección 11. Gravedad, Electricidad y Magnetismo.

### 11.1. Descripción de la lección

 on fuerzas que actúan en el escenario de la Física, la fuerza gravitacional entre dos masas, la fuerza eléctrica entre dos cargas, y la fuerza magnética entre dos polos magnéticos o corrientes eléctricas. Todas ellas tienen esencialmente la misma formulación matemática. Los manuscritos de Newton sugerían la existencia de conexiones entre la electricidad y magnetismo. Por una corazonada científica, Maxwell vio la manera bajo una perspectiva totalmente innovadora.

Los objetivos del capítulo son:

- Indicar la conexión entre electricidad y magnetismo, además de las posibles relaciones formales de los diferentes tipos de fuerza.
- Enunciar ejemplos del concepto de campo.



- Exponer ejemplos de similitudes y diferencias entre gravitación y electromagnetismo.
- Explicar cómo la velocidad de la luz queda acotada por las fuerzas electromagnéticas.
- Mencionar cómo la Relatividad General de Einstein predice la existencia de ondas gravitacionales (detectadas por LIGO en 2016), perturbaciones en el espacio-tiempo que se propagan a la velocidad de la luz.
- Cuestionarse la relevancia de la constancia de la velocidad de la luz o de la propagación de los campos en el espacio-tiempo.

## 11.2. Resumen de la lección

Una cosa que tienen en común todos los físicos es su fascinación por los misterios de la naturaleza, por ejemplo la misteriosa naturaleza de la luz. La propia idea de luz, y especialmente de velocidad de la luz fue muy difícil de comprender. En 1675, O. Romer utilizó el retraso en los eclipses de los satélites de júpiter para determinar la velocidad de la luz. En 1849, Armand Fizeau utilizó una rueda giratoria para medir también la velocidad de la luz. Y en 1850, Foucault midió la velocidad de la luz con un espejo giratorio. Pero no fue hasta 1926 cuando Albert A. Michelson fue capaz de medir con precisión esta velocidad:

$$c = 3 \cdot 10^8 m/s$$

Cuando los físicos son capaces de comprender la electricidad y la gravedad parece que se acercan a comprender la escala y la estructura del universo, sin embargo, para completar ese viaje necesitan hacer una conexión con otra fuerza, la que aparece en el fenómeno del magnetismo. El magnetismo, actuando entre polos magnéticos diferentes, también atrae, y actuando entre polos magnéticos iguales, repele, la sutil diferencia entre el magnetismo y las otras fuerzas consiste en que los polos magnéticos nunca están solos, siempre están en parejas, y ambos son iguales

y opuestos. El descubrimiento del nexo entre electricidad y magnetismo fue realizado en 1820 por Hans Christian Oersted. Entonces, como magnetismo y electricidad no son cosas distintas, la constante magnética se debería encontrar a partir de la fuerza entre corrientes eléctricas. Si la corriente eléctrica fluye por dos barras metálicas, la fuerza magnética entre ellas es suficiente para que se atraiga, aquí no hay polos magnéticos y la fuerza es proporcional a las dos corrientes medidas en amperios o culombios por segundo, y las longitudes de las dos barras en metros. El resultado de la medida de la constante magnética es

$$K_m = 10^{-7} N s^2 / C^2$$

James Clerk Maxwell se dio cuenta de que las fuerzas eléctricas y magnéticas, fuerzas fundamentales de la naturaleza, no son independientes, sino que están relacionadas entre sí, y por ello las constantes también deberían estar relacionadas de alguna manera:

$$\frac{K_C}{K_m} = 9 \cdot 10^{16} m^2 / s^2$$

en otras palabras, es el cuadrado de una velocidad, la velocidad de la luz. Este resultado llevó a Maxwell a desarrollar una teoría combinada que unificó los conceptos de electricidad, magnetismo y luz.

Semejanza de las 3 leyes: gravitacional, eléctrica y magnética.

$$F = G_N \frac{M_1 M_2}{r^2}$$

$$F_C = K_C \frac{Q_1 Q_2}{r^2}$$

$$F_m = K_m \frac{p_1 p_2}{r^2}$$

## 12. Lección 12. El experimento de Millikan.

### 12.1. Descripción de la lección



a Ciencia avanza inexorable. ¿Cómo? A través de penosas pruebas y errores, nos muestra una recreación dramática del clásico

experimento de la gota de aceite de Millikan. Suponiendo la fuerza eléctrica es una gotita cargada y la viscosidad, se puede medir la carga de un electrón aislado.

Los objetivos del capítulo son:

- Describir el experimento de Millikan para medir la carga de un electrón.
- Resolver problemas de fuerzas viscosas.
- Reconocer que toda carga es un múltiplo de la unidad de carga elemental del electrón.

## 12.2. Resumen de la lección

J.J. Thomson consiguió demostrar que la última e indivisible partícula de la materia en realidad tenía otras partes interiores a través de un experimento. La nueva partícula fue llamada electrón, después quedaba la tarea de medir su carga eléctrica, lo que se logró con un experimento llevado a cabo por Robert Andrew Millikan. Los fundamentos ya habían sido establecidos por Thomson, quien había recibido un premio Nobel por sus investigaciones sobre cómo conducían los gases la electricidad. Thomson había inventado el método de la niebla para medir la carga del electrón. Este método era muy difícil, ya que se veía sujeto a numerosas incertidumbres, aunque lograron una estimación de la carga que era correcta en su orden de magnitud. Millikan repitió los experimentos, para ionizar la nube gaseosa en la cámara utilizó primero rayos x y después pequeñas cantidades de radio, y lo hizo con un campo eléctrico más potente. Cuando las cosas comenzaron a moverse hubo un pequeño problema, al utilizar fuerzas eléctricas tan potentes en el interior, la nube de vapor de agua desaparecía rápidamente. Millikan entonces decidió medir las gotas individuales. El problema era que el agua se evapora. Entonces pensó en utilizar gotas de aceite, ya que este no se evapora. Finalmente consiguió calcular la carga del electrón:

$$q = (V_{on} + V_{off})6\pi R\eta/E$$

$$V_{on} = \frac{qE - mg}{6\pi R\eta}$$


$$V_{off} = \frac{mg}{6\pi R\eta}$$

La velocidad de sustentación es:

$$v = \frac{mg}{6\pi R\eta}$$

## 13. Lección 13. Conservación de la energía.

### 13.1. Descripción de la lección

 El mito de la Crisis de la Energía. Según una de las principales leyes de la Física, la energía ni se crea ni se destruye, solamente se transforma.

Los objetivos del capítulo son:

- Definir los conceptos de trabajo, energía cinética y energía potencial.
- Entender la relación existente entre trabajo y energía.
- Resolver problemas empleando el Principio de Conservación de la Energía (PCE).
- Mencionar la relación de los principios o leyes de conservación con el Teorema de Noether y sus generalizaciones. Emmy Noether formuló dos profundos bellos teoremas relacionando las simetrías e invariancias de magnitudes de cierto tipo con leyes de conservación.

### 13.2. Resumen de la lección

Una de las leyes fundamentales de la física es que la energía se conserva, de hecho, existen tres leyes de conservación, la de la conservación

de la energía, la de la cantidad de movimiento y la del momento angular. Pero si la energía siempre se conserva por qué por ejemplo nuestros músculos se cansan. La respuesta es el trabajo,  $W=F \cdot h$ . Cuando el trabajo se realiza cerca de la superficie de la Tierra, la fuerza en esta ecuación es la fuerza constante de la gravedad, entonces:

$$W = Fh = mgh$$

$$W = \int_a^b f(x)dx$$

En este caso la fuerza se utiliza para vencer la gravedad al levantar el peso a una cierta altura. En la conservación de la energía el papel que juega el trabajo es transferir energía de un lugar a otro, por ejemplo del músculo al acero las pesas tienen energía debido a su altura esa es energía potencial

$$U = mgh$$

la energía potencial depende solamente de la distancia vertical, la energía potencial por sí misma no se conserva. Un pequeño trabajo es la fuerza a través de una corta distancia pero todo ello se acumula, en el lenguaje del cálculo, se integra. Si se ejerce un trabajo contra una fuerza constante y opuesta,

$$W = U_1 - U_0 = \Delta U$$

Por otro lado, si se realiza trabajo sin que exista una fuerza opuesta, el trabajo sigue siendo la integral de la fuerza a lo largo de la distancia, pero ahora el resultado del trabajo es que el bloque se acelera, o en otras palabras, gana velocidad. En términos de velocidad el trabajo es

$$W = K_1 - K_0 = \Delta K$$

y este es un nuevo tipo de energía, la energía del movimiento, que se llama energía cinética:

$$E_k = K = \frac{1}{2}mv^2$$

$$\Delta E_k = \int madx = \int mvdv = \int_0^1 mvdv$$

Pero si solo hay dos formas de energía, potencial y cinética, y ninguna se ha conservado, ¿cómo puede conservarse cualquier tipo de energía? La energía potencial cambia constantemente y la energía cinética está en un estado constante de flujo, pero cuando se considera la suma de las energías cinética y potencial juntas, la totalidad de energía es constante

$$E_m = K + U = \text{constant}$$


Equivalencia de calor y energía (Joule):

$$1\text{cal} = 4,186J$$

De acuerdo con la ley de la conservación de la energía aun cuando la energía cambie de forma la cantidad total de energía del universo es siempre constante. La razón de la conservación de la energía es la independencia o invariancia de las leyes físicas frente a traslaciones en el tiempo. La conservación del momento lineal se debe a la invariancia respecto a traslaciones espaciales. La ley de conservación del momento angular deriva de la invariancia respecto a rotaciones. La conservación de la carga se debe a la invarianza respecto a desplazamientos en el potencial-vector o en el potencial eléctrico. Las transformaciones gauge  $A \rightarrow A + d\varphi$  son las responsables de la conservación de la carga eléctrica. El teorema de E. Noether relaciona simetrías o invariancias con leyes de conservación.

## 14. Lección 14. Energía potencial.

### 14.1. Descripción de la lección

 l tema de la estabilidad. La energía potencial da la clave, y en un modelo consistente, permite entender por qué el mundo ha funcionado de la misma manera desde casi el comienzo de los tiempos.

Los objetivos del capítulo son:

- Calcular la función energía potencial asociada a una fuerza conservativa.
- Definiciones de fuerza conservativa equivalentes.
- Identificar la fuerza  $F(x)$  a partir de la función energía potencial  $U(x)$ . Concepto de potencial.
- Situar los puntos de equilibrio y discutir su estabilidad a partir de una gráfica de la función energía potencial  $U(x)$ .
- Usar los conceptos de energía potencial gravitacional y el PCE para resolver problemas de velocidad de escape. Definir velocidad de escape y relacionarla con la velocidad orbital y otras velocidades cósmicas.

## 14.2. Resumen de la lección

Existe una idea que dice que la materia está formada por átomos ligados por campos de fuerza en posiciones de equilibrio estable. En el universo mecánico cada átomo en cada fragmento de un sólido está en una posición de equilibrio estable al igual que en el entramado de materia que imaginaba Bosovich, pero mientras él concebía la estabilidad en términos del juego de las fuerzas newtoniana, la idea es más clara en el concepto dinámico de energía.

$$F = -\frac{dU}{dx}$$

$$U_g = -G\frac{Mm}{r}$$


$$U_e = K\frac{Qq}{r}$$

La energía no puede crearse ni puede destruirse pero puede ser transformada a formas diferentes, la energía puede ser potencial y la energía puede ser cinética. La energía está almacenada en muchas maneras formas

y cosas, y está almacenada en forma de energía potencial, y dondequiera que se almacene la energía potencial depende de la posición de los átomos dentro de las moléculas de una sustancia. La forma en que cada objeto almacena energía potencial depende de la posición del objeto, cuanto más alto esté un objeto respecto a la tierra, tendrá más energía potencial gravitatoria. Por otro lado la energía cinética está relacionada con la velocidad, un cuerpo que se mueve con más rapidez tiene más energía cinética que uno que se mueve más lento. Sin embargo cualquier cuerpo puede cambiar la energía potencial por energía cinética cambiando la posición por velocidad. Cuando todas las fuerzas están compensadas existe equilibrio pero el mero equilibrio, a lo que se llama equilibrio estable. El equilibrio estable puede verse siempre en una gráfica de energía potencial y posición. La fuerza sobre un objeto tiende a llevarla hacia posiciones de menor energía potencial, cuanto mayor es la pendiente, más grande será la fuerza resultante, de hecho la fuerza es precisamente igual a menos la derivada de la energía potencial, ya que la fuerza depende de la pendiente de la curva de la energía potencial y no del valor de esta. La energía potencial puede ser positiva o negativa sin que esto influya en su efecto. Y cuando la pendiente es cero no hay fuerza sobre el cuerpo, es decir está en equilibrio.

## 15. Lección 15. Conservación del momento lineal.

### 15.1. Descripción de la lección

 Si el Universo, en su Mecánica, es un reloj perpetuo, ¿se mantendrá su marcha a lo largo del tiempo y el final de los tiempos? Tomando un ejemplar de Descartes, el momento lineal, el producto de masa y velocidad, la cantidad de movimiento es definida. El impulso es otro de sus nombres. La Segunda Ley de Newton materializa la Ley de Conservación del Momento Lineal. Esta Ley proporciona un convincente principio para analizar los choques, incluso en una mesa de billar.



Los objetivos del capítulo son:

- Reconocer la conservación del momento lineal como una consecuencia de la Segunda Ley de Newton.
- Identificar cuándo se conserva el momento lineal de un sistema.
- Reconocer la conexión entre energía cinética y momento lineal.
- Resolver los problemas con choques elásticos e inelásticos.
- Interpretar la relación entre impulso y tiempo medio de acción de una fuerza.

## 15.2. Resumen de la lección

Descartes fue el primero en enunciar este principio: la cantidad total de movimiento en el universo es constante, si un cuerpo no es interferido se moverá a velocidad constante en línea recta. Esa es la ley de la inercia, una idea de Galileo perfeccionada. Pero cuando un cuerpo choca con otro, no sólo se para, sino que transmite su movimiento a los otros cuerpos, por lo tanto la cantidad total de movimiento se conserva. Aún así la esencia de su cantidad de movimiento fue expresada mejor por Newton. En su obra “Principio” escribió: el cambio en el movimiento es proporcional a la fuerza aplicada y se produce en la dirección de la línea recta en la que se ha aplicado la fuerza. Newton utilizó la palabra movimiento para significar la cantidad de movimiento o en términos modernos la velocidad de un cuerpo multiplicada por su masa

$$p = mv$$

Aunque Newton prefirió expresar sus ideas con ayuda de la geometría clásica, utilizando figuras geométricas y cocientes entre cantidades, sabía que sus leyes se podía expresar mediante ecuaciones diferenciales. Por ejemplo su segunda ley podía ser expresada como

$$F = \frac{dp}{dt}$$


Si no actúa ninguna fuerza, su derivada es igual a 0, por lo tanto  $p$  es constante, lo cual significa que el movimiento del objeto es constante. Si la derivada de algo es igual a cero ese algo es una constante, y esa constante la suma de las cantidades de movimiento de todos los cuerpos es una cantidad que se conserva, es decir, es siempre la misma. El centro de masa es el punto en el que hay que fijar la atención cuando se calcula la velocidad y la aceleración de un cuerpo compuesto. Cuando ninguna fuerza externa neta actúa sobre un sistema compuesto, independientemente de lo que suceda en sus componentes, el centro de masa del mismo continúa moviéndose con velocidad constante y en línea recta. La energía, al igual que la cantidad de movimiento, se conserva siempre. La conservación de la energía regula por supuesto todo juego sin distinción de la forma que adopte la energía y sin importar cuáles sean las masas de los cuerpos, pero en este juego solamente hay energía cinética y todos los cuerpos tienen la misma masa. Entonces obtenemos que la energía cinética es:

$$K = \frac{p^2}{2m}$$

Los choques es el único medio que tenemos para llegar a saber algo sobre el mundo subatómico. Cuando los cuerpos, chocan la cantidad de movimiento total permanece constante y la cantidad de movimiento de cualquier sistema en el que no actúen fuerzas exteriores se conserva siempre.

## 16. Lección 16. Movimiento ondulatorio.

### 16.1. Descripción de la lección

 a música y las Matemáticas guardan una interesante relación y sinergia. Hay una música o armonía en las Matemáticas justo como hay Matemáticas en la Música. La fuerza de recuperación y la inercia de cualquier sistema mecánico estable hace que los objetos realicen un movimiento armónico simple (MAS) que es en realidad una proyección sobre una línea de un MCU. Es un fenómeno

que se repite a tiempos exactos.

Los objetivos del capítulo son:

- Conocer las características generales del movimiento armónico simple (MAS), incluida la importante propiedad de que la aceleración es proporcional al desplazamiento, en su dirección, pero opuesta al mismo en general.
- Relacionar el MAS con el MCU:
- Resolver problemas de objetos fijados a muelles verticales u horizontales.
- Analizar las condiciones en las que el movimiento de péndulos simples o físicos es armónico simple, y ser capaz de encontrar el período del movimiento.
- Interpretar la conexión existente entre MAS y la conservación de la energía.

## 16.2. Resumen de la lección

El movimiento armónico se produce por una combinación de la segunda ley de Newton con una fuerza recuperada, lo que conduce a un movimiento que se repite a sí mismo en periodos iguales de tiempo. Galileo descubrió que el péndulo podía ser usado como instrumento para medir con precisión el tiempo, gracias a haber notado cómo cuando este se movía, siempre tardaba el mismo tiempo en completar cada oscilación. Este movimiento es el movimiento armónico simple. En una determinada posición todas las fuerzas están equilibradas, sin embargo, cuando el muelle está estirado tiende a tirar de la masa hacia su posición original, cuanto más se desplace la masa mayor será la fuerza que tira. El mismo principio funciona a la inversa, cuando el muelle está comprimido trata de empujar la masa hacia su posición original. Cualquiera que sea la dirección en la que se mueva la masa aparece una fuerza para oponerse al desplazamiento, la combinación de esta fuerza y la inercia de la masa será

la clave para llevar cuenta del tiempo en cada punto de su movimiento. La fuerza neta es proporcional y de dirección opuesta a la distancia  $x$  desde la posición de equilibrio a la masa la ecuación es

$$F = -kx$$

donde el valor de  $k$  depende de la rigidez del muelle. El movimiento armónico simple está descrito por la siguiente ecuación:

$$a = \frac{d^2x}{dt^2} = -\frac{k}{m}x$$

Esa ecuación se refiere a cualquier sistema físico que al ser perturbado tiende a recuperar su posición de equilibrio con una fuerza proporcional a la perturbación sufrida. Las oscilaciones pueden ser rápidas o lentas, o de distinta frecuencia. Hace mucho tiempo alguien conjeturó que la solución puede ser una función seno, y realmente fue así:


$$x = A \sin \omega t$$

$$\omega^2 = k/m$$

En el gran reloj del cielo cada ciclo está dividido en radiales como si el universo fuera un enorme círculo, las naturalezas del movimiento circular uniforme y del movimiento armónico simple están relacionadas. La energía potencial del movimiento armónico se puede visualizar como una curva con el perfil de un tazón. Cuando un oscilador armónico es perturbado la perturbación produce una fuerza que lo empuja de nuevo a la posición inicial allí la fuerza es cero pero la inercia lo mantiene en movimiento hasta que la fuerza de recuperación lo detiene y lo hace retornar nuevamente esta es la esencia del movimiento armónico un oscilador armónico simple. Pero los osciladores reales no son simples siempre actúan otras fuerzas que tienden a ralentizar sus movimientos.

## 17. Lección 17. Resonancia.

### 17.1. Descripción de la lección

 a música y las matemáticas de la Naturaleza, segunda parte. Como observó Galileo, las oscilaciones de un péndulo aumentan al aplicarle una fuerza pequeña repetidas veces de una forma sincrónica. Cuando la frecuencia de la aplicación de la fuerza coincide con la frecuencia del sistema, las oscilaciones ganan amplitud y se produce el fenómeno conocido como resonancia. La resonancia explica por qué un puente colgante puede caerse soplando un viento suave, y también cómo la voz humana puede romper una copa de cristal.

Los objetivos del capítulo son:

- Definir las oscilaciones forzadas.
- Explicar la resonancia y dar algunos ejemplos.
- Interpretar la relación existente entre resonancia y movimiento oscilatorio forzado.

### 17.2. Resumen de la lección

Se llama resonancia al fenómeno que ocurre cuando una fuerza se aplica repetidamente a un sistema con la frecuencia natural del mismo y en consecuencia, el resultado es la aparición de oscilaciones de gran amplitud. Tanto si se trata de un columpio como de un muelle los osciladores suben y bajan debido a la fuerza interna  $F$ , y si se aplica una fuerza adicional proporcional a  $F_0$  a una frecuencia diferencial de la frecuencia  $\omega$ , el resultado es un movimiento más complicado,

$$F = -kx + F_0 \sin \omega t$$

Pero el movimiento es realmente la suma de dos movimientos simples que satisfacen la ecuación diferencial. Algunos elementos claves para la resonancia pueden ser una voz muy potente o exquisito control de frecuencia y un sistema oscilante. La amplitud de oscilaciones provocadas


es sensible a la frecuencia, una fuerza a baja frecuencia  $\omega$  que impulsa un oscilador de frecuencia natural  $\omega_0$  provoca complicadas pero pequeñísimas vibraciones, a más alta frecuencia las vibraciones son algo mayores, y por otro lado, si  $\omega$  se aproxima a  $\omega_0$  el efecto puede ser positivamente demoledor. A la hora de intentar romper un vaso con la voz, hay que tener en cuenta que el propio vaso es un fluido viscoso, ya que es el propio vidrio el que es viscoso, y es esta viscosidad la que impide que sus oscilaciones resonantes en infinitas y al mismo tiempo sin esa viscosidad no quedaría vidrio sano. Los efectos de la resonancia pueden llegar a ser en ocasiones más que molestos pueden ser devastadores, como por ejemplo en la resonancia de un edificio durante un terremoto.

$$A = \frac{a_0}{\omega_0^2 - \omega^2}$$

Otro fenómeno relacionado con la resonancia, es el principio del arpa eólica, que explica por ejemplo el sonido que emiten los cables del teléfono al ser soplado por el viento, o, también explica lo que le ocurrió al puente de Tacoma, que debido a no haber tenido en cuenta la resonancia se derrumbó.

## 18. Lección 18. Ondas y el sonido.

### 18.1. Descripción de la lección

as perturbaciones del medio en la Naturaleza. Con un análisis del MAS y un toque de genialidad, Newton extendió la Mecánica a la propagación del sonido.

Los objetivos del capítulo son:

- Diferenciar entre ondas transversales y longitudinales.
- Interpretar las relaciones entre velocidad, período, frecuencia, longitud de onda, frecuencia angular referidas a una onda armónica.

- Reconocer la dependencia entre la velocidad y la longitud de onda, en el caso de ondas que se transmiten por el agua, superficial o profundamente.
- Analizar por qué Newton no se sintió satisfecho con su cálculo de la velocidad del sonido.
- Estado actual de la teoría de ondas.

## 18.2. Resumen de la lección

Se llama onda a las oscilaciones que pueden propagarse a través de un medio como el aire o el agua sin transportar materia. Agua, luz y sonido se propagan por ondas, es decir, las ondas son uno de los fenómenos más comunes en la física. Pero no solo la naturaleza puede crear ondas, también las personas. Cuando se perturba cualquier sistema mecánico estable, la respuesta de la naturaleza es el movimiento armónico simple, esto es lo que sucede en el caso de un oscilador simple, pero cuando se unen varios osciladores entre sí, una perturbación en uno de ellos pasa al siguiente y así sucesivamente. Esta es la esencia de una onda mecánica. La velocidad de una perturbación depende del medio que atraviesa y de la conexión entre una partícula de materia y la siguiente, si la unión es débil la perturbación pasa lentamente y viceversa. Las ondas mecánicas o impulsos pasan a través del cristal de un átomo a otro porque cada átomo está ligado a una posición de equilibrio por fuerzas eléctricas. Cuando se los perturba actúan mecánicamente de la misma forma que las masas unidas por muelles, cuando un impulso se mueve a través de un sistema, cada oscilador simple no se desplaza muy lejos, pero la perturbación se propaga todo a lo largo. Una onda tiene una duración definida para cada ciclo completo llamada periodo, y a la inversa del periodo se le llama frecuencia. Cada una tiene una longitud definida desde una conexión a la siguiente llamada longitud de onda

$$\lambda = Tv$$

$$v = \lambda f$$

$$v = a\sqrt{\frac{k}{m}}$$

Para ondas superficiales en el mar o de olas, la gravedad determina la velocidad de ola. Y si suponemos que la profundidad es mayor que la longitud de onda ( $h \gg \lambda$ ):

$$v_a = \sqrt{\frac{g\lambda}{2\pi}}$$

La velocidad de las ondas en el aire es siempre la misma, pero no todas las ondas se dispersan igual. Todas las ondas mecánicas siguen unos principios básicos. En el aire:

$$v = \sqrt{\frac{p}{\rho}}$$

$$c = v_{em} = \sqrt{\frac{K_C}{K_m}}$$

Las masas y los muelles pueden oscilar a lo largo de la dirección que los conecta, a estas se les llaman ondas longitudinales, y también se las puede hacer oscilar lateralmente, estas se llaman ondas transversales. Las ondas sonoras son generadas por algo que haga vibrar el aire o un objeto que vibre pone en movimiento el aire a su alrededor comprimiendo y expandiendo su densidad con cada vibración, esa es la razón por la que una onda sonora generada lleva igual frecuencia que su fuente. La velocidad del sonido también depende de la densidad y presión del aire, al igual que la velocidad de las ondas de las olas (superficiales y poco profundas) depende de la gravedad. Las ondas electromagnéticas o gravitacionales dependen de la constante eléctrica y magnética del medio.

## 19. Lección 19. Momento angular

### 19.1. Descripción de la lección



n antiguo momento con uno nuevo giro. La Segunda Ley de Kepler del movimiento de los planetas, que aquí se funda de



un principio mucho más sólido, supone una línea desde el Sol a el planeta, que barre áreas iguales en tiempos iguales. El momento angular es una precesión de un momento lineal: el producto vectorial del vector radio por la cantidad de movimiento. Una fuerza que gira por la cantidad de movimiento crea un par o momento angular. Cuando ningún par de fuerzas actúa, el momento angular del sistema permanece constante.

Los objetivos del capítulo son:

- Definir par de torsión, momento de una fuerza y momento angular.
- Identificar el momento angular de un sistema y de una partícula.
- Interpretar la conexión entre la Segunda Ley de Kepler y el Principio de Conservación del momento angular.
- Reconocer el papel de la conservación del momento angular en la formación de vórtices y torbellinos.

## 19.2. Resumen de la lección

Kepler descubrió las tres leyes del movimiento planetario. La primera ley dio a las órbitas de los planetas una nueva forma no circular y puso al sol ligeramente desplazado del centro de las cosas, así en el curso de sus trayectorias un planeta se encuentra a veces más cerca del sol y a veces más lejos. De acuerdo con la segunda ley de Kepler, cuanto más cerca está del sol más rápido se mueve y cuanto más lejos se encuentra el planeta más lento se mueve. Su tercera ley dice que cuanto mayor sea la órbita de un planeta más tiempo tardará en recorrerla. Sin embargo nunca llegó a explicar el por qué de ese movimiento de los planetas, para eso tuvo que llegar Newton, quien dijo que se debía a que cuando un planeta gira alrededor del sol el vector desde el sol al planeta barre áreas iguales en tiempos iguales. Los objetos que giran o que dan vueltas obedecen todos la misma ley básica que es una consecuencia relacionada pero incidental con una ley más profunda de la naturaleza, la ley de la conservación del momento cinético. Cuando el movimiento es angular se

produce un extraño efecto, incluso si se está aplicando una fuerza a un cuerpo, algo puede todavía ser cero y algo es igual a cero, no la fuerza, sino el momento de la fuerza. El momento cinético es:

$$\vec{L} = \vec{r} \times \vec{p} = \vec{r} \times m\vec{v} = \vec{r} \times m(\vec{\omega} \times \vec{r}) = I\vec{\omega}$$

y es constante. El momento cinético él es un vector que sigue la regla de la mano derecha. Para el movimiento circular donde  $v$  y  $R$  son perpendiculares el módulo de  $L$  es  $mr v$ , y para que  $L$  se mantenga constante a medida que el círculo se hace más pequeño la velocidad deberá ser mayor. Esta idea explica la segunda ley de Kepler.

$$L = I\omega = \text{constant}$$

$$v_a r_a = v_p r_p$$

$$r_1^2 \omega_1 = r_2^2 \omega_2$$

La forma de disco es tan frecuente en la estructura del universo probablemente por la conservación del momento cinético. El momento cinético de un objeto se define como el producto vectorial del radio de un punto dado por su cantidad de movimiento. Una fuerza que produce un par se denomina momento y es igual al producto vectorial del radio por la fuerza vectorial  $F$  o el momento es igual al ritmo de cambio o derivada del momento cinético. Cuando no actúa ningún momento sobre un objeto, el momento cinético se conserva. La segunda ley de Kepler, como veremos, es consecuencia de la conservación del momento angular.

## 20. Lección 20. Pares de torsión y los giroscopios.

### 20.1. Descripción de la lección



¿Por qué una tapa que gira no se cae. Cuando un par de fuerzas actúa sobre un objeto giratorio, el momento angular cambia, pero el objeto solamente realiza una precesión. El objeto puede

ser un juguete infantil, una pieza de un sistema de navegación o la propia Tierra o cualquier objeto cósmico, incluso agujeros negros.

Los objetivos del capítulo son:

- Explicar por qué un giroscopio girando realiza una precesión.
- Describir cómo hacer un giroscopio con un grado de precesión pequeño.
- Interpretar de qué manera la Tierra actúa como un giroscopio propio.

## 20.2. Resumen de la lección

Una rueda girando tiene momento cinético y cuando hay un momento cinético hay un extraño momento. No es la fuerza la que cambia el momento cinético, es el momento de la fuerza. Si

$$\vec{\tau} = \frac{d\vec{L}}{dt} = \vec{r} \times \vec{F} = 0$$

el momento cinético se conserva.

$$\tau = \Omega L$$

$$\tau = \vec{R} \times \vec{F} = \vec{R} \times m\vec{g} = Rmg$$

de donde

$$\Omega = \frac{Rmg}{L}$$

$$L = mrv$$


$$\Omega = \frac{Rg}{rv} = \frac{Rg}{\omega r^2}$$

Cuando la gravedad hace caer una rueda que no esté girando, los radios empujan la parte superior de la rueda hacia afuera más bien que hacia abajo, y eso crea una componente de la velocidad en la dirección hacia afuera. Lo mismo sucede en la parte inferior de la rueda, pero hacia adentro en lugar de hacia afuera. Y lo mismo ocurre cuando la rueda gira,

sin embargo ahora cuando la velocidad hacia fuera aumenta lo hace en el costado de la rueda, hacia afuera en un lado y hacia adentro en el otro. Para explicar el fenómeno de la precesión utiliza una peonza: ya sea que esté girando o no la peonza actúa como si toda su masa estuviera concentrada en su centro, en un punto llamado centro de masa, si la peonza se ladea, aunque solo sea un poco, el resultado es un momento. Cuando esto le sucede a una peonza girando, el momento modifica ligeramente el momento cinético de la peonza haciéndola describir un pequeño círculo alrededor del que va la peonza. Cuando un giróscopo está equilibrado en su propio centro de masa la fuerza de la gravedad no le hará tener precisión. Por eso los giróscopos son muy útiles para la navegación. El mejor giróscopo sobre la Tierra sin embargo, es la Tierra misma. Newton fue capaz de explicar la precesión de los equinoccios gracias a su comprensión de que la Tierra era un giróscopo. La precesión de la Tierra tiene un período de unos 26000 años.

## 21. Lección 21. Las tres leyes de Kepler.

### 21.1. Descripción de la lección

 Las tres leyes de Kepler, debidas al matemático errante, describieron el movimiento de los cuerpos celestes con una exactitud sin precedentes.

Para eso se tuvo que abandonar la preconcepción circular platónica. No obstante, los planetas seguían moviéndose en las órbitas trazadas por los antiguos matemáticos griegos pero usando una una figura geométrica: la sección cónica llamada elipse.

Los objetivos del capítulo son:

- Conocer el significado histórico de las 3 leyes de Kepler.
- Enumerar con precisión y enunciar las 3 leyes de Kepler.
- Identificar la relación entre las secciones cónicas y las 3 leyes de Kepler.

- Definir la excentricidad y la fórmula de una sección cónica en coordenadas polares.
- Mencionar la relación de la dimensionalidad del mundo con la tercera ley de Kepler.
- Relacionar la ecuación de la elipse con variables cósmicas.

## 21.2. Resumen de la lección

Después de que Kepler recibiese las observaciones de Tycho Brahe, decidió comprobarlas observando la órbita de Marte, tomando como sistema de referencia el de Tycho. Después de numerosas observaciones se dio cuenta de que Marte no describe una órbita circular alrededor del sol, se dio cuenta de que describía una órbita elíptica, viendo así que cuanto más lejos del sol, más lento iba, y por el contrario, cuanto más cerca del Sol, más rápido iba. Esto pasó a ser conocido como la segunda ley de Kepler. Los griegos ya conocían la existencia de estas figuras y las describían dependiendo del modo en el que un plano cortaba a un cono. Pero no fue hasta más tarde, cuando estas figuras se comenzaron a describir de la siguiente manera: un punto en movimiento traza una sección cónica cuando su distancia desde un punto fijo o foco tiene razón constante con su distancia desde una recta fija la directriz. El cociente de esas distancias es la excentricidad  $e$ . En una elipse por ejemplo, ese cociente es menor que 1 y muestra lo alejado que se encuentra el foco del centro. Las tres secciones cónicas comparten una propiedad común, y las tres se pueden expresar por una misma ecuación algebraica:

$$r = \frac{ed}{1 + e \cos \theta}$$

La primera ley de Kepler establece que cada planeta se mueve en una elipse con el sol en un foco. La segunda ley dice que una recta desde el sol a un planeta, barre áreas iguales en tiempos iguales.

$$L = \text{const}$$

$$v_A = \frac{dA}{dt} = \frac{rv}{2} = \frac{L}{2m}$$

Su tercera ley surgió 10 años más tarde y dice que

$$T^2 = \frac{4\pi^2}{GM}a^3$$

lo que revela una conexión entre los movimientos de diferentes planetas. Newton dio una versión modificada de esta ley para sistemas binarios de dos cuerpos:

$$T^2 = \frac{4\pi^2}{G(M_\star + M_p)}a^3$$

## 22. Lección 22. El problema de Kepler.

### 22.1. Descripción de la lección

La combinación de la LGU y de la segunda ley de Newton,  $F = ma$ . La tarea de deducir las 3 leyes de Kepler a partir de la LGU. se conoce como el problema de Kepler. Su solución es uno de los grandes logros matemáticos y físicos del pensamiento occidental.

Los objetivos del capítulo son:

- Describir el valor de la velocidad en coordenadas polares.
- Enunciar la fórmula del momento angular en coordenadas polares.
- Verbalizar el problema de Kepler.
- Interpretar de qué manera las Leyes de Newton dan una solución al problema de Kepler.
- Comentar la existencia de una simetría oculta y una ley de conservación adicional en el problema de Kepler. Generalizar el problema de Kepler y su aparición en problemas físicos.

## 22.2. Resumen de la lección


Las tres leyes de Kepler describen los movimientos de los planetas, pero no los explican. Fue Isaac Newton quien aportó la explicación de dichas leyes, lo cual fue la culminación de la revolución científica, y esto es conocido como la solución al problema de Kepler. Newton suponía que la fuerza de la gravedad daba origen a las órbitas elípticas y encontró la forma de probar esa opinión en la matemática mundial. El descubrimiento de Newton de que las órbitas de todos los objetos celestes obedecen la ecuación de las secciones cónicas, comenzó como la pregunta de por qué son elipses las órbitas de los planetas al barrer áreas iguales en tiempos iguales. En términos de momento cinético, la respuesta es el resultado es una ecuación diferencial obedecida por todos los objetos que se mueven bajo la influencia de cualquier fuerza central:

$$L = mr^2 \frac{d\theta}{dt}$$

Isaac Newton fue el primero en descubrir que la fuerza de la gravedad mueve todos los cuerpos celestes a lo largo de secciones cónicas, y puesto que los planetas se mueven en curvas cerradas, sus órbitas son elipses.

## 23. Lección 23. Energía y excentricidad.

### 23.1. Descripción de la lección

a órbita precisa de cualquier cuerpo celeste, sea planeta, estrella u otra cosa, es establecida por los principios de conservación de la energía y el momento angular. La excentricidad, que determina la forma de una órbita, está íntimamente ligada a la energía y al momento angular del cuerpo celeste. De hecho, hay una magnitud adicional conservada en el problema de Kepler relacionada con la excentricidad.

Los objetivos del capítulo son:

- Interpretar la relación entre energía y excentricidad.

- Identificar las órbitas por la excentricidad.
- Conocer el concepto de potencial efectivo y cómo se relaciona con el movimiento planetario.
- Explicar cómo afectan las condiciones iniciales a la órbita de un planeta, cometa, satélite u otro astro.
- Conocer la existencia y significado del vector de Laplace-Runge-Lenz. Explicar su existencia como una simetría oculta del problema de Kepler.

## 23.2. Resumen de la lección

Galileo hizo algunos descubrimientos notables, por ejemplo que la distancia recorrida en la caída es proporcional al cuadrado del tiempo. Tycho Brahe, al igual que Galileo con el plano inclinado, reinterpretaba las reglas que gobiernan el universo. Y Kepler también se puso a jugar al mismo juego que Tycho, y al final se dio a conocer con las tres leyes de Kepler del movimiento planetario:

- La ley de las elipses.

$$r = \frac{ed}{1 + e \cos \theta}$$

- La ley de las áreas.

$$v_A = \frac{dA}{dt} = \text{const}$$

- La ley de los períodos o de las armonías (1-2-3).

$$GMT^2 = 4\pi^2 a^4$$

Newton posteriormente las explicaría deduciéndolas a partir de sus propias leyes. Pero la solución de Newton dice que la órbita de todo cuerpo celeste puede ser una parábola, o una hipérbola o incluso un perfecto círculo platónico. La clave de la forma exacta se encuentra en la energía de los cuerpos. La energía potencial y la energía cinética del planeta



se mantienen intercambiándose entre sí, sin embargo como el planeta se mueve en un vacío sin ninguna resistencia a la energía total no varía, y esta energía total es la clave de la forma de las órbitas.

$$F = -\frac{D}{r^2}$$

$$Ma = F$$

$$a = -\frac{D}{Mr^2}$$

$$r = \frac{L^2/DM}{1 + e \cos \theta}$$

y como

$$L = mr^2 \frac{d\theta}{dt}$$

$$a \times L = -\frac{D}{Mr^2} \vec{e}_r \times Mr^2 \frac{d\theta}{dt} \vec{e}_\perp$$

$$a \times L = D \frac{d\theta}{dt} \vec{e}_\perp \times \vec{e}_r$$

$$a \times L = D \frac{d\theta}{dt} \frac{d\vec{e}_r}{d\theta}$$

$$\frac{d\vec{v}}{dt} \times \vec{L} = \frac{d}{dt} (\vec{v} \times \vec{L}) = D \frac{d\vec{e}_r}{dt}$$

y de aquí el vector de Laplace-Runge-Lenz (de Hamilton también), o vector excentricidad:

$$\frac{d\vec{\epsilon}}{dt} = \frac{d}{dt} (\vec{v} \times \vec{L} - D\vec{e}_r) = 0 \rightarrow \vec{\epsilon} = const$$

La energía potencial planetaria es

$$U_g = -\frac{D}{r} = -\frac{D^2 M}{L^2} (1 + e \cos \theta)$$

La energía cinética planetaria es

$$K = \frac{1}{2} M v^2 = \frac{MD^2}{2L^2} (1 + 2e \cos \theta + e^2)$$

$$K = \frac{D^2 M}{L^2} \left( \frac{1}{2} + e \cos \theta + \frac{e^2}{2} \right)$$

$$\vec{v} \times \vec{L} = D(\hat{r} + \vec{e})$$

$$(v)^2 = \frac{D^2}{L^2} (1 + 2e \cos \theta + e^2)$$

La relación entre energía total y excentricidad es la siguiente:


$$E = K + U = \frac{D^2 M}{2L^2} (1 + 2e \cos \theta + e^2) - \frac{D^2 M}{L^2} (1 + e \cos \theta)$$

$$E = \frac{MD^2}{2L^2} (e^2 - 1)$$

Las formas de las órbitas dependen de sus energías, y para un momento cinético dado, la energía determina la excentricidad y la excentricidad determina la órbita. Kepler utilizó los datos de Tycho antes de publicarlos para poder descubrir la órbita de Marte.

## 24. Lección 24. Navegación espacial.

### 24.1. Descripción de la lección

ómo llegar hasta allí, incluso en el espacio exterior. Los viajes a otros planetas exigen enormes cantidades de energía. No obstante, la cantidad de energía gastada puede reducirse al mínimo mediante el empleo de los mismos principios que guían a los planetas alrededor del sol y del sistema solar.

Los objetivos del capítulo son:

- Explicar cómo se usa la fuerza de gravedad en los viajes interplanetarios.
- Comentar la relación de las oportunidades de lanzamiento y la geometría orbital planetaria.

- Distinguir entre ventanas de lanzamiento a planetas interiores y exteriores.
- Calcular los períodos y velocidades de órbitas de transferencia entre planetas.
- Justificar el uso de órbitas de transferencia.
- Describir la influencia de la atracción gravitacional en un satélite y sobre el planeta.

## 24.2. Resumen de la lección

Los viajes a otros planetas requieren de una gran cantidad de energía que se podría minimizar utilizando la energía gravitatoria. Las órbitas seguidas por las naves espaciales y los satélites se rigen por las mismas reglas que rigen las órbitas de los planetas. Se llevaron a cabo varias misiones en busca de respuestas, las cuales fueron las siguientes:


- Mariner 10 (1973) a Venus y Mercurio
- Viking (1975) a Marte
- Voyager (1977) a Júpiter, Saturno, Urano y Neptuno.

Este en concreto permitió conocer la complejidad de los anillos de Saturno. Para llegar de un planeta a otro se utiliza una de las leyes de Kepler que dice que los planetas se mueven alrededor del sol en elipses. Las tres leyes de Kepler establecieron como giran los planetas alrededor del sol y Newton explicó cómo funcionan las leyes de Kepler. La tercera ley de Kepler fija la duración de un año planetario o de un vehículo espacial. Se denomina órbita de transferencia, a la órbita elíptica alrededor del sol que debe seguir la nave que debe cruzar a la de los dos planetas (origen y destino). Se llama oportunidad a una alineación planetaria que permita iniciar el lanzamiento. Normalmente tienen una duración de 1 ó 2 semanas y es específica para cada planeta. Lo primero que se debe hacer es vencer la gravedad del planeta tierra. El principio de la ayuda o asistencia de la gravedad se basa en utilizar la gravedad de un planeta

para cambiar la velocidad y dirección del vuelo de la nave con respecto al sol.

## 25. Lección 25. De Kepler a Einstein.

### 25.1. Descripción de la lección

os planetas en órbita, el flujo y reflujo de las mareas, el cuerpo que cae con un movimiento acelerado, todos estos fenómenos son consecuencia de la LGU. Ello nos lleva a la llamada Teoría General de la Relatividad (TGR). También, al descubrimiento de unos objetos que ya fueron postulados antes en física newtoniana: los agujeros negros (o estrellas negras).

Los objetivos del capítulo son:

- Interpretar las implicaciones de la tercera ley de Kepler en cálculos planetarios.
- Conocer el significado del centro de masa del sistema solar.
- Explicar la causa de las mareas.
- Diferenciar entre masa inerte y gravitacional. Enunciar el Principio de Equivalencia.
- Identificar cualitativamente el concepto de agujero negro.
- A raíz de los experimentos de LIGO y otros, como las observaciones del EHT o de púlsares binarios, establecer la existencia de objetos ligados a la TGR y las predicciones de esta teoría que no ofrece la teoría de Newton, y que se han confirmado (por ejemplo, mediante el uso de GPS).

## 25.2. Resumen de la lección

Para el movimiento planetario:

$$\frac{L}{M_p} = \sqrt{G_N M_\star a (1 - e^2)}$$

$$A = \pi ab = \pi a^2 \sqrt{1 - e^2}$$

$$b^2 + (ea)^2 = a^2$$

$$T = \frac{2A}{L/M_p} = \frac{2\pi}{G_N M_\star} a^{3/2}$$

aunque en el caso más general  $M_\star$  debe ser  $M_t = M_\star + M_p$ . Para Galileo las mareas eran más que el flujo y el reflujo de los océanos de la tierra, eran su evidencia de que la tierra realmente se mueve. decía que existían las mareas porque la Tierra se mueve alrededor del Sol, y desarrolló una teoría que explicaba cómo sucedían exactamente las mareas. Pero para que tuviese razón solo debería de haber una marea alta al día, y sin embargo hay dos. La explicación de esto realmente es que en el sistema tierra-luna la tierra y la luna giran alrededor de un centro de masa común, el extraño movimiento oscilante de la tierra visto desde esta perspectiva es realmente una órbita de Kepler del centro de la tierra alrededor del centro de masa del sistema tierra-luna. Pero solamente en el centro de la tierra está exactamente en la órbita correcta. En el lado más próximo a la luna la gravedad es demasiado fuerte y el agua de ese lado es atraída hacia ella formando un abultamiento. En el lado opuesto, la gravedad de la luna es demasiado débil para mantener el agua en su sitio, y así allí también se abomba hacia fuera tratando de escapar. Cuando la tierra oscila alrededor del centro de la gravedad tierra-luna también está girando sobre su propio eje, y al hacerlo pasa por debajo de esas protuberancias. En los lugares donde la tierra en su rotación pasa debajo del agua que se ha elevado ocurren las mareas altas, y en los puntos entre ellos se suceden las mareas bajas. Aún así el Sol también juega un papel, ya que la gravedad de este también tira de la Tierra. Isaac Newton comprendió que la ley de la caída de los cuerpos significaba que la masa

gravitatoria y la masa inerte, aun siendo completamente diferentes, debían ser exactamente lo mismo para cada cuerpo en el universo. Einstein pensó que debía haber en la naturaleza una ley más profunda que hiciera que la ley de la caída de los cuerpos en vez de ser un misterio fuera algo tan sencillo que resultara perfectamente obvio. Y el principio que éste eligió se convirtió en la base de su teoría de la relatividad. Se llama el principio de equivalencia, es decir, equivalencia entre gravedad constante y aceleración constante. Albert Einstein comprendió que la ley de caída de los cuerpos y la misteriosa igualdad de masa gravitatoria y masa inerte se podrían explicar perfectamente de ser cierto lo siguiente ningún experimento de ninguna clase realizado totalmente en el interior de un laboratorio podría determinar si los objetos caen porque la gravedad tira porque el laboratorio está acelerando hacia arriba en el espacio. Debido a esto, decidió realizar el experimento con un rayo de luz, y concluyó que la luz en vez de desplazarse en línea recta se curva ligeramente a causa de la fuerza de la gravedad de la tierra. Al comprobarse que era verdad, se convirtió en la primera prueba de la relatividad general. El principio de equivalencia plantea la pregunta de que si la luz recorre trayectorias curvas que sería entonces una línea recta, a lo que Einstein respondió aclarando que el espacio es curvo, y no solo el espacio, sino el espacio-tiempo, es decir estos cambian con el efecto de un campo gravitatorio. El espacio-tiempo curvo crea la fuerza gravitacional. Los cuerpos viajan en geodésicas de espacio-tiempo curvo. La curvatura del espacio-tiempo proporciona la explicación de la gravedad:


$$\ddot{x}^\mu = -\Gamma_{\sigma\rho}^\mu \dot{x}^\sigma \dot{x}^\rho$$

Aquí  $\Gamma = \Gamma(g_{\mu\nu}(x), \partial_\sigma g_{\mu\nu})$ . Y también:

$$R_{\sigma\tau\nu}^\mu = f(g_{\mu\nu}(x), \partial_\sigma g_{\mu\nu}(x), \partial_{\sigma\tau} g_{\mu\nu}(x))$$

## 26. Lección 26. La armonía de las esferas.

### 26.1. Descripción de la lección

 a música de las esferas. Tenkuukai. El logro de la Mecánica Celeste y su unificación con la Mecánica Terrestre.

Objetivos del capítulo son:

- Enunciar un breve informe histórico de l mundo de la Física de Aristóteles, Galileo, Kepler y Newton.
- Diferenciar las concepciones del mundo de de la Física de Aristóteles, Galileo, Kepler, Newton y Einstein.
- Explicar por qué ellos denomina a las Matemáticas el lenguaje de la Física y la Naturaleza.
- Conocer el significado de los principios de conservación y entender su origen profundo como consecuencia de la invariancia y simetría mediante los Teoremas de Noether.
- Explicar por qué algunos dirían que la Mecánica es la base de todo el conocimiento occidental.

### 26.2. Resumen de la lección

Kepler fue quien descubrió cómo funciona el universo y lo que descubrió fue que el universo es muy complicado, las órbitas de los planetas son excéntricas, el sol está desplazado del centro, los planetas aceleran o disminuyen su velocidad mientras giran, etc. Kepler publicó en 1619 “Armonía del Universo” en el que anotó la música de las canciones de cada uno de los planetas. En la actualidad John Rogers y Willy Raps de la universidad de Yale han sintetizado esa música. Algunos de los descubrimientos anteriores de la hermandad Pitagórica son: el teorema sobre los cuadrados de los lados de un triángulo, que fue utilizado más tarde para calcular la distancia que cae la luna en cada segundo, al ir sumando los números impares se obtienen cuadrados perfectos, y sobre todo,

mientras escuchaban la música de las esferas en los cielos, descubrieron las leyes de la armonía musical en la tierra.

$$a^2 + b^2 = h^2$$

Durante milenios, compositores occidentales han basado sus partituras en las armonías pitagóricas, hasta el renacimiento con Vincenzo Galilei quien influyó en su hijo Galileo Galilei (copernicano) que colaboró con Johannes Kepler Galileo Galileo dice sobre el movimiento armónico que cada oscilación de un péndulo tarda la misma cantidad de tiempo, con esto descubrió la fórmula para componer música y el secreto para medir el tiempo con precisión y que si se aplica una pequeña fuerza rítmicamente las oscilaciones pueden crecer hasta el límite, y esto es llamado Principio de resonancia Los filósofos griegos advirtieron que la materia estaba compuesta por átomos. Pasarían muchos años hasta que se descubriera que la materia estaba compuesta por átomos unidos por las energías eléctrica y potencial. Isaac Newton contribuyó con su fórmula más importante:

$$F = ma$$

La ley de movimiento unificó la ciencia de la tierra con la de los cielos. Además, todos los proyectiles en la tierra siguen una parábola y todos los planetas describen una elipse. Nicolás Copérnico dijo que la Tierra ya no es el centro del universo (a diferencia del sistema aristotélico de Ptolomeo).

Se pasa de describir algo en términos fijos del mundo antiguo a una matemática del movimiento gracias a la diferenciación e integración. ACME machines!


$$a_m = \frac{GM}{r^2}$$

Otros principios importantes son el principio de conservación de la energía y el hecho de que la energía cinética y potencial determinan las órbitas de los planetas.



## 27. Lección 27. Más allá del Universo Mecánico.

### 27.1. Descripción de la lección

 La investigación de Más allá del Universo Mecánico comienza con sugestivas cuestiones. Este avance a modo de presentación de la segunda mitad del curso, presenta un mundo lleno de Electricidad y el Magnetismo, como fenómenos inicialmente diferentes pero relacionados. Llega entonces al tema de la Relatividad y la Mecánica Cuántica en pleno siglo XX. Las brillantes ideas y aportaciones de Faraday, Ampère, Maxwell, Einstein, Heisenberg, Bohr y Schrödinger se suman a una parte del Universo cognoscible que va más allá del Universo puramente mecánico de Newton.

Los objetivos del capítulo son presentar los nuevos capítulos de forma sucinta.


### 27.2. Resumen de la lección

Einstein habla sobre el poder de las matemáticas, a través de Levi-Civita y Tullio Regge. El cálculo tensorial era importante pero complicado. Faraday imaginó que una fuerza de  $1/r^2$  debe ser aplicada por algo que irradia hacia afuera como la luz del sol viendo incluso más parada y se imagina unas líneas de fuerza partiendo de cargas positivas y terminan en cargas negativas. Pero fue James Clerk Maxwell quien transformó la teoría de Faraday en la teoría del campo electromagnético. Michael Faraday había inventado un aparato que daba vueltas debido al campo magnético creado por una corriente eléctrica, pero al hacerlo fue mucho más lejos y pensó que si una corriente eléctrica crea magnetismo no podría también un campo magnético crear electricidad. A modo de respuesta descubrió la inducción electromagnética. Tesla al contrario de Thomas Edison pensaba que la corriente alterna iba a impulsar la edad moderna industrial. El experimento de Michelson y Morley fue diseñado para detectar el movimiento de la tierra a través del éter luminoso, un

medio que era considerado portador de la luz desde el sol a la tierra. Pero no encontró el movimiento de la Tierra. Lo que sí hizo fue darse cuenta de que todos los observadores medirán la misma velocidad de la luz independientemente de su propio movimiento. Por otro lado, en la relatividad de Einstein los acontecimientos que son simultáneos para un observador pueden ocurrir en instantes diferentes para otro. Así surgió una nueva ciencia que será llamada mecánica cuántica.

## 28. Lección 28. Electricidad estática o electrostática.

### 28.1. Descripción de la lección

 ara entender la Naturaleza de la materia, hay que tender primero la electricidad, y para entender la Naturaleza de la electricidad, primero hay que entender la materia. Los electricistas del s. XVIII no entendían ni lo uno ni lo otro, pero sabían lo que despertaba el interés del público y cómo montar un espectáculo electrificante. La Ley de Coulomb y los principios de la electricidad estática o Electrostática se presentan aquí.

- Identificar y comentar los fenómenos eléctricos.
- Explicar la electrización por frotamiento, por inducción y por contacto.
- Interpretar la Ley de Coulomb y usarla para encontrar la fuerza ejercida por una carga puntual sobre otra.
- Diferenciar entre aislante y conductor. Concepto de semiconductor. Superconductores. Aislantes y superconductores topológicos. Nuevos materiales.
- Explicar la ACR, la atracción, el contacto y la repulsión.
- Describir los principios de un generador electrostático.

- Enunciar el principio de cuantización de la carga eléctrica.

## 28.2. Resumen de la lección

Benjamin Franklin descubrió que algo llamado carga eléctrica era la causa de la fuerza eléctrica. El experimento que realizó Coulomb sirvió para establecer la relación entre carga y fuerza,. La ley de Coulomb establece lo siguiente:

$$F_e = K_e \frac{Q_1 Q_2}{r^2}$$

$$F_e(\text{total}) = K_C \sum_i \frac{Q q_i}{r_i^2} e_i$$

Además hay dos tipos de carga: positiva y negativa. Según esta ley, las fuerzas ejercidas por cualquier número de cargas positivas y cargas negativas se suman como vectores. La electricidad reside en la materia, por lo que las cargas eléctricas no existen aisladas. Franklin fue el primero en ver la electricidad en términos positivos y negativos, pero en lugar de diferenciar entre distintos tipos de cargas, veía la electricidad como un fluido, y por tanto diferenciaba dependiendo de la cantidad de fluido que un objeto contenía para decir si era positivo o negativo. El centro de un átomo está compuesto por neutrones (carga neutra) y protones (carga +), el núcleo está rodeado por electrones (carga -), y en total hay el mismo número de protones que de electrones de modo que sean neutros. Pero a veces no son neutros, existen los iones. Los metales tienen diversas propiedades: son maleables y dúctiles, el brillo, y la conductividad (capacidad de conducir electricidad)

## 29. Lección 29. El campo eléctrico

### 29.1. Descripción de la lección



La visión de Michael Faraday sobre las líneas de fuerza significó el primer paso hacia la moderna idea de campos de fuerzas. Campos eléctricos de cargas estáticas, la Ley de Gauss y la

conservación del flujo se presentan (también se comentará su versión gravitacional por analogía).

Los objetivos del capítulo son:

- Trazar líneas de fuerzas de sencillos sistemas de cargas y obtener información sobre la dirección y la fuerza de un campo eléctrico, partiendo de tal diagrama.
- Calcular el campo eléctrico generado por cargas puntuales y distribuciones continuas de carga, para casos sencillos.
- Definir el concepto de flujo de un campo y la ley  $1/r^2$  como consecuencia de la conservación del flujo.
- Interpretar la ley de Gauss y usarla para encontrar el campo eléctrico producido por varias distribuciones simétricas de cargas.
- Conocer que una distribución de carga en armaduras esféricas simétricas produce un campo eléctrico nulo dentro de la armadura y un campo exterior a la armadura que es igual al producido por una carga puntual en el centro geométrico de la armadura.
- Explicar por qué el campo eléctrico dentro de un conductor es cero o nulo.

## 29.2. Resumen de la lección

Faraday comenzó a investigar por qué la aguja de una brújula se colocaba en posición perpendicular a una corriente eléctrica. Vio que en las proximidades de una carga eléctrica, una pequeña carga de prueba experimenta una fuerza, como si se debiera sólo a una carga, el diseño de las fuerzas detectadas en la carga de prueba es simple y es más complejo en el caso de dos cargas opuestas o para dos cargas del mismo signo. Incluso si la carga de prueba no está ahí para detectarlo se puede suponer que el esquema de fuerzas existe en cualquier lugar del espacio, esa es la

esencia del concepto de campo. El concepto de campo también se puede explicar matemáticamente:

$$F = qE$$

Notar la semejanza con las leyes

$$F_g = -G_N \frac{Mm}{r^2} e_r$$

$$F_e = K_C \frac{Qq}{r^2} e_r$$

$$F_m = K_m \frac{P_1 P_2}{r^2} e_r$$

¿Por qué el inverso del cuadrado de la distancia? Se asemeja a una disminución de intensidad luminosa radial

$$I \propto 1/r^2$$

Es como un flujo luminoso el flujo de los campos eléctricos y gravitacional:

$$\phi_g = \int_S g = \oint g = \oiint \vec{g} \cdot d\vec{S} = -4\pi G_N M$$


$$\phi_E = \int_S E = \oint E = \oiint \vec{E} \cdot d\vec{S} = 4\pi K_C Q = Q/\epsilon_0$$

Para Faraday, la fuerza  $1/r^2$  entre cargas eléctricas sugería que la fuerza debía ser aplicada por algo que se expandía hacia afuera desde las cargas, que podrían ser tubos o líneas. Estas fluyen con suavidad por el espacio sin cruzarse ni enredarse. La fuerza proviene de la intensidad de líneas sin tener en cuenta la situación de las cargas que las originan. Para Faraday, el flujo se representa por todas las líneas de fuerza que atraviesan cualquier superficie. Posteriormente, las matemáticas de Gauss serían un complemento a las teorías de Faraday, originando una ley que establece que para cualquier superficie cerrada el flujo total es proporcional a la carga eléctrica neta encerrada en su interior si en el interior de una superficie no hay carga neta cualquier flujo positivo hacia el exterior de ella debe estar equilibrado con una cantidad igual del

flujo hacia el interior o negativo. Esta ley se puede aplicar también a campos gravitatorios y magnéticos. Un campo eléctrico que atraviesa un conductor hace que fluyan electrones hasta que se acumulen en la superficie, repeliendo el movimiento de nuevos electrones, pero eso significa que el campo eléctrico en el interior de cualquier conductor llega a ser cero cuando se establece el equilibrio electrostático. El campo eléctrico exterior es el mismo tanto si la carga se distribuye uniformemente en una esfera como si se concentra en un punto en el centro.

## 30. Lección 30. Potencial y Capacidad.

### 30.1. Descripción de la lección

 enjamin Franklin, el gran científico estadounidense del siglo XVII, que luego se dedicó a la poesía, fue el primero en proponer la botella de Leyden. Bautizó con nombres de carga positiva y negativa a los tipos de carga eléctrica (duals), e inventó el condensador de cargas de placas plano-paralelas. Potencial eléctrico, potencial de conductores cargados y superficies equipotenciales y capacidad se definen en este tema.

Los objetivos del capítulo son:

- Trazar un esquema de la superficies equipotenciales dado el campo eléctrico de una región.
- Distinguir entre potencial eléctrico y energía potencial eléctrica.
- Definir capacidad y calcular la capacidad de un condensador de láminas paralelas.
- Interpretar la densidad de energía de un campo eléctrico y comentar el significado del concepto de energía del campo electrostático.
- Calcular la energía potencial electrostática de un sistema de cargas puntuales.

- Obtener el valor del potencial eléctrico de varias distribuciones de cargas.

## 30.2. Resumen de la lección

Franklin fue el primero en publicar una teoría sobre la carga eléctrica: en la proximidad de una carga positiva, la fuerza eléctrica repele a una carga de prueba positiva, es necesaria una fuerza exterior para aproximar más la carga realizando trabajo contra la fuerza eléctrica. Se obtiene un trabajo positivo si el movimiento tiene una componente opuesta a la fuerza eléctrica, y un trabajo negativo si tiene una componente a lo largo de la fuerza, y por otro lado no se obtiene ningún trabajo en absoluto si el movimiento es perpendicular a la fuerza eléctrica. El trabajo neto se calcula:

$$\Delta W = - \int \vec{F} \cdot d\vec{r} = \Delta U$$

y eso es igual a  $\Delta U$ . Por otro lado, tenemos el voltaje:

$$\Delta V = - \int \vec{E} \cdot d\vec{r}$$

Los conductores cargados eléctricamente crean campos eléctricos fuera de ellos mismos pero en su interior no hay campo en absoluto y como entre dos piezas de metal cargadas eléctricamente con cargas de signo contrario hay campo eléctrico entre ellas tiene que haber una diferencia de potencial, pero al no haber campo en el interior del potencial es el mismo en cualquier lugar del metal. La diferencia de potencial entre dos piezas de metal depende de cuánta carga neta tenga cada una, la carga negativa reduce el potencial y la positiva lo aumenta. Cuando se conecta a una pila entre dos piezas de metal la carga fluye de una a otra hasta que la diferencia de potencial entre ambas sea igual al voltaje de la pila, eso crea un campo eléctrico entre ellas:


$$q = CV$$

$$\Delta q = C\Delta V$$

Franklin fue el primero en comprender cómo funciona un condensador, gracias al uso de las botellas de Leyden. Se dio cuenta de que el fluido eléctrico no se creaba ni se destruía simplemente fluía de un lugar a otro. Dos piezas cualesquiera de metal pueden formar un condensador sin importar su forma. Observó que si se situaban dos condensadores en paralelo se creaba una capacidad mayor.

## 31. Lección 31. Voltaje, energía y fuerza.

### 31.1. Descripción de la lección

n un mundo de cargas y corrientes eléctricas, campos, fuerzas y voltajes eléctricos, ¿qué pasa en realidad??Cuándo resulta la electricidad peligrosa, inofensiva, espectacular o útil? El potencial eléctrico y su gradiente, los potenciales eléctricos en los átomos y en los metales, la energía eléctrica y por qué salta una chispa se tratan en este episodio.

Los objetivos del capítulo son:

- Definir el concepto de gradiente.
- Interpretar la relación gráfica entre línea de fuerza y superficies equipotenciales en el campo eléctrico.
- conocer las magnitudes promedio de voltajes y fuerzas en la materia.
- Explicar el funcionamiento de un pararrayos.
- Definir la unidad de energía eléctrica, el voltio, y su conversión a julios.
- Explicar por qué se producen las chispas o los rayos (relámpagos).



## 31.2. Resumen de la lección

El voltaje o potencial eléctrico es una medida de la energía potencial de una carga eléctrica.

$$V = - \int \vec{E} \cdot d\vec{r}$$

$$V_e = K_C \frac{Q}{r}$$


$$U_e = K_C \frac{Qq}{r}$$

Se explica también el concepto de línea y superficie equipotencial. Cuanta más pendiente haya más dura es la ascensión, si el potencial no cambia no se necesita ningún trabajo, y si el potencial decrece el campo es cuesta abajo todo el camino. En esta analogía el potencial eléctrico es ascenso y el campo eléctrico es la pendiente hacia abajo. Una zona de potencial eléctrico también puede ser constante, y como el potencial eléctrico es el mismo en cualquier punto de la superficie de un metal el campo eléctrico y siempre perpendicular a esa superficie. El potencial eléctrico es la capacidad de producir trabajo haciendo fuego de cargas eléctricas sin importar a donde vayan. El potencial se mide en voltios. En cada átomo la fuerza eléctrica une electrones cargados negativamente a un núcleo positivo, el núcleo es tan pequeño que se puede considerar como una carga puntual positiva. Cada electrón tiene justamente la carga negativa suficiente para equilibrar la carga positiva de un protón. En los átomos, los electrones están ligados por energía del orden de unos pocos electrones-voltio. La distancia desde el núcleo hasta el electrón más exterior es siempre de 1 Angstrom que equivale a  $10^{-8}cm$ . El electrón más exterior detecta aproximadamente el campo eléctrico y el potencial eléctrico debido a un protón situado a  $1\text{\AA}$  de distancia. Su potencial eléctrico alcanza sólo unos pocos voltios y al ser su carga negativa, también lo es su energía potencial, medida en unas unidades llamadas electrón voltios. Esos pocos eV menos una pequeña energía cinética es lo que hay que vencer para desprender un electrón de un átomo. La luz del rayo se forma cuando hay una chispa y las moléculas de aire se ionizan momentáneamente dejando un gas de iones moleculares positivos y electrones

negativos llamado plasma. Muy rápidamente la fuerza eléctrica entre los iones y electrones hace que se vuelvan a combinar formando materia neutra desprendiendo su exceso de energía en forma de luz. Franklin creó entonces el pararrayos. La energía eléctrica por otra parte sube con el voltaje y con la carga.

## 32. Lección 32. La pila o batería eléctrica.

### 32.1. Descripción de la lección

 a electricidad pasó de ser una mera curiosidad a constituir una preocupación fundamental de la Ciencia y la Tecnología en el siglo XIX, cuando Alejandro Volta inventó la pila eléctrica. Las pilas utilizan como fuente las propiedades internas de diferentes metales para producir energía eléctrica.

Los objetivos del capítulo son:

- Interpretar los potenciales externos e internos de los metales.
- Explicar el trabajo del proceso en el interior de una pila eléctrica.
- Explicar los diferentes tipos de pilas en la actualidad.


### 32.2. Resumen de la lección

Alessandro Volta (voltio) creó la primera batería en el año 1800 Giuseppe Galvani (voltímetro) creó la botella de Leiden o el condensador. Un ión positivo (átomo que ha perdido 1 electrón) crea energía potencial de atracción para ese electrón que falta. El trabajo de extracción es la energía que necesita un electrón para escapar de un metal En 1775 Volta construyó el electro foro perpetuo (perpetuo depósito de electricidad). Este era capaz de retener un ilimitado número de cargas inducidas. Galvani descubrió que los impulsos nerviosos son realmente señales eléctricas. Galvani pensaba que se trataba de electricidad animal, pero Volta pensó que se trataba simplemente de electricidad ordinaria. Cuando se

ponen en contacto dos metales, desaparece la barrera en la superficie de contacto y los electrones quedan en libertad para fluir hacia el metal cuya energía total sea menor. Con esto un metal queda con carga negativa y el otro con positiva creando una diferencia de potencial electrostático que finalmente equilibra la diferencia de energía y se detiene el flujo. Si tenemos dos metales diferentes, cargados eléctricamente por contacto y colocados en un electrolito, se produce un flujo de electrones hacia el que los necesita, hasta que se llega a un estado eléctricamente neutro. Si de nuevo entraran en contacto los metales, se crearía una nueva corriente de electrones debido a la diferencia que existe entre sus potenciales de extracción, pero ahora debido al electrolito el flujo no se detiene, los electrones seguirán fluyendo de un metal a otro y serán reemplazados continuamente por los iones de la solución hasta que toda la energía química de la solución se haya consumido. En resumen, la energía química se convierte en energía eléctrica hasta que los elementos químicos se consumen y la batería se agota. La composición básica de una batería eléctrica son dos piezas de metales diferentes en una solución electrónica, pero eso no quiere decir que sea eficiente. Posteriormente Raymond plante consiguió hacer una batería con dos electrodos del mismo metal plomo en una solución débil de ácido sulfúrico

## 33. Lección 33. Circuitos eléctricos.

### 33.1. Descripción de la lección

 l diseño y análisis del flujo de corrientes en circuitos en serio y en paralelo, con resistencias y condensadores no depende solamente de las conocidas leyes de Ohm y Kirchhoff, sino también de la menos conocida obra de Charles Wheatstone.

Los objetivos del capítulo son:

- Definir los conceptos de corriente eléctrica e intensidad de corriente eléctrica.
- Interpretar la Ley de Ohm y distinguir entre ella y la definición de

resistencia.

- Conocer la relación general entre diferencia de potencial, intensidad de corriente y potencia.
- Identificar elementos de circuitos en serie y paralelo: condensadores o bobinas, inductores, resistencias.
- Aplicar las reglas de Kirchhoff y usarlas para analizar circuitos elementales de corriente continua.
- Conocer la constante temporal de un circuito RC y RLC, y describir la carga en el condensador y la intensidad de corriente como función del tiempo de carga y descarga de un condensador.
- Estado actual de la teoría de circuitos. El memristor y otros memcircuitos. Sistemas memristivos y memcircuitos. Computación neuromórfica e IA. La Tabla Periódica de los memcircuitos de L. O. Chua.

## 33.2. Resumen de la lección

Inventores tales como Thomas Edison encontraron la fórmula de manipular las corrientes eléctricas para iluminar las lámparas de las casas y llevar puntos y rayas a muy largas distancias a través de alambres. También crearon las formas de generar y distribuir electricidad por redes cada vez más complejas. El flujo de electricidad hace posible la luz, cuánta luz depende de la intensidad de corriente que se mide en amperios ( $1A = 1C/1s$ ). El que se puede mantener la intensidad de la señal si se aumenta el voltaje en proporción a la distancia fue verificado por Winston (Ley de Ohm).

$$R = \rho L/A$$

Para hacer fluir una corriente por un material conductor se necesita una diferencia de potencial dicha diferencia de potencial es siempre proporcional a la intensidad de la corriente la constante de proporcionalidad se

llama resistencia. La ley de Ohm:

$$V = IR$$

La intensidad de la corriente eléctrica que pasa a través de una resistencia depende de la caída de tensión a través de ella de su sección, de su longitud y del material de que esté hecha. De no ser por la resistencia, los electrones en un campo eléctrico acelerarían libremente, pero en la realidad se mueven con una velocidad media constante. Cuando no hay campo eléctrico en su interior ni hay diferencia de potencial de un extremo al otro, el conductor está en un equilibrio electrostático, pero si una batería hiciera circular una corriente eléctrica ese equilibrio se destruiría y se crearía un campo eléctrico en el interior del conductor. Cuando la corriente pasa por una resistencia:

$$E = qV$$

La cantidad de calor por unidad de tiempo o potencia consumida:

$$P = IV = I^2R$$

$$1W = 1A \cdot 1V$$

Los elementos comunes en los circuitos eléctricos obedecen unas mismas reglas sencillas llamadas leyes de Kirchhoff:

- Conservación de la carga: cuando una corriente se divide en dos o viceversa la suma de las intensidades de las corrientes que llegan al nudo es igual a la suma de las intensidades de las corrientes que salen de él.

$$\sum_n I_i = 0$$


- Conservación de la energía: una carga eléctrica que recorre un circuito completo ni pierde ni gana energía.

$$\sum_i V_i = R_i I_i$$

$$\sum_i \Delta V_i = 0$$

## 34. Lección 34. Imanes y magnetismo.

### 34.1. Descripción de la lección

 illiam Gilbert, médico profesional y personal por designación de la reina Isabel I de Inglaterra, descubrió que la Tierra se comporta como un gigantesco imán. El magnetismo como fenómeno natural, el comportamiento de los materiales magnéticos, y el movimiento de las partículas cargadas en un campo magnético se analizan en este tema.

Los objetivos del capítulo son:

- Calcular la fuerza magnética sobre un conductor eléctrico y sobre una carga en movimiento en el seno de un campo magnético.
- Explicar el concepto de dominios en materiales magnéticos.
- Definir el concepto de flujo magnético y comentar el significado de que el flujo del campo magnético neto fuera de una superficie cerrada sea nulo.
- Calcular el momento magnético de una espira con una intensidad de corriente y el par ejercido sobre la espira por el campo magnético.
- Reconocer el magnetismo de la Tierra.
- Los monopolos magnéticos y Dirac.

### 34.2. Resumen de la lección

Gilbert descubrió numerosas cosas sobre el magnetismo: se puede destruir el magnetismo de un material magnético calentándolo, se puede aumentar el magnetismo de un imán permanente rozándolo con otro y que la Tierra se comporta como un imán gigante. Debido a esto se descubrió que la mayor parte del universo es como una gran familia de

imanes, y por lo tanto se tiene un efecto sobre los demás. Ecuación de la fuerza entre polos magnéticos:

$$F_m = \frac{p_1 p_2}{r^2} e_r$$

Los polos magnéticos aparecen en dos formas llamadas norte y sur. Los polos opuestos se atraen y los contrarios se repelen. Los polos magnéticos siempre se presentan de dos en dos. Sin embargo hay teorías que dicen que si puede existir un solo polo por sí solo, y este es llamado monopolos (resultado de la explosión del big bang). El campo magnético de un imán con sus dos polos es semejante en su forma el campo eléctrico producido por dos cargas iguales y opuestas. En cualquier campo magnético un imán experimenta fuerzas iguales y opuestas en sus polos, de manera que tiende a alinearse con el campo. Ley de Gauss (campo eléctrico):

$$\phi_E = \oiint \vec{E} \cdot d\vec{S} = Q/\epsilon_0$$

Flujo magnético:

$$\phi_m = \oiint \vec{B} \cdot d\vec{S} = 0$$

Pero como todos los imanes son dipolos, el flujo magnético total a través de cualquier superficie cerrada es siempre cero. Hay materiales magnéticos y otros no. La fuerza magnética de una carga en movimiento está dada por la fuerza de Lorentz


$$F_m = q\vec{v} \times \vec{B}$$

Las cargas en movimiento por campos magnéticos, describen movimientos circulares o helicoidales. Se habla del origen de auroras y del campo de Van Allen. El momento magnético de una espira:

$$\vec{m} = NIA\vec{e}_\perp$$

## 35. Lección 35. Campos magnéticos.

### 35.1. Descripción de la lección

e puede pensar que todo campo magnético es producido por una corriente eléctrica. La relación entre una intensidad de corriente y el campo magnético que produce es, desde el punto de vista geométrico, muy particular y tiene cierta dificultad su asimilación por su complejidad matemática. La Ley de Biot-Sarvart, la fuerza entre corrientes eléctricas y la Ley de Ampère centran esta lección.

Los objetivos del capítulo son:

- Interpretar la Ley de Biot-Sarvart y usarla para calcular el campo magnético de una corriente en un conductor rectilíneo y por una corriente circular, una espira circular.
- Definir la Ley de Ampère y comentar sus usos y limitaciones.
- Calcular las fuerzas entre corrientes eléctricas.
- Enumerar las diferentes unidades de intensidad de campo magnético.
- Reconocer que el campo magnético no puede producir trabajo.

### 35.2. Resumen de la lección

En 1820 Hans Christian Ørsted descubrió que las corrientes eléctricas producen fuerzas magnéticas y que esas fuerzas hacen que los imanes apunten siempre en dirección perpendicular a la dirección de la corriente. Ampère desarrolló las consecuencias del experimento de Oersted. Si pudiera existir un pequeño segmento de corriente eléctrica, produciría un campo magnético proporcional a la inversa de la distancia. La dirección del campo está relacionada con la dirección de la corriente por la regla de la mano derecha o regla del producto vectorial, y el campo será mayor cuando el segmento de corriente y el vector distancia sean perpendiculares. El campo magnético real sería la sumando (integral) la



contribuciones de cada segmento. El campo debido a una corriente que circula por un hilo rectilíneo suficientemente largo es siempre perpendicular al mismo y disminuye inversamente con la primera potencia de la distancia al hilo, el resultado neto es un campo que se mueve en circunferencias concéntricas con el hilo, y es constante en cada circunferencia. Si el hilo se curva formando un lazo la corriente que circula por el produce el campo de un dipolo. Una bobina en forma de hélice o solenoide produce una corriente muy parecida a la de un imán en forma de barra. Si el solenoide se junta en forma de circunferencia se denomina toroide y el campo magnético estaría contenido en el interior de la bobina. En una fuerza entre dos hilos conductores: las corrientes que circulan en la misma dirección se atraen y en direcciones opuestas se repelen. La unidad de la corriente eléctrica se define en términos de la fuerza entre dos conductores (Amperio). La electrodinámica es la teoría de que el magnetismo es electricidad en movimiento. Ampère también pensó que debía haber corrientes dentro de los imanes, de forma que cada átomo de un material magnético tuviera una carga eléctrica circulando que produce un campo magnético. Ampère y Faraday trabajaron en paralelo en el mismo campo pero fueron por caminos diferentes. En un campo eléctrico no se realiza ningún trabajo cuando una carga se mueve a lo largo de cualquier trayectoria cerrada. Ley de Ampère para corrientes:

$$\oint \vec{B} \cdot d\vec{r} = \mu_0 I$$

$$\Delta B = K_m \frac{I}{r^2} \Delta s \vec{e}_r$$

$$\vec{B} = K_m \int \frac{I d\vec{r} \times \vec{e}_r}{r^2}$$

Para un hilo infinito

$$\vec{B} = K_m \frac{2I}{r} \vec{e}_\theta$$

o bien

$$\vec{B}_\varphi = \frac{\mu_0 I}{2\pi r} \vec{e}_\varphi$$

de donde se tiene que

$$K_m = \frac{\mu_0}{4\pi}$$

## 36. Lección 36. Campos vectoriales y análogos hidrodinámicos.

### 36.1. Descripción de la lección

Al primera vista, sustituir la vieja idea de acción a distancia por la nueva concepción de campo de fuerza parece ser un ejercicio de semántica y abstracto poco útil; pero no lo es, porque los campos tienen propiedades de definición propias, ideales para el estudio científico. Los campos eléctricos, por ejemplo, son diferentes en su forma de los campos magnéticos, y ambos se pueden entender mejor por su analogía con los campos de flujo de fluidos.

Los objetivos del capítulo son:

- Definir los conceptos de circulación.
- Relacionar flujo y circulación eléctrico y magnético con los campos de velocidades de un fluido.
- Explicar las diferencias entre fuentes y sumideros.
- Comentar las analogías entre energías y fuerzas para campos vectoriales.

### 36.2. Resumen de la lección

$$\oiint \vec{E} \cdot d\vec{S} = Q/\epsilon_0$$

$$\oiint \vec{B} \cdot d\vec{S} = 0$$

$$\oint \vec{E} \cdot d\vec{r} = 0 = -\Delta V$$

$$\oint \vec{B} \cdot d\vec{r} = \mu_0 I$$

¿Qué pasa con los campos de corrientes de fluidos de agua?

$$\oiint \vec{v} \cdot d\vec{S} = ?$$

$$\oint \vec{v} \cdot d\vec{r} = ?$$

$$\oint \vec{v} \times d\vec{r} = ?$$

$$\oint \vec{v} \times d\vec{S} = ?$$

El estudio de las propiedades de los campos comenzó con la ciencia de la hidrodinámica. Es innegable que el agua se mueve, en el interior de cualquier masa de agua hay una determinada velocidad en cada punto del espacio y en cada instante de tiempo, y como la velocidad es una magnitud vectorial se concluye que la corriente de agua sin importar hacia donde fluía puede ser representada por un conjunto de vectores formando una cierta configuración. Flujo es la cantidad total de agua que pasa por un elemento de área en una cantidad de tiempo dada. Además, el flujo depende del ángulo entre el campo de corriente y el elemento de área. En el agua el flujo saliente de una superficie cerrada es siempre cero, al igual que en un campo magnético, y a diferencia del campo eléctrico, que es como el flujo de la luz del Sol. A medida que se acerca al eje central del recipiente, cada partícula de agua gira cada vez más rápidamente hasta que el agua irrumpe por el agujero en el centro del vórtice. Como cada partícula de agua conserva el momento cinético, cuando gira hacia adentro hacia del vórtice la configuración básica es un conjunto de circunferencia de velocidad constante:

$$v = \frac{L}{mR} \hat{\theta}$$

El vórtice es el origen del movimiento del fluido exactamente en el mismo sentido en que la corriente eléctrica es el origen de los campos magnéticos.

$$\oint \vec{v} \cdot d\vec{r} = 2\pi \frac{L}{M} = k$$

Para cualquier tipo de campo vectorial nos podemos hacer las mismas preguntas: si puede tener circulación y si puede fluir radialmente hacia o desde un punto. Los campos magnéticos tienen circulación, pero nunca convergen al punto. Por otra parte los campos eléctricos irradian desde una carga puntual pero nunca tienen circulación. Los tres campos vectoriales tienen algo más que la misma forma y figura tienen también energía.

$$\frac{E}{V} = \frac{1}{2} \rho v^2$$

Por esta razón, la energía del campo eléctrico es


$$\frac{E}{V} = \frac{1}{2} \epsilon_0 E^2$$

La densidad de energía magnética es similar

$$\frac{E}{V} = \frac{B^2}{2\mu_0}$$

## 37. Lección 37. Inducción electromagnética.

### 37.1. Descripción de la lección

 después de descubrimiento, en 1820, de Oersted que las corrientes eléctricas producen campos magnéticos (por serendipia o serendipiedad), era obvio que de alguna manera el magnetismo podría producir corrientes eléctricas. El descubrimiento de la inducción electromagnética de Michael Faraday y Joseph Henry, en 1831, fue uno de los más importantes hallazgos del siglo XIX, que pervive en consecuencias hasta nuestros días. Desde el punto de vista científico y

tecnológico, le debemos mucho a Faraday y Maxwell, porque ellos fueron los autores últimos que indicaron las formas en que se puede generar actualmente electricidad o energía eléctrica.

Los objetivos del capítulo son:

- Interpretar la Ley de Faraday y usarla para encontrar la fuerza electromagnética inducida por un flujo magnético cambiante.
- Enunciar la Ley de Lenz y usarla para encontrar la dirección de la corriente inducida en distintas aplicaciones de la Ley de Faraday.
- Definir la autoinducción y la inducción mutua.
- Identificar la energía almacenada en un campo magnético y la densidad de energía magnética.
- Aplicar las Leyes de Kirchhoff para obtener la ecuación diferencial de un circuito de corriente inducida y discutir el comportamiento de la solución.

## 37.2. Resumen de la lección

Faraday se vio motivado a desterrar un nuevo eslabón entre dos de las fuerzas fundamentales de la física: el magnetismo y la electricidad. Y su búsqueda comenzó con el descubrimiento de Hans Christian Oersted de que una corriente eléctrica en movimiento crea un campo magnético. Entonces inventó un dispositivo que se mantenía dando vueltas siguiendo el campo magnético circular creado por una corriente. Pero, si una corriente eléctrica podía crear un campo magnético, ¿podría un campo magnético crear una corriente eléctrica? Faraday encontró la respuesta, cuando conectaba una batería a una bobina se generaba una corriente de muy corta duración en otra bobina, y en el proceso descubrió el proceso de Inducción electromagnética. Los campos magnéticos ejercen fuerzas sobre las cargas eléctricas, pero sólo si las cargas están en movimiento. Cualquier método que modificará el campo magnético a través de un circuito produciría una corriente. Al cambiar de orientación una espiral de alambre en un campo magnético constante, el flujo

a través de la espiral cambia continuamente y la diferencia de potencial resultante y la intensidad de corriente son soldadas yendo primero en un sentido y luego en el otro.

$$\varepsilon = -\frac{d\phi_m}{dt}$$

$$V = -\int \vec{E} \cdot d\vec{r}$$

Siempre que varía el flujo magnético a través de una vida de una espira de alambre, circula corriente a lo largo de ella, la corriente circula en un sentido si el flujo decrece y en el otro sentido cuando el flujo aumenta. Pero la corriente inducida en el alambre crea a su vez un flujo propio cuya dirección depende de la dirección de la corriente. El flujo creado por la corriente inducida siempre se opone a la variación del flujo externo, esta regla es conocida como ley de Lenz. La autoinducción ocurre cuando una corriente eléctrica en cualquier circuito crea un campo magnético que en cualquier momento que cambie induce una corriente en el propio circuito que se opone a ese cambio.

$$\varepsilon = -\frac{d\phi_m}{dt} \frac{dI}{dI} = -\frac{d\phi_m}{dI} \frac{dI}{dt} = -L \frac{dI}{dt}$$


Ecuación de Faraday y de Maxwell:

$$\varepsilon = \oint \vec{E} \cdot d\vec{r} = -\frac{d}{dt} \iint \vec{B} \cdot d\vec{S}$$

Esta fue una contribución extraordinaria al electromagnetismo.

## 38. Lección 38. Corriente alterna.

### 38.1. Descripción de la lección

a inducción electromagnética hace que generar corriente alterna sea algo fácil y natural. El uso de transformadores hace posible distribuir la corriente alterna a largas distancias. Aunque Nicola Tesla lo entendió, Thomas Edison no, y por ello el

tema tiene su historia. Los circuitos de corriente alterna obedecen a una ecuación diferencial idéntica a la resonancia de un oscilador armónico.

Los objetivos del capítulo son:

- Definir la corriente S.M.R. y relacionarla con la corriente máxima de un circuito de CA.
- Señalar la relación de fases entre voltajes e intensidad en los elementos de un circuito de RLC.
- Comentar la relación entre un circuito RLC y un oscilador armónico.
- Describir en qué se consiste un transformador eléctrico de baja y alta tensión, así como su importancia para el transporte de la energía eléctrica.
- Analizar la relación existente entre voltaje y transmisión de potencia.
- Determinar las condiciones de resonancia de un circuito RLC y hacer un esquema de la potencia frente a la frecuencia angular.

## 38.2. Resumen de la lección

Se genera una corriente alterna haciendo girar una espira contra fuerzas magnéticas. Para hacer generar la espira se puede utilizar la energía de una máquina térmica o energía hidroeléctrica. La corriente alterna es una corriente oscilante, la produce un voltaje que sube y que cae, positiva y negativa como una onda senoidal. La corriente continua es un chorro constante de electricidad, idealmente su voltaje es constante e iguala la intensidad de corriente, también constante, multiplicada por la resistencia efectiva del circuito. Incluso los circuitos más simples la corriente alterna de tres la podía estar llena de sorpresas, por ejemplo consideramos un simple circuito constituido por una fuente de tensión alterna, un condensador y una autoinducción, entonces:

$$\varepsilon_0 \sin \omega t = L \frac{dI}{dt} + \frac{Q}{C}$$

$$\varepsilon_0 \sin \omega t = L \frac{d^2 Q}{dt^2} + \frac{Q}{C}$$

Analogía mecánica:

$$F_0 \sin \omega t = m \frac{d^2 x}{dt^2} + kx$$

$$F = m \frac{d^2 x}{dt^2}$$

$$V = L \frac{d^2 Q}{dt^2}$$

Resistencia:

$$P = IV = I^2 R$$

En un circuito de corriente alterna incluso una pequeña oscilación de la tensión puede causar que circule una asombrosa cantidad de carga eléctrica. Un condensador se opone al cambio de carga positiva o negativa lo mismo que un muelle se opone a ser estirado o comprimido. Cuando se aplica una tensión a una autoinducción, pasa un cierto tiempo antes de que la corriente se ponga en movimiento y necesita un cierto tiempo antes de pararse de nuevo, de modo que una autoinducción se opone al cambio en la corriente.

## 39. Lección 39. Ecuaciones de Maxwell.

### 39.1. Descripción de la lección

Desde hacia 1860, todas las piezas del rompecabezas del magnetismo y la electricidad habían sido encajadas, excepto una. La última pieza, descubierta por James Clerk Maxwell y denominada (desafortunadamente) corriente de desplazamiento, era justo lo que se necesitaba para producir ondas electromagnéticas llamadas luz. Que la luz se descubriera era una onda electromagnética por la síntesis electromagnética de Maxwell fue sin duda el descubrimiento más revolucionario al final de la unificación de la electricidad y el magnetismo en el siglo XIX, quizás sorprendete e inesperado.

Los objetivos del capítulo son:



- Interpretar las ecuaciones de Maxwell y discutir la base experimental de cada una de ellas.
- Definir, según Maxwell, corriente de desplazamiento y comentar su significado.
- Sacar la conclusión de que las ecuaciones de Maxwell revelan que la luz es una onda electromagnética.
- Enunciar la expresión de la velocidad de la luz de una onda electromagnética en términos de corriente magnética y eléctrica.  $c^2 = 1/\epsilon_0\mu_0$ .
- Comentar la simetría de las ecuaciones de Maxwell y sus asimetrías.
- Analizar la importancia de las ecuaciones de Maxwell en la sociedad tecnológica moderna.
- Escribir de diferentes formas matemáticas las ecuaciones de Maxwell: diferencial, integral, relativista, cuaterniónica, octoniónica, álgebra geométrica y formas diferenciales o tensorial.
- Términos de monopolo y axi3n en las ecuaciones de Maxwell.

## 39.2. Resumen de la lección

En la imaginación de Faraday, las cargas eléctricas estaban ligadas por líneas de fuerza en el espacio vacío. Faraday debió haber imaginado también que cada línea se comportaría como si fuera una hilera de osciladores mecánicos unidos, y en ese caso habría visto una perturbación propagándose a lo largo de la hilera, bien como onda longitudinal o bien como onda transversal. Entre líneas en los libros de Faraday, Maxwell descubriría su teoría electromagnética de la luz. Desde la perspectiva matemática de Maxwell las líneas de Faraday era una expresión de la naturaleza  $1/r^2$  de las fuerzas de la gravedad, de la electricidad y del magnetismo, y al mismo tiempo cada una de ellas tiene una constante específica. Puesto que las fuerzas fundamentales de la electricidad y del

magnetismo no son independientes, la constante eléctrica  $k_e$  y la magnética  $k_m$  deberían estar relacionadas.

$$\frac{K_C}{K_m} = 9 \cdot 10^{16} m^2/s^2 = c^2$$

$$v_s^2 = \frac{P}{\rho}$$

lo que es el cuadrado de la velocidad de la luz y del aire. Maxwell escribió que la única estructura que podía explicar la estabilidad de los anillos de saturno era que estuviesen constituidos por un enjambre de partículas desconectadas. Desarrolló una teoría cinética de los gases según la cual las moléculas de gas son pequeñas partículas elásticas que chocan unas con otras al moverse a diferentes velocidades. A una onda eléctrica le acompaña siempre una magnética. Maxwell se dedicó a examinar las leyes fundamentales de su época, y obtuvo un gran triunfo al encontrar la pieza que faltaba, y lo consiguió observando un condensador. La única manera de estar seguro de que la corriente va a través de esa superficie es imaginando una membrana bordeada por la trayectoria la corriente, entonces deberá pasar a través de la membrana, independientemente de la forma que tenga ésta, pero esto ya no es cierto si la corriente va a un condensador, entonces, aun cuando hay una corriente que circula, no puede haber ninguna a través de la membrana.

$$\epsilon_0 \frac{d}{dt} \iint \vec{E} \cdot d\vec{S} = I$$

La circulación magnética a lo largo de una trayectoria cerrada viene dada no sólo por la corriente eléctrica a través de la superficie bordeada por dicha trayectoria, sino también por el ritmo de cambio del flujo eléctrico a través de dicha superficie. Eso significa que hay ondas en el campo magnético y eso es posible cuando hay variación de flujo eléctrico.

La síntesis de Maxwell de la teoría electromagnética es como sigue. Primero las leyes de Gauss eléctrica y magnética:

$$\oint \vec{E} \cdot d\vec{S} = \frac{Q}{\epsilon_0} = 4\pi K_C Q$$

$$\oint \vec{B} \cdot d\vec{S} = 0$$

Luego la ley de Faraday de la inducción electromagnética:

$$\oint \vec{E} \cdot d\vec{r} = -\frac{d}{dt}\phi_m = -\frac{d}{dt} \iint \vec{B} \cdot \vec{S}$$

Y la ley de Ampère del campo magnético:

$$\oint \vec{B} \cdot d\vec{r} = \mu_0 I$$

Esta forma de la ley de Ampère plantea un problema: que la carga eléctrica no se conserva en un circuito. Maxwell modificó la ley de Ampère para producir la ley más general de la circulación del campo magnético:

$$\oint \vec{B} \cdot d\vec{r} = \mu_0 I + \varepsilon_0 \mu_0 \frac{d}{dt} \iint \vec{E} \cdot d\vec{S}$$

$$\oint \vec{B} \cdot d\vec{r} = \mu_0 \left( I + \varepsilon_0 \frac{d}{dt} \iint \vec{E} \cdot d\vec{S} \right)$$

Comparemos las constantes de fuerzas fundamentales del siglo XIX (gravitación y electricidad y magnetismo):

$$G = 6,674 \cdot 10^{-11} Nm^2/kg^2$$

$$K_C = 9 \cdot 10^9 Nm^2/C^2$$

$$K_m = 10^{-7} N s^2/C^2$$

## 40. Lección 40. Óptica.

### 40.1. Descripción de la lección



a Teoría de Maxwell dice que las ondas electromagnéticas de cualquier longitud de onda, desde las ondas de radio a los rayos gamma, incluida la luz visible, constituyen básicamente

el mismo fenómeno. Muchas de las propiedades de la luz son realmente propiedades de una onda, como la reflexión, la refracción, la difracción o la polarización. La luz normal puede emplearse para vez cosas a escala humana, los rayos X para ver cosas a escala atómica.

Los objetivos del capítulo son:

- Comentar la Naturaleza y propiedades de las diferentes partes del espectro electromagnético.
- Interpretar las Leyes de la Reflexión y Refracción de Snell, y relacionarlas con las propiedades de las ondas.
- Explicar en qué consiste la interferencia y la difracción de las ondas.
- Analizar cómo podemos ver los átomos.
- Instrumentos ópticos. Lentes. Microscopios y Telescopios. Lentes delgadas y dioptrios.
- Concepto de polarización y la ley de Brewster y de Malus de la polarización. Aplicaciones de la polarización.

## 40.2. Resumen de la lección

Las propiedades de la luz se comprenden mejor por el simple hecho de que la luz es una onda, lo que quiere decir que la luz tiene propiedades comunes a todas las ondas, por ejemplo, las ondas pueden extenderse uniformemente hacia afuera a partir de una simple perturbación puntual, pero las ondas debidas a un conjunto de fuentes cuidadosamente coordinadas pueden sumarse hasta formar frentes de ondas planas llamadas ondas planas.

$$v = \lambda f$$

Galileo hizo un uso intensivo del telescopio y a raíz de esto inventó el microscopio compuesto. Las lentes, tanto de gafas como de estos artilugios, están sujetas al principio de la refracción (la refracción ocurre cuando la luz penetra en un medio como el cristal y se desvía). La interferencia

de las ondas puede considerarse como constructiva o como destructiva. Si las ondas al viajar se encuentran entre sí en fase, pueden reforzarse mutuamente creando una onda mayor y produciendo lo que se conoce como interferencia constructiva, pero cuando están desfasadas, pueden destruirse completamente la una nota en otras palabras es la interferencia destructiva. El conjunto de todas las frecuencias/longitudes de onda electromagnéticas se llama espectro electromagnético. La sombra se debe realmente a la interferencia destructiva de la luz que proviene de diferentes partes de la abertura, el resultado de esto es que cuanto más corta es la longitud de onda la luz, emerge en una forma más parecida a un rayo bien definido. La reflexión en un espejo ocurre cuando el ángulo de incidencia es igual al ángulo de reflexión. Las lentes funcionan porque la velocidad de la luz dentro del vidrio es menor que en el aire. Tanto en la reflexión como en la refracción, el principio del mínimo tiempo elige la única dirección a lo largo de la cual los frentes de ondas se reconstruyen por medio de la interferencia constructiva.

Leyes de reflexión y refracción:


$$\theta_i = \theta_r$$

$$n_i \sin \theta_i = n_r \sin \theta_r$$

$$n = \frac{c}{v}$$

## 41. Lección 41. El experimento de Michelson y Morley.

### 41.1. Descripción de la lección

n 1887, en Cleveland, Ohio, la medición exquisitamente preparada, del movimiento de la Tierra a través del éter tuvo como resultado el mayor fiasco experimental de la época y la historia de la Ciencia.

Los objetivos del capítulo son:

- Aplicar el Principio de Galileo para la composición de movimientos a vectores de posición y velocidades.
- Describir el interferómetro de Michelson y explicar sus principios.
- Analizar por qué el experimento de Michelson-Morley habría detectado el movimiento relativo del éter, según la Física newtoniana.
- Identificar el significado del experimento del cero.

## 41.2. Resumen de la lección

Fue diseñado para detectar el movimiento de la tierra a través del éter (éter ideado por Aristóteles y válido hasta el siglo 19 para explicar cómo podía transmitirse la luz a través del espacio vacío entre el sol y la tierra). Michelson y Morley hicieron su experimento y demostraron que no había tal éter de modo que Einstein se vio obligado a inventar la teoría de la relatividad para poder explicar ese resultado. Una onda es una perturbación que pasa a través de un medio de una parte a otra, siguiendo a lo largo de su línea dicho de otra forma, siempre que haya una onda debe haber algo que oscila, pero cuando las ondas luminosas procedentes del sol alcanzan la tierra ¿qué es lo que oscila? hasta el siglo XIX, el éter. La velocidad de cualquier onda depende de la rigidez del medio a través del que pasa, por tanto como la velocidad de la luz es enorme, el éter debía ser algo muy rígido. Por otra parte, los planetas se movían a gran velocidad a través de ese éter, obedeciendo las leyes de Newton, como si no hubiera medio alguno, entonces dijeron que el éter era un fluido perfectamente móvil, sin viscosidad alguna, incomprensible, transparente, que llena todo el espacio. Con todo esto, solo faltaba un experimento que demostrara su existencia. Michelson inventó el interferómetro, utiliza un láser y comienza por dividir un rayo en 2, un espejo en parte transparente y en parte reflectante, envía dos rayos que siguen trayectorias perpendiculares entre sí, cada uno vuelve a ser reflejado hacia el punto donde el rayo se había dividido en dos, ahí vuelven a combinarse formando un único rayo. Se dice que la velocidad de la tierra a través del éter es de  $3 \cdot 10^4 m/s$ . Con el interferómetro intentaba ver

una diferencia en el recorrido entre dos rayos de luz, lo que demostraría la existencia del éter, pero no se detectó ninguna diferencia. La luz aparentemente viaja a la misma velocidad en todas las direcciones en total desacuerdo con la idea de que la tierra se mueve a través del éter. Este experimento se repitió numerosas veces con aparatos cada vez más precisos con el mismo resultado. Galileo había dicho que un objeto en movimiento tendería a permanecer en su estado de movimiento uniforme, era la ley de inercia y era correcta porque en su propio marco de referencia todo estado de movimiento uniforme era en realidad un estado de reposo. No hay ninguna diferencia en absoluto entre estar en reposo y estar en movimiento uniforme. Por otra parte Albert Michelson se había propuesto con su experimento detectar el movimiento absoluto de la tierra, si hubiera tenido éxito habría demostrado que existe una diferencia entre movimiento y reposo. Michelson, con su interferómetro consiguió: medir la velocidad de la luz con gran precisión, medir el diámetro de una estrella y la prueba de la teoría de la relatividad de Einstein. La velocidad de la luz es independiente del movimiento de la fuente y constante. Las leyes de la Física, tanto de la Mecánica como el electromagnetismo.

## 42. Lección 42. Las transformaciones de Lorentz.

### 42.1. Descripción de la lección

**S**i la velocidad de la luz tiene que ser la misma para todos los observadores inerciales, tal y como lo indica el experimento de Michelson-Morley, pueden encontrarse fácilmente unas transformaciones, diferentes a las de Galileo, en las que las relaciones de tiempo y mezclan y el tiempo deja de ser absoluto. ¿Qué significa esto? Significa también que la longitud, o la velocidad de un reloj, o incluso la simultaneidad de un evento, dependen del sistema de referencia.

Los objetivos del capítulo son:

- Usar las transformaciones de Lorentz para resolver problemas rela-

cionados con espacios o intervalos de tiempo en diferentes sistemas de referencia.

- Comentar algunas de las explicaciones hipotéticas enunciadas para justificar el experimento de Michelson-Morley y su resultado negativo.
- Reconocer el concepto de contracción de longitudes.
- Utilizar diagramas espacio-tiempo.
- Definir y comentar el concepto de simultaneidad.
- Analizar la sincronización de un reloj y la dilatación del tiempo.

## 42.2. Resumen de la lección

Desde los tiempos de aristóteles se pensaba que el éter era la materia precisa de que estaban hecho los propios cielos, y permaneció así hasta que se probó que el éter realmente no existía. Con un interferómetro demostraron que la velocidad de la luz es la misma independientemente del movimiento del observador. Lorentz pensaba que una posibilidad era que un electrón se contrajera en la dirección del movimiento. Hoy se sabe que la velocidad de un objeto depende de la velocidad del observador, pero Lorentz decía que las percepciones de las ondas luminosas serían radicalmente diferentes, sugirió que incluso alguien que viajara a una velocidad próxima a la de la luz seguiría observando el movimiento de la luz a trescientos mil kilómetros por segundo. Tanto el tiempo como la distancia tienen que estar afectados por el movimiento. Debido a esto se dijo que se necesitaba un nuevo principio, que fue el principio de relatividad, según el cual las leyes de los fenómenos físicos serían las mismas tanto para un observador fijo como para un observador que se desplazan con movimiento uniforme de traslación. La relatividad del tiempo se deduce del triángulo rectángulo formado por las distancias recorridas del teorema de pitágoras demuestra que el recorrido de la luz en movimiento



es mayor que la distancia entre los dos espejos.


$$\Delta t = \gamma \Delta t' = \frac{\Delta t'}{\sqrt{1 - \frac{v^2}{c^2}}}$$

Este resultado puede obtenerse mediante un reloj de luz de catetos  $c\Delta t'$  y  $v\Delta t$ , que tiene como hipotenusa  $c\Delta t$ .

La transformación de Lorentz-Fitzgerald retrasa o dilata la medida de tiempo y contrae las medidas de distancias en un sistema móvil independientemente de qué sistema móvil se haya tomado, el observador en el sistema móvil piensa que está en reposo y que es el otro sistema el que realmente se mueve pero esas dos ecuaciones hacen algo más de eso en realidad le dan tiempo y espacio. Más tarde, para Einstein los conceptos de espacio y tiempo se habían entrelazado. Gracias al diagrama espacio-tiempo se pueden visualizar muchos de los extraños efectos de la relatividad. Para Lorentz la velocidad constante de la luz y para todos los observadores fue una mera aparición, para Einstein, esa velocidad constante fue un principio del cual deberían deducirse todos los demás. La relatividad especial llega consigo: la introducción de un espacio-tiempo cuadridimensional, la relatividad de la simultaneidad, la contracción de longitudes y la dilatación del tiempo, ley no lineal de composición de velocidades, redefinición de momento y energía cinética y total en relatividad respecto al caso newtoniano, redefinición del principio de relatividad, el efecto Doppler relativista, así como generalizaciones de las leyes de Newton para el caso electromagnético y gravitacional. En el marco de la relatividad especial, la teoría de Newton de la gravedad deja de ser válida también, y guiado por el principio de equivalencia, Einstein construyó la relatividad general (teoría relativista gravitacional).

## 43. Lección 43. Velocidad y tiempo.

### 43.1. Descripción de la lección

 diferencia de Lorentz, Albert Einstein se sintió motivado a perfeccionar las ideas centrales de la Física en vez de buscar

una explicación al experimento de Michelson-Morley. El resultado fue una forma totalmente nueva de entender el significado de los conceptos de espacio y tiempo, incluyendo aspectos como la transformación de velocidades, la dilatación del tiempo y la paradoja de los gemelos. Además reformuló el principio de relatividad galileana, en una versión especial que aplicaba tanto a Mecánica como Electromagnetismo.

Los objetivos del capítulo son:

- Enunciar los postulados de Einstein referentes a la Teoría de la Relatividad Especial.
- Identificar la fórmula de la transformación relativista de la velocidad y en qué se diferencia de la obtenida por la relatividad galileana. En esencial distinguir grupo de Galileo y Grupo de Lorentz. Introducir el concepto de grupo de Poincaré y de Schrödinger.
- Definir los conceptos de tiempo exacto y longitud exacta (o propios), y expresar las ecuaciones de dilatación del tiempo y contracción de longitudes en términos de estos conceptos.
- Explicar el experimento del mesón mu, ahora sabemos que es un leptón, o muón, en términos de la Teoría de Einstein.
- Saber manejar diagramas espacio-tiempo en problemas sencillos.
- Reconocer en qué consiste la paradoja de los gemelos y cómo resolverla, pues es realmente una pseudoparadoja.

## 43.2. Resumen de la lección

En física la explicación del problema comienza con la dilatación del tiempo. Dada la constancia de la velocidad de la luz no hay duda de que una simple regla de rayos de luz en movimiento se atrasa según el factor gamma. La premisa básica de la teoría de la relatividad es que no puede haber ni movimiento absoluto ni reposo absoluto, y si no existe en esas condiciones no puede haber ningún experimento que las detecte así que si la teoría de la relatividad es correcta todos los relojes del universo

deben comportarse exactamente igual que un reloj de rayos de luz. Incluso a lo largo de la dirección del movimiento relativo, las componentes de velocidad nunca suman una velocidad mayor que la de la luz, y la transformación de la velocidad afecta a las componentes perpendiculares al movimiento, porque aunque las distancias siguen siendo las mismas, el tiempo cambia de un sistema a otro.

$$V_x = \frac{V'_x + U}{1 + \frac{V'_x U}{c^2}}$$

Para las componentes transversales


$$V_y = \frac{V'_y}{\gamma \left(1 + \frac{V'_x U}{c^2}\right)}$$

$$V_z = \frac{V'_z}{\gamma \left(1 + \frac{V'_x U}{c^2}\right)}$$

Hay una prueba de la relatividad en un fenómeno llamado la desintegración de los muones. Después de haber registrado 568 mesones mu por hora en su detector en la cima del monte washington, calcularon que a la base de la montaña sólo deberían llegar 27 por hora, pero cuando llevaron sus equipos más abajo al nivel del mar registraron en su detector casi tantos mesones como habían registrado en la cima del monte, 412. La razón de esa discrepancia se explica muy bien por la teoría de la relatividad cuando los mesones viajan a velocidades próximas a la de la luz sus relojes interiores se atrasan de modo que vistos desde la tierra necesitan mucho más tiempo para desintegrarse.

## 44. Lección 44. Masa, momento y energía.

### 44.1. Descripción de la lección

 l nuevo significado de espacio y tiempo hace necesario reformular una nueva mecánica más general. Partiendo de la conservación del momento, entre otras cosas resulta que  $E_0 = mc^2$  y  $E = Mc^2$ .

Los objetivos del capítulo son:

- Definir el momento relativo y las ecuaciones referentes a la energía cinética y total de una partícula para su velocidad en la Teoría de la Relatividad Especial (TRE).
- Comentar la relación entre masa y energía en la TRE, y analizar la energía oculta de varios sistemas a partir de las masas reales de sus constituyentes.

### 44.2. Resumen de la lección

Nos situamos en un escenario de una partida de billar. Según la primera ley de Newton una bola no se parará a menos que algo la detenga, y según la segunda ley de Newton sabemos que la cantidad de movimiento de una bola de billar o de cualquier otra cosa es igual a la masa multiplicada por la velocidad, y la cantidad de movimiento cambia solamente cuando se aplica una fuerza sobre la bola, pero cuando dos bolas chocan la fuerza ejercida sobre una bola es igual y opuesta a la fuerza ejercida sobre la otra. En el espacio exterior, que no hay nunca nada que esté en reposo absoluto, la diferencia entre movimiento y reposo depende sólo del observador. Para ver las cosas en su propia perspectiva es necesario el diagrama espacio-tiempo. En principio la masa es una medida de cómo un cuerpo se resiste un cambio en su velocidad. Según la teoría de la relatividad la masa de cualquier objeto en movimiento depende de la rapidez con que se mueve  $m = m_0\gamma$ . En el interior de cualquier acelerador los campos electromagnéticos ejercen una fuerza sobre un diminuto ion. Esa fuerza aumenta la cantidad de movimiento del ion  $m \cdot v$  y así la

velocidad aumenta pero cuando aumenta la velocidad su masa también aumenta. A medida que se hace más masivo se hace cada vez más difícil hacer que se mueva con mayor velocidad la cantidad de movimiento del ión y su energía continúan creciendo pero su velocidad nunca alcanza la velocidad de la luz por grande que sea la fuerza que se ejerza sobre él. Cuando una fuerza actúa sobre un cuerpo o cuando un cuerpo actúa sobre un objeto la energía cinética aumenta, y al aumentar la energía cinética de un objeto su masa también aumenta. A cualquier velocidad,

$$K = (m - m_0)c^2 = (\gamma - 1)m_0c^2 = \Delta mc^2 = K(v)$$

y la energía de la masa en reposo es  $E_0 = m_0c^2$ . Sumando la energía cinética a la energía de la masa en reposo se obtiene la energía total del cuerpo:

$$E = mc^2 = m_0\gamma c^2 = \frac{m_0c^2}{\sqrt{1 - \beta^2}}$$

Einstein dijo que si la energía adquirida se suma a la masa el cuerpo puede ceder algo de su masa perdiendo energía. La masa relativista es

$$m = m_0\gamma$$

La masa invariante  $m_0$  se relaciona con el momento y energía relativista

$$E^2 = (pc)^2 + (m_0c^2)^2$$

donde el momento y energía relativista son

$$p = m_0\gamma v = mv$$

$$E = m_0\gamma c^2 = mc^2$$

## 45. Lección 45. Temperaturas y ley de los gases.

### 45.1. Descripción de la lección



Las oscilaciones de la investigación científica se reflejan en los experimentos de Boyle, así como en las investigaciones de Char-

les. Nuevos y extraordinarios descubrimientos sobre el comportamiento de los gases que sirven de conexión entre temperatura y calor, y posibilitan una escala absoluta de temperaturas.

Los objetivos del capítulo son:

- Definir las escalas de temperatura Celsius y Fahrenheit, y convertir valores de temperatura de una escala a la otra en grados Kelvin.
- Interpretar la ecuación de estado de un gas ideal, y el valor de la constante universal de los gases en julios/kelvin.
- Conocer que la energía media de una molécula de gas a temperatura absoluta  $T$  es del orden de  $kT$ , donde  $k$  es la constante de Boltzmann.
- Identificar la temperatura absoluta  $T$  como una medida de la energía cinética media de un gas.
- Límites superior e inferior de la temperatura. Cero absoluto y temperatura de Planck, y sus respectivos significados. Temperaturas extremas y propiedades de la materia.

## 45.2. Resumen de la lección

Existe una conexión ineludible de la temperatura con las leyes de Newton. Al coger un objeto, le aplicamos energía potencial, y al soltarlo, adquiere energía cinética, para, acto seguido, al parar el objeto, tanto una como otra desaparece, convirtiéndose en calor. El calor es el movimiento aleatorio de los átomos y moléculas, está es la conexión entre temperatura y el movimiento de átomos y moléculas. Esta relación se estableció en 1950. Para medir la temperatura, se utilizan termómetros. Medir la temperatura de modo preciso es complicado, al no tener dimensiones físicas, como pueda ser la longitud. En principio se establecieron 2 escalas reconocidas: Fahrenheit(F) (utilizada sobre todo en Estados Unidos) y Celsius (C). Ambas ofrecen un patrón para la comparación. Así, establecen que el punto de congelación del agua es de  $0^{\circ}\text{C}$ ,  $32^{\circ}\text{F}$  ,

y que el punto de ebullición del agua es de 100°C, o 212°F. Se vió, que el calor se ve afectado por la presión, que es la fuerza ejercida sobre la unidad de área.

$$P = \frac{F}{A}$$

Cuando un gas ejerce presión sobre una pared sólida, la superficie a la que empuja, hace que las moléculas del gas cambie su cantidad de movimiento. Cuanto más moléculas golpeen la pared, los empujes individuales empiezan a sumarse. Esto puede verse en un experimento muy sencillo, denominado simulación de la dinámica molecular. Este consiste en un émbolo sobre el que se ejerce una presión, lo que da lugar a que las moléculas empiecen a moverse, y éstas, al moverse, generan calor, que se define como el movimiento aleatorio de átomos y moléculas. Por ende, si calentamos un gas, aumenta la energía cinética de las moléculas. Cuanto más calor apliquemos, mayor será la energía cinética, y mayor será la presión. Por lo que, necesitaremos de una menor proporción de gas, para mantener la misma presión. Jule, Maxwell y Boltzmann determinaron que la presión en un gas es directamente proporcional al número de moléculas e inversamente proporcional al volumen y proporcional a la energía cinética de una molécula, determinando que la constante de proporcionalidad es de  $\frac{2}{3}$  Robert Boyle, utilizando el método cuantitativo, posteriormente denominado científico, determinó que a temperatura constante: La ley de Boyle es

$$PV = const = \frac{2}{3}Nk_B$$

Así, el cero absoluto es la temperatura a la cual un gas está enteramente sin calor (-273°C o -459°F). Kelvin estableció la escala absoluta (K), tomando como referencia el cero absoluto y en la que la temperatura es directamente proporcional al volumen del gas. La energía cinética es lo que da a un gas su presión y volumen.

$$k_B T = \frac{2}{3}\overline{E_c}$$


Siendo la ecuación para los gases perfectos o ideales

$$PV = Nk_B T$$

Por la calibración, grados Kelvin se utiliza en ámbitos científicos, grados Fahrenheit en ámbitos meteorológicos y grados Celsius en ámbitos culinarios, al estar basada en la ebullición del agua.

## 46. Lección 46. El motor de la Naturaleza.

### 46.1. Descripción de la lección

 Había un joven llamado Carnot, cuya lógica era capaz de demostrar, para un experto en fuentes de trabajo, que no hay nada tan eficaz como un motor que, sencillamente, no funciona (D. Goodstein, 1958).

Los objetivos del capítulo son:

- Conocer la Primera ley de la Termodinámica y usarla para resolver problemas.
- Calcular el trabajo realizado por un gas durante varios procesos cuasiestáticos, y esbozar el proceso en un diagrama P-V.
- Definir la eficacia de una máquina térmica.
- Describir la máquina de Carnot.
- Aplicar la expresión de la eficacia a una máquina de Carnot.
- Máquina de Carnot y agujeros negros.

### 46.2. Resumen de la lección

Nicolas Léonard Sadi Carnot estaba interesado en las máquinas de vapor. Nada extendió tanto a lo largo y a lo ancho los horizontes de la civilización occidental como la invención de la máquina de vapor. El vapor surgió en la era industrial y se convirtió en la fuerza de la revolución. Lo esencial de la máquina de vapor es el cilindro con un extremo móvil empujado por vapor a presión, abriendo una válvula unida a la caldera




el cilindro recibe vapor a alta presión que empuja el émbolo hacia afuera ejerciendo un trabajo sobre el volante, el volante empuja nuevamente la émbolo hacia adentro expulsando el vapor gastado a través de otra válvula y la máquina está lista para un nuevo ciclo. Sadi Carnot se preguntó cuál es la máquina de vapor más absolutamente eficiente que permitirá la naturaleza. Buscando la respuesta, se inspiró en la rueda hidráulica calórica (el calor que fluye entre un cuerpo y otro). Ninguna máquina ni combinación de máquinas pueden jamás tener el efecto de hacer pasar más calor así a temperaturas altas que hacía temperaturas bajas, y esto es el punto de partida de la teoría de Carnot (segundo principio de la termodinámica) La mejor máquina que la naturaleza podía permitir era una que pudiera trabajar igual de bien en un sentido y en el contrario, en otras palabras, una máquina que pudiera tomar vapor a baja temperatura y lo llevase a alta temperatura. En una máquina ordinaria entra calor a alta temperatura, se genera trabajo y sale de nuevo calor a baja temperatura. Carnot imaginó una máquina que pudiera trabajar en sentido inverso, entraría calor a baja temperatura, mediante trabajo ejercido desde fuera y se produciría calor a alta temperatura (frigorífico) Hay dos tipos de ciclos: el isotérmico y el adiabático . La ley de conservación de la energía dice que el trabajo realizado es sencillamente la diferencia entre el calor que entra y el que sale, de modo que la eficiencia de una máquina, su rendimiento, es siempre menor que uno. Cuanto más elevada sea la temperatura alta y cuanto menor sea la temperatura baja mayor rendimiento tendrá el motor

$$\eta_C = 1 - \frac{T_c}{T_h} = \frac{W}{Q_{irr}}$$

Como resumen final, James Ward cuya meta era ganar dinero inventó, una máquina de vapor más eficiente y Sadi Carnot cuya meta era encontrar una máquina de vapor más eficiente, cambió por completo nuestra visión del universo porque nuestra visión del destino del universo está basada en el principio al que llegó Clausius analizando el trabajo de Carnot, el principio de la entropía.

## 47. Lección 47. Entropía.

### 47.1. Descripción de la lección

 ste programa ilustra el genio de Carnot, y la Segunda Ley de la Termodinámica. La eficacia de la máquina ideal de Carnot depende de la relación entre las temperaturas superior e inferior del ciclo de funcionamiento. La Teoría de Carnot comienza con sencillas máquinas de vapor y termina con profundas implicaciones en el comportamiento de la materia y el flujo del tiempo a través del Universo.

Los objetivos del capítulo son:

- Describir cualitativamente el concepto de entropía.
- Describir cuantitativamente el concepto de entropía.
- Calcular el cambio de entropía de algunos procesos irreversibles.
- Interpretar la conexión entre la Segunda Ley de la Termodinámica y el Principio de Entropía. Comentar el Max-Ent, principio de máxima entropía como análogo al de mínima acción y mínima energía.
- Entender el papel de la entropía en la formación del hielo y del Universo.

### 47.2. Resumen de la lección

Hay cuatro principios de la Termodinámica. La termodinámica se basa en cuatro principios: el principio cero dice que la temperatura tiene sentido o existe, el primer principio es la conservación de la energía, el segundo principio es el principio del aumento de la entropía, y el tercer principio (o cuarto en esta cuenta) de que hay una temperatura tan baja que no se puede alcanzar (cero absoluto). Hay quien ha postulado un cuarto principio: que hay una temperatura máxima, la temperatura de Planck, que no se puede tampoco alcanzar. La energía térmica se propaga

desde el cuerpo caliente al frío hasta que ambos alcancen la misma temperatura, y este es el estado de equilibrio térmico. Con el tiempo toda la energía disponible se llega a distribuir como energía cinética y potencial de los movimientos aleatorios de todos los átomos, por lo tanto la idea de equilibrio en realidad oculta el movimiento agitado de los átomos. La explicación comenzó como una idea para la construcción de una máquina de vapor mejor, un joven llamado Carnot, fue capaz de demostrar que para una fuente de trabajo competente ninguna tan eficiente como una que sencillamente no funcione. En la máquina ideal de Carnot, el cociente entre el calor tomado y el calor desperdiciado era igual al cociente entre las dos temperaturas absolutas necesarias para el funcionamiento de la máquina. Clausius dijo que la entropía era el calor dividido entre la temperatura. O sea que una máquina ideal no solamente conserva la energía, conserva también la entropía. En la realidad, la entropía que sale de la máquina es mayor de la que entra, y no igual, y eso se debe a que siempre hay rozamiento entre las partes en movimiento.

$$\Delta S = \frac{\delta Q}{T}$$

La entropía es esencialmente  $S = Q/T$ . Una máquina ideal conserva la entropía. Hay una relación entre energía y entropía pues:  $E = TS$ . El estado de equilibrio es el estado de máxima entropía. Los líquidos tienen mayor entropía que los sólidos. Los gases mayor entropía que líquidos o gases. La entropía en realidad es una medida del desorden, o más precisamente, el número de configuraciones microscópicas accesibles por un sistema. La energía libre es

$$F = E - TS$$

## 48. Lección 48. Bajas temperaturas.

### 48.1. Descripción de la lección



stados fundamentales de la materia: sólido, líquido y gas. El plasma como cuarto estado básico de la materia. Con la bús-

queda de las bajas temperaturas, llegó el descubrimiento de que, en las adecuadas condiciones de temperatura y presión, todos los elementos pueden existir en cada uno de los tres estados (cuatro) de la materia.

Los objetivos del capítulo son:

- Explicar qué hacer para enfriar y calentar algo.
- Enumerar los 3 (4) estados fundamentales de la materia. Poner ejemplos de los mismos.
- Explicar qué es un diagrama de fases.
- Reproducir el diagrama de fases para el agua y otras sustancias. Explicar por qué el diagrama de fases del agua es particular.
- Conocer por qué los gases se transforman en líquidos. Interpretar el efecto de Joule-Thomson.
- Comentar la existencia de estados exóticos de la materia a baja temperatura. Estado actual de las teorías de superfluidez y superconductividad.

## 48.2. Resumen de la lección

Cualquier sustancia en el mundo, incluso el aire, puede ser sólido, líquido o gas, dependiendo de dos variables: presión y temperatura. Faraday dió la primera explicación racional sobre los estados de la materia. A bajas temperaturas la materia es normalmente sólida (las moléculas forman un retículo geométrico rígido). A temperaturas más altas, los sólidos se funden y se vuelven líquidos (las moléculas están mucho menos ordenadas y se mueven fácilmente intercambiando sus posiciones). Y si se eleva más la temperatura, los líquidos se evaporan y se convierten en gases (las moléculas no se adhieren unas a otras sino que por el contrario rebotan al chocar unas con otras). Las temperaturas a las que ocurren esos cambios de estado dependen para cada sustancia de la presión. Por debajo del punto crítico el gas y el líquido tienen densidades diferentes,

y por encima de la temperatura del punto crítico hay un único fluido continuo. Para algunas sustancias como el oxígeno, la temperatura debe llegar a ser muy baja para poder alcanzar el punto crítico. Para enfriar estas sustancias es necesario utilizar un enfriamiento paso a paso llamado proceso en cascada. Para la licuefacción del oxígeno se necesitó la ayuda del intercambiador de calor. El efecto de Joule Thomson dice que cuando un gas comprimido se calienta por encima de su temperatura crítica las moléculas todavía se atraen unas a otras pero esa atracción no es lo suficientemente fuerte como para licuar el gas, sin embargo aun cuando no exista líquido, cuando el gas se expande a través de un agujero o de una boquilla siguen siendo aplicables los principios de la evaporación, las moléculas que escapan disminuyen su velocidad y se enfrían en el proceso.

## 49. Lección 49. El átomo.

### 49.1. Descripción de la lección

Quando se llega a los átomos, solamente puede usarse el lenguaje matemático como en poesía la palabra. Este programa explora la historia del átomo desde la antigua Grecia hasta el siglo XX, cuando los descubrimientos de J.J. Thomson y Ernest Rutherford provocaron una nueva crisis en el mundo de la Física.

Los objetivos del capítulo son:

- Resumir la Teoría Cinética y comentar el tamaño de los átomos.
- Analizar los modelos atómicos desde la antigüedad hasta los modelos de Thomson, Nagaoka y Rutherford.
- Explicar por qué el modelo atómico de Rutherford entró en conflicto con la teoría electromagnética de Maxwell.
- Comentar el significado del movimiento de Brown o movimiento browniano como prueba de la existencia de los átomos.

## 49.2. Resumen de la lección

Bohr creó el primer modelo del átomo de hidrógeno. En primer lugar Bohr adoptó un modelo de átomo que parecía el sistema solar en miniatura, en el lugar del sol había un núcleo pesado positivo y un electrón en órbita a su alrededor como si fuera un planeta, pero así como un planeta es atraído hacia el sol por la fuerza de la gravedad, el electrón que era atraído hacia el núcleo por la fuerza de la electricidad. Para simplificar las cosas, supuso que describen órbitas circulares donde

$$E = -\frac{D_q}{2r}$$
$$F = -D_q \frac{1}{r^2} = \frac{mv^2}{r}$$
$$F_C = K_C \frac{e^2}{r^2}$$
$$D_q = K_C e^2$$

Sin embargo dijo que un electrón sólo podía existir en unas órbitas determinadas y que el electrón irradiaría y absorbería energía solamente al saltar entre esas órbitas, lo que iba en contra de las leyes existentes. Los espectros fueron una pista para lograr entender el átomo. Para el hidrógeno, Balmer dedujo:

$$E = R \left( \frac{1}{n_1^2} - \frac{1}{n_2^2} \right)$$
$$\frac{1}{\lambda} = \bar{R} \left( \frac{1}{n_1^2} - \frac{1}{n_2^2} \right)$$
$$\bar{R} = 109677,6 \text{ cm}^{-1}$$

Dalton por otro lado estudió las combinaciones químicas de los elementos químicos y se llevó a proponer la ley de las proporciones definidas y múltiples cuando dos sustancias se combinan en una reacción química lo hacen en cantidades cuyas masas están en razón del cociente de números enteros pequeños. Una de las dificultades fue resuelta por Amadeo

Avogadro, quien se dio cuenta de que incluso los gases más simples tales como el oxígeno puro o el nitrógeno puro estarían compuestos no por átomos individuales sino por combinaciones de átomos llamadas moléculas. Maxwell añadió nuevos conocimientos gracias al espectroscopio, dijo que cuando el espectro consta de un número de rayas brillantes el movimiento del sistema debe estar compuesto de un número correspondiente de tipos de vibración armónica. Thomson demostró más tarde que los rayos que emanan de un cátodo caliente en un tubo de cristal en el que se hubiera hecho el vacío eran partículas cargadas eléctricamente, pero más importante, esos rayos podían ser desviados por campos eléctricos y magnéticos e independientemente de la sustancia que hubiera en el tubo, se trataba siempre de las mismas partículas cargadas. Rutherford se dio cuenta de que toda la carga positiva del átomo concentrada tendría que estar dentro de un pequeño núcleo. La teoría de Planck sostenía que la materia emitía solamente cantidades discretas de radiación con energía e proporcional a la frecuencia de la luz. En el modelo de Bohr del átomo de hidrógeno la órbita más baja tiene un momento cinético  $\hbar$  la órbita siguiente tiene  $2\hbar$  la siguiente  $3\hbar$  y de hecho hay una órbita permitida para cada número  $n\hbar$  combinando estas ideas los tamaños de las órbitas permitidas son fáciles de hallar.

$$\Delta E = hf$$

$$L = n\hbar = mvr$$

$$R = \frac{L^2}{DM} = \frac{n^2\hbar^2}{K_C e^2 M}$$

$$E = \frac{D^2 M}{2\hbar^2} \left( \frac{1}{n_1^2} - \frac{1}{n_2^2} \right)$$


$$R = \frac{D^2 M}{2\hbar^2}$$

$$\bar{R} = \frac{D^2 M}{2\hbar^2 hc}$$

Epílogo: les podré enseñar los mecanismos de la Ciencia, las leyes y principios, pero no les podré enseñar a tener imaginación.

## 50. Lección 50. Ondas y partículas.

### 50.1. Descripción de la lección

ncluso antes de la crisis de los modelos atómicos, ya existía una pugna y evidencia de que la luz, que ciertamente es una onda, a veces podía comportarse como una partícula o corpúsculo. En la Nueva Física del siglo XX, denominada Mecánica Cuántica, no sólo la luz sino toda la materia viene en paquetes denominados cuantos y puede presentar fenómenos ondulatorios. Los electrones y otras partículas se comportan como ondas en los átomos.

Los objetivos del capítulo son:

- Describir la evidencia de que las ondas luminosas a veces se comportan como partículas.
- Expresar las relaciones de De Broglie como relaciones de ondas de materia, con la frecuencia y la longitud de onda adecuadas.
- Interpretar la dualidad onda-partícula.
- Analizar el principio de indeterminación o incertidumbre de Heisenberg, comentando su origen y significado.
- Reconocer la evidencia experimental de la existencia de ondas electromagnéticas y del efecto fotoeléctrico.
- Definir la función de onda, relacionarla con una amplitud de probabilidad y discutir su significado físico e interpretación. Consecuencias de los postulados y axiomas de la Mecánica Cuántica.
- Conceptos de microscopía electrónica y computación cuántica básicos.
- El problema de la medida en Mecánica Cuántica.
- Cuestionarse si la Mecánica Cuántica es fundamental o una aproximación a otra teoría. Compatibilidad e incompatibilidad de la MC con la TRE y la TGR.



## 50.2. Resumen de la lección

Al principio fue la luz, con el tiempo fue una bombilla y el hecho de que cuanto más caliente es de su filamento con más intensidad brilla. Independientemente del material de que esté hecho, el color con que brilla un cuerpo depende solamente de su temperatura. Max Planck siempre ha considerado la búsqueda de lo absoluto como la meta más elevada de toda la actividad científica. El problema de Planck resultaba de aplicar la teoría de Maxwell para predecir la cantidad de luz que un cuerpo brillante irradiará a cada frecuencia

$$E = hf$$

La constante de Planck es

$$6,626 \cdot 10^{-34} m^2 \cdot kg \cdot s^{-1}$$

Encontró una verdad nueva y fundamental sobre la naturaleza, la luz es absorbida o emitida en paquetes discretos de energía, lo mismo en el caso de un dispositivo eléctrico que en el caso del sol (podemos ver esa evidencia en el comportamiento de un electroscopio de panes de oro), esto es llamado efecto fotoeléctrico Fue la explicación del efecto fotoeléctrico y no su teoría de la relatividad lo que haría que Albert Einstein ganara el premio nobel de física: un electrón para poder escapar de un metal necesita energía hasta una cantidad llamada trabajo de extracción La ecuación del efecto fotoeléctrico de Einstein es:

$$K = hf - \Phi$$

$$\Phi = hf_0$$

donde  $\Phi$  es la función de trabajo o trabajo de extracción del metal.

La luz llega en partículas, partículas que actualmente reciben el nombre de fotones. Anteriormente Thomas Young había probado que la luz viaja en ondas. En 1920 Louis de Broglie plantea una pregunta crucial, si las ondas de la luz pueden ser partículas ¿es posible que partículas tales como los electrones pueden ser también ondas? Idea radical, no sólo las

ondas de la luz pueden comportarse como partículas sino que las partículas pueden comportarse como ondas, que fue verificada 1 año después.  $L_n = m\hbar$ . La idea de Louis de Broglie había sido brillante, había dado una explicación profunda y elegante del modelo de Niels Bohr del átomo. Para materias:

$$\lambda = \frac{h}{p} = \frac{h}{m_0v} \sqrt{1 - \beta^2}$$

Para luz o fotones de masa cero:

$$\lambda = \frac{hc}{E}$$

porque  $E = pc$  para partículas sin masa. Erwin Schrödinger dijo que una onda tiene una amplitud y una longitud de onda pero no tiene ni principio ni final ni nada parecido a la posición determinada de una partícula, lo que continúa siendo cierto si se la suma una onda de la misma longitud de onda ya sea en fase o fuera de fase, pero si se suman ondas de distintas longitudes se altera la forma resultante, si esas longitudes de onda son próximas y especialmente si se suman más ondas de longitudes de onda próximas el resultado puede ser un tipo de onda concentrada en una región limitada del espacio Max Born, por otro lado, dijo que los fotones pueden ser partículas pero las estructuras que producen se rigen por probabilidades que crean interferencias como si se tratara de ondas

Werner Heisenberg: como las partículas están asociadas con las probabilidades que crean interferencias lo mismo que las ondas es imposible conocer tanto la cantidad de movimiento exacta como la posición exacta de cualquier partícula al mismo tiempo. Cuanto más se sabe acerca de la posición de una partícula menos se puede decir acerca de a dónde va y a qué velocidad va. Cuanto más determinada se hace la posición de la onda menos determinada se hace la cantidad de movimiento de la partícula. El principio de incertidumbre de Heisenberg está expresado en la siguiente fórmula:

$$\Delta x \Delta p \geq \frac{\hbar}{2}$$

o también

$$\Delta E \Delta t \geq \frac{\hbar}{2}$$

$$\Delta A \Delta B \geq \frac{\hbar}{2}$$

donde la última es para operadores conjugados simples, que verifican la relación canónica

$$[A, B] = i\hbar$$

## 51. Lección 51. De los átomos a los quarks.

### 51.1. Descripción de la lección

Las funciones de ondas limitadas por el campo eléctrico de los núcleos, ayudan a resolver el problema y dilema del átomo y explican la Tabla Periódica de los Elementos. Los propios nucleones obedecen a un tipo de Tabla Periódica diferente, y siguen las reglas de la MC pero conducen a la teoría de quarks y gluones. Y también a la teoría electrodébil y el Modelo Estándar de las partículas elementales.

Resumen de objetivos del penúltimo episodio:

- Definir la función de onda y de estado general.
- Describir el átomo de Bohr en términos de funciones de onda y la MC.
- Interpretar la Tabla Periódica en términos de estructura electrónica.
- Comentar en qué consisten los quarks y su papel en la estructura de la materia.
- Entender cómo clasificar las partículas elementales mediante la masa, la carga eléctrica, el espín y otros números cuánticos.

- Introducir el Modelo Estándar y sus campos asociados. Mecanismo de ruptura espontánea de simetría. Campo de Higgs.
- Razones para entender que el Modelo Estándar no puede ser el final de la historia: problemas del Modelo Estándar. Materia oscura y Cosmología. Modelo  $\Lambda$ CDM. Energía oscura.

## 51.2. Resumen de la lección

Un átomo es 1000 veces más pequeño que la longitud de onda de la luz, por lo que no se puede ver al no reflejar la luz. Su núcleo es 100000 veces más pequeño. Su parte activa interna se denomina protones y neutrones, que se detectan con un acelerador de partículas y gracias a la mecánica cuántica. El modelo de Bohr es un átomo de hidrógeno en el que un electrón existe sólo en órbitas en el que da vueltas alrededor del núcleo. Louis de Broglie indicó que sólo pueden ser electrones en órbitas donde producen interferencias constructivas, y esto solo ocurre si la longitud de la circunferencia es la misma que  $n$  veces la longitud de onda. Schrödinger expuso además, que la longitud corpuscular de un electrón puede existir en cualquier parte del espacio tridimensional. Lo que es aplicable a todos los átomos de todos los elementos del mundo natural, y explica toda la tabla periódica de elementos. El principio de indeterminación o incertidumbre de Heisenberg establece que un electrón de poca masa, ocupa una región del espacio relativamente grande. Por contra, un protón tiene tanta masa que no necesita ocupar espacio en absoluto. Lo que da como resultado un átomo cuántico de hidrógeno (pequeño núcleo de masa rodeado de una nube que representa la posición probable del electrón - la probabilidad es máxima cerca del núcleo y disminuye rápidamente al alejarse de él). Sin embargo, la probabilidad de encontrar un electrón a una distancia dada del núcleo aumenta al principio, alcanza el valor máximo cuando la capa se expande y disminuye de nuevo al aumentar la distancia al núcleo. La nube se reduce prácticamente a la nada en grandes distancias. El radio de ese máximo de probabilidad es el mismo que el radio de la primera órbita del modelo de Bohr, y su energía es la misma que el estado más bajo de energía del átomo de Bohr.

Pero el átomo cuántico tiene energía diferente dependiendo del número  $n$  (número entero positivo  $n > 0$ ):

- $n = 1 \rightarrow$  estado fundamental  $\rightarrow$  nube simétrica.
- $n = 2 \rightarrow$  estado excitado primero  $\rightarrow$  nube esférica doble o con forma alabeada  $l = 1$ .

$l$  es otro número cuántico asociado al momento cinético del electrón (num entero desde 0 hasta  $n-1$ ). El tercer número cuántico es el número cuántico magnético  $m$  : es un número cuántico entero entre  $-l$  y  $+l$  (superior, medio, inferior) Los neutrones, protones y electrones son la trinidad de partículas subatómicas que forman todos los elementos, cada elemento tiene múltiples estados de energía, pero en cuanto a su química, el más importante es el más bajo, el estado fundamental. El estado de cosas ocurre debido a las propiedades mecánicas cuánticas del electrón (spin -momento cinético extrínseco-, 2 electrones no pueden tener el mismo estado cuántico -aunque pueden compartir estado orbital con spin diferente-). Se establece tabla periódica de los elementos que se han detectado dentro de los átomos: protón y neutrón (relacionados entre sí, 8 partículas con propiedades similares. Cada partícula tiene antipartículas y a su vez existe otra partícula con propiedades similares pero con mayor masa...). Se encontró que estructuras de partículas elementales se pueden explicar si las partículas, como los átomos, tuvieran constituyentes internos, a los que se llamó quarks. Cada miembro de la familia de neutrones están constituidos por 3 quarks (arriba -carga positiva de  $2/3$ , abajo y extraño  $-1/3$  de la unidad de carga). Se combinan de forma que cada partícula tiene 1, 0,  $-1$  veces la carga de un electrón. Cada quark tiene spin y se combina para dar spin cuántico del electrón. Otros elementos encontrados: encanto, cima y fondo. Los 6 sabores de quarks son pues  $u, c, t, d, s, b$ . Hay también 6 sabores de leptones  $e, \nu_e, \mu, \nu_\mu, \tau, \nu_\tau$ . Hay 8 tipos de quarks y tres colores  $R, G, B$ .

## 52. Lección 52. El Universo mecano-cuántico.

### 52.1. Descripción de la lección

**N**na última aventura de esta serie. Una mirada global a aquello que hemos estudiado, de dónde venimos, dónde estamos y hacia a dónde vamos. Una mirada al futuro de la Física Teórica. Final de El Universo Mecánico y más allá. Fronteras y futuro de la Física.

### 52.2. Resumen de la lección

No conocemos todas las reglas del juego:

$$F = ma$$

$$H\Psi = E\Psi$$

$$\left(-\frac{\hbar^2}{2m}\nabla^2 + V\right)\Psi = E\Psi$$

$$(i\hbar\gamma^\mu\partial_\mu - e\gamma^\mu A_\mu - mc)\Psi = (i\hbar\not{D} - mc)\Psi = 0$$

$$D = \partial_\mu + ieA_\mu$$

$$\not{D} = \gamma^\mu\partial_\mu + ie\gamma^\mu A_\mu$$

En una escala muy pequeña, el mundo está gobernado por las leyes de la mecánica cuántica, y a escala cósmica, está gobernado por la teoría de la relatividad general. Pero estas no son completamente compatibles entre sí. La primera resolvió el problema del sistema solar y la segunda el problema del átomo. La primera revolución parecía reducir todos los fenómenos de los cielos y de la tierra en una única ecuación,  $F=ma$ . Numerosos descubrimientos se realizaron bajo las leyes de la mecánica, el estudio de la electricidad (Franklin), la inducción electromagnética (Faraday), Maxwell que encontró detrás de la relación entre la fuerza eléctrica y magnética la velocidad de la luz. Sin embargo hubo numerosas contradicciones y resultados no esperados. Es aquí cuando entra

Albert Einstein jugando un papel muy importante en esta segunda revolución. Einstein combinó espacio y tiempo en un continuo sin fisuras y su teoría de la relatividad fue solo el primer paso. Más tarde añadió que el propio espacio-tiempo estaba curvado. En 1905 Albert Einstein también se dio cuenta de que tenía un modo de explicar algo llamado efecto fotoeléctrico. Dijo que la luz podía estar formada por partículas. El principio de incertidumbre de Heisenberg escribía en términos generales la física. La nueva teoría llamada mecánica cuántica explicaba todos los átomos del universo, pero esta desafió la relación entre causa y efecto, en la física moderna dada una causa no siempre se produce el mismo efecto. Con la mecánica cuántica las trayectorias de las partículas atómicas no se podían predecir con exactitud, al igual que el destino del universo no era predeterminado. Aún así, en el universo mecánico-cuántico algunas cosas no han cambiado: la energía, el movimiento y el momento cinético se siguen conservando. En la nueva física cada partícula elemental es un tipo de giróscopo mecánico-cuántico. De Newton a Einstein:

$$F = \frac{dp}{dt} = ma$$

$$F_g = -G_N \frac{Mm}{r^2} e_r$$

$$r = \frac{L^2/DM}{1 + e \cos \theta}, \quad V_A = \frac{dA}{dt} = \frac{L}{2M} = \text{const}$$

$$GMT^2 = 4\pi^2 R^3$$

$$F_C = K_C \frac{Qq}{r^2} e_r$$

$$F_m = K_m \frac{p_1 p_2}{r^2} e_r$$

$$F_m = q\vec{v} \times \vec{B}$$

$$\oint \vec{g} \cdot d\vec{S} = -4\pi G_N M$$

$$\oint \vec{E} \cdot d\vec{S} = \frac{Q}{\epsilon_0} = 4\pi K_C Q$$

$$\oint \vec{B} \cdot d\vec{S} = 0$$

$$\oint \vec{E} \cdot d\vec{r} = \varepsilon = -\frac{d\phi_m}{dt} = -\frac{d}{dt} \iint \vec{B} \cdot d\vec{S}$$

$$\oint \vec{B} \cdot d\vec{r} = \mu_0 \left( I + \varepsilon_0 \frac{d}{dt} \iint \vec{E} \cdot d\vec{S} \right)$$

$$u = \frac{E}{V} = \frac{\varepsilon_0 E^2}{2}, \quad u = \frac{E}{V} = \frac{B^2}{2\mu_0}$$

$$\square A_\mu = 0$$

$$V = IR, \quad P = IV = I^2 R$$

$$v = \lambda f$$

$$v_s^2 = \frac{P}{\rho}$$

$$c^2 = \frac{K_C}{K_m}$$

$$v_{ola}^2 = \frac{g\lambda}{2\pi}$$

$$\theta_i = \theta_r$$

$$n_i \sin \theta_i = n_r \sin \theta_r$$



$$s^2 = -c^2\tau^2 = x^2 - c^2t^2$$

$$\Delta t = \gamma\Delta t'$$

$$E = Mc^2 = m_0\gamma c^2$$

$$M = m\gamma = m_0\gamma$$

$$p = Mv$$

$$E^2 = (pc)^2 + (mc^2)^2$$

$$E = nhf$$

$$E = \left(\frac{1}{2} + n\right)\hbar\omega$$

$$E = R(n_1^{-1} - n_2^{-2})$$

$$hf - hf_0 = K$$

$$p = \frac{h}{\lambda}$$

$$\lambda = \frac{h}{p}$$

$$H\Psi = \left(-\frac{\hbar^2}{2m}\nabla^2 + V\right)\Psi = E\Psi$$

$$(i\hbar\mathcal{D} - mc)\Psi = 0$$

$$G_{\mu\nu} = \frac{8\pi G_N}{c^4}T_{\mu\nu}$$

$$\square\bar{h}_{\mu\nu} = -\frac{16\pi G_N}{c^4}T_{\mu\nu}$$