LAS ECUACIONES DEL CAMPO ELECTROMAGNETICO

1.Definición:

1.1.El campo electromagnético:

Se puede definir por el valor del tensor mecánico y por el valor de la densidad de acción en vacío, es decir, por el valor χ tal que el intervalo es $ds = \chi.A_k dx_k$ y por el valor U tal que la acción total del campo (acción sobre la materia y acción en el vacío) es

$$S = S_p + S_v = -mc\int ds + \int U.d\Omega$$

El cuadrivector A_k se denomina cuadripotencial vectorial del campo electromagnético, y el vector formado por sus tres primeras componentes es el vector $\vec{A} = (A_1, A_2, A_3)$, que se llama potencial vectorial. El escalar $\phi_e = i.A_4$ se llama potencial escalar.

- Para el intervalo:

$$ds = \chi.A_k dx_k = \left[\frac{\sqrt{-\delta_{rx}.dx_r.dx_s}}{A_k.dx_k} - \frac{e}{m.c^2}\right].A_k dx_k$$

- Para la densidad de acción en el vacío:

$$U = \frac{i}{16\pi c} F_{jk}{}^2$$

Siendo F_{jk} tal que

$$F_{jk} = \frac{\partial A_k}{\partial x_j} - \frac{\partial A_j}{\partial x_k}$$

que se llama Tensor Campo Electromagnético

La carga eléctrica de cada partícula material es la magnitud mediante la cual puede ponerse de manifiesto la existencia de un campo electromagnético. O sea, una partícula material interactúa con un campo electromagnético solamente si tiene carga eléctrica no nula, es decir, si está "cargada". Este es el sentido de algunas definiciones que damos a continuación al objeto de establecer un criterio matemático para la causalidad del campo electromagnético.

Las causas del campo:

Se denominan *causas del campo electromagnético* en un punto fijo, N, del espacio-tiempo (M_4,R), a la carga eléctrica de las partículas constituyentes de las distribuciones materiales, y a sus movimientos respecto del punto fijo. N.

A la carga eléctrica de la distribución se le llama *causa escalar del campo,* y al producto de la carga eléctrica por la velocidad del sistema respecto al punto N de referencia, se le llama *causa vectorial del campo*, o también, *corriente eléctrica.*

Se tienen, pues, las siguientes definiciones para un sistema de partículas inmerso en el campo:

Causa escalar:............... $q = \Sigma e_k$

Causa vectorial:........... $n = q.v$

Cuadricausa:................ $n_j = q.x_j$, $j = 1,2,3,4$

Se definen, asimismo, las densidades de causa escalar, o densidad de carga eléctrica, la densidad de causa vectorial, o densidad de corriente, y, finalmente, la densidad de cuadricausa, o cuadridensidad de corriente, como las respectivas causas escalar o vectorial, por unidad de volumen en (M_4,R).

Que pueden expresarse, utilizando la función Delta de Dirac, de la forma:

Densidad de carga:.................... $\rho = \sum e_k.\delta(\bar{r} - \bar{r}_k)$

Densidad de corriente:............. $\bar{j} = \rho.\bar{v} = \sum e_k.\delta(\bar{r} - \bar{r}_k).\bar{v}$

Cuadridensidad de corriente:..... $J_j = \rho.\frac{dx_j}{dt} = \sum e_k.\delta(\bar{r} - \bar{r}_k).\frac{dx_j}{dt}$

(siendo $\delta(\bar{r} - \bar{r}_k)$ la función Delta de Dirac).

1.2. Los vectores campo:

Se definen dos vectores fundamentales a partir del potencial vectorial y del potencial escalar del campo:

- Vector *campo eléctrico* es el vector dado por las expresión

$$\overline{E} = -\frac{1}{c}\frac{\partial \overline{A}}{\partial t} - \overline{\nabla}\phi_e$$

- Vector *campo magnético,* que se define por:

$$\overline{H} = \overline{\nabla} x \overline{A}$$

Estos vectores, así definidos, permiten expresar el tensor campo electromagnético sin necesidad de que aparezcan las derivaciones parciales.

Teorema:

El tensor campo electromagnético puede expresarse en función de los vectores campo eléctrico y campo magnético del modo siguiente:

$$(F_{jk})_4 = \begin{bmatrix} 0 & H_3 & -H_2 & -i.E_1 \\ -H_3 & 0 & H_1 & -i.E_2 \\ H_2 & -H_1 & 0 & -i.E_3 \\ i.E_1 & 1.E_2 & i.E_3 & 0 \end{bmatrix}$$

En efecto:

$$\overline{E} = -\frac{1}{c}\frac{\partial \overline{A}}{\partial t} - \overline{\nabla}\phi_e = -i.\frac{\partial \overline{A}}{\partial (ict)} - \nabla(-iA_4) = -i.\frac{\partial \overline{A}}{\partial (x_4)} - \nabla(-iA_4) =$$

$$= i.(\overline{\nabla}A_4 - \frac{\partial \overline{A}}{\partial x_4}) = i.\left(\frac{\partial A_4}{\partial x_1}, \frac{\partial A_4}{\partial x_2}, \frac{\partial A_4}{\partial x_3}\right) - i.\left(\frac{\partial A_1}{\partial x_4}, \frac{\partial A_2}{\partial x_4}, \frac{\partial A_3}{\partial x_4}\right) =$$

$$= i.\left(\frac{\partial A_4}{\partial x_1} - \frac{\partial A_1}{\partial x_4}, \frac{\partial A_4}{\partial x_2} - \frac{\partial A_2}{\partial x_4}, \frac{\partial A_4}{\partial x_3} - \frac{\partial A_3}{\partial x_4}\right) = \left(i.F_{14}, i.F_{24}, i.F_{34}\right) = \left(E_1, E_2, E_3\right) \Rightarrow$$

$$\Rightarrow \begin{cases} F_{14} = -i.E_1 \\ F_{24} = -i.E_2 \\ F_{34} = -i.E_3 \end{cases}$$

$$\overline{H} = \overline{\nabla} \wedge \overline{A} = \left(\frac{\partial A_3}{\partial x_2} - \frac{\partial A_2}{\partial x_3}, \frac{\partial A_1}{\partial x_3} - \frac{\partial A_3}{\partial x_1}, \frac{\partial A_2}{\partial x_1} - \frac{\partial A_1}{\partial x_2}\right) = \left(.F_{23}, F_{31}, F_{12}\right) \Rightarrow$$

$$\Rightarrow \begin{cases} F_{23} = H_1 \\ F_{31} = H_2 \\ F_{12} = H_3 \end{cases}$$

2. Magnitudes básicas:

Desde la definición de campo electromagnético como un caso particular de campo físico, pueden obtenerse las magnitudes básicas de forma inmediata:

2.1. Tensor mecánico:

$$\chi = \left[\frac{\sqrt{-\delta_{rx}.dx_r.dx_s}}{A_j dx_j} - \frac{e}{m.c^2} \right]$$

2.2. Intervalo:

El intervalo se define como $ds = \chi(A_j dx_j) \Rightarrow$

$$\Rightarrow ds = \left[\frac{\sqrt{-\delta_{rx}.dx_r.dx_s}}{A_j.dx_j} - \frac{e}{m.c^2} \right].(A_j.dx_j) = \sqrt{-\delta_{rx}.dx_r.dx_s} - \frac{e}{m.c^2}(A_j.dx_j)$$

Explicitando las componentes de los vectores, sustituyendo x_4 =-ict, A_4=-iϕ:

$$ds = \sqrt{-(dx_1{}^2 + dx_2{}^2 + dx_3{}^2 + dx_4{}^2)} - \frac{e}{m.c^2}(A_1.dx_1 + A_2.dx_2 + A_3.dx_3 + A_4.dx_4) =$$

$$= \sqrt{-dr^2 + c^2.dt^2} - \frac{e}{mc^2}(\overline{A}.d\overline{r} - c\phi.dt)$$

2.3. Acción en vacío:

La acción del campo electromagnético en el vacío, para cada volumen Ω, puede espresarse por una integral de volumen:

$$S_v = \int_\Omega U.d\Omega = \frac{i}{16\pi.c}\int_\Omega {F_{jk}}^2.d\Omega$$

2.4. Acción de la materia en el campo:

Partiendo de la expresión del intervalo, ds, podemos determinar la expresión matemática de la acción campo-materia:

$$S_p = -m.c\int ds = -mc\int\left(\sqrt{-dr^2 + c^2.dt^2} - \frac{e}{mc^2}(\overline{A}.d\overline{r} - c\phi.dt)\right) =$$

$$= -mc\int\left(\sqrt{-\frac{dr^2}{dt^2} + c^2} - \frac{e}{mc^2}(\overline{A}.\frac{d\overline{r}}{dt} - c\phi.)\right),dt = -mc\int\left(\sqrt{-v^2 + c^2} - \frac{e}{mc^2}(\overline{A}.\overline{v} - c\phi.)\right).dt$$

2.5. Lagrangiana:

Desde la expresión de la acción campo-materia se puede despejar inmediatamente la lagrangiana:

$$L = -mc\sqrt{-\frac{dr^2}{dt^2} + c^2} - \frac{e}{mc^2}(\overline{A}.\frac{d\overline{r}}{dt} - c\phi.) = -m.c^2\sqrt{1 - \left(\frac{v}{c}\right)^2} + \frac{e}{c}(\overline{A}.\overline{v} - c\phi.)$$

2.6. Hamiltoniana:

Desde la definición clásica de Hamiltoniana a partir de la función de Lagrange:

$$H = \overline{v}.\frac{\partial L}{\partial \overline{v}} - L = \overline{v}.\frac{\partial(-m.c^2\sqrt{1-\left(\frac{v}{c}\right)^2} + \frac{e}{c}(\overline{A}.\overline{v} - c\phi.)}{\partial \overline{v}} - (-m.c^2\sqrt{1-\left(\frac{v}{c}\right)^2} + \frac{e}{c}(\overline{A}.\overline{v} - c\phi.)) =$$

$$= \overline{v}.\left(\frac{m.\overline{v}}{\sqrt{1-\left(\frac{v}{c}\right)^2}} + \frac{e}{c}\overline{A}.\overline{v}\right) - (-m.c^2\sqrt{1-\left(\frac{v}{c}\right)^2} + \frac{e}{c}(\overline{A}.\overline{v} - c\phi.)) = \frac{m.\overline{v}^2}{\sqrt{1-\left(\frac{v}{c}\right)^2}} + e\phi$$

2.7. Acción total:

$$H = \frac{m.\overline{v}^2}{\sqrt{1-\left(\frac{v}{c}\right)^2}} + e\phi$$

La acción total del campo electromagnético es la suma de la acción en el vacío más la acción campo-materia. Puede expresarse en función de las densidades de lagrangiana y de acción en el vacío, o bien, puede expresarse en función de la cuadridensidad de corriente.

$$S = S_p + S_v = -mc\int\left(\sqrt{-dr^2 + c^2.dt^2} - \frac{e}{mc^2}(\overline{A}.d\overline{r} - c\phi.dt)\right) + \frac{i}{16\pi.c}\int F_{jk}{}^2.d\Omega$$

- Expresión en función de las densidades de lagrangiana y acción en el vacío:

La acción en el vacío, si es U la densidad de acción en vacío por unidad de volumen, es $S_v = \int_\Omega U.d\Omega$, en un volumen Ω.

La acción de la interacción campo-materia, si llamamos a la densidad de langrangiana por unidad de volumen con la expresión $-\frac{1}{c}\sqrt{-\varphi}.\Delta$, es $S_p = -\int\frac{1}{c}\sqrt{-\varphi}\Delta.d\Omega.$

Por tanto, se tiene finalmente, para la acción total:

$$S = S_v + S_p = \int_\Omega (U - \frac{1}{c}\sqrt{-\varphi}\Delta).d\Omega$$

- Expresión en función de la cuadridensidad de corriente:

Modifiquemos la expresión del término de la acción campo-materia donde aparece la carga eléctrica, esto es, el segundo termino de la expresión de la acción total:

$$S_p = -m.c\int ds = -mc\int\left(\sqrt{-dr^2 + c^2.dt^2} - \frac{e}{mc^2}(\overline{A}.d\overline{r} - c\phi.dt)\right) + \frac{i}{16\pi.c}\int F_{jk}{}^2.d\Omega$$

así, pues, el segundo término:

$$-mc\int\left(-\frac{e}{mc^2}(\overline{A}.d\overline{r} - c\phi.dt)\right) = \int\frac{e}{c}(\overline{A}.d\overline{r} - c\phi.dt) = \int\frac{\rho.dV}{c}A_k.dx_k = \frac{1}{c}\int A_k.dx_k.\rho.dV =$$

$$= \frac{1}{c}\int A_k.\rho.dx_k.dx_1.dx_2.dx_3 = \frac{1}{c}\int A_k.\rho.\frac{dx_k}{dt}.dx_1.dx_2.dx_3.dt = \frac{1}{ic^2}\int A_k.\rho.v_k.dx_1.dx_2.dx_3.(icdt) =$$

$$= \frac{1}{ic^2}\int A_k.\rho.v_k.d\Omega = \frac{1}{ic^2}\int A_k.J_k.d\Omega$$

Por consiguiente, se obtiene como expresión final de la acción total:

$$S = S_v + S_p = -mc\int\left(\sqrt{-dr^2 + c^2.dt^2}\right) + \frac{i}{.c}\int(-\frac{1}{c}A_k.J_k + \frac{1}{16.\pi}F_{jk}{}^2).d\Omega$$

3. Ecuaciones del campo electromagnético:

Para obtener las ecuaciones del campo hemos de partir del Principio de Mínima Acción total, es decir, de que la variación virtual de la acción total del sistema campo-materia más la acción en vacío, es nula. Se obtienen de esta manera las llamadas *ecuaciones tensoriales* o *ecuaciones de campo*, y, por introducción de los vectores campo eléctrico y campo magnético, la forma conocida como *Ecuaciones de Maxwell*.

3.1. Ecuaciones tensoriales:

Por principio de mínima acción: $\delta S = \delta(S_v + S_p) = 0$, por consiguiente, tomando la expresión de la acción total en función de la cuadridensidad de corriente:

$$\delta S = -mc.\delta\int\left(\sqrt{-dr^2 + c^2.dt^2}\right) + \frac{i}{.c}.\delta\int(-\frac{1}{c}A_k.J_k + \frac{1}{16.\pi}F_{jk}{}^2).d\Omega = 0$$

de estos dos sumandos, el primero es nulo, por tratarse de la variación virtual de la acción de un campo libre (partícula en ausencia de campo), por lo que también es nulo el segundo sumando:

$$\delta\int(-\frac{1}{c}A_k.J_k + \frac{1}{16.\pi}F_{jk}{}^2).d\Omega = 0$$

y se tiene:

$$\delta S = \int(-\frac{1}{c}\delta(A_k.J_k) + \frac{1}{16.\pi}\delta F_{jk}{}^2).d\Omega = \int\left(-\frac{1}{c}\delta(A_k.J_k) + \frac{1}{16.\pi}2.F_{jk}\delta F_{jk}\right).d\Omega =$$

$$= \int\left(-\frac{1}{c}(\delta A_k.J_k + \delta J_k.A_k) + \frac{1}{16.\pi}2.F_{jk}\delta F_{jk}\right).d\Omega = 0$$

y siendo $\delta J_k = 0,$ resulta:

$$\int\left(-\frac{1}{c}\delta A_k.J_k + \frac{1}{8.\pi}F_{jk}\delta F_{jk}\right).d\Omega = 0$$

o bien:

$$\int\left(\frac{1}{8\pi}F_{jk}\delta(\frac{\partial A_j}{\partial x_k}-\frac{\partial A_k}{\partial x_k})-\frac{1}{c}.J_k\delta A_k\right).d\Omega=0$$

y se tiene:

$$\int\left(\frac{1}{8\pi}F_{jk}\delta\frac{\partial A_j}{\partial x_k}-\frac{1}{8\pi}F_{jk}\delta\frac{\partial A_k}{\partial x_j}-\frac{1}{c}.J_k\delta A_k\right).d\Omega=\int\left(-\frac{1}{4\pi}F_{jk}\delta\frac{\partial A_k}{\partial x_j}-\frac{1}{c}.J_k\delta A_k\right).d\Omega=$$

$$=\int\left(\frac{1}{4\pi}F_{jk}\frac{\partial\delta A_k}{\partial x_j}+\frac{1}{c}.J_k\delta A_k\right).d\Omega=0$$

Resolveremos por partes la integral del primer sumando, llamando previamente $d\,s_j=\frac{d\Omega}{d\,x_j}$:

$$\frac{1}{4\pi}\int F_{jk}\frac{\partial\delta\,A_k}{\partial\,x_j}d\Omega=\frac{1}{4\pi}\int F_{jk}\frac{\partial\delta\,A_k}{\partial\,x_j}d\,x_j d\,s_j=$$

$$=\frac{1}{4\pi}\int\left[\int F_{jk}\frac{\partial\delta\,A_k}{\partial\,x_j}d\,x_j\right]d\,s_j=\frac{1}{4\pi}\int\left[F_{kj}\,\delta\,A_k-\int\delta\,A_k\frac{\partial\,F_{kj}}{\partial\,x_j}dx_j\right]ds_j=$$

$$=\frac{1}{4\pi}\int F_{kj}\,\delta A_k d\,s_j-\frac{1}{4\pi}\int\delta\,A_k\frac{\partial\,F_{kj}}{\partial\,x_j}d\Omega$$

Sustituimos esta integral en la expresión de la variación virtual de la acción:

$$\delta S=\frac{1}{c}\int J_k.\delta\,A_k d\Omega+\frac{1}{4\pi}\int F_{kj}\,\delta\,A_k\,d\,s_j-\frac{1}{4\pi}\int\delta\,A_k\frac{\partial\,F_{kj}}{\partial\,x_j}d\Omega$$

La segunda de estas integrales, al estar extendida a una hipersuperficie y ser los A_k datos fijos en los limites de la integración, se anula. Por lo cual:

$$\delta S=\frac{1}{c}\int J_k\,\delta\,A_k\,d\Omega-\frac{1}{4\pi}\int\delta A_k.\frac{\partial F_{kj}}{\partial x_j}.d\Omega=$$

$$=\int\left[\frac{1}{c}J_k-\frac{1}{4\pi}\frac{\partial F_{kj}}{\partial x_j}\right].\delta A_k.d\Omega=0$$

Estas son las ecuaciones del campo electromagnético:

$$\frac{1}{c}J_k - \frac{1}{4\pi}\frac{\partial F_{kj}}{\partial x_j} = 0$$

$$(k = 1,2,3,4)$$

En forma desarrollada:

$$\frac{1}{c}J_1 - \frac{1}{4\Pi}\left[\frac{\partial F_{11}}{\partial x_1} + \frac{\partial F_{12}}{\partial x_2} + \frac{\partial F_{13}}{\partial x_3} + \frac{\partial F_{14}}{\partial x_4}\right] = 0$$

$$\frac{1}{c}J_2 - \frac{1}{4\Pi}\left[\frac{\partial F_{21}}{\partial x_1} + \frac{\partial F_{22}}{\partial x_2} + \frac{\partial F_{23}}{\partial x_3} + \frac{\partial F_{24}}{\partial x_4}\right] = 0$$

$$\frac{1}{c}J_3 - \frac{1}{4\Pi}\left[\frac{\partial F_{31}}{\partial x_1} + \frac{\partial F_{32}}{\partial x_2} + \frac{\partial F_{33}}{\partial x_3} + \frac{\partial F_{34}}{\partial x_4}\right] = 0$$

$$\frac{1}{c}J_4 - \frac{1}{4\Pi}\left[\frac{\partial F_{41}}{\partial x_1} + \frac{\partial F_{42}}{\partial x_2} + \frac{\partial F_{43}}{\partial x_3} + \frac{\partial F_{44}}{\partial x_4}\right] = 0$$

Teniendo en cuenta la expresión de las componentes del tensor campo con respecto a los vectores campo eléctrico y campo magnético, es posible modificar estas ecuaciones para obtener la forma conocida como *Ecuaciones de Maxwell.*

3.2. Las Ecuaciones de Maxwell:

Al sustituir las componentes del tensor campo electromagnético por sus expresiones en función de las componentes de los vectores *campo eléctrico* y *campo magnético*:

$$\frac{4\pi}{c}J_1 - \left[\frac{\partial H_3}{\partial x_2} + \frac{\partial H_2}{\partial x_3} - \frac{\partial iE_1}{\partial x_4}\right] = 0$$

$$\frac{4\pi}{c}J_2 - \left[-\frac{\partial H_3}{\partial x_1} + \frac{\partial H_1}{\partial x_3} - \frac{\partial iE_2}{\partial x_4}\right] = 0$$

$$\frac{4\pi}{c}J_3 - \left[\frac{\partial H_2}{\partial x_1} - \frac{\partial H_1}{\partial x_2} - \frac{\partial iE_4}{\partial x_4}\right] = 0$$

$$\frac{4\pi}{c}J_4-\left[\frac{\partial E_1}{\partial x_1}+\frac{\partial E_2}{\partial x_2}+\frac{\partial E_3}{\partial x_3}\right]=0$$

o bien:

$$\frac{\partial H_3}{\partial x_2}-\frac{\partial H_2}{\partial x_3}=\frac{4\pi}{c}J_1+\frac{\partial iE_1}{\partial x_4}=\frac{4\pi}{c}J_1+\frac{\partial iE_1}{\partial (ict)}=\frac{4\pi}{c}J_1+\frac{1}{c}\frac{\partial E_1}{\partial t}$$

$$\frac{\partial H_1}{\partial x_3}-\frac{\partial H_3}{\partial x_1}=\frac{4\pi}{c}J_2+\frac{\partial iE_2}{\partial x_4}=\frac{4\pi}{c}J_2+\frac{\partial iE_2}{\partial (ict)}=\frac{4\pi}{c}J_2+\frac{1}{c}\frac{\partial E_2}{\partial t}$$

$$\frac{\partial H_2}{\partial x_1}-\frac{\partial H_1}{\partial x_2}=\frac{4\pi}{c}J_3+\frac{\partial iE_3}{\partial x_4}=\frac{4\pi}{c}J_3+\frac{\partial iE_3}{\partial (ict)}=\frac{4\pi}{c}J_3+\frac{1}{c}\frac{\partial E_3}{\partial t}$$

$$\frac{\partial E_1}{\partial x_1}+\frac{\partial E_2}{\partial x_2}+\frac{\partial E_3}{\partial x_3}=\frac{4\pi}{ic}.J_4$$

Las tres primeras se pueden escribir en forma vectorial, como el rotacional del vector campo magnético :

$$\overline{\nabla}\wedge\overline{H}=\frac{4\pi}{c}\overline{J}+\frac{1}{c}\frac{\partial\overline{E}}{\partial t}$$

Y la cuarta es expresable también vectorialmente, como la divergencia del vector campo eléctrico:

$$\overline{\nabla}.\overline{E}=\frac{4\pi}{ic}J_4$$

Hallando el rotacional del campo eléctrico y la divergencia del campo magnético, se obtienen otras dos ecuaciones vectoriales:

$$\vec{\nabla}\wedge\vec{E}=\vec{\nabla}\wedge\left(-\frac{1}{c}\frac{\partial\vec{A}}{\partial t}-\vec{\nabla}\phi_e\right)=-\frac{1}{c}\frac{\partial}{\partial t}(\vec{\nabla}\wedge\vec{A})-\vec{\nabla}\wedge\vec{\nabla}\phi_e=-\frac{1}{c}\frac{\partial H}{\partial t}$$

$$\vec{\nabla}.\vec{H}=\vec{\nabla}.(\vec{\nabla}\wedge\vec{A})=0$$

Estas son las ecuaciones buscadas, que, en función de las densidades de carga eléctrica y de corriente eléctrica:

$$q = \frac{1}{ic}\int J_4 . dV \Rightarrow \rho = \frac{dq}{dV} = \frac{1}{ic} J_4$$

Se obtienen, en definitiva, las cuatro ecuaciones clásicas que fueron propuestas por Maxwell en el siglo XIX:

$$\overline{\nabla} \wedge \overline{H} = \frac{4\pi}{c}\overline{J} + \frac{1}{c}\frac{\partial \overline{E}}{\partial t}$$

$$\overline{\nabla}.\overline{E} = 4\pi\rho$$

$$\vec{\nabla} \wedge \vec{E} = -\frac{1}{c}\frac{\partial H}{\partial t}$$

$$\vec{\nabla}.\vec{H} = 0$$

---oo0oo---

UNA NOTA DE REFERENCIA:

James Clark Maxwell *(1831-1879), británico. Su trabajo por desentrañar el porqué de los fenómenos electromagnéticos le convirtieron en uno de los científicos importantes del siglo XIX.*

Nació en Edimburgo y estudió en las universidades de Edimburgo y Cambridge. Fue profesor de física de la universidad de Aberdeen desde 1856 hasta 1860. En 1871 era ya el profesor más destacado de física experimental en Cambridge, donde supervisó la construcción del laboratorio Cavendish.

En su época, Maxwell amplió la investigación de Michel Faraday sobre el campo electromagnético, demostrando la relación matemática entre ambos campos vectoriales eléctrico y magnético, mediante este sistema de cuatro ecuaciones, que representó en su tiempo, uno de los grandes logros de la ciencia.