AUTORES: CRIADO PEREZ, A., **CRIADO Gª-LEGAZ, A.M.** ,M^{NEZ} GOBANTES, L.
TITULO: El concepto de campo en su evolución histórica (II). El campo en la revolución relativista.
TIPO DE PARTICIPACIÓN:
CONGRESO: ***XI Encuentro de Didáctica de Ciencias Experimentales.***
PUBLICACIÓN: *Actas* pp. 128-135
LUGAR DE CELEBRACIÓN: E. U. M. Univ. Burgos.
AÑO: 1990

ACTAS

DE LOS

XI ENCUENTROS

DE

DIDACTICA

DE LAS

CIENCIAS EXPERIMENTALES

JESUS ANGEL MENESES VILLAGRA
(COMP.)

BURGOS, 11-14 de septiembre de 1990

DPTO. DE DIDACTICA DE LAS CIENCIAS EXPERIMENTALES Y GEODINAMICA.

E. U. DEL PROFESORADO DE E.G.B. DE BURGOS

UNIVERSIDAD DE VALLADOLID

E.U. DEL PROFESORADO DE E.G.B. (BURGOS)
UNIVERSIDAD DE VALLADOLID

I.S.B.N.: 84-88002-00-9
Depósito Legal: BU-114-1991

EL CONCEPTO DE CAMPO EN SU EVOLUCION HISTORICA (II). EL CAMPO EN LA REVOLUCION RELATIVISTA.

Criado Pérez, A.(*); Criado García-Legaz, A.(**) y Martínez Gobantes, L.(***)

(*) *E.U. Informática. Universidad de Sevilla.*

(**) *E.U. Magisterio. Universidad de Sevilla.*

(***) *Centro de Formación. CTNE. Sevilla.*

1. INTRODUCCIÓN

En el siglo XX se produce una doble revolución científica, (la Relatividad y los Cuantos), que cambia nuestro conocimiento de la estructura de mundo físico y que afecta profundamente a la concepción del campo de interacciones.

Desde una perspectiva macroscópica, los campos eléctrico **E** y magnético **B** se unifican en un ente único $\hat{F}$ que es covariante en el continuo espacio-tiempo, desterrándose el éter definitivamente. El campo gravitatorio **G**, adquiere su verdadera significación de alteración geométrica del universo debida a la distribución de masas (materiales y energéticas) y se convierte en el fundamento de la Cosmología.

Desde una perspectiva microscópica, la dualidad onda-corpúsculo cuantifica los campos que verifican el Principio de Heissenberg, se descubre la existencia de bosones (reales y virtuales) y se inicia un proceso de unificación de las cuatro interacciones de largo alcance (electromagnética y gravitatoria) y de corto alcance (fuerte y débil).

2. RELATIVIDAD.

2.1. Relatividad especial. Generalidades.

Se ha visto, (en un trabajo anterior), la profunda diferencia entre las transformaciones de Galileo (t. de G.) y las de Lorentz (t. de L.) ya que éstas niegan el tiempo absoluto e introducen, formalmente, "un tiempo local". ¿Sería posible, por medios electromagnéticos, diseñar un velocímetro autocontenido?. Los físicos han realizado un conjunto de experiencias intentando responder empíricamente a este interrogante, de estas experiencias, las más fiables se clasifican en tres clases:

- 1727, Bradley: fuente luminosa en reposo, receptor móvil, (aberración estelar). Resultado: el éter no es arrastrado por el sistema de observación.

- 1851, Fizeau: fuente y receptor fijos, (medio de propagación móvil, luz propagándose en un fluido móvil). Resultado: el éter es parcialmente arrastrado.

- 1887, Michelson y Morley: fuente y receptor solidarios y móviles, velocidad de propagación de la luz en direcciones paralela (de igual o distinto sentido) y normal, ambas referidas al movimiento de traslación de la Tierra. Resultado: la velocidad de la luz es constante y el éter es arrastrado por la Tierra.

A la imposibilidad de obtener una única conclusión de estas experiencias, se añade el hecho de que en los campos electromagnéticos se obtienen resultados que no concuerdan con la invarianza de los fenómenos físicos en los distintos sistemas de referencia (s. de r.):

Una carga q, genera un campo electrostático para todos los observadores que se encuentran en reposo respecto a ella; pero para aquellos que se mueven, con velocidad **V**, q no sólo crea el campo **D**, sino también un campo magnético **H = v x D**.

2.2. Postulados de Einstein.

En 1905 un joven físico, Albert Einstein, decide desterrar definitivamente al éter y con él al espacio y tiempo absolutos. Desde entonces sólo tendrá sentido real el tiempo relativo, cronometrado en cada s. de r., por relojes en reposo en él, y sincronizados mediante señales ópticas. Einstein formula dos sencillos postulados sobre los que se iba a fundamentar una de las teorías de mayor trascendencia en todos los campos de la Ciencia:

1º Los fenómenos físicos (no sólo los mecánicos), transcurren de igual forma en cualquier s. de r.

2º La velocidad de la luz es una constante invariante, independiente de la fuente y del observador.

Consideremos un ejemplo que aclare la variación de la duración y distancia entre dos sucesos, al ser observados en dos s. de r.i. en movimiento relativo, así como su invariante:

Sea una varilla de longitud D provista de un foco emisor F y un espejo E. F emite un destello que se refleja en E y regresa a F. Un reloj R_o solidario a la varilla, registra la duración entre los dos sucesos, S_1, emisión, y S_2 retorno; R_o está presente en ambos sucesos y cronometra el "tiempo propio" $\Delta t_o = 2\frac{D}{c}$. La varilla y los artefactos que le son solidarios, constituyen un sistema inercial K_o que puede moverse con una velocidad **u**:**u**(u,0,0), respecto de otra referencia K. (Ver figura 1).

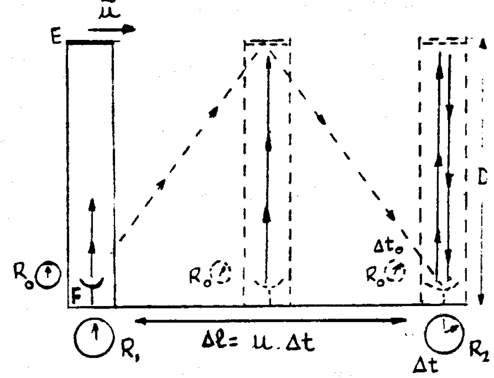


Fig. 1

La duración impropia t, es cronometrada en el sistema K por dos relojes R_1 y R_2, que distan entre sí: $\Delta l = u.\Delta t$.

En el sistema móvil K_0 (varilla), la trayectoria de la radiación es rectilínea (ida y vuelta). En el sistema K (fijo), la trayectoria es una quebrada que recorre los lados de un triángulo isósceles, de altura D y base Δl . Se verifica que:

$$c = \frac{2D}{\Delta t}$$

$$\Delta t_o = \Delta t \sqrt{1 - \frac{u^2}{c^2}} \quad \text{(I)} \qquad c^2 \Delta t_o = c^2 \Delta t^2 - \Delta l \quad \text{(II)}$$

$$c = \frac{2\sqrt{D^2 + \frac{(u\Delta t)^2}{4}}}{\Delta t}$$

La expresión (I) muestra como la duración propia t_0 que transcurre entre dos sucesos, que ocurren en un mismo lugar, $(\Delta l_o = 0)$, en K_o, cronometrados por un sólo reloj R_o, es menor que la duración impropia, cronometrada por dos relojes, R_1 y R_2 anclados en K. La expresión (II) indica que la duración Δt y la distancia forman una expresión, $c^2 \Delta t^2 - \Delta l^2$, que es invariante en cualquier s. de r.i. y de valor $c^2 \Delta t_o^2$, es decir:

$$c^2 \Delta t_o = c^2 \Delta t^2 - \Delta l^2 = c^2 \Delta t'^2 - \Delta l'^2$$

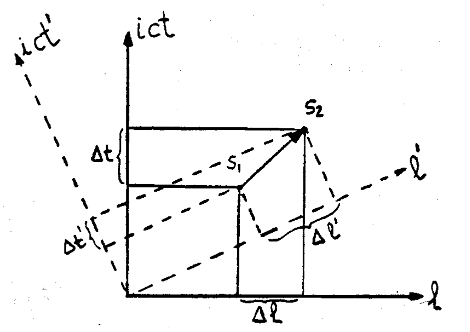
2.3. Espacio de Minkowski

Minkowski introdujo un espacio tetradimensional pseudoeuclídeo, universo U = {**r**,t}, cuyos puntos son los sucesos S que ocurren en un lugar ($x=x_1$, $y=x_2$, $z=x_3$) y en un instante ($ict=x_4$, $i=-1$) .De lo anterior se deduce que el intervalo S_{12} entre dos sucesos S_1 y S_2 en un s. de r. arbitrario, determina la forma cuadrática:

$$S_{12}^2 = c^2 (t_2 - t_1)^2 - \sum_{j=1}^{3} (x_{j2} - x_{j1})^2 = c^2 \Delta t^2 - \Delta l^2 = -\sum_{\mu=1}^{4} \Delta x_\mu^2$$

que es el cuadrado del módulo del tetravector $\mathbf{S_1 S_2}$.

Cambiar el s. de r.i. equivale a cambiar las componentes duración Δt y distancia Δl, entre S_1 y S_2, conservando el módulo de S_1S_2, lo que corresponde a una transformación ortogonal, que es la representación geométrica de una t. de L.



Las leyes físicas expresadas en vectores tetradimensionales deben ser covariantes frente a una t. de L.; cuando $v/c << 1$, las t. de L. tienden a las t. de G.

Aplicando este formalismo a la Mecánica se llega a varias conclusiones muy conocidas y ampliamente verificadas en la Física Atómica, Nuclear y de Alta Energía:

$$m(v)=\frac{m_o}{\sqrt{1-\beta^2}} \qquad \xi(v)=m(v).c^2 \qquad \vec{p}=\frac{m_o\vec{v}}{\sqrt{1-\beta^2}} \qquad \xi^2=p^2c^2+m_o^2c^4$$

2.4 Formulación relativista del campo electromagnético.

De las expresiones se sigue que **B** y **E** pueden derivarse de un tetravector potencial: A = (A, A, A , iϕ/c), de forma que sus componentes se identifiquen con los elementos de un único tensor $\hat{F}$ tetradimensional y hemisimétrico:

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

Análogamente se define un tetravector densidad $\vec{J}=(\rho\vec{v},\frac{i}{c}\rho)$.

Todas estas magnitudes son covariantes en una t. de L. La transformación del campo electromagnético de un s. de r.i. a otro se obtiene sin dificultad y la carga q es un invariante. Las componentes del campo son los elementos de un ente físico único $\hat{F}$ = (F_{jk}), cuya fuente es **J**. $\hat{F}$ se propaga con velocidad invariante c y su comportamiento físico es autónomo, independiente de las fuentes.

El éter es innecesario y el continuo espacio-tiempo es el asiento del campo y su energía electromagnética. Las ecuaciones de Maxwell resultan al expresar el hecho de que la fuente de $\hat{F}$ es J: div $\hat{F}$ = J.

3. RELATIVIDAD GENERAL.

3.1. Principios de Relatividad General.

La relatividad especial, ampliamente utilizada en física, tiene dos grandes limitaciones: a) Se restringe al ámbito de los s. de r.i. b) Ignora, en principio la interacción **G** y la singularidad del hecho de que "sean iguales las masas inerte y gravitatoria".

Durante 10 años, Einstein trabajó en esta problemática y en 1916, definitivamente, publicó "Los fundamentos de la teoría de la relatividad general", donde se expone, expresada en lenguaje tensorial, una genial interpretación de la interacción gravitatoria. Einstein parte de un primer principio:

(I) P. de covarianza.- En el espacio tetradimensional E_4, las leyes físicas deben ser independientes del s. de r. (acelerado o no). Las leyes de la Ciencia son enunciados acerca de coincidencias en el continuo espacio-tiempo, y si están expresadas en forma intrínseca (tensorial), deben ser covariantes en los cambios de s. de r.

Posteriormente, en 1911, descubre un nuevo principio:

(II) P. de equivalencia.- Al menos formalmente, toda fuerza gravitatoria es equivalente a una fuerza inercial. Dos partículas, en iguales condiciones iniciales, se mueven de igual forma, independientemente del valor de sus masas (iguales o distintas), ya en un campo gravitatorio, ya en un campo inercial.
Igualmente debe ocurrir con cualquier fenómeno físico.

Aplicando estos dos principios al análisis de los resultados obtenidos en un conjunto de casos particulares, (dos de los cuales se exponen), consistentes con la relatividad especial, por generalización, llegó Einstein a un tercer principio:

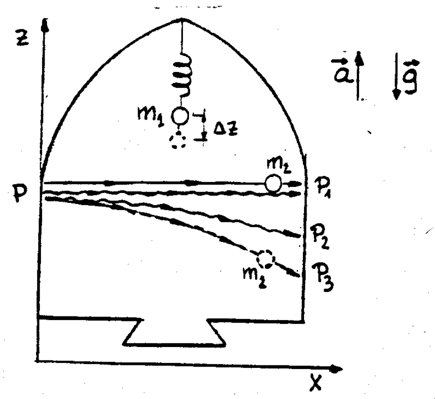
(III) Geometría del espacio y materia.- **Una distribución de masas** (materiales y/o energéticas) altera, en su entorno la geometría del universo, cambia la métrica del espacio y el transcurso de las duraciones. El universo adquiere curvatura y las trayectorias de las partículas libres (o la de los rayos electromagnéticos) ya no son rectas sino líneas curvas, geodésicas (curvas tales que, a lo largo de ellas, la distancia entre dos sucesos es mínima).

La formulación newtoniana de la Gravitación: $\Delta\phi=4\pi\gamma\rho$; $\vec{G}=-\nabla\phi$ resulta como un caso límite de la formulación einsteniana, en caso de campos poco intensos (sistema solar, astronáutica,...) pero es una primera aproximación incapaz de explicar y predecir fenómenos de muy pequeña magnitud (corrimiento hacia el rojo, curvatura de rayos luminosos, precesión del perihelio de mercurio,...) o de enorme complejidad (agujeros negros, modelos cosmológicos,...). El significado físico de ambas teorías es radicalmente distinto: Para Newton **G** es una atracción a distancia, euclídeo, absoluto y pasivo. Para Einstein, es una perturbación del continuo de sucesos (universo tetradimensional), que se propaga con velocidad finita, en forma de una curvatura, decreciente con la distancia a las fuentes), lo que da lugar a trayectorias curvas (geodésicas) de las partículas móviles y de la energía radiante; es una acción próxima del campo (agente activo) sobre la partícula situada en él.

3.2. La astronave y el disco giratorio.

Veamos dos ejemplos, triviales pero muy ilustrativos, del contenido físico de la Relatividad General.

1º La figura esquematiza la sección longitudinal de una astronave inicialmente en movimiento uniforme y lejos de los astros. La masa m_1 no alarga el dinamómetro ($\Delta z=0$) y una partícula m_2 (o un rayo de luz) lanzada (o emitido) desde P, recorre con velocidad constante, v_2 = (v,0,0),(c,0,0) la trayectoria inercial **PP$_1$**. Posteriormente, el dinamómetro se estira (z<0) y partícula y rayo describen trayectorias curvas parabólicas: PP_3 y PP_2, respectivamente.



De acuerdo con el principio (II) caben dos interpretaciones, físicamente equivalentes:

a) La astronave adquirió una aceleración constante (0,0,a) que origina un campo inercial uniforme **I** = (0,0,-a), que genera las fuerzas:

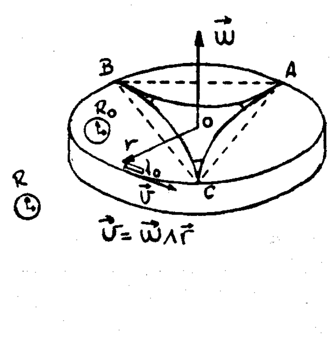
$$\vec{F}_1=(0,0,-m_1a) \qquad \vec{F}_2=(0,0,-m_2a) \qquad \text{y} \qquad \vec{F}=[0,0,-a(m=\frac{\epsilon}{c^2})]$$

b) La astronave atraviesa un campo gravitatorio uniforme **-g=a**, que genera las fuerzas **F$_1$** y **F$_2$** y, de acuerdo con (I), la curvatura del rayo.

Análogamente, en la cabina de un ascensor que cae libremente, **a=g** y también: respecto a la cabina acelerada, el campo gravitatorio desaparece, es anulado por el inercial, por ello, los cuerpos "no pesan" y las trayectorias inerciales (o las de los rayos), pueden ser rectas paralelas al suelo.

2º Un disco plano (figura 4), gira con velocidad angular constante **w**=(0,0,w), alrededor de su eje, que coincide con los ejes OZ y OZ´, correspondientes a dos s. de r. : K en reposo y K´ solidario al disco (s. de r. no i.). La rotación genera un campo inercial centrífugo:

$$\vec{I}=w^2\vec{r} \quad ; \quad \vec{I}=-\nabla\phi \quad ; \quad \phi=-\frac{r^2w^2}{2}$$



I es físicamente equivalente a un campo gravitacional repulsivo,

$$\vec{G}=-\nabla\phi \quad ; \quad \phi=-\gamma M(x^2+y^2) \quad ; \quad \gamma M=\frac{w^2}{2} \ .$$

Sea una circunferencia Γ de centro en O y radio r, r es normal en todo punto a v,($\mathbf{v}=\mathbf{w}_x\mathbf{r}$), y por consiguiente, Γ es invariante al pasar de K a K´. Hagamos medidas de Δl e Δt desde K y comparémoslas con las correspondientes Δl_o e Δt_o realizadas en K´. Determinar, desde K, la longitud de Γ es contar el número L, de segmentos de longitud propia l_o (medida en K´), situados sobre el disco, y que forman una poligonal inscrita en Γ. Si el disco estuviera en reposo, sería $L/2r = \pi$ pero al estar en movimiento, los segmentos tienen una velocidad longitudinal, rw, y su longitud (en K) es menor:

$l=l_o\sqrt{1-\frac{v^2}{c^2}}=l_o\sqrt{1-\frac{r^2w^2}{c^2}}$, por lo que el número L´ de ellos será mayor, y por tanto: $\frac{L'}{2r}=\frac{\pi}{\sqrt{1-\frac{r^2w^2}{c^2}}}>\pi$

Análogamente, al comparar las duraciones Δt_o e Δt , cronometrada por R_o y R [relojes anclados en K´ (móvil) y K (fijo)], se tiene:

$$\Delta t_o=\sqrt{1-\frac{v^2}{c^2}}.\Delta t=\sqrt{1-\frac{r^2w^2}{c^2}}.\Delta t$$

Las geodésicas en K´, trayectorias de inercia o rayos de luz, están curvadas por la repulsión del campo I. Al construir con tres de ellas un triángulo ABC, la suma de sus tres ángulos es menor que π.

3.3. La Gravitación einsteniana.

Para Einstein el universo es un espacio tetradimensional de Riemann, el elemento de intervalo es $ds^2 = g_{jk}.dx_j.dx_k$, g_{jk} son las diez componentes del tensor métrico ($g_{jk} = g_{kj}$, $4^2=16$, $16-10=10$), que determinan la geometría de E_4; particularmente, la curvatura esférica (C>O) de cada región y sus geodésicas. Para determinar las g valen las siguientes analogías:

Ecuación de las trayectorias:

$$\frac{d^2x_j}{dt^2}=G_j \quad , \quad G_j=-\frac{\partial\phi}{\partial x_j}$$

Ecuación de las geodésicas:

$\frac{d^2x_j}{ds^2}=-\Gamma^j_{kr}\frac{dx_k}{ds}.\frac{dx_r}{ds}$, en donde

Γ^j_{kr} es una función lineal en las derivadas $\frac{\partial g_{kr}}{\partial x_2}$.

1ª analogía: el potencial ϕ es análogo a los g_{jk}

ϕ se determina resolviendo la ecuación $\Delta\phi=4\pi\gamma\rho$

$$\Delta\phi=\frac{\partial^2\phi}{\partial x_j^2\partial x_j}$$

$\rho=$ = densidad másica.

los g_{jk} se determinan resolviendo las ecuaciones $G_{jk}=\chi T_{jk}$. G_{jk} son función lineal de $\frac{\partial^2 g_{jk}}{\partial x_1\partial x_2}$,

T_{jk}corresponde a la distribución másica (material y energética).

2ª analogía: La ecuación de Poisson $\Delta\phi=4\pi\gamma\rho$ es análoga a la ecuación de Einstein, $G_{jk}=\chi T_{jk}$

En condiciones de gran simetría (masa puntual aislada), disco giratorio, distribución másica homogénea e isótropa y esférica...), se pueden integrar exactamente las ecuaciones $\hat{G}=\chi\hat{T}$ pero siempre son posibles soluciones aproximadas que pueden contrastarse con la experiencia, como el cálculo de la desviación de los rayos estelares por el Sol, que verificó Eddington.

La validez del potencial está ligada a un observador inercial y su campo $\hat{G}=\nabla\phi$ puede ser anulado, al menos localmente, usando un sistema de referencia no inercial. Los tensores de Einstein $\hat{G}$ y de materia-energía $\hat{T}$ confieren al universo una geometría invariante en los cambios de coordenadas y proporcionan una medida absoluta de la gravitación. Indicaremos que la importancia de las dos teorías einstenianas es distinta, la R. especial está ampliamente verificada y es imprescindible en la Física Moderna; la R. general raramente interviene en los fenómenos físicos y su aplicación se centra en la cosmología, ciencia de desarrollo aún no consolidado.

BIBLIOGRAFIA

CID, F. (1982). *Historia de la Ciencia.* Planeta.

DAMPIER, W.C. (1972). *Historia de la Ciencia...* Tecnos.

LANDAU, L.D. (1973). *Teoría Clásica de los campos.* Reverté.

PEREZ BALLESTAR, J. (1984). *Compendio de H^a de la C.* Univ. Salamanca.