UNIVERSIDAD COMPLUTENSE DE MADRID
DEPARTAMENTO DE FISICA TEORICA I

OCTUBRE DE 2007

DEL QUARK AL COSMOS: Breve descripción de la asignatura
http://teorica.fis.ucm.es/docenteft1.html

Lo que sigue hace referencia únicamente a los temas de *Relatividad y Gravitación* y a los de *Física Nuclear y Partículas Elementales* del programa de la asignatura. Está basado principalmente en cómo se impartieron estos temas en el curso 2004/2005. Como consta en la oferta de asignaturas de libre elección de nuestro Vicerrectorado de Estudios, esta asignatura puede ser cursada por los estudiantes de cualquier carrera, excepto los de la licenciatura de Físicas. Sin embargo es a mi entender conveniente que el alumno que la escoja tenga una base digna en las matemáticas del Bachillerato (o equivalente en nuestros días), en realidad poca cosa, que sepa calcular inversas de matrices, determinantes, resolver sistemas de ecuaciones lineales, derivar e integrar funciones sencillas y algunas nociones de trigonometría. De otra manera, es muy difícil sacar algún provecho o gusto a la asignatura.

Antes de comenzar a explicar el programa consideré oportuno como profesor de la asignatura definir a los alumnos lo que es el *orden de magnitud* de una cantidad, y cómo expresar valores en *notación científica* con un número determinado de *cifras significativas*. Me pareció práctico porque no están obligados a saberlo viniendo de disciplinas diferentes. Siempre con la excusa de los órdenes de magnitud y con la idea de que el alumno se fuera involucrando en cálculos reducidos, expuse varios ejemplos que ponen de manifiesto lo sorprendente que es la materia: cómo la órbita de un electrón, por citar un caso, alrededor del protón en el átomo de hidrógeno es sorprendentemente grande, mucho más grande de lo en realidad debe ser; o cómo cambia la energía por unidad de longitud a distintas escalas. También estimé la energía liberada en la primera explosión atómica realizada en Nuevo Méjico en 1945. Esta cuenta y otras muchas no requieren ser un experto profesional para obtener un resultado razonable, basta tener cierto buen sentido para obtener una estimación decente. Insistir en los órdenes de magnitud de las cantidades físicas me llevaron a hablar, por primera vez en el curso, de las cuatro interacciones fundamentales de la naturaleza, de sus constantes de acoplamiento, y del alcance de las mismas. Comenté en clase lo deseable que sería expresar un gran número de parámetros físicos en términos de una pocas *constantes fundamentales*, que fui citando. Más aún, dije que al hombre le gustaría tener una explicación teórica del valor de estas constantes fundamentales con las cuales va a formar todas las demás. Con los términos "explicación teórica" me refiero a que dispusiéramos de algo así como una ecuación bien definida que determinara exactamente estas constantes[1]. Por ejemplo, la *constante de estructura fina* que es considerada como una constante fundamental que sabemos mide la intensidad de la interacción electromagnética, y de la que sólo tenemos un conocimiento empírico de su valor, 1/137 aproximadamente, ¿por qué es tan pequeña? Está claro en este momento de la existencia humana que nadie sabe por qué lo es, como nadie sabe muchas otras cosas, pero yo esperaba que planteando ésta y otras muchas cuestiones el alumno estuviera aún más motivado para cursar esta asignatura. Me centro ahora en los temas del programa.

[1] Obviamente esto de la ecuación teórica es utópico en la mayor parte de los casos

Palabras clave: Orden de magnitud, notación científica, cifras significativas, unidades atómicas, constante de estructura fina, radio de Boh, las interacciones fundamentales de la naturaleza, cociente entre fuerta gravitatoria y fuerza eléctrica en el átomo de hidrógeno, constantes fundamentales.

Al acabar el tema de *Relatividad Especial* los objetivos que me había fijado en lo que concierne al alumno eran los siguientes: que el alumno entendiera claramente que hay una inconsistencia entre la *Transformación de Galileo* y la *Teoría del Electromagnetismo* (ecuaciones de Maxwell), y que la inconsistencia se resuelve introduciendo una nueva transformación de coordenadas. La derivación de esta transformación se explica en clase. Que fuera capaz de utilizar *diagramas de Minkowski* aplicándolos a una gran variedad de problemas: para determinar simultaneidad de sucesos en dos sistemas distintos de referencia, o para averiguar si sucesos que ocurren en el mismo lugar en un sistema de referencia ocurren en lugares distintos en otro. También esperaba que el alumno entendiera la noción de intervalo y la interpretación física del cono de luz. Finalmente, en cinemática relativista, que fuera capaz de usar la conservación de energía-momento para resolver problemas sencillos de colisiones de cuerpos puntuales, sacando conclusiones de los resultados obtenidos. Por ejemplo, una conclusión que debe recordar de los ejercicios hechos en clase es que en una desintegración la masa de la partícula que se desintegra debe ser por lo menos igual a la suma de las masas de los productos de desintegración, además de saber, con más o menos dificultad, referir la colisión al sistema de referencia en el que el momento total es cero y determinar las energías umbrales para que determinadas reacciones tengan lugar. Todo esto, por supuesto, en problemas sencillos (ver hoja de problemas en la página web si se desea).

Palabras clave: Transformaciones de Galileo, la velocidad de la luz en la teoría de Maxwell, experimento de Mickelson-Morley, transformaciones de Lorentz, empujones (boosts), transformaciones de las componentes paralela y perpendicular, espacio-tiempo de Minkowski, diagramas de Minkowski en dos dimensiones, simultaneidad, cuadrivector, invariancia Lorentz, postulados de la Relatividad Especial, conservación de energía-momento, sistema de centro de masas, scattering Compton, creación de partículas.

El tema de *Gravitación* es delicado. Empezando por los conceptos de *masa gravitatoria* y *masa inercial*, al alumno le choca que pueda haber dos tipos de masa, aunque se acostumbra a saber cuál va en una ecuación y cuál en otra. Afortunadamente esta cuestión se zanja con el *Principio de Equivalencia Débil* y el *experimento de Eötvös*, que expliqué con detalle. Después utilicé la *Ley de Gauss* para calcular el campo gravitatorio creado por distintas distribuciones sencillas de masa. Los estudiantes son capaces de usar este teorema, que además gusta, y repetirlo en casos nuevos, casos siempre sencillos, por supuesto. La dificultad del tema está en que hay que hablar de la *Relatividad General* de Einstein, que es una teoría complicada, y más complicada todavía para el alumno que escoge esta asignatura. El primer problema es que es una teoría tan deslumbrante que da la impresión a los no iniciados de que lo que había antes de Eintein en gravitación tenía poco valor. Como esto no es así, comenté los éxitos de la teoría de la gravitación de Newton, muchísimos como sabemos, pero sólo expliqué en detalle uno de ellos: las mareas. El segundo problema aparece en las ecuaciones de Einstein propiamente dichas. El alumno de este curso comprende cuando se le explica aquello de $\mathsf{Geometría} = \mathsf{Materia}$, y entiende que con las ecuaciones de Einstein lo que uno encuentra es la métrica del espacio-tiempo, y hasta intuye el significado de la métrica, pero tampoco hay que abusar forzándoles a conceptos más matemáticos. Ni siquiera la comprobación, dada una métrica sencilla, de que es solución de la ecuaciones de Einstein puede hacerse en clase, porque en este curso ello resulta demasiado elevado. A pesar de esto cité algunas de las soluciones más importantes de las ecuaciones de Einstein (Schwarzchild, Robertson-Walker) y sus características. Finalmente expliqué la precesión del perihelio de Mercurio, uno de los admirables éxitos de la Relatividad General, corrigiendo las ecuaciones de la Mecánica Newtoniana con los términos que provienen de la métrica de Schwarzchild. Suplí con explicaciones los puntos oscuros del desarrollo y lo expuse de la manera más simplificada que pude hasta llegar al número final.

Palabras clave: La interacción gravitatoria, comparación con otras interacciones, características y efectos, limitaciones de la ley de Newton, Principio de Equivalencia Débil, experimento de Eötvos, ley de Gaus, éxitos de la Teoría de la Gravitación de Newton, la constante G_N de la gravitación universal, referencial inercial local, Principio de Equivalencia Fuerte, Principio de Relatividad o de Covariancia General, ecuaciones de Einstein, geometrías importantes, avance del perihelio de Mercurio y otros éxitos de la Relatividad General.

Más fácil para los alumnos que el tema anterior me parece que resulta el tema de *Partículas Elementales*, porque al nivel que se da en el curso se pueden hacer bastantes cuentas y no son difíciles. Tras explicar cómo producir y cómo detectar partículas elementales y mencionar otra vez más a la *familia clásica*, electrón, protón y neutrón, me concentré en las demás partículas: fotones, mesones, antipartículas, neutrinos y partículas extrañas. Fui señalando cómo habían sido descubiertas (muy elusivos los neutrinos, por ejemplo, de los que sabemos que se tenía evidencia teórica en 1950 pero no verificación experimental hasta unos pocos años más tarde), sus propiedades, las interacciones en las que intervienen, etc. Detenerse en esta lista de partículas implica tener que hablar otra vez de *interacciones fuertes* y *débiles*, que ya había mencionado en otros temas, de la necesidad de introducir el *número leptónico*, y el *número bariónico* para explicar por qué ciertas reacciones ocurren y otras no, de violación y de *leyes de conservación*. Quizás especialmente atractivos sean los ordenamientos, debidos primeramente a Gell-Mann, de partículas en hexágonos o triángulos: el octete de bariones, el nonete de mesones y el decuplete de bariones, dan pie a utilizar fórmulas de masa y averiguar las desintegraciones principales de algunas partículas (ver problemas). A esto siguió el *Modelo de Quarks* y para terminar una introducción breve al *Modelo Standar*. Esta no fue fácil porque hablar de la partícula Higgs no lo es, ni de los *grupos de gauge*, pero considero que dije a los alumnos en este apartado lo más que creo puede explicarse en un curso en el que no se requieren conocimientos de física.

Palabras clave: Fórmula ciclotrón, detectores, era clásica: electrón, protón y neutrón, fotón, mesones, antipartículas, crossing symmetry, neutrinos, partículas sin masa, partículas extrañas, Eightfold Way: octete y decuplete de bariones y nonete de mesones, fórmula de masas de Gell-Mann-Okubo, desintegraciones, el Modelo de Quark, partículas sin color, confinamiento, revolución de Noviembre, los bosones $W^{\pm}, Z$, el Modelo Standard.

Para terminar diré que la Fisica Nuclear es un tema clásico donde, si se ha hablado ya de partículas elementales, lo que hay que ver a mi entender son las propiedades generales de los núcleos, las fuerzas nucleares y las simetrías, además de algunos modelos sencillos y de las desintegraciones α, β y γ, que ahora que el alumno ha visto cinemática relativista ya no le parecen tan complicadas. Además de la fusión (muy curioso cómo se han creado los últimos elementos de la tabla periódica) y de la fisión, para terminar el tema se deben mencionar algunas aplicaciones (la medicina nuclear me parece que interesa al alumno, técnicas en arte y arqueología, técnicas en la seguridad civil, contrabando y detección de explosivos) hasta otras menos sociales como la nucleosíntesis estelar.

Palabras clave: Propiedades generales de los núcleos, fórmula de masa nuclear, estabilidad, fuerzas nucleares, el deuterón, Modelo del Gas de Fermi, Modelo de Capas, Modelos Colectivos, procesos de desintegración, fisión, fusión, aplicaciones de la Física Nuclear.

Se recomienda consultar la pagina de problemas del curso para completar esta descripción de la asignatura porque algunas aplicaciones incluidas como problemas no las he señalado anteriormente.

Bibliografía:

Ha de tenerse mucho cuidado con la bibliografía que cito para este curso porque puede más desorientar que ayudar al alumno. Excepto los libros o trabajos marcados con un asterisco que son más asequibles, los demás quedan muy por encima del curso. De ellos he ido seleccionando cosas, pero de algunos muy poco. Séase pues muy cauto.

∗ A.P. French, *Relatividad Especial: Curso de Física del M.I.T.*, Ed. Reverté, Barcelona, 1984.

W. Rindler, *Introduction to Special Relativity*, Oxford Science Publications, 1991.

W. Rindler, *Essential Relativity*, Springer-Verlag, 1979.

M. Carmelli, *Classical Fields: General Relativity and Gauge Theory*, John Willey and Sons, 1982. (Muy elevado para el curso. De aquí únicamente saqué el experimento de Eötvos).

A. Fernández-Rañada, *Dinámica clásica*, Alianza Editorial, D.L. 1990.

∗ D. Griffiths, *Introduction to Elementary Particles*, John Willey and Sons, 1987. También es aprovechable de este libro la *cinemática relativista*: viene bastante bien.

∗ F. Wilczek, *Asimetría cósmica entre materia y antimateria*, Investigación y Ciencia, núm. **53**, Febr. 1981. El original en inglés: *Cosmic Asymmetry Between Matter and Antimatter*, Scientific American, December 1980, p. 82.

∗ R. Fernández Álvarez-Estrada y M. Ramón Medrano, *Partículas Elementales*, Fondo de Cultura Económica, 2003.

S.F. Novaes, *Standard Model: an introduction*, hep-th/0001283.

W.E. Burcham y M. Jobes, *Nuclear and Particle Physics*, Longman, 1997.

MJRPlaza