

ELOGIO AL DOCTORANDO
PROFESOR DR. FRANK T. AVIGNONE

Rector Magnífico de la Universidad de Zaragoza
Distinguidas autoridades
Queridos compañeros
Señoras y señores

Me corresponde presentar en este solemne acto al profesor Frank Avignone con motivo de su nombramiento como doctor honoris causa por la Universidad de Zaragoza. Este hecho supone, tanto para mí como para nuestro grupo de investigación en Física Nuclear y Astro-partículas, un auténtico orgullo desde el punto de vista científico, pero es también un motivo de gran alegría por la amistad que nos une desde hace más de veinte años.

Me consta que este nombramiento no es para el profesor Avignone uno más entre la larga lista de premios y distinciones que ha recibido a lo largo de su carrera. Abusando un poco de su confianza, permítanme que les lea parte del mensaje que me envió cuando le comuniqué el acuerdo de su nombramiento. Decía así:

En estos momentos me siento muy agradecido por tu amistad y enormemente honrado por esa Universidad al

concederme esta distinción. Desde los primeros días en que comencé a trabajar con Ángel, con Julio, contigo y con todos mis amigos de allí, siempre he sentido que la Universidad de Zaragoza era, de alguna manera, mi Universidad.

Aunque reconozco que es difícil evitar una cierta subjetividad al hablar de una persona a la que conoces y aprecias, creo que soy sincero si digo que hablar de Frank Avignone, de Frank, o simplemente de Paco, como lo llamamos en muchas ocasiones fruto de la confianza, es hablar de un excelente científico pero, por encima de todo, es hablar de una persona tremendamente activa, con independencia de las circunstancias y de los años, que, además, posee un carácter en extremo afable.

El profesor Avignone nace un 9 de mayo de 1933 en Nueva York, y es en esta ciudad donde realiza sus primeros estudios. Tras su graduación cambia su tarea de estudiante por la de soldado de la Marina de los Estados Unidos en el frente de Corea entre 1952 y 1957. A su vuelta, ingresa en el Georgia Institute of Technology, donde obtiene en 1962 el máster en Ciencias y, tres años más tarde, el doctorado en Física. Ese mismo año, 1965, consigue una plaza de profesor en la Universidad de Carolina del Sur, concretamente en el Departamento de Física y Astronomía del que será director entre 1979 y 1998, y en esta Universidad desarrollará ya toda su carrera docente e investigadora hasta la jubilación.

No resulta exagerado decir que se trata de uno de los científicos de referencia en el campo de la Física de Neutrinos y de la Física de Astropartículas, en cuya temática ha publicado unos 250 artículos científicos y ha dirigido 20 tesis doctorales. Por otro lado, sería prolijo enumerar aquí los méritos que ha ido acumulando a lo largo de los años, pero, a título orientativo, sirva decir que ha sido director de la sección sudeste de la Sociedad Americana

de Física, premio Russell en Ciencia e Ingeniería, medalla Jesse W. Beams de la Sociedad Americana de Física, premio Gobernador de Carolina del Sur a la excelencia científica, premio al liderazgo científico otorgado por las 87 universidades americanas asociadas al Laboratorio Nacional de Oak Ridge, doctor honoris causa por la Universidad de Buenos Aires (Argentina), etc.

Durante 50 años ha centrado su interés en el estudio de las interacciones elementales de los neutrinos, la estructura nuclear experimental y, más recientemente, en los tests a baja energía de las Teorías de Gran Unificación. En concreto, su figura se vincula internacionalmente a las investigaciones sobre el proceso de desintegración doble beta, aunque también interviene en experimentos sobre axiones y su acoplamiento a fotones y en la búsqueda de la materia oscura del universo.

En 1985, en colaboración con el Instituto de Estudios Nucleares de la Universidad de Bordeaux-Gradignan, nuestro grupo de investigación de la Universidad de Zaragoza, dirigido por el profesor Ángel Morales, llevó a cabo un experimento sobre la desintegración doble beta del ^{76}Ge en el Laboratorio Subterráneo de Modane, en el túnel de Frejus (Francia). Posteriormente, en 1986, con el propósito de poder realizar nuevos experimentos sobre esta temática en España, poníamos en marcha unas pequeñas instalaciones subterráneas, de escasamente 12 metros cuadrados, en el túnel ferroviario de Canfranc, que se encontraba fuera de servicio desde hacía varios años. En estas instalaciones, desarrollamos un nuevo experimento de desintegración doble beta, y fue precisamente la asistencia a uno de los congresos internacionales de la especialidad con objeto de presentar los resultados de este experimento la que propició el encuentro del profesor Morales con el profesor Avignone. A esta prime-

ra toma de contacto seguirían diversas reuniones y el intercambio de muy diversa información científica, concluyendo en 1988 con el acuerdo de aunar esfuerzos y crear un equipo conjunto de investigación altamente competitivo sobre la desintegración doble beta. Se iniciaba de esta manera una colaboración muy fructífera que, en la actualidad, pasa ya sobradamente de los 20 años. Eran también los inicios del Laboratorio Subterráneo de Canfranc, y, de hecho, puede decirse que el profesor Avignone lo vio nacer, ha conocido todas sus ampliaciones y se ha convertido en uno de sus más firmes impulsores a nivel internacional.

Posteriormente, con el propósito de llevar a cabo un experimento de desintegración doble beta de nueva generación, la colaboración de la Universidad de Zaragoza y de la Universidad de Carolina del Sur se dirigió a otros grupos experimentales expertos en este tipo de física que desearan formar parte del nuevo experimento. Se incorporaron así el Laboratorio Nacional del Noroeste del Pacífico de los Estados Unidos, dirigido por el doctor Ron Brodzinski; el Instituto de Física Nuclear de Moscú, dirigido por el profesor Alexander Pomansky; y el Instituto de Física Teórica y Experimental de Moscú, dirigido por el profesor Igor Kirpichnikov. Este experimento recibió el nombre de IGEX (International Germanium Experiment) y estuvo en funcionamiento en el Laboratorio Subterráneo de Canfranc hasta el año 2000. Hoy en día IGEX sigue manteniendo uno de los dos mejores límites mundiales para la vida media de la desintegración doble beta sin neutrinos del ^{76}Ge .

Sin embargo, no fue IGEX el único experimento que realizamos juntos. Por el camino están otros experimentos como SOLAX, COSME, DEMOS, CUORICINO, CUORE, CAST, etc., muchos de ellos fruto de nuevas

colaboraciones internacionales. Esta prolija actividad científica fue dando lugar, durante todos estos años, a numerosas estancias de investigación en la Universidad de Zaragoza y en el Laboratorio Subterráneo de Canfranc, tanto del profesor Avignone como de sus discípulos, pero, sobre todo, se ha traducido en cientos y cientos de horas de trabajo en colaboración cuyos resultados se han plasmado en 60 publicaciones científicas conjuntas.

Si después de tantos años tuviera que enumerar las tres características que definen mejor el carácter de Frank Avignone, estas serían su permanente curiosidad científica, su dinamismo vital y su capacidad de liderazgo. Por ello, no resulta extraño que, al alcanzar la edad reglamentaria, la Universidad de Carolina del Sur manifestase al profesor Avignone su deseo de que siguiera vinculado a ella, para lo cual creó por primera vez en su historia una plaza vitalicia ad hoc (el «First Carolina Endowed Professor») que le permite mantener la increíble actividad que siempre le ha caracterizado y que se traduce, entre otras cosas, en permanentes viajes de un lado para otro del planeta. En la actualidad, su principal labor investigadora se reparte entre dos proyectos: el desarrollo de un Observatorio Criogénico Subterráneo de Sucesos Raros (CUORE), para la búsqueda de la doble desintegración beta sin emisión de neutrinos del ^{130}Te , que se llevará a cabo en el Laboratorio Nacional de Gran Sasso (Italia) y del que es responsable del grupo de producción electrónica; y el desarrollo de un proyecto de investigación sobre la desintegración doble beta sin emisión de neutrinos del ^{76}Ge (MAJORANA), financiado con 22 millones de dólares, en el que participan cinco laboratorios nacionales americanos y otras nueve universidades. Él es el portavoz y responsable del grupo de trabajo sobre purificación y producción de germanio.

Una faceta menos conocida de Frank Avignone, a la que ya me he referido anteriormente, es su relación y colaboración prácticamente permanente con el Laboratorio Subterráneo de Canfranc, del que se siente un miembro más. No en vano, ha participado durante los 25 años de existencia del laboratorio en experimentos y actividades científicas, ha conocido todas sus vicisitudes y lo ha visto hacerse un hueco en el contexto internacional. Frank Avignone siempre ha estado allí, en la primera línea, apoyándolo. No es de extrañar, por tanto, que, cuando se constituyó el Comité Científico Asesor Internacional del Laboratorio, el científico elegido para ser presidente de dicho Comité fuese precisamente el profesor Frank Avignone.

En resumen, creo que aquella colaboración que iniciaron los profesores Morales y Avignone en 1988 ha producido excelentes resultados científicos y ha permitido recibir una mejor formación experimental a varios de los investigadores más jóvenes de ambas universidades. Pero, por encima de todo, nos ha permitido conocer la valía científica y personal de Frank Avignone, y, por ello, su nombramiento como doctor honoris causa por la Universidad de Zaragoza fue recibido con enorme satisfacción por nuestro grupo de investigación. Además, este nombramiento le permitirá al profesor Avignone, ahora ya sí de una manera oficial, sentirse miembro de pleno derecho del claustro científico de la Universidad de Zaragoza.

Para acabar, quiero aprovechar también este acto para expresar nuestro reconocimiento y afecto a Ángel, Julio, Ron y Sasha, excelentes científicos y compañeros que quedaron atrás en el transcurso de la colaboración, porque sin su participación esta apasionante aventura que hemos vivido durante más de 20 años no hubiera sido posible.

Muchas gracias.

José Ángel VILLAR

TEMAS DE ASTROFÍSICA DE PARTÍCULAS

FRANK T. AVIGNONE III

Rector Magnífico de la Universidad de Zaragoza
Excmos. e Ilmos. Señores
Distinguidos doctores
Señoras y señores

La Astrofísica de Partículas estudia fenómenos de la Astrofísica y la Cosmología asociados con las propiedades de las partículas elementales, abarcando estas desde los neutrinos hasta las partículas masivas débilmente interaccionantes (WIMPS) que hipotéticamente forman parte de la Materia Oscura Fría (CDM). El grupo de la Universidad de Carolina del Sur (USC) comenzó a trabajar en este campo desde su inicio, realizando las primeras investigaciones terrestres sobre la CDM. Esta es necesaria para explicar la dinámica de las galaxias y aspectos relevantes de los modelos cosmológicos utilizados para explicar la evolución del universo. En tal sentido, se han constatado los efectos gravitacionales de la CDM en la distribución de velocidades de las estrellas en galaxias espirales. En 1933 Fritz Zwicky descubrió que era necesaria mucha más masa que la que aparece en las estrellas y en el polvo estelar para explicar la dinámica de los cúmulos globulares. En 1985, el grupo de la USC, inspirado por el grupo

de astrofísica del Instituto Max Planck en Múnich, llevó a cabo la primera búsqueda terrestre de CDM en la mina de oro de Homestake, en Lead (Dakota del Sur), con un único detector desarrollado junto con el Pacific Northwest National Laboratory (PNNL). Esta colaboración sobre Materia Oscura incluyó posteriormente al Laboratorio de Física Nuclear y Altas Energías de la Universidad de Zaragoza (UZ) dirigido por el profesor Ángel Morales. Los primeros experimentos fueron capaces de eliminar los neutrinos de Dirac pesados como la mayor contribución a la CDM. En la actualidad, las investigaciones se han extendido por todo el mundo con mejoras impresionantes en la tecnología de detectores, pero fueron precisamente aquellos trabajos pioneros la semilla de todos ellos.

La colaboración USC/UZ también tuvo un papel de liderazgo en la búsqueda de otras partículas elementales: los axiones emitidos por el Sol. Estos aparecen en la teoría de Roberto Peccei y Helen Quinn para explicar por qué en las interacciones fuertes de la cromodinámica cuántica no se viola la simetría CP (carga-paridad). El experimento propuesto se basaba en una técnica de análisis desarrollada en la USC por una colaboración internacional liderada por Richard Creswick. La idea es utilizar la conversión coherente Bragg de axiones a fotones en cristales simples cuando la línea detector-núcleo solar satisface la condición de Bragg. El grupo de la UZ participó de forma relevante en la verificación del formalismo teórico y llevó a cabo trabajos clave en este primer experimento de la colaboración que se realizó en Sierra Grande (Argentina). Asimismo, la técnica ha sido utilizada posteriormente por grupos de todo el mundo. Estos primeros experimentos dieron lugar al establecimiento de un método único para la búsqueda de la presumible

modulación diaria de la señal de CDM debida a la rotación de la Tierra. Como continuación de ellos, los esfuerzos conjuntos de los grupos de USC y UZ convergieron en un experimento para la búsqueda de axiones solares utilizando uno de los imanes existentes en el CERN para las pruebas del LHC. Este experimento, llamado CAST (CERN Solar-Axion Telescope), ha dado lugar a la búsqueda experimental más sensible a nivel mundial de axiones y partículas de tipo axión. Estas últimas incluyen a cualquier bosón que interactúe con el campo electromagnético mediante dos fotones, uno real y otro virtual. Es el llamado «efecto Primakoff». Más tarde, se comentará en detalle una nueva motivación para la búsqueda de partículas de tipo axión. En la actualidad la USC ya no participa en CAST y únicamente permanece en dicho experimento el grupo de la UZ.

En 1988, el profesor Ángel Morales y el autor decidieron crear un equipo investigador conjunto para la búsqueda de la posible desintegración doble beta sin neutrinos ($\beta\beta_{0\nu}$) y medir también la vida media de la desintegración doble beta ordinaria ($\beta\beta_{2\nu}$), con dos neutrinos. En este contexto, hay dos preguntas muy importantes que permanecen sin respuesta en la Física de neutrinos y que pueden ser abordadas en la próxima generación de experimentos sobre la desintegración ($\beta\beta_{0\nu}$). Primero, ¿son los neutrinos partículas de Majorana que difieren de los antineutrinos solo por la helicidad? Si es así, la desintegración sin neutrinos puede existir e implicaría una violación de la conservación del número leptónico. Segundo, ¿cuál es su escala de masas? Se han realizado investigaciones sobre la desintegración ($\beta\beta_{2\nu}$) de forma regular durante décadas, sin embargo, sigue siendo este uno de los problemas de mayor interés. Recientes descubrimientos y medidas de oscilaciones de

neutrinos atmosféricos, solares y provenientes de reactores nucleares han demostrado que existen escenarios en los que la masa efectiva de Majorana del neutrino electrónico podría ser mayor que 0,05 eV. Además, los desarrollos recientes en la tecnología de detectores hacen que la observación de la desintegración ($\beta\beta_{0\nu}$) a esta escala sea posible. La idea de que una detección directa de esta desintegración era posible fue potenciada tras la observación y medida de oscilaciones de los neutrinos atmosféricos, la confirmación de oscilaciones en los experimentos de neutrinos solares en SuperKamiokande y los resultados de un experimento realizado en el Observatorio de Neutrinos Solares (SNO), mostrando claramente que el flujo total de neutrinos del Sol predicho por Bahcall y sus colaboradores es correcto. Finalmente, el experimento con neutrinos de reactores, KamLAND, evidenció claramente que la solución MSW con ángulo de mezcla grande para oscilaciones de neutrinos solares es la más favorecida. Queda claro, por tanto, que los neutrinos tienen masa y posiblemente la suficiente como para hacer observable la desintegración ($\beta\beta_{0\nu}$) con un experimento de tamaño razonable. La importante lista de resultados publicados en 1998, diez años después de nuestra decisión, justifica un mayor esfuerzo en la realización de experimentos sobre la desintegración ($\beta\beta_{0\nu}$). Fue natural que eligiéramos para ello el ^{76}Ge por nuestra experiencia en experimentos anteriores realizados con detectores de germanio. Sin embargo, para construir un verdadero experimento de nueva generación se necesitaba un determinado número de kilos de germanio enriquecido (al 86%) en el isótopo ^{76}Ge que tiene una abundancia natural del 7,8%. Este material sólo estaba disponible en la Unión Soviética. Contactamos por ello con el profesor Alexander Alexandrovich Pomansky del Instituto de Físi-

ca Nuclear de Moscú y con el Dr. Igor Valientienovich Kirpichnikov del Instituto de Física Teórica y Experimental, también de Moscú. Se formó de esta manera una nueva colaboración que incluía a estos dos grupos soviéticos, y nació el «International Germanium Experiment» (IGEX). El acuerdo original fue que se construirían tres detectores de aproximadamente un kilo de germanio enriquecido cada uno y que, hasta tomar la decisión de donde ubicar el experimento final, uno se instalaría en la mina de oro de Homestake, en los Estados Unidos; otro, en el Baksan Neutrino Observatory, en la Unión Soviética; y el tercero, en el Laboratorio Subterráneo de Canfranc, en España. Los resultados obtenidos en los tres laboratorios justificaron la expansión del experimento a una nueva fase: IGEX-II.

La segunda fase de IGEX (IGEX-II) se plasmó en un *Memorandum of Understanding*, que fue firmado el 13 de septiembre de 1991 por los profesores Á. Morales, A. A. Pomansky, I. V. Kirpichnikov y el propio autor. Implicaba la importación de 13 kilos más de germanio enriquecido al 86% en ^{76}Ge . El material fue entregado para su purificación y refinamiento a la compañía Eagle Peacher y, posteriormente, a Oxford Instruments Inc. para la fabricación de los detectores. El primer detector, de 2,15 kg, fue entregado el 11 de noviembre de 1993 e instalado en la mina de oro de Homestake para iniciar la toma de datos. El segundo detector, entregado un año más tarde, tenía una masa de 2,2 kg y también fue instalado en Homestake. El tercer detector, de 2,1 kg, fue entregado el 18 de marzo de 1995 y enviado directamente al Laboratorio Subterráneo de Canfranc. Finalmente, ese mismo año, los tres detectores fueron instalados en Canfranc. Los detectores fueron operados mediante un montaje electrónico y una adquisición diseñados y desarrollados

por el profesor Julio Morales de la UZ. Como parte del acuerdo internacional, durante todo el tiempo que duró el experimento hubo al menos un físico ruso en Canfranc/Zaragoza. Los tres detectores pequeños construidos para IGEX-I fueron enviados a Rusia y operados en el Baksan Neutrino Observatory. Los nuevos detectores estuvieron en operación hasta principios del año 2000, momento en que se decidió concluir IGEX-II. IGEX produjo uno de los dos mejores resultados para la desintegración ($\beta\beta_{0\nu}$) y medidas muy precisas para la desintegración ($\beta\beta_{2\nu}$). A su vez, sirvió como experimento piloto del futuro experimento MAJORANA con una tecnología mucho más desarrollada.

Los mejores límites provienen de los detectores enriquecidos en ^{76}Ge . Dos fueron los experimentos más sensibles llevados a cabo con este isótopo: el experimento Heidelberg-Moscú ($T_{1/2}^{0\nu}(^{76}\text{Ge}) \geq 1,9 \times 10^{25}$ años) y el experimento IGEX ($T_{1/2}^{0\nu}(^{76}\text{Ge}) \geq 1,6 \times 10^{25}$ años). Estos valores implican que la masa efectiva de Majorana del neutrino electrónico, $m_{\beta\beta}$, definida más abajo, es $m_{\beta\beta}c^2$ menor que 0,46 eV, utilizando para calcular este número los valores obtenidos mediante aproximación QRPA de los elementos de matriz nucleares publicados recientemente. Más tarde, un subgrupo de la colaboración Heidelberg-Moscú volvió a analizar los datos y reclamó la existencia de un pico a la energía total de la desintegración, 2039 keV, que implicaría la existencia de la desintegración ($\beta\beta_{0\nu}$). Aunque esta evidencia no ha sido ampliamente aceptada por la comunidad de neutrinos, tampoco hay certeza de que dicho pico no sea una evidencia de la desintegración sin neutrinos. El experimento GERDA, otro experimento con ^{76}Ge que está siendo construido en el Laboratorio Nacional del Gran Sasso (LNGS), en Italia, tratará de comprobar este hecho. El

experimento CUORICINO, también localizado en el LNGS, ha sido el experimento de desintegración doble beta sin neutrinos más sensible en operación hasta julio de 2008, cuando concluyó para poder comenzar la construcción de CUORE. Los grupos de la UZ y de la USC han participado activamente en CUORICINO. El experimento buscaba la desintegración ($\beta\beta_{0\nu}$) del ^{130}Te y tenía la capacidad de confirmar o refutar el resultado reclamado; sin embargo, un resultado nulo tampoco puede ser utilizado para refutar dicha reclamación, dada la incertidumbre en los elementos de matriz nucleares. GERDA (^{76}Ge), MAJORANA (^{76}Ge), CUORE (^{130}Te) y EXO (^{136}Xe) son experimentos diseñados para alcanzar valores para la sensibilidad en la masa de $m_{\beta\beta}c^2 \approx 0,05$ eV y, posiblemente, incluso más bajos. Además, existen otras restricciones en la escala de masa del neutrino, independientemente de su carácter Dirac o Majorana.

Los experimentos de Troitsk y Maguncia de desintegración beta simple del tritio han proporcionado un límite superior combinado de 2,2 eV para la masa del neutrino electrónico. El experimento KATRIN, un nuevo experimento ampliado sobre la desintegración beta del tritio en preparación, prevé tener una sensibilidad de 0,2 eV. Esto será tremendamente interesante. Si, por ejemplo, el experimento KATRIN observase una masa de 0,2 eV o más, y si la desintegración ($\beta\beta_{0\nu}$) no observase ningún efecto para una masa efectiva del neutrino electrónico menor que este valor, tendríamos la prueba definitiva de que los neutrinos tienen un carácter Dirac, es decir, que los neutrinos y los antineutrinos son partículas distintas. Ello es debido a que, para que no se emitan neutrinos en la desintegración, cuando se desintegra el primer neutrón, tendrá que emitir un neutrino y este neutrino será absorbido por otro neutrón que emite el

segundo electrón. Para que ello sea posible, el neutrino y el antineutrino deben ser idénticos.

Los datos astrofísicos son también relevantes en la discusión de la masa del neutrino. En una publicación reciente de Barger et ál. se ha obtenido un límite superior a la suma de los autovalores de masa del neutrino $\Sigma \equiv m_1 + m_2 + m_3 \leq 0,75$ eV (95% C.L.). Estos datos provienen del «Sloan Digital Sky Survey» (SDSS), el «Two Degree Field Galaxy Red Shift Survey» (2dFGRS) y el «Wilkinson Microwave Anisotropy Probe» (WMAP), así como de experimentos sobre el fondo cósmico de microondas (CMB) y del telescopio espacial Hubble. Hannestad utilizó los datos de WMAP y 2dFGRS para derivar un valor de $\Sigma \leq 1,0$ eV (95% C.L.) y concluyó que esos datos podrían no excluir la evidencia apuntada. Allen, Schmidt y Briddle, sin embargo, encuentran una preferencia por una masa del neutrino de $S = 0,56^{+0,30}_{-0,25}$ eV.

Sin embargo, este resultado positivo no tiene confirmación. La restricción de $\Sigma \leq 0,75$ eV implicaría que el autoestado de masa del neutrino más ligero sería menor que 0,24 eV. Por otro lado, si el anunciado valor positivo de Σ es correcto, $m_1 \approx 0,17$ eV y, entonces, los experimentos de desintegración doble beta sin neutrinos de nueva generación constituirían un test riguroso de la conservación del número leptónico, independientemente del orden de las masas de los autovalores de masa del neutrino, lo que se conoce como jerarquía de masas del neutrino.

Damos aquí los resultados del experimento de desintegración doble beta sin neutrinos CUORICINO. Hay que tener en cuenta que para el ^{130}Te existe un rango de elementos de matriz calculados que implican valores de $m_{\beta\beta}$, correspondientes al límite de vida media dado por CUORICINO, entre $\sim 0,2$ eV y 0,68 eV. Los grupos de USC y UZ han participado en el experimento CUORICINO desde

su comienzo hasta su conclusión en julio de 2008. Este experimento puso un límite inferior a la vida media para la desintegración sin neutrinos del ^{133}Te de $2,5 \times 10^{24}$ años. CUORICINO consistía en una matriz de 42 kg de detectores criogénicos de TeO_2 funcionando a $\sim 0,008$ K. En la actualidad, se está construyendo una versión de 750 kg llamada CUORE. La principal responsabilidad del grupo de la USC es la producción del sistema electrónico. Este grupo ejerce también el liderazgo de la parte americana en la construcción y operación de la primera torre de CUORE (CUORE-0), que funcionará en 2010 en el criostato de CUORICINO. La tecnología criogénica utilizada para CUORICINO y CUORE fue desarrollada en la Universidad de Milán por el profesor Ettore Fiorini, un gran amigo del profesor Morales y del autor.

Otra cuestión muy importante en Cosmología se refiere a la detección de fotones de muy alta energía provenientes de núcleos de galaxias activas distantes que deberían haber sido absorbidos en la radiación de fondo durante su largo viaje hacia la Tierra. En 2007, De Angelis, Roncadelli y Mansutti (DARM) propusieron que la observación de rayos gamma de ultra alta energía con telescopios de tipo Cherenkov era la evidencia de un nuevo bosón ligero de espín cero. La idea básica radica en el hecho de que los fotones de ultra alta energía tienen una sección eficaz muy grande $\sigma(\gamma\gamma \rightarrow e^+e^-)$ para producción de pares a través de la interacción con la radiación del fondo extragaláctico. Según esto, el flujo observado debería ser significativamente menor que el observado por los telescopios HESS, MAGIC, CANGAROO III y VERITAS. Para explicar estas observaciones, propusieron que los fotones deberían convertirse en partículas de tipo axión (ALP) en los campos magnéticos intergalácticos y de nuevo en fotones cerca de la Tierra.

Simet, Hooper y Serpico consideraron el escenario en el que los fotones se convierten en ALP en los campos magnéticos cerca del blazar original, sobreviviendo distancias cosmológicas como ALP y reconvirtiéndose a fotones en el campo magnético de la Vía Láctea por el mecanismo similar al de un helioscopio de Sikivie. La pregunta interesante aquí es: ¿se puede entonces comprobar la existencia de ALP usando el Sol como fuente? Muchos experimentos previos fueron motivados por el deseo de buscar axiones de Peccei-Quinn para encontrar una solución elegante al problema CP en las interacciones fuertes.

Ahora la pregunta relevante es: ¿en qué rango de valores de acoplamiento y masa se podrían encontrar ALP? Hay una gran incertidumbre en estos valores a causa de las incertidumbres en las intensidades y geometrías de los campos magnéticos involucrados. Sin embargo, recientemente Burrage, Davis y Shaw sugieren dos rangos interesantes basados en la dispersión en las relaciones de luminosidad de rayos X o γ de varios AGN. Sus análisis implican que la dispersión podría ser causada por un acoplamiento fuerte ALP-fotón para fotones en el rango del keV, como ocurre en cúmulos galácticos si $M \approx 10^{11}$ GeV y $m_a \ll 10^{-12}$ eV. En otro escenario, sugieren que si las conversiones ocurren en campos próximos al AGN, los rangos posibles podrían ser: $M \approx 10^{10}$ GeV y $m_a \ll 10^{-7}$ eV. Este último valor de M está muy próximo a la sensibilidad actual del experimento CAST. Es obvio que el primer paso debería ser intentar mejorar el fondo y hacer funcionar CAST en vacío, pero también se considera la posibilidad de utilizar grandes detectores centelleadores de Xe de muy bajo fondo. Por este motivo, se calcularon las secciones eficaces y se combinaron con los valores teóricos aceptados en la actualidad para los flujos de ALP del Sol. El resultado del cálculo para el ritmo de detec-

ción para el acoplamiento correspondiente a los límites del experimento CAST se da más adelante. Por otro lado, el ritmo total de interacciones en Xe se puede integrar numéricamente, obteniéndose un valor aproximado de $1,83 \times 10^{-36} \text{ s}^{-1}$ por átomo. Como el número de átomos de Xe por kilo es $4,62 \times 10^{24}$, el ritmo total sería de 0,267 por tonelada y año para un valor de $g_{\alpha\gamma\gamma} = 10^{-10} \text{ GeV}^{-1}$.

El proyecto XMASS está trabajando con un detector de 800 kg de Xe líquido para desarrollar un detector esférico de 10 toneladas con un volumen fiducial de 1,25 toneladas y un fondo de 10^{-4} cuentas por keV, kilo y día, rodeado por 812 fotomultiplicadores. Este diseño es utilizado como un nuevo tipo de detector para la búsqueda de ALP solares. El fondo previsto por la colaboración XMASS supone un valor de 548 cuentas por tonelada y año. Para que esta técnica sea viable, el fondo debería reducirse en un factor 1000 y se necesitaría un volumen fiducial de más de 100 toneladas para que fuera viable la observación del acoplamiento en el caso de $M = 10^{10} \text{ GeV}$. Es evidente que esta técnica no puede competir en sensibilidad con los actuales resultados de CAST teniendo en cuenta los detectores de Xe actualmente en consideración. Por otra parte, una búsqueda basada en el detector XMASS de 10 toneladas y utilizando efecto axioeléctrico para la detección proporcionaría unas 89 cuentas por día en el volumen fiducial de 1,25 toneladas si las constantes de acoplamiento son $10^{-10} \text{ GeV}^{-1}$, con aproximadamente 1 ó 2 cuentas de fondo. Sin embargo, como se ha dicho antes, aunque este escenario presenta un potencial interesante, un resultado negativo del experimento no tendría valor para poner límite superior al acoplamiento de ALP a fotones. Los cálculos anteriores demuestran que es extremadamente dudoso que un detector gigante de centelleo para ALP solares pudiera

en un futuro servir como test de la hipótesis cosmológica ALP-fotón si ese test implica solo acoplamiento de ALP a fotones.

Por otro lado, la operación de CAST en el modo vacío, con un fondo mejorado y para tiempos largos de medida, es la única esperanza de explorar dos de los escenarios sugeridos por Burrage, Davis y Shaw, basados en la dispersión en las relaciones de luminosidad antedicha. De hecho, el propio experimento CAST está probablemente cerca del límite de su tecnología. Como la probabilidad de conversión va con $(BL)^2$, sería necesario incrementar la longitud del imán mucho más de 10 metros (y que pueda seguir al Sol) y/o aumentar el campo magnético mucho más de 10 Teslas, aspectos que no parecen realistas. Sin embargo, bajar el fondo a través de la mejora de los detectores y del blindaje y/o operar en subterráneo, son las únicas mejoras realistas a corto plazo. Recordemos que para mejorar la sensibilidad de $M = 10^{10}$ GeV a $M = 10^{11}$ GeV se requiere una mejora de los datos en un factor 10^4 , ya que la constante de acoplamiento va al cuadrado en ambos, flujo y sección eficaz.

Esta es la mejora que sería necesario realizar en cualquiera de los escenarios examinados antes para los que solo se comprueba el acoplamiento a fotones.

En conclusión, está claro que la colaboración científica entre la Universidad de Carolina del Sur y la Universidad de Zaragoza se ha centrado en algunos de los problemas más interesantes y que suponen un mayor reto en el ámbito de la Astrofísica de Partículas. El autor ha disfrutado de esta apasionante y fructífera colaboración con sus colegas españoles y echará de menos la amistad y la camaradería de los profesores Ángel Morales y Julio Morales, a quienes dedica este breve escrito.

TOPICS IN PARTICLE ASTROPHYSICS

FRANK T. AVIGNONE III

Rector Magnífico of the University of Zaragoza
Distinguished guests and doctors
Ladies and gentlemen

Particle Astrophysics focuses on phenomena in astrophysics and cosmology associated with the properties of elementary particles ranging from neutrinos to Weakly Interacting Massive Particles (WIMPS), hypothesized as the Cold Dark Matter (CDM). The USC group was early in the field when it made the first terrestrial CDM search. CDM is needed to explain the dynamics of galaxies and important features of cosmological models used to explain the evolution of the universe. The gravitational effects of CDM on the velocity distribution of stars in spiral galaxies, is well established. It was motivated by the discovery in 1933 by Fritz Zwicky that far more mass is needed to explain the dynamics of Globular Clusters than appears in stars and dust. In 1985, the USC group, inspired by the astrophysics group at Max Planck Institute in Munich, led the first terrestrial search for the CDM in the Homestake goldmine in Lead, South Dakota, with a unique detector developed with the Pacific Northwest National Laboratory

(PNNL). This Dark Matter collaboration later included the Laboratorio de Fisica Nuclear y Altas Energias at the Universidad de Zaragoza, headed by professor Angel Morales. The early experiments were able to eliminate heavy Dirac Neutrinos as the major component of the CDM. These searches have now become popular throughout the world, with vast improvements in detector technology. This pioneering work was seminal.

The USC/Zaragoza group also played a leading role in searches for elementary particles called axions emitted by the sun. Axions result in the theory by Roberto Peccei and Helen Quinn that explains why the strong interactions of quantum chromodynamics, do not violate charge-parity (C-P) symmetry. The experiment was based on an analysis technique developed at USC by an international collaboration led by Richard Creswick. It used the coherent Bragg conversion of axions to photons in single crystals when the line from the detector to the solar core satisfies a Bragg condition. The University of Zaragoza played important roles in verifying the theoretical formalism, as well as playing a key role in the first experiment done by our collaboration in Sierra Grande, Argentina. This technique was used later in experiments by several groups worldwide. These experiments also resulted in a unique method for searching for a predicted daily modulation of the signal from Cold Dark matter due to the earth's rotation. Following these experiments, the joint efforts of USC and Zaragoza groups turned to a unique experiment to search for solar axions using one of the test magnets for the Large Hadron Collider. This experiment, called CAST (CERN Solar-Axion Telescope), has produced the most sensitive experimental search for axions and axion-like particles in the world. Axion-like particles include any bosons that interacts with the

electromagnetic field by via two photons, one real, and one virtual. This mechanism is called the “Primakoff Effect.” Later a new motivation for searching for axion-like particles will be discussed in detail. While the University of South Carolina no longer participates in CAST, the University of Zaragoza is still involved in this effort.

In 1988, Professor Morales and the author decided to build a competitive team to search for the predicted rare neutrino less double-beta decay, and to measure the half-life of the ordinary two-neutrino double-beta decay. There are two very important open questions in neutrino physics that can best be addressed by next generation zero-neutrino double-beta decay experiments. First, are neutrinos Majorana particles that differ from antineutrinos only by helicity? If so then $0\nu\beta\beta$ -decay can exist, which would violate lepton-number conservation. Second, what is their mass-scale? While searches for $\beta\beta$ -decay have been carried out steadily throughout many decades, it had become a more interesting time for the field. The recent discoveries and measurements of atmospheric, solar and reactor neutrino oscillations have shown that there exist scenarios in which the effective Majorana mass of the electron neutrino could be larger than 0.05- eV. At that time, recent developments in detector technology made the observation of $0\nu\beta\beta$ -decay at this scale feasible. Optimism that a direct observation of $0\nu\beta\beta$ -decay could be possible was greatly enhanced later by the observation and measurement of the oscillations of atmospheric neutrinos, the confirmation of oscillations of the chemical solar neutrino experiments by SuperKamiokande, and the results of the Solar-Neutrino Observatory experiment that clearly showed that the total flux of ^8B neutrinos from the sun predicted by Bahcall and his co-workers is correct. Finally, the KamLAND reactor-

neutrino experiment gave clear evidence that the MSW large mixing-angle solution of solar-neutrino oscillations is the strongly favored one. At that point it was clear that neutrinos have mass, and possibly enough to make neutrino-less double-beta decay observable with a reasonable size experiment. This important list of results published in 1998, ten years after our decision, clearly weighs very heavily in favor of supporting a major effort in $0\nu\beta\beta$ -decay experiments. It was natural that the search for the $0\nu\beta\beta$ -decay of ^{76}Ge would be our choice, because of our earlier experiments and our experience with germanium detectors. However, to build a truly next generation experiment required a number of kilograms of germanium, enriched in the isotope ^{76}Ge from a natural abundance of 7.8% to 86%. This material was available nowhere except in the Soviet Union. We contacted Professor Alexander Alexandrovich Pomansky of the Institute of Nuclear Physics (INR) in Moscow and Dr. Igor Valentienovich Kirpichnikov of the Institute for Theoretical and Experimental Physics (ITEP) in Moscow. A new collaboration was formed that included the two Soviet groups and the International Germanium Experiment (IGEX) was born. The original agreement was that there would be three detectors of about one-kg of enriched Ge each, and that one would be operated in each of the three countries until a final decision of where the final experiment would be operated, the Homestake Goldmine, in the USA, the Baksan Neutrino Observatory in the USSR, or the first Canfranc Underground Laboratory in Spain. Data were combined from all three laboratories which gave justification for an expanded IGEX-II experiment.

The second phase of IGEX (IGEX-II), followed a written Memorandum of Understanding signed on

September 13, 1991. It was signed by Professors A. Morales, A. A. Pomansky, Dr. I.V. Kirpichnikov, and the author. It involved the importation of 13-kg more of Ge enriched to 86% in ^{76}Ge . The material was delivered to Eagle Picher for purification and zone refinement, and later delivered to Oxford Instruments Inc., for fabrication of detectors. The first detector of 2.15-kg was delivered on November 11th 1993 and installed in the Homestake Goldmine to begin data collection. The second detector, delivered about one year later, had a mass of 2.2-kg and also installed in Homestake. The third detector of 2.1-kg was delivered on March 18th, 1995 and sent directly to the Canfranc Underground Laboratory. That year all three detectors were installed in Canfranc. The detectors were controlled by a data acquisition and electronic system designed and built by Professor Julio Morales of the University of Zaragoza. As part of the international agreement there was at least one Russian physicist on site in Spain throughout the entire time of operation of the experiment. The three smaller detectors from IGEX-I were all sent to Russia and operated in the Baksan Neutrino Observatory underground facility. The detectors were operated until early 2000, when it was decided to terminate IGEX-II. The IGEX series produced one of the best two results on $0\nu\beta\beta$ -decay, and also accurate measurements on $2\nu\beta\beta$ -decay. IGEX served as the pilot experiment for the future MAJORANA Experiment, having developed much of the technology.

The most sensitive limits have come from germanium detectors enriched in ^{76}Ge . They were the Heidelberg-Moscow experiment ($T_{1/2}^{0\nu}(^{76}\text{Ge}) \geq 1.9 \times 10^{25}$ y) and the IGEX experiment ($T_{1/2}^{0\nu}(^{76}\text{Ge}) \geq 1.6 \times 10^{25}$ y). These bounds imply that the effective Majorana mass of the electron neutrino, $m_{\beta\beta}$, defined below, is $m_{\beta\beta}c^2$ less than 0.46-

electron Volts using recently published quasi-particle random phase approximation (QRPA) calculated nuclear matrix elements. However, recently, a subset of the Heidelberg-Moscow Collaboration has reanalyzed the data and claimed evidence of a peak at the total decay energy, 2039-keV, implying $0\nu\beta\beta$ -decay. While this has not been widely accepted by the neutrino community there is no clear proof that the observed peak is not an indication of $0\nu\beta\beta$ -decay. The GERDA experiment, another ^{76}Ge experiment being constructed in the Laboratori Nazionali del Gran Sasso (LNGS), will test this claim. The CUORICINO experiment, also located at LNGS, was the most sensitive $0\nu\beta\beta$ -decay experiment in operation until July 2008, when it was terminated to begin CUORE construction. The University of Zaragoza and the University of South Carolina were both active in CUORICINO. It searched for the $0\nu X\beta$ -decay of ^{130}Te and had the capability of confirming the claim; however, a null result cannot be used to refute the claim because of the uncertainty in the theoretical nuclear matrix elements. GERDA, the proposed Majorana ^{76}Ge experiment, the CUORE ^{130}Te experiment, and the EXO ^{136}Xe experiment are all designed to reach the $m_{\beta\beta}c^2 \approx 0.05$ -electron-Volt mass sensitivity and possibly even below. There are several other constraints on the neutrino-mass scale, irrespective of their Majorana or Dirac character.

The Troitsk and Mainz tritium single β -decay experiments have placed a combined upper limit of 2.2 electron-Volts on the mass of the electron neutrino. The KATRIN experiment, a greatly enlarged tritium β -decay experiment in preparation, is projected to have a sensitivity of 0.2 electron-Volts. This will be extremely interesting. If, for example, the KATRIN experiment would observe a mass of 0.2 electron-Volts or more, and

neutrino-less double-beta decay observes no effect for an effective electron neutrino mass definitely less than that, it would be definite proof that neutrinos have a Dirac character, that is, neutrinos and anti-neutrinos are distinct particles. This is because for the decay to be neutrino-less, when the first neutron decays, it will have to emit a neutrino, and that neutrino will be absorbed on another neutron that emits the second electron. For this to be possible, the neutrino and anti-neutrino must be identical.

Astrophysical data are also relevant in a discussion of neutrino mass. In a recent paper by Barger et al., an upper limit on the sum of neutrino mass eigenvalues, $\Sigma \equiv m_1 + m_2 + m_3 \leq 0.75 eV$ (95% C.L.), was derived. The data were from the Sloan Digital Sky Survey, the two-degree Field Galaxy Red Shift Survey, and the Wilkinson Microwave Anisotropy Probe (WMAP), as well as other CMB experiments and data from the Hubble Space Telescope. Hannestad used the WMAP and 2dFGRS data to derive the bound $\Sigma < 1.0 eV$ (95% C.L.) and concluded that these data could not rule out the claimed evidence. Allen, Schmidt and Bridgman, however, found a preference for a non-zero neutrino-mass i.e., $\Sigma = 0.56_{-0.25}^{+0.30} eV$.

However, this positive result does not have confirmation. The constraint $\Sigma \leq 0.75$ electron-Volts would imply that the lightest neutrino eigenstate mass < 0.24 electron- Volts. On the other hand, if the claim of the positive value Σ is correct, $m_1 \approx 0.17 eV$, and next generation $0\nu\beta\beta$ -decay experiments would constitute a stringent test of lepton-number conservation, irrespective of the order in mass of the neutrino mass eigenstates called the neutrino mass hierarchy.

Here we give the results of the CUORICINO $0\nu\beta\beta$ -decay experiment. Finally, we note that for ^{130}Te there exists a range of calculated matrix elements

implying values of $m_{\beta\beta}$, corresponding to the CUORICINO half-life limit, between ~ 0.2 -electron-Volts and 0.68 electron-Volts. The USC and Zaragoza groups have been involved in the CUORICINO double-beta decay experiment in the Gran Sasso Laboratory in Assergi, Italy from the very beginning until it was discontinued in July 2008. It has set a lower limit on the half-life for the $0\nu\beta\beta$ -decay of ^{133}Te of 2.5×10^{24} y. CUORICINO was an array of ~ 42 kg of TeO_2 cryogenic detectors operating at ~ 0.008 K. The current effort; however, is in the construction of a 750-kg version called CUORE. The USC group's main responsibility is the production of the electronic system. The group also has the U.S. leadership role in the construction and operation of the first tower of CUORE (CUORE-Zero) that will operate in 2010 in the CUORICINO cryostat. The unique cryogenic technology used for CUORICINO and CUORE was developed at the University of Milan by Professor Ettore Fiorini, a close friend and colleague of both Professor Morales and of the author.

Another very interesting question in cosmology concerns the detection of ultra-high energy photons from distant active galactic nuclei that should have been absorbed in the background radiation during the long trip to earth. In 2007, De Angelis, Roncadelli and Mansutti (DARM) proposed that the observation of ultra-high energy gamma rays, with Imaging Atmospheric Cerenkov Telescopes, constituted evidence for a new light spin-zero boson. The basic idea stems from the fact that ultra-high energy photons have a very large cross section, $\sigma(\gamma\gamma \rightarrow e^+e^-)$, for pair production via the interaction with the extragalactic background radiation. Accordingly, their observed flux should be significantly less than observed by the H.E.S.S, MAGIC, CANGAROO III, and VERITAS

imaging telescopes. To explain these observations, DARM proposed that the photons would be converted into axion-like-particles (ALPs) in the intergalactic magnetic fields and again into photons closer to earth. Simet, Hooper and Serpico considered the scenario in which the photons convert to ALPs in the magnetic fields near the originating blazar, surviving cosmological distances as ALPs, and reconverting to photons in the magnetic field of the Milky-way galaxy by the mechanism similar to that of a Sikivie helioscope. The question of interest here is: can the existence of ALPs be tested using the sun as a source? Many previous experiments were motivated by the desire to search for Peccei-Quinn (PQ) axions to verify the elegant solution of the strong-CP problem.

A very relevant question is in what ranges of values of coupling strength and mass might we expect to find ALPs? There is a large uncertainty in these values because of the uncertainties in the strengths and geometries of the magnetic fields involved. However recently Burrage, Davis and Shaw suggest two interesting ranges based on the scatter in x- or γ -ray luminosity relations of various AGNs. Their analyses imply that the scatter could be caused by strong ALP-photon coupling with keV photons that occur in galaxy clusters if $M \approx 10^{11} GeV$ and $m_a \ll 10^{-12} eV$. In another scenario, they suggest that if the conversions occur in fields close to the AGN, possible ranges might be: $M \approx 10^{10} GeV$, and $m_a \ll 10^{-7} eV$. This latter value of M is very close to the present sensitivity of the CAST experiment. While it is obvious that the first step would be to try to improve the background and run the CAST experiment in the vacuum mode, we also consider the possibility of using ultralow background large Xe scintillation detectors. To this end, the cross sections were calculated and combined with the presently accepted theoretical axion

or ALP flux from the sun. The result of the calculation for the detection rate for the coupling corresponding to the upper bound on the coupling from the CAST experiment is given below. The total rate for interactions in Xe can be integrated numerically:

$$\int_2^{15} \sigma(E_a) \Phi(E_a) dE_a = 1.83 \times 10^{-36} s^{-1} / atom$$

The number of Xe atoms/ kg is 4.62×10^{24} so that the total rate then would be $0.267 / ton / y$ for $g_{a\gamma\gamma} = 10^{-10} GeV^{-1}$.

The XMASS project is experimenting with an 800 kg liquid Xe scintillation detector to develop a 10-ton spherical detector with a 1.25-ton fiducial volume with a predicted background rate of $10^{-4} / day / keV / kg$, surrounded by 812 photomultiplier tubes. Here this detector design is used as one possible scintillation detector concept for a solar ALP search. The background given by the XMASS collaboration scales to 548 background counts per ton year. To make this technique viable, the background would have to be reduced by a factor of 1000, and one would need a fiducial volume of more than 100 tons to make a meaningful observation for a coupling corresponding to $M = 10^{10} GeV$. This analysis clearly demonstrates that this technique cannot even compete in sensitivity with the present CAST results with Xe detectors presently under consideration. On the other hand, a search using the planned 10-ton XMASS detector, and using the axio-electric effect for detection there would be about 89 counts per day in the 1.25-ton fiducial volume if both coupling constants are $10^{-10} GeV^{-1}$, with about 1 or 2 background counts. However, as stated before, while this scenario has interesting discovery potential, a null experiment would have no value in placing an upper bound on ALP coupling to photons. The

above calculations demonstrate that it is extremely doubtful that a giant scintillation detector for solar ALPs, could in the foreseeable future serve as a test of the cosmological ALP-photon hypothesis, if that test involved only coupling of ALPs to photons.

Therefore, the operation of CAST in the vacuum mode, and with improved background and for very long running times, is the only hope of exploring two of the scenarios suggested by Burrage, Davis and Shaw, based on their analysis of the scatter in x – and γ – ray luminosity relations. In fact, CAST itself is probably near the limit of its technology. While the conversion probability scales as, $(BL)^2$, the squares of the magnetic field and, increasing the length of a magnet much beyond $10m$ that can track the sun, and/or increasing the magnetic field much beyond $10T$, are not very realistic. Perhaps lowering the background by improving the detector systems and shielding, and/or operating it underground are the only near term realistic improvements. We recall that to improve the sensitivity from $M = 10^{10} GeV$ to $M = 10^{11} GeV$ requires an improvement in the data by a factor of 10^4 , because the coupling constant is squared in both the flux and cross section. This is the improvement that would be necessary to make any meaningful test of the scenarios discussed above for which only coupling to photons is tested.

In conclusion, it is clear that the scientific collaboration between the University of South Carolina and the University of Zaragoza has focused on several of the most interesting and challenging problems on the forefront of Particle Astrophysics. The author has enjoyed an exciting and fruitful collaboration with his Spanish colleagues, and will miss the friendship and collegiality of Professors Angel and Julio Morales to whom I dedicate this brief writing.