



Instituto de Física, Universidad de Antioquia

Informe de lectura: “Campos magnéticos galácticos y el origen de la radiación cósmica. Enrico Fermi”

Juan Manuel Espejo Salcedo

Medellín, Colombia

1 Noviembre 2013

(Astrophysical Journal 119, 1-6 [1954])

La idea principal del paper publicado por Enrico Fermi en el año 1954 es la de hacer una propuesta bastante eficaz sobre los mecanismos con los cuales se da la aceleración de los rayos cósmicos que llegan a la tierra de forma casi simétrica a la superficie, y el origen de los mismos. Apoyado sobre estudios y cálculos que había publicado antes en el paper: “E. fermi, phys. Rev. 75. 1169 (1949)” que en el artículo se cita como “R” Fermi hace un análisis más teórico que cuantitativo sobre las falencias y modificaciones que debe hacerle al citado artículo publicado 5 años antes.

El estudio de este tema empieza en el año 1912 cuando Victor Hess descubrió que continuamente llegan a la tierra rayos cósmicos energéticos, al volar a una gran altura en un globo aerostático. Al principio se creyó que dichos rayos no eran más que rayos gamma con carga neutra. Sin embargo, en la década de los años 30 se vieron algunas evidencias que convencieron a los físicos de que la mayoría de rayos que entraban a la tierra deberían estar compuestos por partículas cargadas positivamente.

Para explicar las altas energías con las que llegaban estas partículas se propusieron algunos mecanismos de aceleración en los años 30 como el de William Francis Swann quien anticipó los aceleradores de partículas al afirmar que estas se pueden acelerar hasta alcanzar altas velocidades con el uso de campos magnéticos y los de Walter Baade y Frits Zwicky quienes dijeron que los rayos cósmicos eran acelerados en explosiones de supernova.

El interés de la comunidad científica en este tema aumentó considerablemente cuando en 1948 se dió la

identificación directa de los rayos cósmicos primarios por primera vez en la historia. Se vió entonces que los rayos no estaban compuestos únicamente por protones sino que también por núcleos cósmicamente abundantes. Se abrió aún más espacio para el estudio del tema. También era necesario explicar porqué los rayos cósmicos caen con la misma intensidad de casi todas las posibles direcciones, pues si las fuentes de dichos rayos son las supernovas, entonces se esperaría una mayor intensidad en la dirección de las mismas.

En 1939 la interesante propuesta hecha por Hannes Alfvén de que el movimiento de los rayos cósmicos era afectado por campos magnéticos producidos por la materia interestelar ionizada revolucionó a la astrofísica del momento pues lograba solucionar varios de los problemas planteados. Fue entonces cuando se dieron las primeras conversaciones entre Alfvén y Fermi en la universidad de Chicago que llevaron a Fermi a exponer sus hipótesis sobre los mecanismos de aceleración en 1949, dejando sin embargo, algunas preguntas sin responder y algunas hipótesis sin demasiada justificación. En el paper que se analiza, Fermi hace énfasis en los aspectos estadísticos de su mecanismo de aceleración teniendo en cuenta los espectros de energía, también explica porqué son importantes los rayos cósmicos y los campos magnéticos interestelares para mantener el equilibrio de la materia interestelar y además, agrega un importante punto que no se pudo explicar en su artículo del año 1949 y es el porqué los núcleos pesados son capaces de llegar a la tierra con energías tan altas.

Básicamente, el mecanismo de aceleración que Fermi expone tiene en cuenta los efectos del campo magnético interestelar que había propuesto Alfvén, pero además tiene en cuenta que de las posibles colisiones de las partículas de los rayos cósmicos con dichos campos, la más probable es la que acelera a las partículas mientras que el otro tipo de colisión es casi despreciable, además tiene en cuenta como los campos magnéticos pueden variar debido a la no uniforme distribución de la materia interestelar ionizada que los produce. Fermi expone que la evidencia reciente (de su época) indicaba campos magnéticos de una baja intensidad (gracias a la polarización de la luz estelar que llegaba a la tierra) pero suficientemente fuertes para efectivamente alterar la trayectoria y velocidad de las partículas que posiblemente provenían de supernovas o incluso de algunos tipos especiales de estrellas.

La aceleración se da así: debido a la existencia de turbulencias, las líneas de fuerza son empujadas irregularmente hasta que la tensión magnética aumenta al punto de forzar movimientos en el material interestelar dándole así un movimiento no muy suave pero que responde a un comportamiento oscilatorio. Una partícula que esté dando vueltas en espiral alrededor de estas líneas que se mueven es gradualmente acelerada. Se podría decir que la parte principal del mecanismo de Fermi para la aceleración de las partículas de los rayos cósmicos es precisamente el movimiento de las líneas de fuerza donde se encuentran los campos magnéticos inducidos por la materia difusa ionizada que se encuentra en constante movimiento.

Pero, como se dijo antes, la mayor diferencia de este paper con el publicado en 1949 radica en que el análisis está basado en las energías de las partículas, lo que incluso, resuelve el problema de los núcleos pesados planteado por el mismo Fermi en su anterior paper y además, muestra las probabilidades de colisión y escape de las partículas. El mecanismo de aceleración que se acaba de exponer implica según Fermi que la energía de las partículas aumenta a una tasa que, para partículas relativistas es proporcional a su energía, lo que implica que la energía aumenta exponencialmente con el tiempo:

$$E(t) = E_0 e^{t/A}$$

Es notable que el tiempo A estimado para que la energía aumente un factor e es de 100 millones de años, que a estas escalas es muy coherente. Ahora, el estudio de la energía permitió a Fermi darle fortaleza a su mecanismo anteriormente planteado pues pudo probar que las energías necesarias para que las partículas salgan de sus galaxias se pueden alcanzar con los modelos ya propuestos y que las ecuaciones que describen esa probabilidad entran en completa concordancia con el mecanismo de aceleración que había planteado en "R". Pudo probar que el tiempo A sería comparable con el tiempo B para las colisiones nucleares que ocurrirían y que sin embargo, el número de partículas que escapan sería mayor que el de las que se pierden por colisiones nucleares. Incluso, a este punto, Fermi logró explicar la presencia de núcleos pesados en los rayos cósmicos así: las componentes protónicas y nucleares de la radiación cósmica tienen casi el mismo espectro de energía y uno esperaría que los núcleos pesados tengan una vida media menor, sin embargo, dice Fermi, esta dificultad se eliminaría si el proceso de eliminación fuera igualmente efectivo para ambos tipos de partículas, lo que efectivamente se puede ver con un estudio probabilístico.

La teoría de Fermi implica que se debe asumir que el tiempo de escape por difusión afuera de la galaxia es un poco menor que el tiempo de colisiones nucleares, esto para que el proceso de escape de cuenta de la gran cantidad de radiación cósmica que continuamente llega a la tierra.

Finalmente, Fermi dice que, dejando a un lado los detalles de la aceleración, se les debe dar mucha importancia a la radiación cósmica y los campos magnéticos en cuanto al equilibrio del gas interestelar.

La trascendencia del paper de Fermi está en que estos procesos por él planteados y estudiados han sido base para numerosos estudios en la astrofísica de altas energías, la física estadística y la física nuclear. Incluso un proceso importante en la aceleración de partículas cargadas principalmente por la influencia de espejos magnéticos se conoce como "Aceleración de Fermi".

[1] E. fermi, phys. Rev. 75. 1169 (1949) (citado como "R")