

Buscando los límites de la aproximación de campo medio mediante $(e, e'p)$. Midiendo distribuciones de momento. Viendo correlaciones

Madrid, 7 de Junio de 2007

¿Por qué usar electrones como sonda para estudiar el núcleo?

- Interacción electrón-núcleo predominantemente electromagnética:
 - Bien descrita a través de la Electrodinámica Cuántica (QED)
 - Es relativamente débil ($\alpha = 1/137$): Tratamiento perturbativo posible
 - El electrón explora todo el volumen nuclear sin alterarlo significativamente
- Posibilidad de variar la energía (ω) y el momento (q) transferidos al núcleo de forma independiente

¿Qué le puede pasar al núcleo como consecuencia de la interacción con el electrón?

- Puede adquirir energía cinética (proceso elástico)
- Podemos excitar estados del mismo
- Podemos arrancar un nucleón o más.
- Podemos producir piones, excitar resonancias...Y más...

HAY MUCHOS TIPOS DE PROCESOS DE DISPERSIÓN DE ELECTRONES POR NÚCLEOS

La información que podemos extraer depende del tipo de proceso

TIPOS DE PROCESOS (I)

Dependiendo de:

- Régimen de energías en el que se produzca el proceso (transparencia anterior):
Proceso elástico, inelástico, cuasielástico, profundamente inelástico...
- Cuántas partículas detectemos:
 - ▮▶ Sólo el electrón dispersado $A(e, e')B$
 - ▮▶ Electrón en coincidencia con un protón o más ($A(e, e'N)B$, $A(e, e'pp)B$, $A(e, e'pn)B...$)
 - ▮▶ Electrón en coincidencia con un pión ($A(e, e'\pi)B$, $A(e, e'\pi N)B$)
- Inclusión de polarizaciones (o no): $A(\vec{e}, e')B$, $A(\vec{e}, e'\vec{N})B$, $A(e, e'\vec{N})B...$

TIPOS DE PROCESOS (II)

- ➡ Procesos **EXCLUSIVOS**: la cinemática del proceso está perfectamente DETERMINADA. Sabemos qué canal/es estamos midiendo, y que no hay otros canales abiertos contribuyendo a la sección eficaz.
- ➡ Procesos **INCLUSIVOS**: la cinemática no está completamente determinada. Hay canales contribuyendo a la sección eficaz que no se miden explícitamente.

Ejemplos:

- $(e, e'p)$ en un régimen de energías en el que sea posible la producción de piones NO es proceso exclusivo: es semi-inclusivo.
- (e, e') es un proceso ¿...?

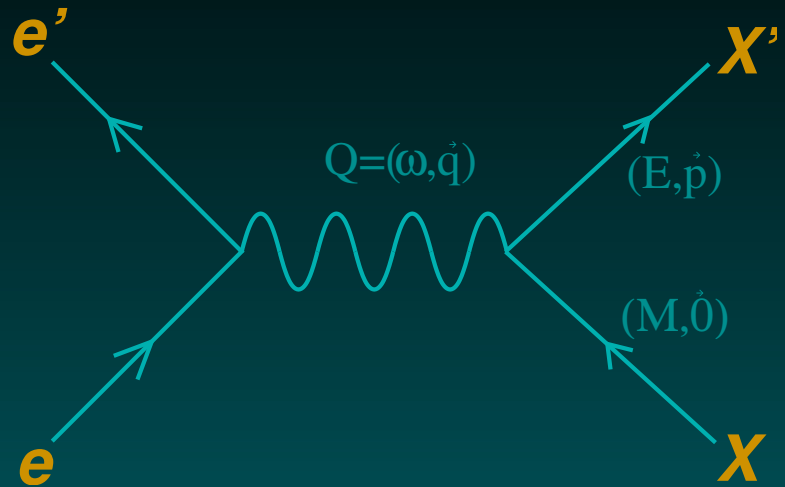
¿Cómo hacemos una idea de que le puede estar pasando al núcleo al interactuar con el electrón?

Imaginemos un proceso **ELÁSTICO** en el cual el electrón interactuara con una partícula X de masa $M = xM_N$ inicialmente en reposo, siendo M_N la masa del nucleón:

Por conservación de energía y momento:

$$Q^2 = 2M\omega = 2xM_N\omega$$

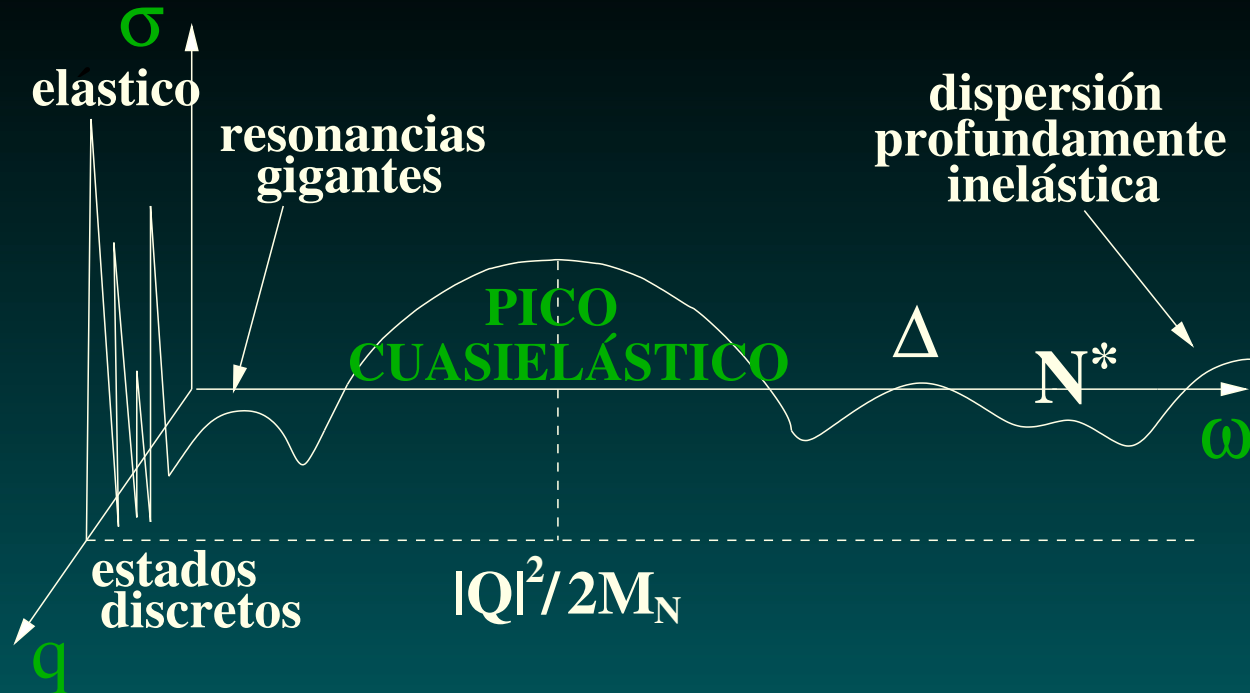
$$\Rightarrow \boxed{x = Q^2 / 2M_N\omega}$$



x es la **variable de BJORKEN**. Conociendo la energía y el momento transferidos conoceremos x , es decir, la masa M de la partícula con la que el electrón interactúa. Por ejemplo, si $x \approx A$ el electrón estará interactuando con el núcleo como un todo.

Sección eficaz total de dispersión de e^- por núcleos

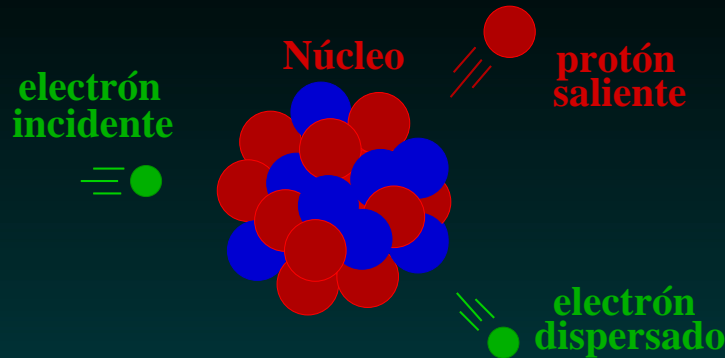
La sección eficaz cuando, independientemente de lo que le haya pasado al núcleo, medimos únicamente el electrón dispersado, tiene la forma:



En el pico cuasielástico $x = 1$, y el proceso más probable es así aquel en el cual el electrón está interactuando con un único nucleón del núcleo. Si la energía es suficiente, el electrón conseguirá arrancar el nucleón.

El proceso $A(e, e'p)B$ en el pico cuasielástico

Se trata de un proceso en el que un protón se detecta en coincidencia con el electrón dispersado



“The $(e, e'p)$ reaction proves the literal truth of the shell model”

D.H. Wilkinson, Comments on Nucl. Part. Phys. 2, 48 (1968)

El proceso $(e, e'p)$ en cinemática cuasielástica y en condiciones exclusivas supone un test limpio y potente del **modelo nuclear de partículas independientes**, así como de las **correlaciones** que se necesitan para corregirlo.

¿Qué tipo de información nuclear se puede extraer de los procesos $A(e, e'p)B$?

PROPIEDADES MONOPARTICULARES:

- Energías de niveles monoparticulares
- Distribuciones de momento
- Factores espectroscópicos
- Existencia de correlaciones de corto y largo alcance (también procesos $A(e, e'pp)B$ y $A(e, e'pn)B$)

OTRA INFORMACIÓN

- Propagación de nucleones a través del medio nuclear (¿Transparencia de color?)
- Posible modificación de las propiedades del nucleón en el medio nuclear...

Descripción del mecanismo de reacción

Para describir el proceso exclusivo $A(e, e'p)$ necesitaremos:

- Especificar el acoplamiento electromagnético e^- -núcleo.
- Describir la estructura nuclear del blanco y del núcleo residual

Vamos a usar dos aproximaciones que suelen funcionar bastante bien:

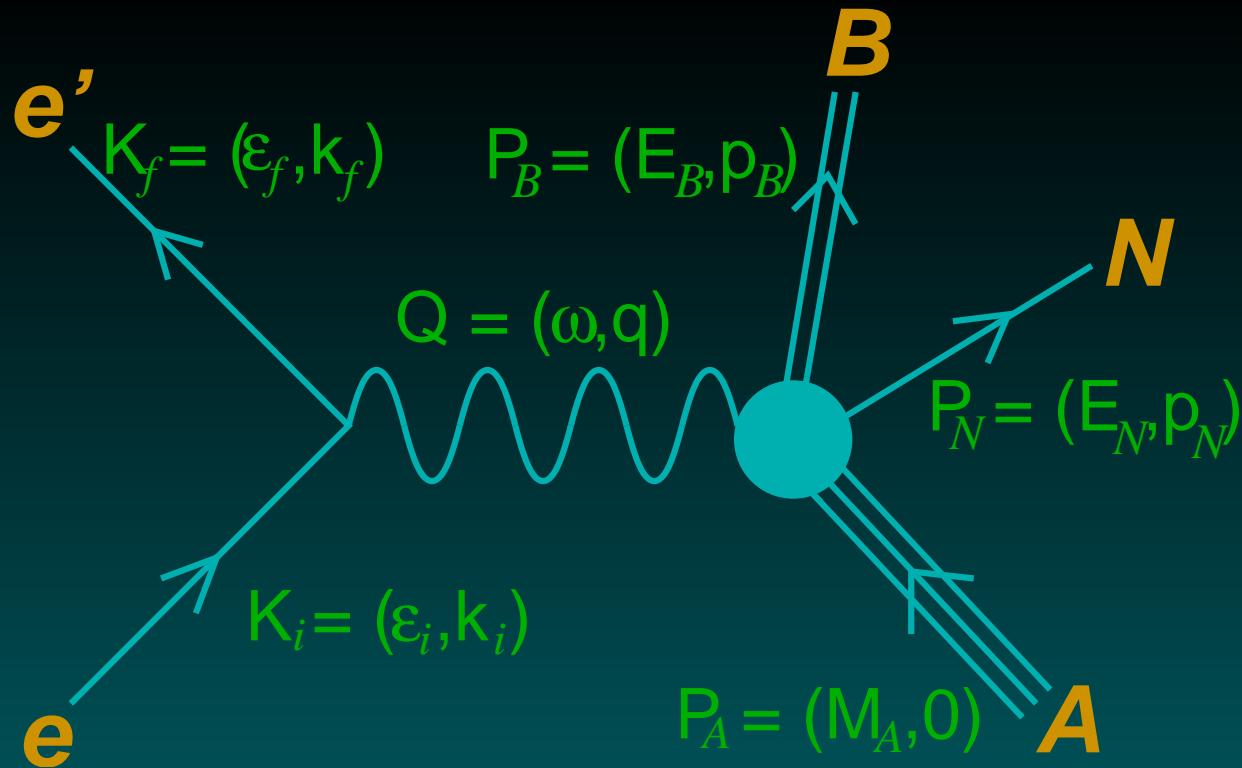
- Vértice leptónico: primer orden en teoría de perturbaciones, intercambio de un único fotón:

Aproximación de Born de Ondas Planas (PWBA)

- Vértice nuclear:

Aproximación de Impulso (IA)

Aproximación de Born de Ondas Planas (PWBA)

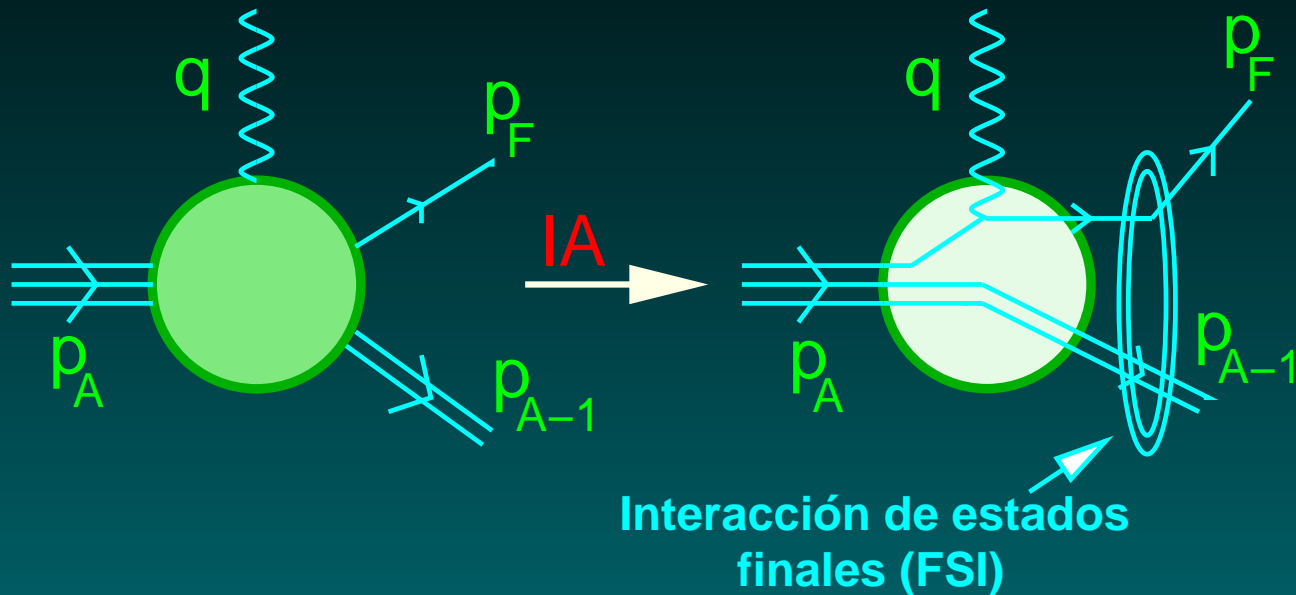


- Intercambio de un único fotón virtual
- Las funciones de onda de los electrones son ondas planas

Aproximación de Impulso (IA)

- El fotón virtual cede su energía y momento a un único nucleón
- Dicho nucleón es el mismo que se detecta en coincidencia con el e^-

Corriente nuclear \Rightarrow Operador a un cuerpo



Sección eficaz $A(e, e'p)B$

En la aproximación de impulso, la cantidad básica que se debe calcular es

$$\int d^3r_1 e^{i\vec{q}\cdot\vec{r}_1} \psi^+(\vec{r}_1) \hat{J}^\mu \psi_\alpha(\vec{r}_1)$$

donde

$$\psi_\alpha(\vec{r}_1) = \sqrt{A} \int d^3r_2 \dots d^3r_A \psi_{B,\alpha}^+(\vec{r}_2 \dots \vec{r}_A) \psi_A(\vec{r}_1 \dots \vec{r}_A)$$

es la integral de *overlap*.

En el modelo de capas extremo, la integral de overlap coincide con la función de onda del hueco. Si comparamos los datos experimentales con cálculos en los que hayamos usado el modelo de capas extremo, la desviación nos indicará cómo de bueno es usar la aproximación de partículas independientes.

Aproximación de Impulso de Ondas Planas (PWIA)

Se ignora la interacción entre el nucleón saliente y el núcleo residual, es decir, la interacción de estados finales, con lo cual la función de onda del nucleón saliente es una onda plana.

En PWIA con f.o. no relativistas (o relativistas 'proyectadas'...):

Se “desacopla” la dinámica nuclear y la interacción electrón-protón:

FACTORIZACIÓN

$$\frac{d\sigma}{d\varepsilon_f d\Omega_e dE_p d\Omega_p} = K f_{rec}^{-1} \sigma^{ep} S(E_m, p_m)$$

- σ^{ep} : sección eficaz elemental electrón-protón
- $S(E_m, p_m)$: sección eficaz reducida. Coincide con la función espectral en el modelo de capas extremo (probabilidad de encontrar un protón en el núcleo con momento p_m a energía E_m compatibles con la cinemática del proceso)

Midiendo distribuciones de momento

¿Qué es una distribución de momentos? \Rightarrow Es la probabilidad de encontrar un nucleón en el núcleo con momento p .

$$\rho(p_m) = \int_{AE_m} S(E_m, p_m) dE_m$$

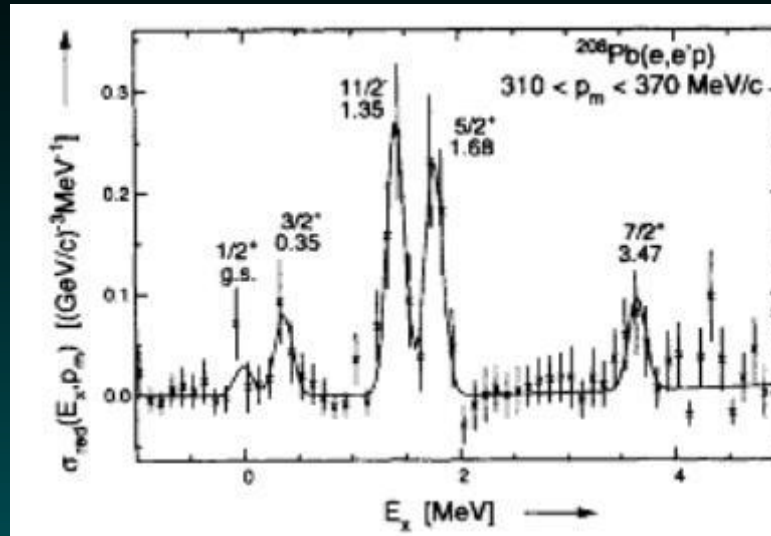
Si AE_m comprende a un solo nivel monoparticular, $\rho(p_m)$ es la distribución de momentos de ese nivel o capa.

Si en un experimento $A(e, e'p)B$ se mide la sección eficaz, y se extrae la sección eficaz reducida, esos datos proporcionan una muy buena estimación de la distribución de momentos cuando integramos en la región de E_m de interés.

Además, esas secciones eficaces reducidas experimentales se pueden comparar con cálculos basados en el modelo de capas extremo...

La estructura del núcleo “vista” con experimentos $A(e, e'p)$

Si se representa la sección eficaz reducida vs la energía de excitación o la E_m :

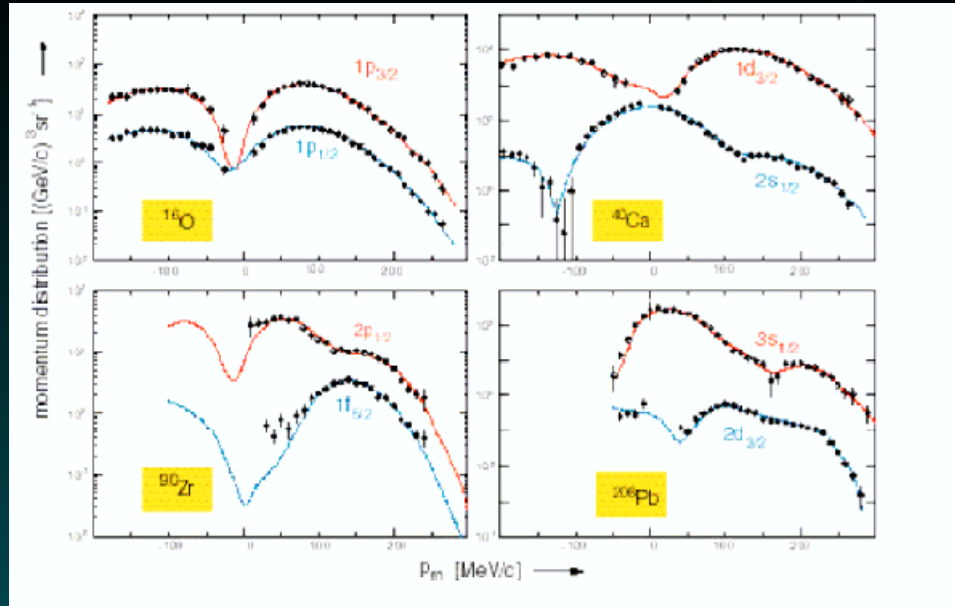


Cada uno de los picos se puede identificar con una capa del modelo de partículas independientes.

$A(e, e'p)$ permite observar claramente la estructura de capas nuclear

¿Cómo funciona el modelo de capas extremo cuando se usa para describir procesos $A(e, e'p)B$?

Los programas experimentales de NIKHEF-K y Saclay mostraron que:



- La **forma** de la sección eficaz $A(e, e'p)B$ **se reproduce bien** con cálculos basados en el modelo de capas extremo para el caso de las capas más externas...
- ...Pero la **magnitud absoluta** de la sección eficaz es demasiado alta. Se hace necesario escalar la teoría usando **factores espectroscópicos**.

Límites del modelo factorizado $A(e, e'p)B$

- **Límites de la aproximación PWBA+PWIA:**

- ▶▶▶▶ Distorsión coulombiana de las f.o. de los electrones
- ▶▶▶▶ Interacción de estados finales (FSI): el nucleón saliente interactúa con el núcleo residual.
- ▶▶▶▶ Efectos relativistas dinámicos

- **Límites del modelo de partículas independientes:**

CORRELACIONES

Límites del modelo de partículas independientes (IPSM): correlaciones

Las correlaciones modifican la ocupación de las capas predicha por el IPSM.

Idea simple= debido a la existencia de correlaciones, “un nucleón no se encuentra siempre en la capa donde predice el IPSM, sino que tendrá una cierta probabilidad de estar fuera de ella”.

Si el cálculo teórico de una sección eficaz $A(e, e'p)B$ correspondiente a arrancar un protón de una cierta capa se hace con el IPSM, obtendremos un valor mayor que el experimental, puesto que el e^- “ve más nucleón en la capa del que realmente hay”.

Las correlaciones hacen que:

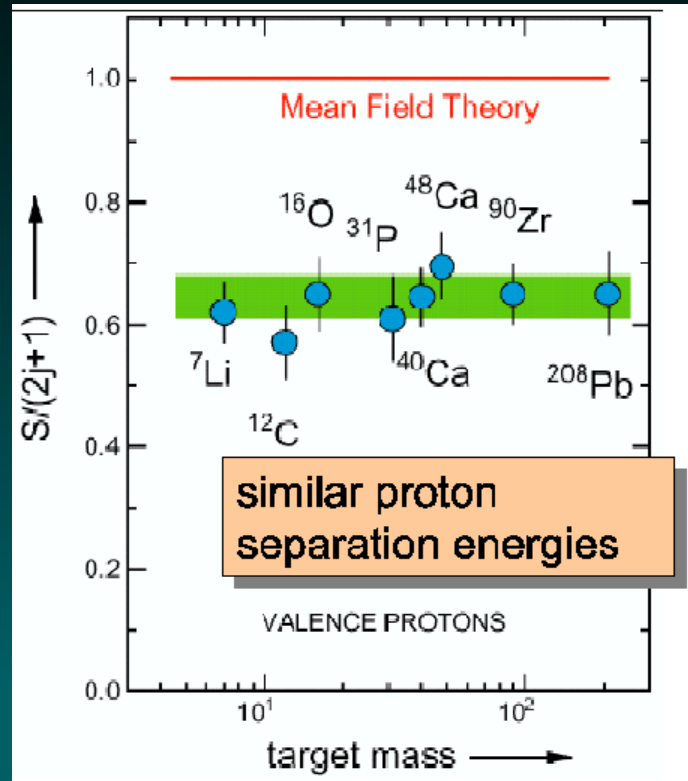
$$d\sigma_{teor} > d\sigma_{exp}$$

Viendo correlaciones: Factores espectroscópicos

$$A(e, e'p)B$$

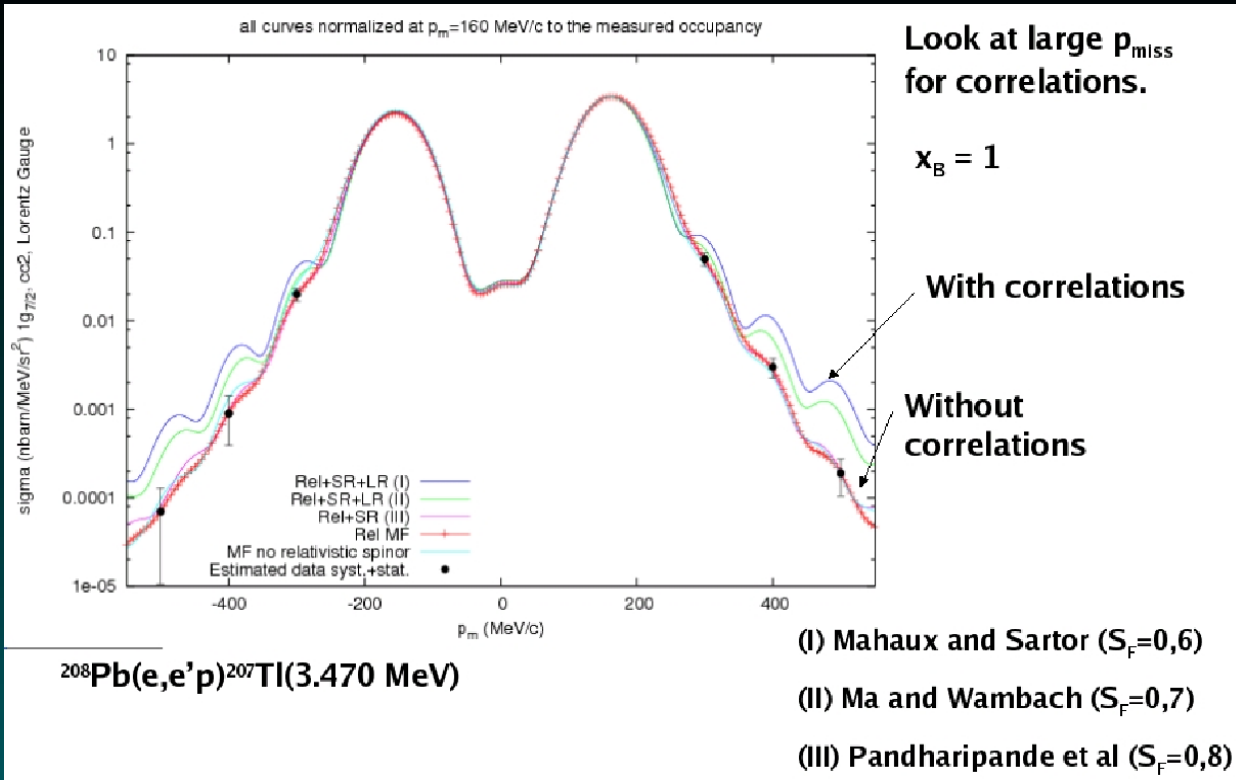
De forma simplificada, el factor espectroscópico es el resultado de hacer el cociente entre $d\sigma_{exp}$ y $d\sigma_{teor}$. Si todos los demás ingredientes del mecanismo de reacción se han tratado adecuadamente, la desviación se atribuye a los límites del IPSM.

- Desviaciones de los factores espectroscópicos respecto a las predicciones del IPSM ($2j + 1$)
- Explicación: efecto de correlaciones de **corto alcance** y **largo alcance**



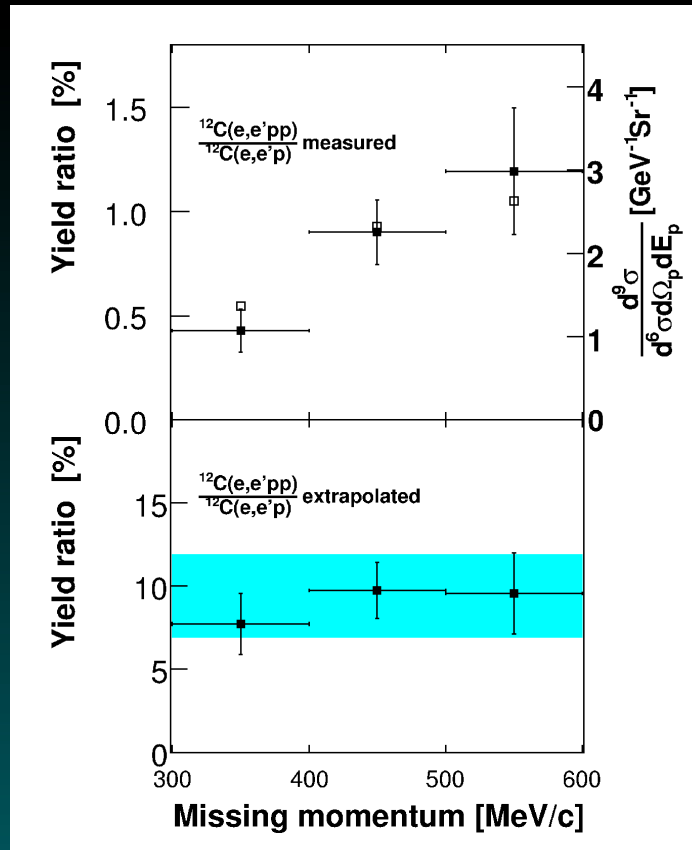
Si se necesitan las correlaciones para reproducir los valores experimentales de los factores espectroscópicos, éstas pueden manifestarse también en las distribuciones de momento de las partículas.

Distribuciones de momento a alto p_{miss} : buscando correlaciones



A $x_B = 1$ no hay ningún modelo que prediga un exceso de strength a alto p_{miss} si se excluyen las correlaciones de largo alcance.

Correlaciones mediante $A(e, e'pp)B$ y $A(e, e'p)B$



En el rango de p_m entre 300 y 600 MeV, un 9.5 % de los sucesos $^{12}\text{C}(e, e'p)$ tienen un segundo protón emitido aproximadamente en dirección opuesta al primero: hemos visto CORRELACIONES

Resumen

La dispersión de electrones por núcleos...

- ... es una de las mejores herramientas que tenemos para estudiar la estructura nuclear
- ... nos permite ver claramente la estructura de “capas” de los núcleos
- ...ha proporcionado valores de las energías de las capas y se han medido numerosas distribuciones de momento
- ...nos han enseñado que las correlaciones se pueden observar experimentalmente de forma clara

AUNQUE AÚN QUEDA MUCHO POR APRENDER Y EXPLICAR...

Modelos relativistas vs no relativistas, efectos de correlaciones de corto y largo alcance, dependencia de los factores espectroscópicos con Q^2 , núcleos exóticos...