مطالعه تابع ساختار عرضی نوترون پیشرو با استفاده از ویژگی خودمتشابه‌ای ساختار پروتون در x کوچک

شعیبی محسن آبادی، سمیرا[۱]؛ تقوی شهری، فاطمه[۱]

[۱] دانشکده علوم، گروه فیزیک، دانشگاه فردوسی مشهد، مشهد

چکیده

در این مقاله، فرآیند پراکندگی ناکشسان ژرف نیمه فراگیر تولید نوترون‌های پیش‌رو در HERA مورد مطالعه قرار گرفته است که در این برهم کنش نوترون های پیشرو بخش عظیمی از تکانه‌ی طولی پروتون را حمل می‌کنند. با استفاده از ویژگی خود متشابهی ساختار پروتون در x کوچک، فرم پارامتربندی شده برای تابع ساختارعرضی نوترون پیشرو در تقریب NLO ارائه شده است که با آنالیز گلوبال این تابع با داده های تجربی تولید نوترون های پیشرو، مقدار پارامتر ها معلوم و نتایج به دست آمده سازگاری خوبی با این داده‌های تجربی دارند.

واژه های کلیدی: *پراکندگی ناکشسان ژرف نیمه فراگیر-نوترون های پیشرو-تابع ساختار عرضی نوترون پیشرو- مدل فرکتالی.*

Considering the transverse neutron structure functions using the self-similarity attitude of proton structure in low x

Samira, Shoeibi Mohsenabadi[1]; Fatemeh Taghavi-Shahri[1]

[1]*Department of Physics, Ferdowsi University of Mashhad, P.O.Box 1436, Mashhad, Iran*

Abstract

The production of leading neutrons, where the neutron carries a large fraction of the incoming proton's longitudinal momentum, is studied in semi inclusive deep inelastic positron-proton scattering (SDIS) at HERA. In this paper, we use the self-similarity attitude of proton structure in small value of x in order to achieve a parametrized form for transverse neutron structure function at next-to-leading order (NLO) approximation. By using the leading neutrons data, we find the parameter values and as a result the obtained results are in good agreement with the SDIS leading neutrons data.

***Keywords**: Semi-inclusive Deep Inelastic Scattering-Leading neutron-Transvers structure of leading neutron-Fractal model*

PACS No. (13)

مقدمه

از جمله آزمایش‌های قابل توجه در فیزیک انرژی‌های بالا (High Energy Physics) پراکندگی ناکشسان ژرف کاملا فراگیر (Totally Inclusive Deep Inelastic Scattering) و پراکندگی ناکشسان ژرف نیمه فراگیر (Semi-Inclusive Deep Inelastic Scattering(SDIS)) است. در پراکندگی ناکشسان ژرف کاملا فراگیر لپتون-پروتون، سطح مقطع ذرات تولید شده در مرحله‌ی نهایی، حاصل از برهم‌کنش فوتون مجازی با پارتون‌های فعال پروتون فرودی، مورد بررسی قرار می‌گیرد. لپتون‌ها یکی از ذرات بنیادی دارای ساختار نقطه‌ای هستند و با استفاده از آن‌ها می‌توان ساختار داخلی پروتون فرودی را مطالعه و قوانین حاکم بر کوچکترین جزء تشکیل دهنده‌ی ماده را توصیف نمود. در فرآیند SDIS، ذره‌ای خاص توسط آشکارساز ردیابی و سطح مقطع تولید

این مقاله درصورت قابل دسترس بودن در وبگاه psi.ir معتبر است

آن نیز بررسی می شود. داده‌های مربوط به این فرآیندها نیز منظری جدید از تئوری دینامیک کوانتومی رنگ (QCD) در ناحیه نرم برهم‌کنش ارائه می‌دهد و بدین‌وسیله رابطه‌ی بین دینامیک نرم QCD و برهم‌کنش قوی هادرون‌ها نیز مطالعه می‌شود. به منظور درک عمیق‌تر و کامل‌تر از مکانیزم برهم‌کنش‌های SDIS و پدیده‌ی حبس درمحدوده‌ی xها و Q^2های کوچک، می‌توان چگالی پارتون‌های درون هادرون را براساس الگوهای برخالی یا فراکتالی (Fractal) و ویژگی‌های خود همانندی نیز بیان کرد. فراکتال، ساختاری هندسی است که با بزرگ کردن هر بخش از این ساختار به نسبت معین، همان ساختار نخستین به دست آید. در این مقاله فرآیند تولید نوترون های پیشرو در بر هم کنش SDIS پوزیترون–پروتون با استفاده از مدل فرکتالی مورد مطالعه قرار گرفته است. براین اساس تابع ساختار عرضی نوترون های پیشرو به صورت تابع پارامتربندی شده ارائه شده که با استفاده از آنالیز گلوبال این تابع با داده‌های تجربی جمع آوری شده‌ی از آشکارسازهای H1 در شتاب‌دهنده‌ی HERA، بهترین مقادیر پارامترهای مجهول گزارش می‌شود.

تعریف بعد فراکتالی

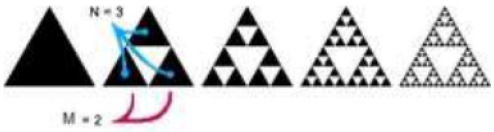
فراکتال ساختاری است که هر بخش از آن با کل‌اش متشابه است و دارای سه خاصیت خودمتشابه‌ای (به معنی یکسان دیده شدن شکل در مقیاس‌های متفاوت)، تشکیل از راه تکرار و بعد فراکتالی یا بعد کسری می باشد. به منظور مطالعه بعد فراکتالی در ابتدا باید مفهوم بعد را درک کنیم. منظور از بعد غیر کسری یا بعد با مقدار صحیح، تعداد مسیرهای مستقل در یک سیستم مختصات خاص است. به عنوان مثال، یک خط دارای یک بعد، مربع دارای دو بعد و مکعب دارای سه بعد می‌باشد. با این وجود ابعاد اشکال دیگری مانند مثلث سرپینسکی که در شکل (۱) نشان داده شده است، نیاز به تعریف عمومی‌تری دارند. مکعب، مربع و خط، اشیاء خودمتشابه هستند. هنگامی که یک خط از وسط به دو نیمه تقسیم می‌شود، با بزرگ‌نمایی یکی از آنها به اندازه ضریب دو (به عبارتی دو برابر کردن یکی از آنها) خط اصلی (مادر) دوباره بازسازی می‌شود. فرآیند مشابه را می‌توان برای مربع و مکعب نیز انجام داد. به عنوان مثال اگر ضریب بزرگ‌نمایی برای مربع سه باشد، در آن صورت تعداد مربع‌های کوچک، خواهد بود و اگر این ضریب بزرگ‌نمایی را برای مکعب اعمال کنیم تعداد مکعب‌های کوچک می‌شود. در حالت کلی اگر ضریب بزرگ‌نمایی را با M نشان دهیم، در آن صورت تعداد شکل‌های خودمتشابه تولید شده بر اساس این ضریب بزرگ‌نمایی، M^D خواهد بود که D بعد شکل مورد نظر است. براین اساس، بعد به صورت زیر تعریف می گردد [۱]:

$$D = \frac{\log(M^D)}{\log(M)} = \frac{\log(\text{تعداد شکلهای خودمتشابه})}{\log(\text{ضریب بزرگنمایی})} \quad (۱)$$

با توجه به این رابطه، می‌توان بعد مثلث سرپینسکی را نیز بدست آورد.

$$D = \frac{\log 3}{\log 2} = 1.58496\ldots \quad (۲)$$

که بعد مثلث سرپینسکی، مقداری کسری است.



شکل ۱. شماتیکی از بزرگ نمایی مثلث سرپینسکی

بعد فراکتالی یک مقیاس عددی برای میزان پر شدگی فضا توسط یک الگو می‌باشد و به عنوان یک شاخص آماری پیچیده معرفی می‌شود که تغییر الگوی فراکتالی را نسبت به تغییر مقیاس لحاظ شده به شکل، بیان می‌کند. بزرگ بودن یک صفحه از یک خط کاملا مشخص است، اما مثلث سرپینسکی به عنوان یک شکل فراکتالی، نه تنها یک خط نیست بلکه به بزرگی یک صفحه هم نیست. تعریف بعد ارائه شده در رابطه‌ی (۱) را می‌توان به فراکتال‌های غیرگسسته نیز تعمیم داد:

$$D = \frac{\log f(z)}{\log(z)} \quad (۳)$$

که در آن ضریب بزرگ‌نمایی عدد z است و تعداد شکل‌های خودمتشابه در فراکتال مذکور، توسط تابع چگالی f(z) نشان داده می‌شود. با انتگرال‌گیری از رابطه‌ی (۳)، تابع چگالی به صورت زیر بیان می‌گردد:

$$\log f(z) = D\log(z) + D_0 \quad (۴)$$

با توجه به این رابطه، می‌توان گفت که رفتار تابع چگالی f(z) به شکل تابعی توانی به صورت $f(z) \propto z^D$ است که متغیر D_0 به

این مقاله درصورت قابل دسترس بودن در وبگاه psi.ir معتبر است

عنوان ضریب نرمال‌سازی این تابع معرفی می‌شود. اگر مدل فراکتالی دارای دو ضریب بزرگ‌نمایی مستقل از هم (z و y) باشد، در آن صورت تابع چگالی مربوط به این مدل فراکتالی با f(z,y) نشان داده شده است و به صورت زیر عنوان می‌شود:

$$\log f(z.y) = D_{zy}\log z\log y + D_z\log z + D_y\log y + D_0 \quad (۵)$$

که در آن، D_{zy} به عنوان همبستگی ابعادی مربوط به ضریب‌های z و y معرفی می‌شود.

تولید نوترون‌های پیشرو در HERA و بررسی ساختار خودمتشابه پروتون

هشت تا ده درصد از ذرات نهایی تولید شده در برهم کنش پراکندگی ناکشسان ژرف نیمه فراگیر پوزیترون-پروتون، نوترون هایی هستند که کسر عظیمی از انرژی اولیه‌ی پروتون ورودی را با خود حمل می‌کنند. تکانه‌ی عرضی این نوترون ها نسبت به محور برخورد الکترون-پروتون کوچک است($p_{T.max} = 200\ MeV$) و در زوایای بسیار کوچک نسبت به محور برخور تولید می شوند ($\theta_B = 0.8\ mrad$). با توجه به این ویژگی ها، به این نوترون ها، نوترون های پیشرو (Forward Neutrons) می گویند. در چند دهه‌ی گذشته، برهم‌کنش ناکشسان ژرف نیمه فراگیر پوزیترون-پروتون به منظور اندازه‌گیری تابع ساختار عرضی نوترون های پیشرو، $F_2^{Ln}(\beta.Q^2.x_L)$ ، در مرکز تحقیقاتی DESY توسط شتاب‌دهنده HERA انجام شده است [۳-۴]. در این تابع، $\beta = \frac{x_B}{1-x_L}$ کسر تکانه‌ی انتقالی به پارتون شرکت‌کننده در برهم‌کنش هادرونی سخت و $x_L \simeq \frac{E_n}{E_p}$ کسر تکانه‌ی طولی منتقل شده به نوترون پیش‌رو می باشد. لازم به ذکر است که در این آنالیز از به روزترین داده های این برهم کنش استفاده شده است [۴]. یکی از مسائل جالب در تئوری QCD ، مطالعه ساختار پروتون در x های کوچک است [۵-۶]. در چنین شرایطی برهم‌کنش‌های گلئون-گلئون اتفاق می‌افتد و سهم کوارک‌های دریای ساطع شده از گلوئون در تابع توزیع پروتون چشمگیر می‌شود. بنابراین به نظر می‌رسد که برهم‌کنش‌های مذکور، از ماهیت خودمتشابه عنوان شده در مدل فراکتالی تبعیت کنند و بتوان چگالی کوارک‌های دریا در پروتون را به صورت تابعی توانی نوشت.

شکل پارامتربندی شده ی تابع ساختار پروتون در مدل فراکتالی

با توجه به مطالب عنوان شده در دو بخش قبل و با توجه به رابطه‌ی (۵)، در ابتدا باید ضریب(های) بزرگ‌نمایی مربوط به چگالی کوارک و گلئون فعال در برهمکنش SDIS تولید نوترون های پیشرو را پیدا کرد. در صورت انتخاب درست ضریب بزرگ‌نمایی z، نمودار log-log تابع چگالی f(z) بر حسب این ضریب باید حالت خطی باشد که شیب این خط، بعد فرکتالی را به ما می‌دهد. از آنجایی که در مرجع [۲] مدلی پارامتربندی شده برای نوترون های پیشرو براساس متغیرهای سینمانیکی x، Q^2 و x_L است، با استفاده از آن نه تنها می توان اعتبار مدل فرکتالی برای نوترون های پیشرو بررسی کرد، بلکه با بهره‌گیری از رابطه‌ی (۵) می‌توان ضریب(های) بزرگ نمایی را نیز پیدا کرد. همانطور که در شکل (۲) نشان داده شده، رفتار چگالی کوارک و گلوئونهای مدل ارائه شده در مرجع [۲] بر حسب متغیرهای سینماتیکی x و Q^2 خطی است. خط افقی مشکی رنگ در شکل (۲) محدوده ی رفتار خطی لگاریتم تابع چگالی کوارک و گلوئون را نشان می دهد. بنابراین با توجه به اینکه ضریب‌های بزرگ‌نمایی باید مقادیری غیر صفر و مثبت باشند و بعد فیزیکی نداشته باشند، چگالی کوارک و گلوئون های برهمکنش مذکور به صورت زیر عنوان می گردد:

$$\log f_i(x.q^2.x_L) = f(x_L)\{D_1\log\frac{1}{x}\log\left(1+\frac{q^2}{Q^2}\right) + D_2\log\frac{1}{x} + D_3\log\left(1+\frac{q^2}{Q^2}\right) + D_0\} \quad (۶)$$

که در آن $f(x_L)$، تابعی بر حسب متغیر سینماتیکی x_L است. با استفاده از رابطه‌ی $xq(x.Q^2.x_L) = \int_0^{Q^2}\frac{dq^2}{q^2}f(x.q^2.x_L)$ تابع توزیع کوارک به صورت زیر نوشته می شود:

$$xq_i(x.Q^2.x_L) = f(x_L)\left[\frac{e^{D_0^i}Q_0^2x^{-D_2+1}}{1+D_3-D_1\log x}\left(x^{-D_1\log\left(1+\frac{Q^2}{Q^2}\right)}\left(\left(1+\frac{Q^2}{Q^2}\right)\right)^{D_3+1}-1\right)\right] \quad (۷)$$

لازم به ذکر است که ضریب نرمال سازی D_0^i به طعم کوارک وابسته است. در نهایت تابع ساختار پروتون در برهم‌کنش نیمه فراگیر تولید نوترون پیشرو را می‌توان با استفاده از رابطه‌ی تابع

این مقاله درصورت قابل دسترس بودن در وبگاه psi.ir معتبر است

توزیع کوارک‌های دریا با تابع ساختار پروتون ($F_2 = x\sum_i e_i^2(q_i + \bar{q}_i)$)، با در نظر گرفتن تقارن بین کوارک و پادکوارک و با توجه به رابطه $\beta = \frac{x_B}{1-x_L}$ به صورت زیر عنوان کرد:

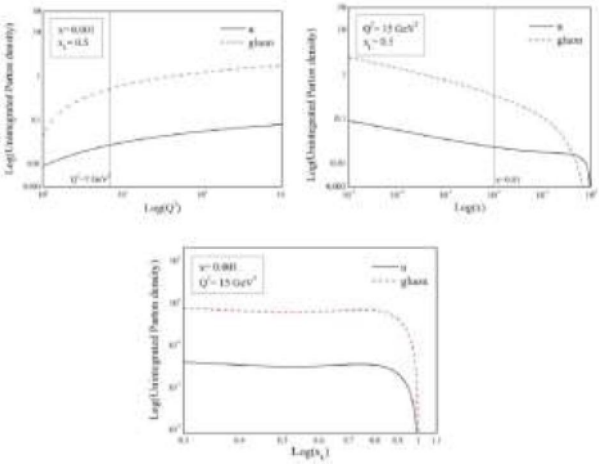
$$F_2^{Ln}(\beta.Q^2.x_L) = f(x_L)\left[\frac{e^{D_0}Q_0^{2\beta^{-D_2+1}}}{1+D_3-D_1\log\beta}\left(\beta^{-D_1\log\left(1+\frac{Q^2}{Q^2}\right)}\left(\left(1+\frac{Q^2}{Q^2}\right)\right)^{D_3+1}-1\right)\right]$$

(۸)

که در آن تابع $f(x_L)$ به فرم پارامتربندی زیر است:

$$f(x_L) = A(x_L^B)(1-x_L)^C(1+Dx_L^E)$$

(۹)



شکل (۲): نمودار چگالی کوارک و گلوئون مدل ارائه شده در مرجع [۲] برحسب متغیرهای سینماتیکی x ، Q^2 و x_L.

برازش داده های تجربی H1 با مدل پیشنهادی

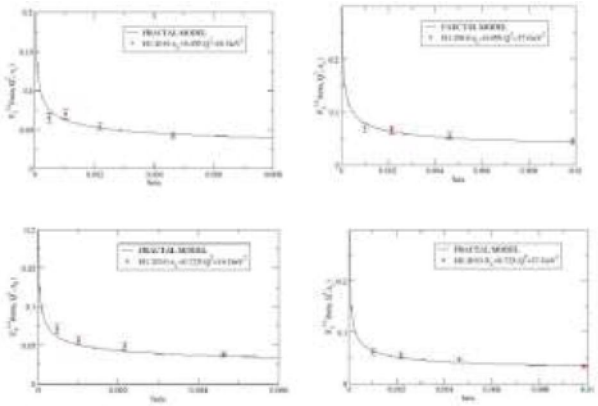
برازش مدل ارائه شده در رابطه (۸) با داده های تجربی تابع ساختار عرضی نوترون های پیشرو ارائه شده توسط گروه H1، توسط برنامه های QCDNUM [۷] و MINUIT انجام شد که مقدار بهینه پارامترها در جدول (۱) نشان داده شده است و مقدار χ^2 بهنجار شده در این آنالیز $\frac{\chi^2}{d.o.f} = 1.070$ گزارش شده است. شکل (۳) تابع ساختار عرضی نوترون های پیشرو را با داده های تجربی H1 در مقادیر متفاوت $x_L = 0.455$ و $x_L = 0.725$ مقایسه می کنند. این نتایج به ازای مقادیر متفاوت β، Q^2 و x_L رسم شده است.

نتیجه گیری

با اعمال الگوی فراکتالی برای چگالی پارتون‌های نوترون های پیشرو در xهای کوچک، یک رویکرد کاملا جدید در مطالعه‌ی ساختار پروتون معرفی شد. براین اساس پروتون به عنوان یک موجود چند فراکتالی دیده می‌شود که ابعاد فراکتالی آن با استفاده از برازش مدل پدیدارشناختی پیشنهاد شده در این مقاله با داده‌های H1، تعیین می‌گردد. نتایج حاصل از این برازش نیز تطابق قابل قبولی با داده‌های تجربی دارند.

پارامترها	مقدار پارامترها
Q_0 [GeV^2]	0.532±0.02
D_0	0.803±0.07
D_1	0.139±0.003
D_2	0.945±0.008
D_3	-1.83±0.02
A	0.075±0.005
B	0.531±0.06
C	1.00±0.03
E	3.436±0.344

جدول (۱). بهترین مقدار پارامترهای بدست آمده حاصل از برازش نتایج مدل تئوری (۸) با داده های تجربی.



شکل(۳). مقایسه‌ی تابع ساختار عرضی نوترون پیشرو مدل (۸) با داده های تجربی H1 در $x_L = 0.455$ و $x_L = 0.725$

مرجع‌ها

[1] T. Lastovicka, Eur. Phys. J. C **24**, 529 (2002).
[2] S. Shoeibi, H. Khanpour, F. Taghavi-Shahri and K. Javidan, Phys. Rev. D **95**, no. 7, 074011 (2017).
[3] S. Chekanov et al. [ZEUS Collaboration], Nucl. Phys. B **637**, 3 (2002).
[4] F. D. Aaron et al. [H1 Collaboration], Eur. Phys. J. C **68**, 381 (2010).
[5] I. Abt, A. M. Cooper-Sarkar, B. Foster, V. Myronenko, K. Wichmann and M. Wing, Phys. Rev. D **94**, no. 3, 034032 (2016).
[6] H. Abdolmaleki et al. [xFitter Developers' Team], Eur. Phys. J. C **78**, no. 8, 621 (2018).
[7] M. Botje, Comput. Phys. Commun. **182**, 490 (2011).

این مقاله درصورت قابل دسترس بودن در وبگاه psi.ir معتبر است