

## لزوم و چگونگی دسته بندی و بررسی نیروهای چند جسمی

صادقی، حسین<sup>۱\*</sup>

گروه فیزیک دانشگاه اراک

### چکیده:

در مورد سیستمهای با نیروهای کوتاه برد و زیر سیستمهای دوجسمی با انرژی بستگی کم، قدرت و اندازه بزرگی نیروهای چند جسمی (سه، چهار و ... جسمی) در مورد همه امواج جزئی شامل جریانهای خارجی را می توان بطور سیستماتیک با مربوط به گروه بازیمنجارش در نظریه میدان موثر برای اندرکنشهای نقطه ای، تخمین زد. در این مقاله سعی خواهیم کرد تا با دسته بندی این نیروها در فیزیک هسته ای به اهمیت و نتایج مربوط به افزودن این نیروها در مراتب مختلف محاسبات پردازیم. نتایج نشان می دهند که افزودن نیروهای سه ذره ای به روش نظریه میدان موثر تا مرتبه  $N3LO$  و نیروهای چهار جسمی تا مرتبه اول، نتایجی تا زیر یک درصد خطا را در انرژیهای پایین و واکنشها در مقایسه با نتایج تجربی خواهد داد.

### مقدمه

نظریه میدان موثر برای ذرات با اندرکنش نقطه ای، روش مستقل از مدلی است که برای سیستمهای بدون نیروهای بلند-برد در فیزیک اتمی و هسته ای بویژه در انرژیهای پایین از اهمیت زیادی برخوردار است. در مورد سیستمهای چند جسمی که از زیر سیستمهای دو جسمی مقید با انرژی بستگی کم ساخته می شوند، با جداسازی مقیاسهای مختلف درون سیستم، می توان از این نظریه در محاسبات استفاده نمود. در مورد مسائل چند نوکلئونی در انرژیهای پایین مقیاسهای ما به صورت زیر خواهند بود:

مومنتوم بستگی دوترون  $\gamma \sim 45Mev$  که از جرم پایون  $m_\pi \sim 140Mev$  و نیز جرم نوکلئون  $M_N \sim 1000Mev$  پایین تر است. در مورد چنین مسائلی که می توان به راحتی مقیاس های مختلف در مسئله را جدا نمود، نظریه میدان موثر خوب جواب می دهد پس  $EFT$  نظریه خوبی را برای جداسازی اثرات فیزیک بلند برد از فیزیک کوتاه برد به ما ارائه می کند. اگر مومنتوم ما در حد جرم پایون باشد  $p \sim m_\pi$  آنگاه می توان جرم پایون و جرم نوکلئون را به عنوان مقیاس بلند برد و کوتاه برد در نظر گرفت. در غیاب جوابهای صحیح برای معادلات حرکت مکانیک کوانتومی، همانند  $QCD$ ، ساختارهای سیستماتیکی در صورت وجود

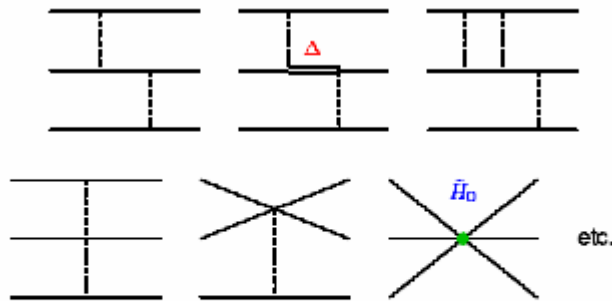
<sup>1</sup> Hossein Sadeghi (email: H-Sadeghi@Araku.ac.ir)

پارامتری کوچک و بدون بعد می توان یافت. دسته ای از این پارامترهای بدون بعد ، اعداد واقعی مانند ثابت جفت شدگی مطابق با اندرکنش و بازبهنجارش شده می باشند و یا همانند حد  $Large-N_c$  عکس ابعادی گروه هستند. دسته ای دیگر از این پارامترهای بدون بعد نسبتی از دو کمیت بعد دارند که مثلاً " بصورت طبیعی از شکست تقارن ناشی می شوند. همانطور که می دانیم شکست خودبه خود تقارن پیوسته ، مدهای گلدستون بدون جرم را بالا می برند و این مدها در خلا انتشار نمی یابند پس به صورت مشتق جفت می شوند. اندرکنش این بوزونهای گلدستون در انرژیهای پایین تر نسبت به مقیاس مشخصه شکست تقارن ، برای ما این امکان را فراهم می سازد که بسطی را بر حسب مومنتوم ایجاد کنیم . در  $QCD$  ، پارامتر کوچک بسط  $Q/\Lambda_x$  است که در آن  $Q$  مومنتوم مشخصه و  $\Lambda_x$  مقیاس شکست خود به خود تقارن کایرال است و از مرتبه جرمهای پایین ترین تحریکات و تشدیدها می باشند. اثرات کوارکهای با جرم غیر صفر نیز در جرم پایون است به شرطی که در تئوری  $Q$  را همانند جرم کوچکترین ذره ای که از تئوری خارج می شود یا پایون در نظر بگیریم. بنابراین پارامتر  $m_\pi/\Lambda_x$  کوچک خواهد بود. برای مرور مقالات [1-9] رابینید.

در این مقاله سعی خواهیم کرد تا با دسته بندی این نیروها در فیزیک هسته ای به اهمیت و نتایج مربوط به افزودن این نیروها در مراتب مختلف محاسبات پردازیم. نتایج نشان می دهند که افزودن نیروهای سه ذره ای به روش نظریه میدان موثر تا مرتبه  $N^3LO$  و نیروهای چهار جسمی تا مرتبه اول، نتایجی تا زیر یک درصد خطا را در انرژیهای پایین و واکنشها در مقایسه با نتایج تجربی خواهد داد.

### ساختار و فرمولبندی نیروهای چند جسمی

در شکل (۱) دیاگرامهای دسته بندی شده نیروی سه جسمی نشان داده شده است. در قسمت آخر این شکل نوع اندرکنش نقطه گونه برای سه جسم در نظر گرفته شده است که به ترتیب نوکلئونها راسهای اندرکنش میدانهای سه نوکلئون ( $H_0$ ) و از طریق مشتقات آنها ( $H_2$ ) با درج انرژی جنبشی میسر خواهد بود.

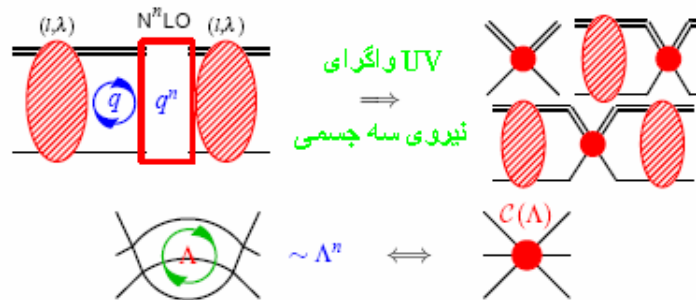


$$H_0 (N^+N)^3: \text{---} \overset{H_0}{\times} \text{---}, \quad p^2 H_2 (N^+N)^3: \text{---} \overset{p^2 H_2}{\times} \text{---}, \quad \text{etc.}$$

شکل ۱: دیاگرام برهمکنشهای ممکن سه جسمی اضافه شده به محاسبات مربوط به توزیعات دو جسمی را

تا مرتبه N2LO نشان می دهد. خطوط پر و خط چین به ترتیب نوکلئون و پایون را نشان می دهد.

با قرار دادن این نوع اندرکنش و افزودن آن به سیستم دو جسمی، به معادله انتگرالی فدیو در سیستمهای سه جسمی می رسیم که باید بصورت عددی حل شود. وجود این نوع برهمکنش باعث وجود واگرایی UV خواهد شد و احتیاج به بازهنجارش و رفع این واگرایی در حل معادله انتگرالی فدیو دارد.



شکل ۲: دیاگرام برهمکنشهای ذره گونه سه جسمی اضافه شده به محاسبات مربوط به توزیعات دو جسمی را

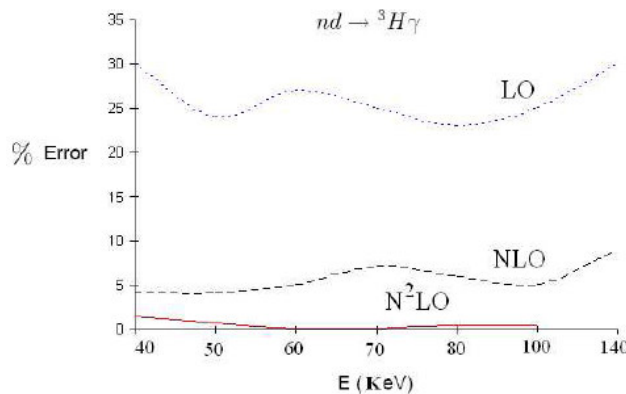
همراه با ثابت جفت شدگی به منظور عدم بستگی نتایج به برش و واگرایی UV را نشان می دهد.

در شکل (۲) این نوع واگرایی و نوع رفع آن با افزودن نیروی سه جسمی وابسته به برش (Cut-off) نمایش داده شده است. در واقع افزودن نیروی سه جسمی مشابه با افزودن یک جمله متقابل (counter-term) عمل می نماید و ایجاب می کند تا نتایج مربوط به مشاهده پذیرها مستقل از برش انتخابی گردد.

جدول ۱- نتایج مربوط به بزرگی و مراتب مختلف نیروی سه نوکلئونی را نشان می دهد.

کانال امواج جزئی	آنالیز ابعادی $Re[s_l(\lambda) + s_l(\lambda')]$	بطور ساده $l+l'+2$		اندازه بزرگی (بطور ساده) $Q^n \sim \frac{1}{3}^n$	
$2s-2s$	LO	$N^2LO$	بالا می‌برد	100%	(10%)
$2s-4d$	$N^{3.1}LO$	$N^4LO$	بالا می‌برد	3%	(1%)
$2p-2p, 4p-4p$	$N^{3.5}LO$	$N^4LO$	بالا می‌برد	2%	(1%)
$2p-4p$	$N^{4.6}LO$	$N^4LO$	تنزل می‌دهد	0.6%	(1%)
$4s-4s$	$N^{4.3+2}LO$	$N^{2+2}LO$	تنزل می‌دهد	0.1%	(1%)
$4s-2d$	$N^{5.0}LO$	$N^4LO$	تنزل می‌دهد	0.4%	(1%)
$4s-4d$	$N^{5.3}LO$	$N^4LO$	تنزل می‌دهد	0.3%	
بالا می‌برد	بطور ساده ~	$N^{l+l'+2}LO$			

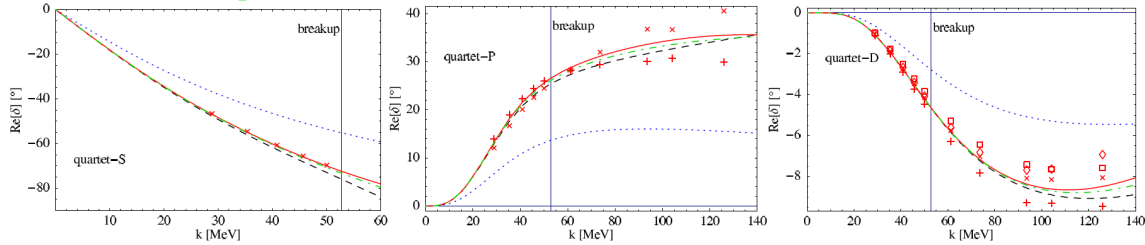
نیروهای سه جسمی مختلف بر حسب بزرگی آنها در امواج جزئی مختلف در جدول (۱) آورده شده است. برای  $l$  های کوچکتر از یک، قدرت نیروی سه جسمی در نیمه اول جدول ضعیفتر و در نیمه دوم قوی تر خواهد بود. امواج جزئی بالاتر انتظار می رود همانند معادله فدیو با بسط بورن بیان شوند و اشباع شوند. با توجه به قدرت و بزرگی نیروی سه جسمی کاملاً "مشهود خواهد بود که در کدام مرتبه و بازای کدام موج جزئی قدرت این نیرو زیادتر است. قدرت نیروی سه جسمی از موج جزئی  $S -$  در مورد بوزونهای بدون اسپین قوی تر از  $P -$  خواهد بود. همینطور بوضوح می توان دید حتی در مرتبه اول (LO) نیز نیروی سه جسمی وجود خواهد داشت و باید در محاسبات در نظر گرفته شود. بین تمامی کاربردها در فیزیک هسته ای، خواص تریتون و هلیوم-۳ از اهمیت خاصی بواسطه فرآیندهای سنتز نوکلئونی در انفجاز بزرگ، اختر فیزیک و نتایج تجربی تعیین خواص اساسی نوترون، برخوردار است. در شکل (۳) می توان این واقعیت را دید که با حضور نیروهای سه جسمی خطای محاسبات مرتبه-مرتبه کاسته شده تا فاکتور کاهش باندازه ۲۰۰ بار را نشان دهد [10].



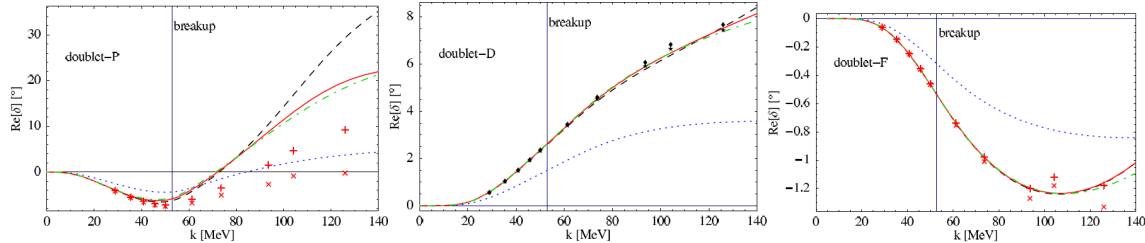
شکل ۳: خطای محاسبات تا مرتبه N3LO را نشان می دهد [10].

شکل (۴) مربوط به نتایج فاز شیفت نوترون-دوترون را با درج نیروی سه جسمی تا مرتبه N3LO را در کانالهای مختلف نشان می‌دهد [4]. نتایج خطایی معادل با ۳ درصد را برای این محاسبه با افزودن نیروی سه جسمی و تصحیح مرتبه آن تا مرتبه N3LO، نشان می‌دهد.

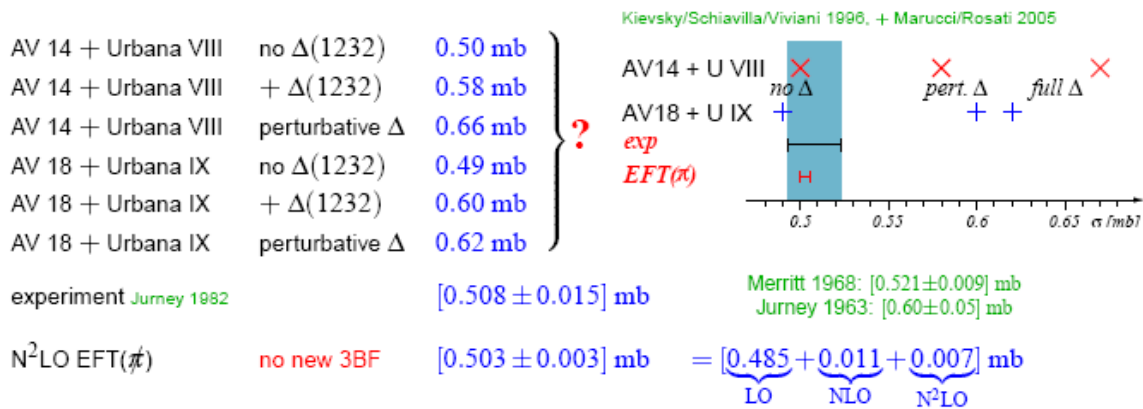
Quartet Channel ( $s = \frac{3}{2}$ )



Doublet Channel ( $s = \frac{1}{2}$ )



شکل ۴: نتایج مربوط به فاز شیفت نوترون-دوترون را با درج نیروی سه جسمی تا مرتبه N3LO را در کانالهای مختلف نشان می‌دهد. در شکل (۵) نتایج مربوط به محاسبه سطح مقطع پراکندگی نوترون-دوترون با حضور نیروهای سه جسمی تا مرتبه N3LO نشان داده شده است. نتایج مربوط به این فرآیند با نظریه میدان موثر، مدل‌های آرکون V18 و V14 و نتیجه تجربی با یکدیگر مقایسه شده است. در سمت چپ این شکل، می‌توان دید نتایج مدل پتانسیل با درج نیروی سه جسمی هنوز نیز به فیزیک برد-کوتاه وابسته است [12].



شکل ۴: نتایج مربوط به گیراندازی تابشی نوترون-دوترون را با درج نیروی سه جسمی تا مرتبه N3LO را نشان می‌دهد. نتایج بر پایه پتانسیل AV18 از مرجع [12]، نتایج میدان موثر از مرجع [11] و نتیجه تجربی مربوط به مرجع [13] می‌باشد.



در سمت راست این دیاگرام، شکل مقایسه بین نتایج نظریه میدان موثر و مدل پتانسیل آورده شده است. همانطور که دیده می شود، نتایج نظریه موثر از نتایج بر پایه مدل با افزودن نیروی سه جسمی بهتر و از خطای کمتری برخوردار است [11].

در زیر این شکل نتایج تجربی [13] با نتایج نظریه میدان موثر [11] مقایسه شده و نشان‌دهنده خطای کمتر حتی نسبت به خطای تجربه در هر مرتبه از محاسبه خواهد بود.

## نتایج

نتایج ما با نظریه میدان موثر حاکی از کاسته شدن و همگرایی نظریه با افزودن نیروهای سه جسمی با نتیجه تجربی و افزایش مرتبه محاسبات می باشد.

همانطور که از نتیجه سطح مقطع واکنش فرآیند گیراندازی تابشی نوترون-دوترون  $\sigma_{tot} = [0.485(LO) + 0.011(NLO) + 0.007(N^2LO)] \text{ mb} = [0.503 \pm 0.003] \text{ mb}$  مشاهده می شود تا مرتبه N3LO نتایج خطایی کمتر از یک درصد را در مقایسه با نتیجه تجربی نشان می دهد. نتایج عدم وابستگی به برش انتخابی را نشان داده و در مقایسه با نتایج بر پایه پتانسیل انتخابی به فیزیک برد-کوتاه وابستگی ندارد. نتایج نشان می دهند که افزودن نیروهای سه ذره ای به روش نظریه میدان موثر تا مرتبه N3LO و نیروهای چهار جسمی تا مرتبه اول، نتایجی تا زیر یک درصد خطا را در انرژیهای پایین و واکنشها در مقایسه با نتایج تجربی خواهد داد. این همه حکایت از آن دارد که دسته بندی نیروهای چند جسمی لازم و مرتبه آن برای هر نوع از این نیروها در سیستمهای چند جسمی باید مشخص گردد.



## تشکر و قدردانی

این مقاله، قسمتی از کار در قالب طرح پژوهشی مصوب دانشگاه اراک می باشد که در حال انجام است. در اینجا بر خود لازم می دانم از حمایت‌های آن دانشگاه در راستای انجام و تحقق این کار تشکر و قدردانی نمایم.

## مراجع

- [1] S.Weinberg, *Phys. Lett.* **B251**, 288 (1990); *Nucl. Phys.* **B363**, 3 (1991).
- [2] D.B. Kaplan, M.J. Savage and M.B. Wise, *Phys. Lett.* **B424**, 390 (1998) nucl-th/9801034; *Nucl. Phys.* **B534**, 329 (1998) nucl-th/9802075.
- [3] D.B. Kaplan, M.J. Savage and M.B. Wise, *Phys. Rev.* **C59**, 617 (1999).
- [4] P.F. Bedaque, H.-W. Hammer and U. Van Kolck, *Nucl. Phys.* **A646**, 444 (1999); P.F. Bedaque, H.-W. Hammer and U. Van Kolck, *Phys. Rev. Lett.* **82**, 463(1999).
- [5] P.F. Bedaque and U. van Kolck, *Ann. Rev. Nucl. Part. Sci.* **52**, 339 (2002) .
- [6] H.W.Griesshammer, *Nucl. Phys.* **A 760**, 110 (2005).
- [7] E. Braaten and H.W. Hammer, cond-mat/0410417.
- [8] M.C. Birse, nucl-th/0509031.
- [9] H.W. Griesshammer, *Nucl. Phys.* **A 744**, 192 (2004).
- [10] H. Sadeghi and S. Bayegan, *Nucl. Phys.* **A 753**, 291(2005).
- [11] H. Sadeghi, S. Bayegan and Harald W. Griesshammer, *Phys.Lett B* **643**, 263(2006).
- [12] L.E. Marcucci, M. Viviani, R. Schiavilla, A. Kievsky and S. Rosati, *Phys. Rev.* **C 72**, 014001(2005).
- [13] E.T. Journey, P.J. Bendt and J.C. Browne, *Phys. Rev.* **C25**, 2810 (1982).