دانشگاه کاشان

دانشکده فیزیک

گروه فیزیک ذرات بنیادی و نظریه میدان

پایان نامه

جهت اخذ درجه کارشناسی ارشد

در رشته فیزیک

عنوان:

بررسی ساختار ماده باریونی بر اساس تقریب توماس- فرمی

استاد راهنما:

دکتر مهدی غضنفری مجرد

به وسیله:

روح‌اله عرب‌سعیدی

شهریور ماه ۱۳۹۲

بسمه تعالی

تاریخ:
شماره:
پیوست:

دانشگاه کاشان
دانشکده فیزیک

مدیریت تحصیلات تکمیلی دانشگاه

صورتجلسه دفاع از پایان نامه کارشناسی ارشد

نام و نام خانوادگی دانشجو : آقای روح اله عرب سعیدی

شماره دانشجویی : ۹۰۱۱۶۰۰۰۰۴رشته: فیزیک گرایش ذرات بنیادی و نظریه میدان

دانشکده : **فیزیک**

عنوان پایان‌نامه : " بررسی ساختار ماده باریونی بر اساس تقریب توماس- فرمی "

این پایان‌نامه به مدیریت تحصیلات تکمیلی به منظور بخشی از فعالیتهای تحصیلی لازم برای اخذ درجه کارشناسی ارشد ارائه می‌گردد.دفاع از پایان نامه در تاریخ ۱۳۹۲/۶/۲۷ مورد تأیید و ارزیابی هیأت داوران قرار گرفت و با نمره

به عدد ۱۹/۸۰ ودرجه عالی

به حروف نوزده و هشتاد صدم

به تصویب رسید.

اعضاء هیأت داوران

عنوان	نام و نام خانوادگی	مرتبه علمی	امضاء
۱. استاد راهنما :	دکتر مهدی غضنفری مجرد	استاد یار	
۲. متخصص وصاحب نظر داخل دانشگاه :	دکتر فرهاد زمانی	استادیار	
۳. متخصص وصاحب نظر داخل دانشگاه :	دکتر سروش زمانی مقدم	استادیار	
٤. نماینده تحصیلات تکمیلی دانشگاه :	دکتر سروش زمانی مقدم	استادیار	

دکتر منصورنیا
مدیر تحصیلات تکمیلی

آدرس: کاشان- بلوار قطب راوندی
کدپستی ۸۷۳۱۷-۵۱۱۶۷
تلفن ۵۵۵۲۹۳۵- دورنگار ۵۵۵۲۹۳۵
http : www.kashanu.ac.ir

تقدیم به:

بهترین‌های زندگی‌ام

پدر و مادرم

برادرم سعید و خواهران دوست‌داشتنی‌ام

از استاد عزیزم که در یک جمله عشق و علاقه مرا به فیزیک فزونی بخشیدند و تجربیات علمی و شخصی‌شان را بدون هیچ چشم‌داشتی در اختیارم نهادند،

جناب آقای دکتر مهدی غضنفری مجرد،

صمیمانه سپاسگزارم.

بر خود لازم می‌دانم از همه اساتید ارجمندی که در طول دوره کارشناسی و کارشناسی ارشد همواره بنده را یاری نموده و مورد لطف و عنایت خود قرار داده‌اند از جمله جناب آقای دکتر مصطفی زاهدی‌فر، جناب آقای دکتر عبدالعلی رمضانی، جناب آقای دکتر سید احسان روزمه، جناب آقای دکتر ابراهیم حیدری سمیرمی، جناب آقای دکتر رضا رمضانی آرانی ، جناب آقای دکتر بهرام جزی، جناب آقای دکتر فرهاد زمانی و مهندس سید محمود نجفیان رضوی سپاسگزاری نمایم.

هر چند در قالب کلمات نمی‌توان ارزش آموختن را به تمام و کمال قدر دانست.

در پایان نیز از اساتید ارجمند جناب آقای دکتر فرهاد زمانی و جناب آقای دکتر سروش زمانی مقدم برای داوری کار حاضر تشکر و قدردانی می‌نمایم.

چکیده

بر اساس تقریب میدان میانگین نیمه‌کلاسیکی توماس- فرمی ساختار ماده باریونی بررسی می‌گردد. معادله حالت ماده هسته‌ای متقارن و ماده هسته‌ای نامتقارن در دمای صفر محاسبه شده‌اند. الکترون‌ها و میون‌ها در این مدل به منظور خنثی‌کردن بار الکتریکی کل این ماده و پایدارکردن آن در برابر واپاشی بتا در نظر گرفته شده و رفتار نسبیتی دارند. با ارائه شکل صریح پتانسیل شیمیایی برای تمام ذرات، محاسبات برای رده وسیعی از چگالی‌های باریونی که در اخترفیزیک مورد توجه هستند، صورت می‌گیرند. ساختار تقریب توماس- فرمی با استفاده از مدل جدید برهمکنش موثر دو جسمی مایرز- شواتکی برای تعیین شکل صریح پتانسیل شیمیایی و معادله حالت در دمای صفر ارائه می‌گردد. با ارائه برهمکنش‌های پدیده‌شناسی هسته‌ای به تعمیم مدل توماس- فرمی در فضای فاز می‌پردازیم. این چارچوب نیمه‌کلاسیکی کمک می‌کند تا حالات نوکلئونی دیگر به سادگی توسط موقعیت و تکانه‌شان در فضای فاز تعیین گردند. سپس این پتانسیل را به ساختار هایپرونی تعمیم می‌دهیم. در این چارچوب چاه پتانسیل باریون‌ها در تکانه فرمی‌شان، پتانسیل شیمیایی نوترون و الکترون، فراوانی نسبی ذرات در ماده باریونی، پتانسیل تک‌ذره‌ای آنها و درنهایت چگالی انرژی نهان کل محاسبه می‌شوند. نتایج به دست آمده در توافق خوبی با داده‌های تجربی‌اند.

کلمات کلیدی: **معادله حالت، ماده هسته ای، ماده باریونی، روش میدان میانگین**

فهرست مطالب

	عنوان	صفحه
۱	**فصل اول**	۱
۱-۱	مقدمه	۲
۱-۲	خلاصه ای از روند تاریخی	۷
۱-۳	مروری بر مدل‌های هسته‌ای	۸
۲	**فصل دوم**	۱۱
۲-۱	مقدمه	۱۲
۲-۲	مدل توماس- فرمی TF	۱۳
۲-۲-۱	معرفی مدل توماس- فرمی (TF)	۱۳
۲-۲-۲	فرمول‌بندی مدل توماس- فرمی (TF)	۱۴
۲-۲-۳	تقریب توماس- فرمی (TF)	۱۵
۲-۲-۴	فرمول‌بندی مدل توماس- فرمی (TF) با یک برهمکنش موثر	۱۶
۲-۲-۵	انرژی برهمکنشی	۱۷
۲-۲-۶	مقادیر پارامترهای پتانسیل برهمکنشی $(TF96)$	۱۹
۲-۳	محاسبه چگالی انرژی ماده هسته ای متقارن با استفاده از مدل توماس- فرمی در دمای صفر $(T = 0)$	۲۰
۲-۳-۱	چگالی انرژی جنبشی در ماده هسته‌ای متقارن	۲۱
۲-۳-۲	چگالی انرژی برهمکنشی در ماده هسته ای متقارن	۲۲
۲-۴	محاسبه چگالی انرژی ماده هسته‌ای نامتقارن با استفاده از مدل توماس- فرمی در دمای صفر $(T = 0)$	۲۹
۲-۴-۱	چگالی انرژی جنبشی در ماده هسته‌ای نامتقارن	۲۹
۲-۴-۲	چگالی انرژی برهمکنشی در ماده هسته‌ای نامتقارن	۳۰
۲-۵	محاسبه پتانسیل شیمیایی در ماده هسته‌ای نامتقارن	۳۷

۲-۵-۱ دقیق‌ترین شکل پتانسیل شیمیایی ماده هسته‌ای نامتقارن۴۴
۲-۶ ماده پایدار بتایی ۴۶
۲-۶-۱ انرژی آزاد ماده پایدار بتایی ۴۷
۲-۶-۲ چگالی انرژی لپتون‌ها در ماده پایدار بتایی ۴۸
۲-۶-۳ پتانسیل شیمیایی لپتون‌ها ۵۰
۲-۶-۴ شرط پایداری بتایی ۵۱
۲-۷ نتایج ۵۳
۳ فصل سوم ۶۴
۳-۱ مقدمه ۶۵
۳-۲ مدل توماس- فرمی برای ماده باریونی ۶۶
۳-۳ تعیین ثابت‌های جفتیدگی ۶۷
۳-۳-۱ ثابت جفتیدگی برهمکنش نوکلئون- نوکلئون ۶۷
۳-۳-۲ ثابت جفتیدگی برهمکنش هایپرون- هایپرون ۶۸
۳-۳-۳ ثابت جفتیدگی برهمکنش هایپرون- نوکلئون ۶۸
۳-۴ بررسی معادله حالت ماده باریونی ۶۹
۳-۵ ترکیب و ساختار ماده باریونی ۷۱
۳-۶ نتایج ۷۳
۳-۷ پیشنهادات ۸۶
منابع و ماخذ ۸۸

فهرست جدول‌ها

عنوان **صفحه**

جدول (۲-۱): ترکیب کوارکی، بار الکتریکی، جرم سکون و اسپین نوکلئون‌ها ۵۱
جدول (۲-۲): ترکیب کوارکی، نسل، بار الکتریکی، جرم سکون و اسپین لپتون‌ها ۵۲
جدول (۲-۳): مقادیر پارامترهای پتانسیل برهمکنشی (*TF96*)..... ۵۲
جدول (۳-۱): مقادیر جرم سکون، بار، اسپین و ترکیب کوارکی هایپرون‌ها. ۷۳

فهرست نمودارها

عنوان **صفحه**

نمودار (۲-۱): فراوانی نسبی ($yi = \rho i/\rho B$) ذرات الکترون، میون و پروتون در چگالی‌های مختلف باریونی در ماده پایدار بتایی..... ۵۳

نمودار (۲-۲): چگالی الکترون در برابر چگالی باریونی در ماده پایدار بتایی خطوط تیره برای محاسبه دقیق و خطوط ممتد برای محاسبه تقریبی آورده شده‌اند..... ۵۵

نمودار (۲-۳): چگالی میون در برابر چگالی باریونی در ماده پایدار بتایی خطوط تیره برای محاسبه دقیق و خطوط ممتد برای محاسبه تقریبی آورده شده‌اند..... ۵۶

نمودار (۲-۴): پتانسیل شیمیایی الکترون در ماده پایدار بتایی در چگالی‌های مختلف باریونی خطوط تیره برای محاسبه دقیق و خطوط ممتد برای محاسبه تقریبی آورده شده‌اند ۵۷.....

نمودار (۲-۵): مقادیر تقریبی و دقیق پتانسیل شیمیایی نوترون و پروتون در ماده پایدار بتایی در چگالی‌های مختلف باریونی..... ۵۸

نمودار (۲-۶): انرژی نهان به ازای هر ذره در ماده هسته‌ای متقارن، ماده هسته‌ای نامتقارن و ماده پایدار بتایی در برابر چگالی باریونی..... ۵۹

نمودار (۲-۷): مقایسه مقدار دقیق فشار در ماده پایدار بتایی با مقدار تقریبی آن ۶۰.....

نمودار (۲-۸): مقایسه مقدار دقیق چگالی انرژی در ماده پایدار بتایی با مقدار تقریبی آن. ۶۱.....

نمودار (۲-۹): فشار ماده پایدار بتایی بر حسب چگالی انرژی نهان کل. ۶۲

نمودار (۲-۱۰): مقادیر دقیق پتانسیل شیمیایی ذرات الکترون، نوترون و پروتون در برابر چگالی باریونی در ماده پایدار بتایی..... ۶۳

نمودار (۳-۱): پتانسیل تک ذره ای ماده هایپرونی بر حسب Mev در چگالی باریونی نهایی. ۷۵.....

نمودار (۳-۲): فراوانی نسبی ذرات برای ماده هایپرونی در چگالی‌های مختلف باریونی.

.....۷۷
نمودار (۳-۳): رفتار پتانسیل شیمیایی ذرات Σ در چگالی باریونی نهایی.....۷۸
نمودار (۳-۴): پتانسیل شیمیایی برای دو ذره p و Λ در چگالی‌های باریونی نهایی.....۷۹
نمودار (۳-۵): پتانسیل شیمیایی نوترون‌ها و الکترون‌ها بر اساس چگالی باریونی در غیاب هایپرون‌ها.....۸۰
نمودار (۳-۶): پتانسیل شیمیایی نوترون ها و الکترون ها بر اساس چگالی باریونی در حضور هایپرون‌ها.....۸۱
نمودار (۳-۷): مقایسه پتانسیل شیمیایی به دست آمده از محاسبه صریح پتانسیل شیمیایی و نیز از طریق مشتق برای نوترون در ماده باریونی.....۸۲
نمودار (۳-۸): چگالی انرژی نهان در ماده باریونی و ماده پایدار بتایی بر حسب چگالی باریونی نهایی.....۸۳
نمودار (۳-۹): فشار برای ماده باریونی (BM) و ماده پایدار بتایی (BSM) در برابر چگالی باریونی نهایی.....۸۴
نمودار (۳-۱۰): فشار بر حسب چگالی انرژی نهان برای ماده باریونی.....۸۵

۱ فصل اول

مقدمه و تاریخچه

۱–۱ مقدمه

بررسی سیستم‌های بس‌ذره‌ای به علت تعداد زیاد ذرات و برهمکنش‌های متعدد میان آنها از پیچیدگی‌های خاصی برخوردار است. برای یک سیستم هسته‌ای شامل A نوکلئون هامیلتونی در چارچوب مکانیک کوانتومی به صورت زیر تعریف می‌شود:

$$H = T(i) + V(i,j) \qquad (۱-۱)$$

که در آن $T(i)$ عملگر انرژی جنبشی تک‌ذره‌ای برای ذره i و برابر با $\frac{-\hbar^2}{2m}\nabla_i^2$ و m جرم متوسط نوکلئون‌ها می‌باشد. $V(i,j)$ پتانسیل برهمکنش دوجسمی میان ذرات i و j است.

برای یک توصیف جامع از چنین سیستم‌های هسته‌ای با داشتن هامیلتونی فوق و حل معادله شرودینگر مربوطه می‌توان انرژی و تابع موج سیستم را تعیین نمود. در بسیاری موارد در مواجهه با ساختار هسته‌ای زمان دخالتی ندارد و باید معادله مستقل از زمان شرودینگر را حل نمود. معادله شرودینگر برای یک سیستم متشکل از A نوکلئون عبارت است از:

$$H\psi(r_1, r_2, \dots, r_A) = E\psi(r_1, r_2, \dots, r_A) \qquad (۲-۱)$$

که در آن $\psi(r_1, r_2, \dots, r_A)$ تابع موج سیستم A ذره‌ای و E انرژی این سیستم خواهد بود. اما همچنان که از مکانیک آماری می‌دانیم حل دقیق معادله شرودینگر برای این سیستم‌ها که از تعداد زیاد ذرات تشکیل شده‌اند تقریبا کاری غیرممکن است. یکی از این سیستم‌های بس‌ذره‌ای سیستم ماده هسته‌ای[1] است، که یک سیستم فرضی بی‌نهایت بزرگ از نوکلئون‌ها است که در آن نوکلئون‌ها فقط از طریق نیروی‌های هسته‌ای برهمکنش می‌کنند و از برهمکنش کولنی بین

[1]– Nuclear matter

نوکلئون‌ها صرف‌نظر می‌شود. در واقع چنین ساختارهای بی‌نهایتی وجود ندارند و واژه فرضی از همین رو به کار می‌رود. کاربرد تعریف این سیستم‌ها به صورت بی‌نهایت از این جهت است که می‌توان با استفاده از آنها برخی ویژگی‌های مهم هسته‌های پیچیده را تعیین نمود. بنابراین ماده هسته‌ای یک سیستم ایده‌آل بس‌ذره‌ای به حساب می‌آید. از آنجا که در سیستم هسته‌ای A تعداد ذرات و به تبع آن V حجم سیستم بی‌نهایت است، مسئله را باید در حد ترمودینامیکی با چگالی محدود ρ بررسی نمود:

$$\rho = \lim_{\substack{A\to\infty \\ V\to\infty}} \frac{A}{V} \qquad (۳-۱)$$

به طوری که $\frac{A}{V}$ در یک مقدار از پیش تعیین‌شده ثابت باقی می‌ماند.

دو مشخصه مهم ماده هسته‌ای چگالی نوکلئونی (ρ) و پارامتر عدم تقارن (δ) یا همان کمیت نوترون اضافی هستند به طوری که:

$$\rho = \rho_n + \rho_p \quad ; \quad \delta = \frac{\rho_n - \rho_p}{\rho} \qquad (۴-۱)$$

که در آن ρ_n و ρ_p به ترتیب چگالی نوترون‌ها و پروتون‌ها می‌باشند. اگر چگالی نوترون‌ها و پروتون‌ها با هم برابر باشند ماده هسته‌ای متقارن[1] ($\delta = 0$) و در غیر این صورت ماده هسته‌ای نامتقارن[2] خواهد بود. اگر ماده هسته‌ای فقط شامل نوترون‌ها باشد ($\delta = 1$) ماده هسته‌ای تبدیل به ماده نوترونی خالص[3] خواهد شد. از سیستم ماده هسته‌ای برای بررسی رفتار برهمکنش میان نوکلئون‌ها استفاده می‌کنیم. به علاوه مطالعه چنین سیستم‌هایی به فهم پدیده‌هایی همچون برخورد یون‌های سنگین [۲،۱]، مدل‌سازی بخش داخلی ستارگان نوترونی، سردشدن آنها و انفجار

[1]- Symmetric Nuclear Matter(SNM)
[2]- Asymmetric Nuclear Matter(ASNM)
[3]- Pure Neutron Matter(NM)

ابرنواخترها[1] کمک می‌کند [۳،۴،۵].

نظریه‌های هسته‌ای بر اساس دو روش میکروسکوپیک و پدیده‌شناسی (ماکروسکوپیک) پایه‌ریزی شده‌اند. این تقسیم‌بندی از نوع برهمکنش‌هایی که در این روش‌ها به کار گرفته می‌شود ناشی شده است. روش میکروسکوپیک روی درجات آزادی یک ذره و روش ماکروسکوپیک روی درجات آزادی دسته‌جمعی نوکلئون‌ها متمرکز می‌گردد. در مدل‌های میکروسکوپیک پتانسیل برهمکنشی از نوع واقعی بوده و در مدل‌های ماکروسکوپیک از نوع پدیده‌شناسی است. اگر پتانسیل با خواص شناخته‌شده سیستم‌های دونوکلئونی یعنی داده‌های پراکندگی نوکلئون- نوکلئون و خواص دوترون مطابقت داشته باشد آن پتانسیل واقعی و حقیقی به شمار می‌رود، که از طریق محاسبه سطح مقطع و تغییر فاز تابع موج و برازش داده‌های پراکندگی نوکلئون- نوکلئون تعیین می‌گردد.

در پتانسیل پدیده‌شناسی پارامترهای برهمکنش بر اساس خواص نقطه اشباع هسته‌ای و تراکم‌ناپذیری[2] تعیین می‌شوند. اگر یک مدل هسته‌ای خواص اشباع ماده هسته‌ای را به درستی توصیف نکند پارامترهایی که برای انجام محاسبات مربوطه استفاده می‌شوند مانند ثابت‌های جفتیدگی، جرم موثر و... سازگار با خصوصیات زمینه ماده هسته‌ای نخواهند بود.

معادله حالت[3] اساسی‌ترین ورودی برای ساخت یک مدل کارامد و مناسب از ستارگان نوترونی[4] و مطالعه پدیده‌های اخترفیزیکی مانند ابرنواخترها، سیاهچاله‌ها[5] و کوتوله‌های سفید[6] می‌باشد [۵]. معادله حالت در واقع ارتباط بین کمیت‌های ترمودینامیکی را بیان می‌کند که یک شکل آن می‌تواند انرژی به ازای هر نوکلئون بر حسب چگالی و یا فشار بر حسب چگالی باریونی

[1]- Supernova
[2]- Incompressibility
[3]- Equation of state
[4]- Neutron stars
[5]- Black holes
[6]- White dwarf

باشد و برای به دست آوردن خواص حجمی ماده هسته‌ای مانند تراکم‌ناپذیری، چگالی انرژی[1]، فشار[2] و... کاربرد دارد [۶].

نقطه کمینه در معادله حالت (اشباع‌شدگی) در دمای صفر می‌تواند با دقت خوبی چگالی اشباع ماده هسته‌ای (ρ_0) را به دست دهد. زیرا در چگالی اشباع جاذبه و دافعه میان نوترون‌ها و پروتون‌ها به تعادل می‌رسد. مقدار عددی انرژی به ازای هر باریون در چگالی اشباع به عنوان انرژی اشباع سیستم ماده هسته‌ای شناخته می‌شود. با استفاده از این مقادیر می‌توان به اطلاعات دیگری نظیر شعاع ماده هسته‌ای در چگالی اشباع و تکانه فرمی برای آن دست یافت. شعاع هسته‌های سنگین با دقت خوبی از داده‌های تجربی پراکندگی الکترون از رابطه $\varepsilon(\rho_0) = r_0 A^{\frac{1}{3}}$ به دست می‌آید که با برازش داده‌های تجربی مقدار $r_0 = 1.14fm$ را نتیجه می‌دهد. فشار برای یک سیستم در حال تعادل صفر است لذا چگالی اشباع از شرط صفرشدن فشار ماده هسته‌ای به دست می‌آید. مقدار تجربی چگالی اشباع و انرژی اشباع ماده هسته‌ای متقارن در دمای صفر عبارت است از [۷]:

$$\rho_0 = \frac{3}{4\pi r_0^3} \approx 0.16 \pm 0.02(fm^{-3}) \quad ; \quad \varepsilon_0 = -16 \pm 1 \text{ Mev} \qquad (۵-۱)$$

روش تجربی برای محاسبه ضریب تراکم‌ناپذیری κ ، که به روش تشدید تک قطبی‌های بزرگ معروف است ،مقدار این کمیت را بین 200-300 Mev نشان می‌دهد. مقدار نظری این کمیت هم با توجه به تابعیت انرژی داخلی بر نوکلئون بر حسب چگالی نوکلئونی $\varepsilon(\rho)$ در نقطه اشباع‌شدگی قابل پیش‌بینی است [۸].

$$\kappa = 9\rho^2 \frac{\partial^2 \varepsilon(\rho)}{\partial \rho^2} \Big|_{\rho=\rho_0} = k_F^2 \frac{\partial^2 \varepsilon}{\partial k_F^2} \Big|_{k_F=k_{F_0}} \qquad (۶-۱)$$

ρ_0 و k_{F_0} به ترتیب چگالی و تکانه فرمی‌اند در نقطه اشباع.

[1]- Energy density
[2]- Pressure

پل ارتباطی میان ماده هسته‌ای متناهی و ماده هسته‌ای بی‌نهایت فرمول نیمه‌تجربی جرم[۱] می‌باشد. فرمول نیمه‌تجربی جرم رابطه‌ای است که انرژی بستگی[۲] کل هسته E_B را به صورت تابعی از عدد جرمی A (تعداد نوکلئون‌ها) و عدداتمی Z (تعداد پروتون‌ها) نشان می‌دهد. این فرمول بر پایه مدل قطره مایع که در آن محیط هسته‌ای به عنوان یک مایع کوانتومی و هسته به عنوان قطره‌ای از این مایع در نظر گرفته می‌شود، توسط وایزسکر[۳]، بته[۴] و بکر[۵] ارائه شده است [۹،۱۰]:

$$\frac{B(A,Z)}{A} = a_v - a_s A^{2/3} + a_{col} Z^2 A^{-1/3} - a_{sym}\left(\frac{A-2Z}{A}\right)^2 + \delta \qquad (۷-۱)$$

چهار جمله اول به ترتیب سهم انرژی‌های حجمی، سطحی، کولنی و تقارنی‌اند. جمله آخر هم سهم اثرات لایه‌ای و تزویج می‌باشد. شعاع سیستم A نوکلئونی متناسب با $A^{1/3}$ است. بنابراین نسبت جمله سطحی به جمله حجمی متناسب با $A^{-1/3}$ می‌باشد که در حد $A \longrightarrow \infty$ به سمت صفر میل می‌کند. سهم دافعه کولنی میان پروتون‌ها را نیز به علت کنارگذاشتن اثرات الکترومغناطیسی برابر با صفر در نظر می‌گیریم. زمانی که سیستم متقارن‌تر است، انرژی سیستم کاهش می‌یابد یعنی انرژی تقارنی آن کمتر است. برای ماده هسته‌ای متقارن جمله تقارنی هم حذف می‌گردد و باز هم به دلیل نامتناهی‌بودن ماده هسته‌ای، اثرات تزویج و لایه‌ای هم قابل صرف‌نظرکردن بوده و فقط جمله حجمی باقی می‌ماند.

نظریه‌های هسته‌ای که بتوانند مقادیر تجربی چگالی، تراکم‌ناپذیری و انرژی در نقطه اشباع را با دقت خوبی بازتولید کنند و پارامترهای فرمول نیمه‌تجربی جرم را به دست آورند پیش‌بینی‌های مطمئن‌تری خواهند داشت. هر نظریه باید بتواند تابع انرژی را بر حسب چگالی و پارامتر عدم تقارن برای هر پتانسیل داده شده محاسبه نماید. انرژی اشباع ماده هسته‌ای متقارن در

[1]- Semi-empirical mass formula
[2]- Binding_energy
[3]- Weizsacker
[4]- Bethe
[5]- Bacher

دمای صفر در واقع همان ضریب جمله حجمی در فرمول نیمه‌تجربی جرم می‌باشد.

$$a_v = -\varepsilon(\rho_0) = 16 \pm 1\ Mev \qquad (۸-۱)$$

چگالی اشباع نیز در واقع چگالی مرکز هسته‌های سنگین است که از پراکندگی الکترون‌های پرانرژی به دست می‌آید. تراکم‌ناپذیری معیاری از سختی[1] معادله حالت به شمار می‌رود و به عنوان انحنای معادله حالت تعبیر می‌شود [۱۱].

۱-۲ خلاصه ای از روند تاریخی

اولین پژوهش در زمینه ماده هسته‌ای به وسیله اولر درسال ۱۹۳۷ بلافاصله بعد از معرفی فرمول نیمه‌تجربی جرم انجام شد. درک درستی از نیروی هسته‌ای تا سال ۱۹۵۰ حاصل نشد. پس از آن روش‌های مختلفی که هر کدام بر پایه تقریبات گوناگونی بنا شده و فقط برخی از خواص این سیستم‌ها را به دست می‌داد، ظهور یافتند که بعضی کاربردی در چگالی‌های بسیار بالا نداشتند. روش‌های کلی که برای این محاسبات به کار می‌روند در صورت سازگاری نتایج نظری با نتایج تجربی، می‌توانند راه مناسبی برای مسئله موردنظر باشند. در دهه‌های گذشته معادله حالت ماده هسته‌ای به طور گسترده‌ای به روش‌های مختلف بس‌ذره‌ای مورد مطالعه قرار گرفته است. برای تشریح خواص سیستم‌های باریونی به نظریه‌ای که بتواند مقادیر نسبتا دقیقی برای کمیت‌های ترمودینامیکی از جمله فشار، چگالی انرژی، پتانسیل شیمیایی، پتانسیل تک‌ذره و... به دست دهد نیاز داریم. در بررسی خواص هسته‌ای روش‌های میکروسکوپیک می‌توانند پیچیدگی‌هایی درفرایند محاسبات پدید آورند و در برخی موارد حتی به نتایج مطلوبی نیز منجر نشوند. این مسئله هنوز به طور کامل حل نشده به طوری که در برخی موارد بین نتایج نظری و تجربی توافق کامل برقرار

[1]- Stiffness

نیست.

۱-۳مروری بر مدل‌های هسته‌ای

برای ساخت یک معادله حالت نیاز به دو ابزار اساسی است. یکی مدل نیروی هسته‌ای و دیگری یک تکنیک عددی. برای مدل نیروی هسته‌ای می‌توانیم از:

- مدل پتانسیل‌های غیرنسبیتی[۱]
- مدل میدان میانگین نسبیتی[۲]
- مدل توماس- فرمی با دامنه محدود[۳]

استفاده نماییم و به عنوان یک تکنیک عددی راه‌های زیر را انتخاب کنیم [۱۲]:

- روش قطره مایع[٤]
- تقریب توماس- فرمی[٥]
- تقریب هارتری- فوک[٦]

این دو ابزار برای ساخت یک معادله حالت هسته‌ای می‌توانند ترکیب شوند و یک معادله حالت مناسب را در دسترس قرار دهند.

مدل میدان میانگین نسبیتی (*RMF*) به عنوان یک مدل پدیده‌شناسی، اصل نیروی هسته‌ای را بر اساس لاگرانژی موثر برهمکنشی شامل میدان‌های مزون- نوکلئون توضیح می‌دهد

[1]- Non-relativistic potential model
[2]- Relativistic Mean Field model (RMF)
[3]- Finite-range Thomas-Fermi model
[4]- Liquid droplet approach
[5]- Thomas-Fermi approximation
[6]- Hartree-Fock approximation

[۱۳]. در چگالی‌های بالا تعمیم انرژی کل از $\sqrt{m^2c^4+p^2c^2}$ به $mc^2+\frac{p^2}{2m}$ به هیچ وجه معتبر نیست و تاثیرات نسبیتی لپتون‌ها باید مورد توجه قرار گیرند. در مدل میدان میانگین فرمول‌بندی لاگرانژی از اصول نسبیت و علیت پیروی می‌کند.

روش‌های میکروسکوپیک در دو دسته کلی روش‌های وردشی و اختلالی مانند روش بروکنر- هارتری- فوک[۱] (نسبیتی و غیرنسبیتی)، گوگنی- هارتری- فوک [۲]و اسکرم- هارتری- فوک[۳] [۱٤]، مدل نیجمژن هسته نرم[۴] در چارچوب نظری بروکنر- بته- گلدستون[۵] [۱٥]، دیراک- بروکنر- هارتری- فوک[۶] [۱٦،۱٥] و... جای می‌گیرند.

مدل دیراک- بروکنر- هارتری- فوک نسبیتی و مدل بروکنر- هارتری- فوک غیرنسبیتی مثال‌های دیگری برای دو روش ذکر شده در بالا به شمار می‌روند [۱۸،۱۷]. همچنین است روش اسکرم- هارتری- فوک- بوگولیبوف[۷] که به وسیله گروه بوراسل- مونتره‌ال[۸] بر اساس روش هارتری- فوک- بوگولیبوف با نیروی موثر اسکرم به عنوان یک روش میکروسکوپیک توسعه یافته است [۱۹].

به طور کلی روش‌های هارتری- فوک و مشتقات آن به محاسبات عددی پیچیده‌ای منجر شده و عملا برای سیستم‌های هسته‌ای روش‌های چندان مناسبی نیستند.

نظریه چند جسمی بته- بروکنر- گلدستون به عنوان یک راهکار دیگر میکروسکوپیک برای ساخت معادله حالت هسته‌ای به کار می‌رود [۲۲،۲۱،۲۰].

مدل‌های میکروسکوپیک و ماکروسکوپیک (پدیده‌شناسی) هر چند از روش‌های مختلف به

[1]- Brueckner-Hartree-Fock
[2]- Gogny-Hartree-Fock
[3]- Skyrme-Hartree-Fock
[4]- Njimegen soft-core model
[5]- Brueckner-Bethe-Goldstone
[6]- Dirac-Brueckner-Hartree-Fock
[7]- Skyrme-Hartree-Fock-Bogoliubov
[8]- Brussels-Montreal group