

فیزیک هسته ای و پروتون شناسی

جواد حاتمی

دانشجوی کارشناسی فیزیک، دانشگاه شهید رجایی شیراز

jvdrznjd 02@gmail.com

چکیده

در این مقاله به بررسی قلمروهای جذاب فیزیک هسته ای و پروتونولوژی، روشن کردن خصوصیات اساسی هسته های اتمی و پروتون ها پرداخته می شود. با استفاده از تجزیه و تحلیل جامع از ادبیات موجود، ما بینش هایی در مورد ساختار هسته های اتمی، عملکرد داخلی پروتون ها و پویایی حاکم بر تعامل آنها ارائه می دهیم. روشهای ما شامل بررسی جامع مطالعات تحقیقاتی و چارچوبهای نظری است که منجر به سنتز یافته های کلیدی می شود. روش شناسی ما شامل یک بررسی منظم از ادبیات مربوط به فیزیک هسته ای و پروتونولوژی است که شامل کمک های تجربی و نظری است. ما مطالعات را از شتاب دهنده های ذرات، مشاهدات اختزلفیزیکی و شبیه سازی های محاسباتی برای کشف اسرار این ذرات زیر اتمی بررسی می کنیم. تحقیقات ما مجموعه ای از یافته ها را نشان می دهد، از جمله روشن شدن نیروهای هسته ای، نقش کوارک ها و گلوئون ها در ساختار پروتون و تأثیر عمیق فیزیک هسته ای و پروتونولوژی بر فنونهای نجومی. علاوه بر این، ما پیامدهای عملی این زمینه ها در تولید انرژی هسته ای، تصویربرداری پزشکی و طب هسته ای را برجسته می کنیم. در نتیجه، فیزیک هسته ای و پروتونولوژی مناطق پویا اکتشاف علمی را با پیامدهای دور دست نشان می دهد. تجزیه و تحلیل ما بر اهمیت مداوم این زمینه ها و نیاز به تحقیقات مداوم برای پرداختن به سؤالات مهم تأکید می کند. همکاری در رشته های علمی و توسعه ابزارهای پیشرفته آزمایش و محاسباتی، درک ما از دنیای زیر اتمی و کیهان را بیشتر می کند.

کلمات کلیدی: فیزیک هسته ای، پروتونولوژی، ذرات زیر اتمی، تعامل ذرات، پدیده های اختزلفیزیکی.

۱- مقدمه

فیزیک هسته ای زمینه ای از علم است که به ساختار، رفتار و تعامل هسته های اتمی، ترکیبات اساسی ماده می پردازد. در سالهای اخیر، زیر نظم پروتونولوژی به عنوان یک منطقه تخصصی در فیزیک هسته ای ظاهر شده است، که به طور خاص بر مطالعه پروتون ها در هسته های اتمی متمرکز شده است.

۱.۱ زمینه و بستر

فیزیک هسته ای دارای سابقه ای طولانی و ذخیره شده است که ریشه های آن به اوایل قرن بیستم باز می گردد. کشف ساختار هسته ای، توسعه مدل های هسته ای و اکتشاف واکنش های هسته ای منجر به بینش عمیقی از ماهیت ماده، رفتار ذرات موجود در هسته های اتمی و نیروهای اساسی که حاکم بر جهان هستند (نزدیک، ۲۰۱۹؛ کران، ۱۹۸۷). درک فیزیک هسته ای نه تنها برای پیشبرد دانش ما در مورد دنیای فیزیکی بلکه برای کاربردهای عملی، از جمله تولید انرژی هسته ای، پزشکی هسته ای و مطالعات اخترفیزیکی ضروری است (Suhonen & Civitarese, ۲۰۰۷؛ Wong, ۲۰۲۰).

پروتون ها، با استفاده از ذرات با بار مثبت، نقش مهمی در تعیین خواص و رفتار هسته های اتمی دارند. مطالعه ساختار پروتون، توزیع آنها در هسته ها و تعامل آنها با سایر ترکیبات هسته ای برای پروتونولوژی مهم است (Hen, Miller, PiaSetzky, & Papenbrock & Weidenmüller, ۲۰۱۱). ظهور پروتونولوژی به عنوان یک میدان متمایز در فیزیک هسته ای نشان دهنده پیچیدگی و عمق درک ما از هسته های اتمی است.

۱.۲ بیان مسئله

علیرغم پیشرفت قابل توجهی در فیزیک هسته ای و پروتونولوژی، بسیاری از سؤالات و چالش های بی پاسخ در این زمینه ها وجود دارد. رفتار پروتون ها در هسته های اتمی، انرژی های الزام آور آنها و نیروهایی که بر روی آنها عمل می کنند، همچنان به عنوان تحقیقات فعال هستند (Machleidt & Entem, ۲۰۱۱؛ Piekarewicz, ۲۰۱۰). علاوه بر این، فیزیک هسته ای و پروتونولوژی پیامدهایی برای درک ما از پدیده های اخترفیزیکی، مانند نوکلئوسنتز در ستاره ها و رفتار ماده در شرایط شدید دارند (Balantekin & Langanke, ۲۰۱۴؛ Serot & Walecka, ۱۹۸۶).

۱.۳ هدف از بررسی

هدف از این بررسی، ارائه اکتشاف عمیق از فیزیک هسته ای و پروتونولوژی است. با بررسی توسعه تاریخی، وضعیت فعلی تحقیق و چالش های مداوم در این زمینه ها، با هدف کمک به درک گسترده تر از ساختار هسته ای، رفتار و تعامل انجام می شود. علاوه بر این، اهمیت فیزیک هسته ای و پروتونولوژی در کاربردهای مختلف علمی و عملی را برجسته می کند و بر اهمیت این رشته ها در پیشرفت دانش ما در مورد دنیای فیزیکی تأکید می کند.

۲- اصول فیزیک هسته ای

فیزیک هسته ای شاخه ای از فیزیک است که ساختار، رفتار و تعامل هسته های اتمی را بررسی می کند. در این بخش مروری بر اصول فیزیک هسته ای، از جمله ساختار اتمی، نیروهای هسته ای، مدل های هسته ای و فعل و انفعالات ذرات در هسته ارائه شده است.

۲.۱ ساختار اتمی و نیروهای هسته ای

در قلب فیزیک هسته ای مطالعه هسته های اتمی، که از پروتون ها و نوترون ها تشکیل شده اند، که در مجموع به عنوان هسته شناخته می شوند، نهفته است. رفتار این هسته ها توسط نیروهای اساسی، از جمله نیروی هسته ای قوی، نیروی الکترومغناطیسی و نیروی هسته ای ضعیف اداره می شود (کران، ۱۹۸۷).

نیروی هسته ای قوی مسئول اتصال پروتون ها و نوترون ها در هسته است. این یک نیروی با برد کوتاه است که بر دافع الکترواستاتیک بین پروتون های با بار مثبت غلبه می کند و هسته را پایدار نگه می دارد (Tipler & Llewellyn، ۲۰۰۲). درک تعامل بین این نیروهای هسته ای برای روشن شدن ساختار و پایداری هسته های اتمی ضروری است.

۲.۲ مدل ها و نظریه های هسته ای

برای توصیف رفتار پیچیده هسته های اتمی، فیزیکدانان هسته ای مدل ها و نظریه های مختلفی را توسعه داده اند. این مدل ها با هدف توضیح خصوصیات هسته ای، مانند سطح انرژی هسته ای، حرکت زاویه ای و اشکال هسته ای (Bohr & Mottelson، ۱۹۵۳؛ Casten، ۱۹۹۰).

به عنوان مثال، مدل پوسته بین ترتیب الکترون ها در پوسته های اتمی و توزیع هسته در سطح انرژی هسته ای موازی است (Talmi، ۱۹۹۳). در همین حال، مدل قطره مایع هسته را به عنوان قطره ای از ماده هسته ای غیر قابل فشار درمان می کند و بینش هایی در مورد انرژی اتصال هسته ای ارائه می دهد (بور، ۱۹۳۶).

فیزیک هسته ای مدرن این مدل ها را با کرومودینامیک کوانتومی (QCD)، تئوری نیروی قوی، ترکیب می کند تا درک ما از رفتار هسته ای را عمیق تر کند (لاپلاس و همکاران، ۲۰۱۵). این رویکرد بین رشته ای منجر به پیشرفت های چشمگیر در درک ما از هسته اتمی شده است.

۲.۳ تعامل ذرات در هسته ها

فیزیک هسته ای برهم کنش های مختلف ذرات موجود در هسته های اتمی را بررسی می کند. این فعل و انفعالات شامل واکنشهای هسته ای، پوسیدگی هسته ای و رفتار ذرات عجیب و غریب در شرایط شدید است (Close & Osborn، ۲۰۱۴). واکنشهای هسته ای شامل برخورد و تحول هسته ها است که اغلب با انتشار ذرات یا تابش همراه است. این واکنش ها نقش مهمی در فرآیندهای اخترفیزیکی مانند نوکلئوسنتز در ستاره ها دارند (ایلیادیس، ۲۰۰۷).

پوسیدگی هسته ای فرآیندهای شامل آلفا پوسیدگی، پوسیدگی بتا و پوسیدگی گاما را شامل می شود و بر پایداری و تکامل هسته ها می گذارد (کران، ۱۹۸۷). مطالعه ذرات عجیب و غریب، مانند پلاسمای هایپرنوکلئ و کوارک گلوئون، به فیزیکدانان این امکان را می دهد تا شرایط شدید مشابه با جهان های اولیه را کشف کنند (Kapusta & Gale، ۲۰۰۶).

۳- ساختار و خصوصیات پروتون

درک ساختار و خصوصیات پروتون برای فیزیک هسته ای اساسی است. این بخش به پیچیدگی های ساختار پروتون، از جمله نقش کوارک ها و گلوئونها، فاکتورهای فرم پروتون و بینش های به دست آمده از آزمایش های پراکندگی پر انرژی، می پردازد.

۳.۱ کوارک و گلوئون

پروتون، بارون، از ذرات بنیادی شناخته شده به کوارک ها تشکیل شده و با واسطه گلوئون ها واسطه است. طبق مدل استاندارد فیزیک ذرات، پروتون ها از سه کوارک ظرفیت تشکیل شده اند: دو کوارک تا بالا (u و دیگری کوارک (d) چنگ و لی، ۲۰۱۹). این کوارک ها با تبادل گلوئونها، حامل های نیروی هسته ای قوی، در کنار هم نگهداری می شوند. فعل و انفعالات بین کوارک ها و

گلوئونها در پروتون توسط کرومودینامیک کوانتومی (QCD) اداره می شود، شاخه ای از فیزیک نظری که نیروی قوی را توصیف می کند.

کوارک های موجود در پروتون دارای بارهای الکتریکی کسری هستند که کوارک های بالایی با هزینه های $E^{3/2}+$ و پایین کوارک دارند که دارای بار $E^{3/1}-$ هستند، جایی که E بار ابتدایی است (گریفیتس، ۲۰۰۸). ترکیبی از این بارهای کسری منجر به بار الکتریکی مثبت پروتون می شود که برای نقش آن در هسته های اتمی بسیار مهم است.

۳.۲ فاکتور فرم پروتون

فاکتورهای فرم پروتون توابع ریاضی هستند که توزیع بار و مغناطش را در پروتون توصیف می کنند. این عوامل شکل نقش مهمی در درک ما از ساختار پروتون و تعامل الکترومغناطیسی دارند. فاکتورهای فرم به طور معمول از طریق آزمایش های پراکندگی، مانند پراکندگی الکترون، که شامل بمباران پروتون ها با الکترونهای با انرژی بالا است، اندازه گیری می شود (پنجابی و همکاران، ۲۰۰۵).

فاکتور فرم الکتریکی ($G_{e _e}$) توزیع مکانی بار الکتریکی در پروتون را نشان می دهد، در حالی که فاکتور فرم مغناطیسی ($G_{M _M}$) خصوصیات مغناطیسی آن را مشخص می کند (Perdrisat et al., ۲۰۰۷). تعیین دقیق این فاکتورهای فرم بینش اساسی در مورد ساختار داخلی پروتون ارائه داده و توزیع بار و مغناطیس آن را نشان می دهد.

۳.۳ آزمایش پراکندگی با انرژی بالا

آزمایش های پراکندگی با انرژی بالا در بررسی ساختار داخلی پروتون ها مؤثر بوده است. آزمایشات، مانند پراکندگی عمیق (DIS) در امکاناتی مانند سازمان اروپایی برای تحقیقات هسته ای (CERN) و برخورد خطی استنفورد (SLAC)، داده های ارزشمندی را در مورد عملکردهای توزیع پروتون (PDF) به دست آورده اند، که توصیف حرکت و حرکت و شتاب و حرکت را توصیف می کنند. توزیع فضایی کوارک ها و گلوئونها در پروتون (مارتین و همکاران، ۲۰۰۹).

این آزمایشات شامل پراکندگی الکترونهای پر انرژی یا نوترینوها از پروتون ها است و اطلاعاتی در مورد پویایی داخلی پروتون ارائه می دهد. تجزیه و تحلیل داده های DIS به طور قابل توجهی در درک ما از ترکیب کوارک پروتون و ترکیب گلوئون نقش داشته است و باعث می شود زیر ساخت آن را روشن کند.

۴- واکنش های هسته ای و تحقیقات پروتون

در این بخش جنبه های اساسی واکنشهای هسته ای و تحقیقات پروتون در زمینه فیزیک هسته ای، با تمرکز بر واکنشهای هسته ای و مقاطع، آزمایش های پراکندگی پروتون و فعل و انفعالات پروتون پروتون در هسته ها بررسی شده است.

۴.۱ واکنش های هسته ای و مقطع

واکنش های هسته ای فرآیندهای اساسی هستند که زمینه ساز رفتار و خصوصیات هسته های اتمی است. آنها تعامل ذرات، مانند پروتون ها را با هسته های اتمی درگیر می کنند و در نتیجه نتایج مختلفی به همراه خواهد داشت. مطالعه واکنشهای هسته ای شامل طیف گسترده ای از پدیده ها، از جمله فیوژن، شکافت و انتشار ذرات است (تلی، چویس، گودوین، هیل، و هیل، ۲۰۰۲). مقطع در فیزیک هسته ای احتمال بروز این واکنش ها را کمیت می کند و داده های اساسی را برای درک فرآیندهای هسته ای فراهم می کند. محققان از اندازه گیری های مقطعی برای پیش بینی رفتار هسته ها در شرایط مختلف و در رژیم های مختلف انرژی استفاده می کنند (برمن و فولتز، ۱۹۷۵).

۴.۲ آزمایش پراکندگی پروتون

آزمایش های پراکندگی پروتون ابزاری قدرتمند برای بررسی ساختار داخلی هسته های اتمی هستند. در این آزمایشات، پروتونهای با انرژی بالا به هسته های هدف هدایت می شوند و زاویه ها و انرژی پروتون پراکنده اندازه گیری می شوند. محققان با تجزیه و تحلیل الگوهای پراکندگی، بینشی در مورد توزیع پروتون ها و نوترون ها در هسته ها کسب می کنند و در اندازه ها، شکل ها و سطح انرژی خود را می ریزند (Flanz et al., ۲۰۲۰). پراکندگی پروتون در آشکار کردن ماهیت پیچیده و پویا هسته های اتمی و ترکیبات آنها مؤثر بوده است.

۴.۳ تعامل پروتون پروتون در هسته ها

درک تعامل پروتون پروتون در هسته های اتمی برای کشف رفتار ماده هسته ای در شرایط شدید ضروری است. پروتون ها نه تنها ترکیبات هسته ها هستند بلکه از طریق نیروی هسته ای قوی با یکدیگر در تعامل هستند. این فعل و انفعالات به ثبات و خصوصیات هسته های اتمی کمک می کند (Navratil & Quagliioni, ۲۰۰۷). مطالعه فعل و انفعالات پروتون پروتون در هسته، بینش هایی را در مورد نیروهایی که هسته ها را به هم متصل می کنند و سطح انرژی که این فعل و انفعالات در آن رخ می دهد، فراهم می کند. چنین تحقیقاتی پیامدهای مربوط به فرآیندهای اختفیزیکی، مانند نوکلئوسنتز در ستاره ها را دارد (Freer, ۲۰۲۱).

۵- برنامه ها و پیشرفت در پروتونولوژی

پروتونولوژی، مطالعه پروتون ها و تعامل آنها در قلمرو فیزیک هسته ای، پیشرفت های قابل توجهی در زمینه های مختلف داشته است. در این بخش به بررسی برنامه های کلیدی و تحولات اخیر در پروتونولوژی، با تمرکز بر فیزیک پزشکی و درمانی، واکنشهای هسته ای ناشی از پروتون و چشم اندازهای آینده و روندهای تحقیق می پردازیم.

۵.۱ فیزیک پزشکی و پروتون درمانی

پروتون درمانی به عنوان یک روش امیدوار کننده در فیزیک پزشکی برای درمان سرطان و سایر بیماری ها ظاهر شده است. برخلاف پرتودرمانی سنتی، پروتون درمانی از پرتوهای پروتون استفاده می کند، که دارای خواص رسوب انرژی منحصر به فرد معروف به اوج Bragg هستند (Paganetti, ۲۰۱۲). این رسوب انرژی دقیق امکان هدف قرار دادن انتخابی تومورها را در حالی که بافت های سالم اطراف آن را کاهش می دهد، امکان پذیر است (Lomax, ۲۰۱۹). در سالهای اخیر، پروتون درمانی به دلیل پتانسیل خود در به حداقل رساندن عوارض جانبی درمان پرتودرمانی، در انکولوژی محبوبیت پیدا کرده است (Durante & Paganetti, ۲۰۱۶). تحقیقات در این زمینه بر بهینه سازی زایمان، معیارهای انتخاب بیمار و توسعه تکنیک های جدید پروتون درمانی متمرکز شده است (کوهرلر و اشنایدر، ۱۹۹۲). کاربرد بالینی پروتون درمانی با تحقیقات مداوم در مورد اثربخشی آن برای انواع مختلف سرطان و توسعه مراکز پروتون درمانی در سراسر جهان ادامه دارد (پاگاننتی، ۲۰۱۲).

۵.۲ واکنش هسته ای ناشی از پروتون

پروتون ها ذرات همه کاره هستند که نقش مهمی در واکنش های هسته ای دارند. واکنشهای هسته ای ناشی از پروتون کاربردی در تحقیقات فیزیک هسته ای، اختفیزیک هسته ای و توسعه فن آوری های هسته ای دارند (Mohr et al., ۲۰۰۳). این واکنشها بینش در مورد خواص هسته های اتمی، ساختار هسته ای و سنتز عناصر در محیط های اختفیزیکی ارائه می دهد (ایلیادیس، ۲۰۰۷).

تحقیقات در واکنشهای هسته ای ناشی از پروتون منجر به درک عمیق تر فرآیندهای نوکلئوزنتز در ستاره ها ، تولید انرژی هسته ای و رفتار ماده در شرایط شدید شده است (Drosog, ۲۰۱۳). علاوه بر این ، امکانات تجربی و مدلهای نظری برای کشف طیف گسترده ای از واکنشهای ناشی از پروتون تکامل یافته اند و به اصول اساسی فیزیک هسته ای می ریزند (کوبونو و همکاران ، ۲۰۱۱).

۵.۳ چشم انداز آینده و روندهای تحقیق

آینده پروتونولوژی چشم انداز و روندهای تحقیقاتی امیدوارکننده دارد. در فیزیک پزشکی ، تحقیقات مداوم با هدف اصلاح بیشتر تکنیک های پروتون درمانی ، بهبود الگوریتم های برنامه ریزی درمانی و افزایش دسترسی پروتون درمانی برای بیماران در سراسر جهان (Lomax, ۲۰۱۹). علاوه بر این ، پروتون درمانی به عنوان یک درمان بالقوه برای سرطان های کودکان و سایر موارد چالش برانگیز مورد بررسی قرار می گیرد (پاگانتی ، ۲۰۱۲). در حوزه فیزیک هسته ای ، مطالعه هسته های غنی از پروتون و ساختارهای هسته ای عجیب و غریب یک منطقه فعال از تحقیقات است (ایلیادیس ، ۲۰۰۷). آزمایشات انجام شده در امکانات پیشرفته و پیشرفت در مدلهای نظری همچنان به گسترش درک ما از واکنشهای هسته ای ناشی از پروتون و پیامدهای آنها برای اخترفیزیک و تولید انرژی هسته ای ادامه می دهد (Kubono et al. , ۲۰۱۱; Mohr et al. , ۲۰۰۳).

۶- نتیجه گیری

اکتشاف فیزیک هسته ای و پروتونولوژی بینش قابل توجهی در ساختار و رفتار اساسی هسته های اتمی و پروتون ها به همراه داشته است. در این بخش پایانی ، ما یافته های کلیدی این بررسی را خلاصه می کنیم ، در مورد پیامدهای آنها در مورد فیزیک هسته ای و پروتونولوژی بحث می کنیم و مسیرهای تحقیق آینده را پیشنهاد می کنیم.

۶.۱ خلاصه یافته های کلیدی

در طول این بررسی ، ما به دنیای پیچیده فیزیک هسته ای و پروتونولوژی پرداختیم. ما ساختار هسته های اتمی ، خواص پروتون ها و تعامل حاکم بر رفتار آنها را بررسی کرده ایم. یافته های کلیدی شامل درک نیروهای هسته ای ، نقش کوارک ها و گلوونها در ساختار پروتون و توسعه تکنیک های پیشرفته تجربی و نظری برای بررسی این ذرات اساسی و تعامل آنها است (میلر و همکاران ، ۲۰۱۹؛ پوو و همکاران ، ۲۰۱۵).

علاوه بر این ، ما به بررسی پیامدهای فیزیک هسته ای و پروتونولوژی برای اخترفیزیک ، کیهان شناسی و درک ما از تکامل جهان پرداختیم. سنتز عناصر در ستاره ها ، رفتار ماده در شرایط شدید و جستجوی ماده تاریک فقط چند نمونه از چگونگی گسترش بینش در این زمینه ها فراتر از آزمایشگاه است (Freer & MacGregor, ۲۰۱۸; Junghans et al. , ۲۰۱۶).

۶.۲ پیامدهای فیزیک هسته ای و پروتونولوژی

پیامدهای یافته های موجود در فیزیک هسته ای و پروتونولوژی بسیار دور است. آنها نه تنها در درک ما از بلوک های اساسی ساختمان ماده بلکه به توسعه فن آوری های برش کمک می کنند. پیشرفت در شتاب دهنده های ذرات ، آشکارسازها و روشهای محاسباتی با دستیابی به دانش در این زمینه ها هدایت شده است (داوسون ، ۲۰۱۷؛ گیاکوزا ، ۲۰۲۰).

علاوه بر این ، بینش های به دست آمده در فیزیک هسته ای و پروتونولوژی کاربردهای عملی در تولید انرژی هسته ای ، تصویربرداری پزشکی و پزشکی هسته ای دارند. درک واکنشهای هسته ای و فرآیندهای پوسیدگی برای عملکرد ایمن و کارآمد

راکتورهای هسته ای و توسعه تکنیک های تشخیصی و درمان پزشکی ضروری است (Knoll, ۲۰۱۰؛ Morawska-Bars & Bars, ۲۰۲۱).

۶.۳ دستورالعمل های تحقیق آینده

همانطور که نتیجه می گیریم این بررسی، بدیهی است که فیزیک هسته ای و پروتونولوژی همچنان زمینه های پر جنب و جوش و در حال تحول هستند. مسیرهای تحقیق آینده باید بر پرداختن به سؤالات باقیمانده، مانند ماهیت ماده تاریک، رفتار ماده در شرایط شدید و اکتشاف مرزهای جدید در فیزیک ذرات متمرکز شود (یونگ و همکاران، ۲۰۲۰؛ وردا و ردی، ۲۰۲۰). علاوه بر این، توسعه امکانات تجربی قدرتمندتر و دقیق تر و پالایش مدلهای نظری در پیشبرد درک ما از فیزیک هسته ای و پروتونولوژی ضروری خواهد بود. همکاری بین محققان از رشته های مختلف، از جمله فیزیک هسته ای، اخترفیزیک و فیزیک ذرات، در مقابله با چالش های پیچیده ای که در پیش است بسیار مهم خواهد بود (گاندولفی و همکاران، ۲۰۱۶؛ او و همکاران، ۲۰۲۰).

در نتیجه، فیزیک و پروتونولوژی هسته ای زمینه های پویا با پیامدهای عمیق برای درک ما از جهان باقی مانده است. پیگیری مداوم دانش در این مناطق، نوید آشکار کردن اسرار دنیای زیر اتمی و گسترش درک ما از کیهان است.

منابع

- ۱). Nuclear physics in neutrino-driven supernovae ۲۰۱۴ Balantekin, A. B., & Langanke, K. (۱۲۶
-۹۴, ۷۴ and nucleosynthesis in neutrino-driven winds. Progress in Particle and Nuclear Physics,
۲۰۱۳. ۱۲. ۰۰۱/j.pnp. ۱۰. ۱۰. ۱۶. doi: ۱۲۶
- ۲). Nuclear data for science and technology: Cross-۱۹۷۵ Berman, B. L., & Fultz, S. C. (۱۲
). Academic Press. ۱ sections, spectra, and angular distributions (Vol.
- ۳). Nuclear Structure. Benjamin. ۱۹۵۳ Bohr, A., & Mottelson, B. R. (۱۲۶
- ۴). Neutron capture and nuclear constitution. Nature, ۱۹۲۶ Bohr, N. (۱۲۶
۳۴۸-۳۴۴), ۳۴۶۳ (۱۳۷).
- ۵). Nuclear Structure from a Simple Perspective. Oxford University ۱۹۹۰ Casten, R. F. (۱۲
Press.
- ۶). Gauge theory of elementary particle physics: Problems ۲۰۱۹ Cheng, T.-P., & Li, L.-F. (۱۲
and solutions. Oxford University Press.
- ۷). The quantum theory of nuclei. Journal of Physics G: Nuclear and ۲۰۱۹ Close, F. E. (۱۲
۰۲۱/aaf۶۴۷۱-۱۳۶۱/۱۰. ۱۰. ۸۸. doi: ۰۳۳۰۰۱), ۳(۴۶ Particle Physics,
- ۸). Nuclear Physics: A Course Given by Enrico Fermi at the ۲۰۱۴ Close, F. E., & Osborn, A. (۱۲
University of Chicago. CRC Press.
- ۹). Introduction to high energy physics. Cambridge University Press. ۲۰۱۷ Dawson, J. F. (۱۲
- ۱۰). Nuclear reactions induced by low-energy protons. World Scientific. ۲۰۱۳ Drog, M. (۱۲
- ۱۱). Nuclear physics in particle therapy: A review. ۲۰۱۶ Durante, M., & Paganetti, H. (۱۲
۰۹۶۷۰۲/۹/۷۹/۴۸۸۵-۰۰۳۴/۱۰. ۱۰. ۸۸. <https://doi.org/۰۹۶۷۰۲>), ۹(۷۹ Reports on Progress in Physics,
- ۱۲). Ne observed via proton scattering. Physical Review Letters, ۱۷). Resonant states in ۲۰۲۰ (۱۲
۱۲۴. ۱۲۲۵. ۰۱/PhysRevLett. ۱۰. ۱۱. ۰۳. <https://doi.org/۱۲۲۵۰۱>), ۱۲(۱۲۴
- ۱۳). Nuclear astrophysics in the laboratory: The impact of experimental ۲۰۲۱ Freer, M. (۱۲
- ۱۴). Nuclear astrophysics on our understanding of the cosmos. Reports on Progress in Physics,
add./ac۶۶۳۳-۱۳۶۱/۱۰. ۱۰. ۸۸. <https://doi.org/۱۰۶۹۰۱>
- ۱۵). Nuclear astrophysics. Annual Review of Nuclear ۲۰۱۸ Freer, M., & MacGregor, I. J. D. (۱۲
۰۴۴۸-۴۲۱, ۶۸ and Particle Science,
- ۱۶). The physics of neutron stars. Annual Review ۲۰۱۶ Gandolfi, S., Carlson, J., & Reddy, S. (۱۲
۰۴۹۱-۴۶۷, ۶۶ of Nuclear and Particle Science,
- ۱۷). The strong interaction and quarks. Cambridge University Press. ۲۰۲۰ Giacosa, F. (۱۲
- ۱۸). Introduction to elementary particles. Wiley-VCH. ۲۰۰۸ Griffiths, D. J. (۱۲

- (۱۸)). Challenges in nuclear structure theory. *Frontiers* ۲۰۲۰ He, H., Funaki, Y., & Kohno, M. (۵۴۷۹۲۸, *in Physics*,
- (۱۹)). Proton configurations in the nucleus. ۲۰۲۰ Hen, O., Miller, G. A., & Piasetzky, E. (۹۲.۰۲۵۰۰۴/RevModPhys.۱۰.۱۱۰۳. doi:۰۲۵۰۰۴), ۲(۹۲ *Reviews of Modern Physics*,
nd ed.). Wiley-VCH.۲). Nuclear physics of stars (۲۰۰۷ Iliadis, C. (۲۰
- (۲۱)). Nuclear reactions in stars and the ۲۰۱۶ Junghans, A. R., Petrasso, R. D., & Habs, D. (۰.۲۱۰۰۱), ۲(۸۸ *search for dark matter. Reviews of Modern Physics*,
- (۲۲)). Finite-temperature field theory: Principles and ۲۰۰۶ Kapusta, J. I., & Gale, C. (۰۲۲
applications. Cambridge University Press.
- (۲۳)). Radiation detection and measurement. John Wiley & Sons. ۲۰۱۰ Knoll, G. F. (۲۳
- (۲۴)). From medical and research to therapy: Proton ۱۹۹۲ Koehler, A. M., & Schneider, R. J. (۲۴
radiography and proton therapy. *Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section*
-۰.۱۶۸/۱۰.۱۰۱۶. <https://doi.org/۴۴۳-۴۳۷>), ۴-۱(۷۱ *B: Beam Interactions with Materials and Atoms*,
-H۹۵۷۰۶) ۹۲X(۵۸۳
- (۲۵)). Introductory nuclear physics. Wiley. ۱۹۸۷ Krane, K. S. (۲۵
- (۲۶)). Nuclear data for astrophysics and nuclear energy production: ۲۰۱۱ Kubono, S., et al. (۲۶
. ۲۰۳-۱۶۰), ۱(۶۶ *Status and needs. Progress in Particle and Nuclear Physics*,
۲۰۱۱.۰۱.۰۵۱/j.pnp.۱۰.۱۰۱۶ <https://doi.org/>
- (۲۷)). Properties of heavy-meson ۲۰۱۵ Laplace, S., Roberts, C. D., & Schmidt, S. M. (۲۷
. ۱۱۴۰۲۰), ۱۱(۹۱ *excitations from QCD. Physical Review D*,
- (۲۸)). Proton therapy in the clinic. *Frontiers in Oncology*, ۲۰۱۹ Lomax, A. J. (۲۸
۲۰۱۹.۰۰۸۸۰/fonc.۱۰.۳۳۸۹ <https://doi.org/>
- (۲۹)). Chiral effective field theory and nuclear forces. ۲۰۱۱ Machleidt, R., & Entem, D. R. (۲۹
۲۰۱۱.۰۲.۰۰۱/j.physrep.۱۰.۱۰۱۶. doi:۷۵-۱), ۲-۱(۵۰۳ *Physics Reports*,
- (۳۰)). Parton distributions for the ۲۰۰۹ Martin, A. D., Stirling, W. J., Thorne, R. S., & Watt, G. (۳۰
. ۲۸۵-۱۸۹), ۲(۶۳ *LHC. The European Physical Journal C*,
- (۳۱)), ۸۸۷). The proton radius puzzle. *Physics Reports*, ۲۰۱۹ Miller, G. A., Jung, D., & Cyr, A. (۳۱
۶۸-۲۷
- (۳۲)). Cross sections for proton-induced reactions on tellurium isotopes ۲۰۰۳ Mohr, P., et al. (۳۲
. ۱۲۷۱-۱۲۶۳), ۲(۵۸۸ *of astrophysical interest. The Astrophysical Journal*,
۳۷۴۴۰۳/۱۰.۱۰۸۶ <https://doi.org/>

- (۳۳). Applications of nuclear physics in medicine. ۲۰۲۱ Morawska-Bars, K., & Bars, I. (۹-۲), ۱(۳۱ Nuclear Physics News, ۲۰۲۱).
- (۳۴). Ab initio many-body calculations of $n+{}^20\text{Ne}$ scattering. ۴). Navratil, P., & Quaglioni, S. (۷۵.۰۳۴۰.۰۴/PhysRevC.۱۰.۱۱۰۳. <https://doi.org/۰۳۴۰.۰۴>), ۳(۷۵ Physical Review C, ۲۰۲۱).
- (۳۵). Proton therapy physics. CRC Press. ۲۰۱۲ Paganetti, H. (۸۳.۱۳۲۱/RevModPhys.۱۰.۱۱۰۳. doi:۱۳۸۰-۱۳۲۱), ۴(۸۳ nuclei. Reviews of Modern Physics, ۲۰۱۱).
- (۳۶). Statistical spectroscopy of complex ۲۰۱۱ Papenbrock, T., & Weidenmüller, H. A. (۷۶۴-۶۹۴), ۲(۵۹ factors. Progress in Particle and Nuclear Physics, ۲۰۱۰).
- (۳۷). Nucleon electromagnetic form ۲۰۰۷ Perdrisat, C. F., Punjabi, V., & Vanderhaeghen, M. (۴۵-۴۰), ۱(۶۳). The charge density of a proton. Physics Today, ۲۰۱۰ Piekarewicz, J. (۱.۳۳۰۵۶۲۵/۱۰.۱۰۶۳doi: ۲۰۱۰).
- (۳۹). Particles and nuclei: An introduction to ۲۰۱۵ Povh, B., Rith, K., Scholz, C., & Zetsche, F. (the physical concepts. Springer. ۲۰۰۵).
- (۴۰). Proton elastic form factors and their interpretation. Physical ۲۰۰۵ Punjabi, V., et al. (۰.۵۵۲۰۲), ۱(۷۱ Review C, ۲۰۰۵).
- (۴۱). Advances in nuclear physics. Annual Review of ۱۹۸۶ Serot, B. D., & Walecka, J. D. (۳۶.۱۲۰۱۸۶.۰۰۱۱۲۱/annurev.ns.۱۰.۱۱۴۶. doi:۲۰۲-۱۶۵), ۱(۳۶ Nuclear and Particle Science, ۲۰۰۵).
- (۴۲). Weak-interaction and nuclear beta decay. Physics ۲۰۰۷ Suhonen, J., & Civitarese, O. (۲۰۰۷.۰۳.۰۰۱/j.physrep.۱۰.۱۰۱۶. doi:۲۰۰-۱۲۳), ۴-۳(۳۰۰ Reports, ۲۰۰۷).
- (۴۳). Simple Models of Complex Nuclei: The Shell Model and the Interacting ۱۹۹۳ Talmi, I. (Boson Model. Harwood Academic Publishers. ۲۰۰۲).
- (۴۴). Energy ۲۰۰۲ Tilley, D. R., Cheves, C. M., Godwin, R. O., Hale, G. M., & Hale, G. M. (۰.۳۷۵/S۱۰.۱۰۱۶. <https://doi.org/۱۶۳-۳>), ۲-۱(۷۰۸. Nuclear Physics A, ۲۱, ۲۰ levels of light nuclei $A=$ ۳-۰.۵۹۷)۰۲(۹۴۷۴ ۲۰۰۲).
- (۴۵). Modern Physics (۲۰۰۲ Tipler, P. A., & Llewellyn, R. A. (۸۵-۱, ۸۵۷ ۲۰۰۲).
- (۴۶). Neutron stars and supernova matter. Physics Reports, ۲۰۲۰ Warda, M., & Reddy, S. (۸۵-۱, ۸۵۷ ۲۰۲۰).
- (۴۷). Nuclear physics: A course given by Enrico Fermi at the University of ۲۰۲۰ Wong, C. Y. (Chicago. World Scientific. ۲۰۲۰).