

■ گروه پدیده‌شناسی ذرات (مدیر گروه یاسمن فرزانه)
■ تاریخ نگارش: تابستان ۱۴۰۲ (۲۰۲۳ میلادی)

همواره شنیده ایم که در هر علم تجربی، به ویژه در علم فیزیک، آزمایش رکن اصلی است؛ یعنی، دست آخر آزمایش درستی یا نادرستی فرضیه‌ها را روشن می‌سازد. شاخه فیزیک ذرات و انرژی‌های بالا به اقتضای رشته و مسایل مطرح، بعد بین‌المللی بسیار پررنگی دارد و سه رهیافت تئوری، پدیده‌شناسی و آزمایشگاهی دست در دست هم توسط گروه‌های مستقل اما در هم تنیده دنبال می‌شوند. به عبارت دیگر بخش تئوری این شاخه و بخش آزمایشگاهی این شاخه هر کدام اقبانوسی از دانش هست و در نتیجه یک محقق یا گروه تحقیقاتی نمی‌تواند هم‌زمان در هر دو خیره باشد و در پیشبرد دانش در دو جبهه نقش درخور ایفا کند. حلقه واسط آزمایشگران و تئوریست‌ها، پدیده‌شناسان هستند.

گروه پدیده‌شناسی فیزیک ذرات پژوهشکده فیزیک از زمستان ۱۳۸۳ یعنی ۱۵ سال بعد از تشکیل پژوهشکده فیزیک و گروه انرژی‌های بالا با ورود یاسمن فرزانه شکل گرفت. اندکی پیش از آن پژوهشگاه همتی نیز برای ورود به آزمایش ال-ایچ-سی در سرن سویس داشت. با این حال همکاران خارجی فرزانه که با پیچیدگی‌ها و ظرافت‌های کار پدیده‌شناسی آشنا بودند ابراز نگرانی می‌کردند که در کشوری که ارتباط نزدیک با آزمایشگاه‌های جهان ندارد شکست یک گروه پدیده‌شناسی محتوم است. کار تئوری بیشتر قائم به افراد و گروه‌هاست و به اندازه کار پدیده‌شناسی به ارتباط تنگاتنگ با سایر گروه‌های پژوهشی و آزمایشگاهی متفاوت در سطح بین‌المللی نیاز ندارد. از سوی دیگر گروه‌های آزمایشگاهی بر یک آزمایش یا بخشی از آن آزمایش متمرکز می‌شوند. اما برای کار پژوهشی پدیده‌شناسی که درخور توجه باشد لازم است که اطلاع وسیعی از آنچه که در دنیای آزمایش در گوشه و کنار جهان می‌گذرد داشته باشیم. برای فعالیت‌های تاثیر گذار در زمینه پدیده‌شناسی فیزیک ذرات باید بدانیم که سیاست‌گذاری‌های ساخت آزمایش‌ها در جهان چه سمت و سویی می‌گیرد. اگر بخواهیم در سوگیری روندهای آزمایشگاهی موثر باشیم باید بدانیم آزمایش‌های مختلف چه نتایج منتشر نشده‌ای به دست آورده‌اند. دست یافتن به چنین اطلاعاتی و به‌روز ماندن در دنیای نسبتاً بسته جامعه علمی ایران چالش عظیم در راه ایجاد یک گروه پدیده‌شناسی مطرح در پژوهشکده به شمار می‌رفت و نگرانی‌های متعددی به دنبال داشت.

قبل از این‌که به سیر تحول این گروه و موضوعات پژوهشی مورد مطالعه آن بپردازیم لازم است اشاره کنیم که بنا به ذات پدیده‌شناسی ذرات، موضوعات مورد تمرکز در این شاخه به آزمایش‌های در حال ساخت یا داده‌گیری در دنیا و نتایج آنها بستگی مستقیم دارد. در بازه زمانی حدود پنج سال این شرایط در دنیا عوض می‌شود. در نتیجه، یک گروه پدیده‌شناسی مطرح در دنیا باید بتواند خود را با تغییرات تطبیق دهد. اگر از حدی این گروه قوی‌تر و مطرح‌تر باشد می‌تواند خود در تغییر روندها نقش ایفا کند.

گروه پدیده‌شناسی پژوهشکده فیزیک در اواخر سال ۱۳۸۳ (۲۰۰۴) با تمرکز بر موضوع فیزیک نوترینو و ابرتقارن کار علمی خود را شروع نمود. این دو موضوع در آن زمان از داغ‌ترین و محبوب‌ترین موضوعات پژوهشی در این شاخه محسوب می‌شدند. نوسان نوترینوها یا یافته‌های سال ۱۹۹۸ آزمایش سوپرکامیوکانده در ژاپن و سپس یافته‌های آزمایش اس-ان-او در کانادا به تثبیت رسید. پدیده نوسان نوترینوها فیزیک جدیدی (که در مدل استاندارد فعلی لحاظ نشده) می‌طلبد. از این رو در سالهای دهه اول ۲۰۰۰ فعالیت چشمگیری در عرصه نوترینو چه در زمینه تئوری و پدیده‌شناسی و چه در زمینه آزمایشگاهی آغاز شد. با توجه به این یافته‌ها و آزمایش‌های متعددی که برای شناخت ذرات نوترینو در آن سالها پایه ریزی شد، دانشجویان دکتری متعددی در کشورهای پیشرو در علم در سالهای ۲۰۰۰ تا ۲۰۰۴ به سوی فیزیک نوترینو گرایش یافتند. یاسمن فرزانه که در آن زمان در موسسه سیسا در ایتالیا دانشجوی دکتری بود این اقبال را یافت که تحت راهنمایی الکسی اسمیرنوف- یکی از مطرح‌ترین فیزیکدانان نوترینو- با مبنای این مبحث آشنا شود و پایان‌نامه خود را بر این موضوع بنگارد. بعد از بازگشت به ایران وی به پژوهش بر نوترینو ادامه داد. در آن سالها آشکارساز آیس کیوب در یخهای قطب جنوب در حال ساخت بود. بخش عمده‌ای از فعالیت‌های گروه در سالهای ۲۰۰۴ تا ۲۰۰۹ بر بررسی نوترینوهای کیهانی پرانرژی که قابل مطالعه با این آشکارساز هستند متمرکز بود. رساله دکتری یکی از دانشجویان وقت پژوهشکده بر همین موضوع بود. داده‌های آیس کیوب که در سالهای بعد منتشر شد ابزاری جدید از شناخت کیهان به دست داده است. یافته‌های سالهای اخیر توسط این آشکارساز سئوالات متعددی را مطرح ساخته است. کار پژوهشی بر روی داده‌های آیس کیوب ادامه دارد.

در سالهای ۲۰۰۴ تا ۲۰۰۹ مدارس، کارگاه‌ها، همایش‌ها و دوره‌های کوتاه مدت متعددی در سطح ملی و بین‌المللی توسط گروه پدیده‌شناسی فیزیک پژوهشکده در این موضوعات برگزار شد که در تربیت نسلی نو از فیزیکدانان نوترینو موثر بود. همچنین فعالیت‌های ترویجی یاسمن فرزانه در فضای مجازی در جذب دانشجویان به این شاخه نقش به‌سزا ایفا نمود. برخی از این دانشجویان اکنون در دانشگاه‌های معتبر دنیا به کار پژوهشی می‌پردازند و در شاخه پژوهشی خود سرشناس هستند. تعداد قابل توجهی از ایشان را خانم‌ها تشکیل می‌دهند که در جامعه بین‌المللی به ایجاد تصویر مثبت از فرهنگ معاصر ایرانی کمک شایانی می‌کند.

همان گونه که پیشتر عنوان شد دیگر موضوع مورد علاقه گروه پدیده‌شناسی، در چند سال اول تشکیل گروه به تبع رویکرد جهانی، ابرتقارن از دید پدیده‌شناسی بود. فرضیه ابرتقارن در دهه‌های هشتاد و نود میلادی تا حدود سال ۲۰۱۲ هژمونی مطلق در میان فرضیه‌های پدیده‌شناسی فیزیک ذرات برای فیزیک جدید داشت. هرچند طرفداران دلایلی نظیر حل معضل تنظیم ظریف برای محبوبیت فرضیه ابرتقارن مطرح می‌نمودند، علت اصلی این هژمونی، زیبایی‌های ریاضی فرمالیزم ابرتقارن بود. یاسمن فرزانه مبنای این فرضیه را در سال‌های ۲۰۰۱ تا ۲۰۰۴ و هنگامی که در استنفورد دانشجوی مهمان بود، از فیزیکدانان برجسته‌ای نظیر مایکل

پسکین آموخته بود. در دهه ابتدایی قرن بیست و یکم، تمرکز پژوهشی فرزنان بر اثرات نقض تقارن بار-پاریته و نیز نقض طعم لپتونی در چارچوب این فرضیه بود. پیش‌بینی این مدل و اثرات آن بر مشاهده‌پذیرهایی نظیر دوقطبی الکتریکی الکترون، واپاشی‌های نادر نظیر واپاشی به الکترون و فوتون و نیز تبعات آن برای توجیه عدم تقارن ماده و پادماده موضوع مقالات چندی بود که به همکاری مایکل پسکین از استنفورد، خوزه وایه از دانشگاه والنسیای اسپانیا و نیز دانشجویان همکار در پژوهشکده به نگارش در آمد. به عنوان مثال مراجعه کنید به

Y. Farzan and J. W. F. Valle, “*R-parity violation assisted thermal leptogenesis in the seesaw mechanism*,” Phys. Rev. Lett. **96** (2006), 011601

در دهه نود و سالهای اولیه قرن بیست و یکم گمان می‌رفت که شتاب‌دهنده ال-ایچ-سی در سال‌های اول داده‌گیری‌اش بلافاصله ذرات پیش‌بینی شده در فرضیه‌های ابرتقارنی را کشف نماید. جالب آن که در آن سال‌ها گمان می‌رفت کشف ذره هیگز در دور اول داده‌گیری میسر نخواهد شد چرا که برخی شواهد تجربی و همچنین برخی ملاحظات تئوریک بر سنگین‌تر بودن ذره هیگز دلالت می‌کرد. اما نتیجه آزمایش خلاف این پیش‌دوری‌ها از آب درآمد. در واقع ذره هیگز نسبتاً سریع در داده‌های ال-ایچ-سی رخ نمود و کشف آن در ۴ جولای ۲۰۱۲ اعلام گشت. اما هنوز شاهدهی بر تولید ذرات ابرتقارنی در آزمایش ال-ایچ-سی نیست. از آن جایی که در علوم تجربی نظیر فیزیک این آزمایش است که حرف اول و آخر را می‌زند، علی‌رغم زیبایی مدل و طرفداری بسیاری از فیزیکدانان شهیر معاصر از این فرضیه، مشاهدات آزمایشگاهی از محبوبیت این فرضیه کاست. تعداد مقالات منتشر شده بر پدیده‌شناسی ابرتقارن در ده سال اخیر به شدت کاهش یافته است. گروه پدیده‌شناسی پژوهشکده فیزیک نیز تمرکز خود را از ابرتقارن به فرضیه‌های دیگر سوق داده است.

هرچند شواهد مشاهداتی و رصدی بسیاری بر وجود ماده تاریک و اثرات گرانشی آن در کیهان‌شناسی و تشکیل ساختارهای کیهانی و نیز حرکت ستارگان در کهکشان موجود است هنوز نمی‌دانیم ماده تاریک از چه نوع ذراتی ساخته شده است. هیچ کدام از ذرات شناخته شده استاندارد، ویژگی‌های لازم برای ماده تاریک را ندارند. بنابراین وجود ماده تاریک در عالم دال بر فیزیک جدید و ذرات جدید است. ماهیت این ذره از سئوالات باز پیش روی فیزیکدانان ذرات هست. با اعمال یک تقارن اضافی، مدل استاندارد ابرمتقارن یک کاندید برای ماده تاریک پیش‌بینی می‌کند. هژمونی فرضیه ابرتقارن باعث شده بود که بسیاری از جمله اغلب آزمایشگران-ماده تاریک را مترادف با کاندیدای ابرتقارن بدانند. در نتیجه اغلب استراتژی‌های آزمایشگاهی و مشاهداتی برای جست و جوی ماده تاریک بر این اساس پیاده شده بود. در چنین فضایی، گروه پدیده‌شناسی به همکاری دوستان در اروپا مقاله زیر را نوشتند که در آن هم آلترناتیوی برای ماده تاریک ارائه شد و هم کوچک بودن جرم نوترینوها توضیح داده شد:

C. Boehm, Y. Farzan, T. Hambye, S. Palomares-Ruiz and S. Pascoli, “*Is it possible to explain neutrino masses with scalar dark matter?*,” Phys. Rev. D **77** (2008), 043516

پس از انتشار این مقاله هر کدام از نویسندگان از جمله یاسمن فرزنان- به تنهایی یا با همکاری یکدیگر یا سایر همکاران جنبه‌های مختلف این مدل آلترناتیو را (به خصوص اثرات آن بر مشاهده‌پذیرهای مختلف را) بررسی نمودند. سپس مدل‌های بدیل دیگری را در مقالات متعدد مطرح ساختند. به تدریج تلاش‌های این گروه و چند گروه دیگر هژمونی ابرتقارن را در جست و جوی ماده تاریک شکست و به تدریج آزمایشگران را متقاعد ساخت که باید بر استراتژی‌های متنوع‌تری برای کشف کاندیداهای متنوع ماده تاریک رو بیاورند. در برخی از مقالات این گروه استراتژی‌های آلترناتیو معرفی شده‌اند.

امروزه می‌دانیم نوترینو با طعم مشخص ترکیبی خطی از نوترینوها با جرم مشخص هستند. این ترکیب خطی با ماتریس درآمیختگی که با سه زاویه و یک فاز ناقص تقارن بار-پاریته مشخص می‌گردد توصیف می‌شود. آزمایش‌های نوترینوی خورشیدی (یافته‌های سوپرکامیوکانده و اس-ان-او) که در بالا به آن اشاره شد به همراه آزمایش راکتوری کملند تا حدود سال ۲۰۰۲ مقادیر دو زاویه از این سه زاویه را به دست آورده بودند. اما تا سال ۲۰۱۲ مقدار زاویه سوم نادانسته بود. آزمایش‌های راکتوری تنها نشان داده بودند که مقدار این زاویه باید از حدود ۱۲ درجه کوچک‌تر باشد. بر اساس پیش‌دوری‌های نظری مانند اعمال تقارن‌های گسسته بر ماتریس درآمیختگی یا قیاس با درآمیختگی در بخش کوارکی، بخش بزرگی از فیزیکدانان نوترینو گمان می‌کردند که این زاویه باید بسیار کوچک باشد. استراتژی‌های آزمایشی برای کشف‌های بعدی هم بر این فرض استوار بود تا این که در سالهای ۲۰۱۲ تا ۲۰۱۳ مقدار این زاویه اندازه‌گیری شد و با کمال تعجب مقدار آن نسبتاً بزرگ و حدود ۸ درجه گزارش شد. جالب آن که گروه‌های مختلف که دستی در پیش‌بینی مقادیر این زاویه بر اساس برخی مدل‌های مبتنی بر تقارن‌های گسسته داشتند ادعا نمودند که مدل آنها قابلیت پیش‌بینی این مقدار عددی را داشته است اما می‌بایست پارامترهای آزاد بیشتری را وارد مدل می‌کردند. در هر حال گروه پدیده‌شناسی پژوهشکده فیزیک هیچ‌گاه به این نوع مدل‌ها علاقه‌ای نشان نداده است. در پی این اندازه‌گیری استراتژی‌های آزمایشی برای اندازه‌گیری مجهول نهایی ماتریس درآمیختگی یعنی فاز ناقص بار-پاریته تغییر کرد.

اندکی بعد از اندازه‌گیری زاویه سوم، پروپوزال آزمایش پایه بلند دون (DUNE long baseline experiment) با هدف اصلی اندازه‌گیری فاز ناقص بار-پاریته طرح شد. منبع نوترینوها در این آزمایش آزمایشگاه فرمی در ایالت ایلینویز آمریکا خواهد بود. آشکارساز آن بناست در معدنی در ایالت داکوتای جنوبی و در فاصله ۱۳۰۰ کیلومتری از منبع باشد. هنگام شکل‌گیری گروه همکاری

این آزمایش طوماری جهت امضا در اینترنت قرار گرفت. یاسمن فرزانه جزو امضا کنندگان بود. با توجه به مقالات وی در این زمینه - بدون هیچ گونه بار مالی برای پژوهشگاه - پژوهشکده فیزیک وارد این همکاری چند میلیارد دلاری گشت. در این مدت مقالات چندی در مورد پتانسیل این آزمایش برای آزمودن فیزیک جدید توسط گروه پدیده‌شناسی ذرات پژوهشگاه به نگارش درآمده است.

با مطرح شدن آزمایش‌های دقیق مانند آزمایش دون جهت اندازه‌گیری پارامترهای مجهول بخش نوترینو سؤال پیش می‌آید که آیا برهمکنش‌های نوترینو با ماده به اندازه کافی شناخته شده است؟ اگر علاوه بر برهمکنش ضعیف استاندارد، برهمکنش جدید و ناشناخته‌ای بین نوترینو و ماده باشد می‌تواند در این آزمایش‌های فوق دقیق رخ بنماید. اگر این اثرات بالقوه را در نظر نگیریم در تحلیل نتایج آزمایشگاهی به نتیجه اشتباه می‌رسیم. اثرات برهمکنش غیراستاندارد در آزمایش‌های پایه بلند دقیق توسط گروه‌های پژوهشی مختلف در کشورهای گوناگون از جمله توسط گروه پدیده‌شناسی پژوهشکده بررسی شده و در قالب مقالات منتشر گشته است. با این حال، تا سال ۲۰۱۵ و انتشار مقاله زیر توسط یاسمن فرزانه گمان می‌رفت که نمی‌توان مدل سازگاری ساخت که بتواند برهمکنش غیر استاندارد با ضریب جفت‌شدگی قابل مقایسه با ثابت فرمی برای نوترینوها پیش‌بینی کند. این مقاله

Y. Farzan, "A model for large non-standard interactions of neutrinos leading to the LMA-Dark solution," Phys. Lett. B 748 (2015), 311-315.

و مقالات دنباله رو آن که جوانب متفاوت امر را بررسی می‌نمودند در این حوزه جریان‌ساز بوده است.

در سرن و آزمایش‌های ال.اچ.سی نقطه برخورد باریکه پروتون‌ها شاری قوی از نوترینوها هم جهت با باریکه پروتون‌های اولیه تولید می‌شود. آشکارسازهای اصلی این آزمایش نظیر سی-ام-اس یا اطلس تنها قادرند ذرات بارداری را که در زوایای بزرگ پراکنده می‌شوند آشکار کنند و به شار نوترینوها غیر حساس هستند. در تابستان ۲۰۱۹ در همایش سالانه اتحادیه فیزیک انرژی‌های بالای اروپا برای اولین بار طرحی برای آشکارسازی این نوترینوها به نام آزمایش «فیزر-نو» (FASER-ν) مطرح شد. یاسمن فرزانه در این همایش به عنوان عضوی از کمیته برگزارکنندگان جلسه نوترینو حضور داشت و پتانسیل این طرح را برای جست‌وجو برای فیزیک ناشناخته دریافت. از آن زمان به بعد یکی از جریان‌های پژوهشی این گروه به آزمایش‌هایی نظیر «فیزر-نو» اختصاص دارد.

همان طوری که از متن بالا برداشت می‌شود این شاخه از پژوهش بسیار متأثر از یافته‌های آزمایشی است. هر از گاهی مقاله‌ای توسط یکی از همکاری‌های آزمایشی (experimental collaborations) دنیا منتشر می‌شود که در آن ادعا می‌شود که پدیده‌ای مشاهده شده که با فیزیک شناخته شده قابل توضیح نیست. اغلب این گونه ادعاها ناشی از خطای آزمایشگاهی هستند. با این حال نباید هیچکدام را دست کم گرفت. چرا که نمایاندن فیزیک ناشناخته راهی جز این ندارد. اگر همه آنها را نادیده بگیریم در کشف فیزیک جدید ناکام خواهیم ماند. سیاست گروه پدیده‌شناسی پژوهشکده فیزیک، جدی گرفتن احتمال درستی این ادعاها-البته توأم با شک و تردید علمی- است. به این ترتیب در کنار موضوعات کلی پژوهشی که در بالا به آن اشاره شد، سالانه به طور متوسط یک مقاله هم توسط اعضای این گروه با همکاران ایرانی و غیر ایرانی در مورد توضیح این گونه ادعاها نگاشته شده است. به طور مثال مقاله اخیر یاسمن فرزانه به همراه استاد راهنمای سابقش الکسی اسمیرنوف و همکار جوان‌تر خود نیکلاس برنال، بر روی مشاهده گامای بسیار پرانرژی از یک تیپ-آختر گاما واقع در فاصله‌ای حدود دو میلیون سال نوری که در نهم اکتبر ۲۰۲۲ مشاهده شده است بوده است. انتظار می‌رود که در طی این مسافت فوتون‌های پیش زمینه پرتو گامای پر انرژی را با تولید زوج الکترون-پوزیترون جذب کنند. بنابراین مشاهده چنین فوتون‌های پر انرژی فیزیک جدید می‌طلبد. در مقاله مزبور راهی برای امکان رسیدن چنین فوتون‌هایی از فاصله دو میلیون سال نوری ارائه می‌شود.

از شهریور ۹۶ تا مهر ۹۷، پژوهشکده میزبان کاظم عزیزی بود. در طول این بازدید پر بار، مقالات متعددی در زمینه فیزیک مزون بی و نیز هادرون‌های نامتعارف پنتاکوارک و هگزاکوارک توسط ایشان و همکارانشان منتشر گردید.

همان طور که شرح آن رفت این نوع پژوهش ارتباط تنگاتنگ با محققان در کشورهای گوناگون می‌طلبد چرا که گروه‌های آزمایشی و پدیده‌شناسی در کشورهای گوناگون پراکنده‌اند. بدون چنین ارتباطی، سطح پژوهش در این شاخه پایین می‌آید و در جهت پیشبرد دانش فایده‌ای نخواهد داشت. عضویت در شبکه‌های همکاری گوناگون بین‌المللی نظیر INVISIBLES از سال ۲۰۱۲ تا ۲۰۱۶، شبکه اروپایی ELUSIVES از سال ۲۰۱۶ تا ۲۰۲۰ و از سال ۲۰۲۰ تاکنون شبکه اروپایی Hidden این امر را تسهیل نموده است. بودجه این شبکه‌ها از طریق اتحادیه اروپا تأمین می‌شود. عضویت آی-پی-ام در آنها تنها به اعتبار علمی گروه پدیده‌شناسی پژوهشکده متکی است و بار مالی برای پژوهشگاه ندارد.