

یکی کردن - تورّم و مادّه ی - تاریک به کمک - نوترینوها

روزبه اللهوردی

Dept. of Physics and Astronomy, Univ. of New Mexico, Albuquerque, NM 87131, USA

این مقاله مروری است بر کوشش‌ها ی اخیر برا ی توضیح - تورّم و مادّه ی - تاریک بر اساس - گسترش‌ها ی - ابرمتقارن - مدل - استاندارد - ذره‌ها ی - بنیادی .

فهم - منشاء - میکروسکپیک - تورّم و مادّه ی - تاریک، مسئله ی - مهم ی در مرز - کیهان‌شناسی و فیزیک - ذرات است . برا ی حلّ مسئله‌ها ی - تخت بودن - فضا، هم‌سان‌گرد بودن - انبساط - کیهان، و تولید - بذرها ی - تشکیل - ساختار در کیهان‌شناخت - مهبانگی، پارادایم - غالب تورّم است [1]. تا امروز آزمایش‌ها با ساده‌ترین پیش‌بینی‌ها ی - تورّم می‌خوانند: یک طیف - تقریباً مقیاس‌ناوردا ی - اُفت‌وخیزها ی - گاؤسی و بی‌درروی - اولیّه که در ناهم‌سان‌گردی ی - دما ی - تابش - زمینه ی - کیهانی (CMB) ^(a) نقش بسته است [2]. هم‌چنین، مشاهده‌ها ی - مختلف ی دلالت بر این دارند که بیش‌تر - مادّه ای که در جهان هست نمی‌درخشد . امروز تقریباً 85% مادّه ی - موجود در جهان تاریک و ناباریونی است [2]، که اصطلاحاً آن را مادّه ی - تاریک - سرد (CDM) ^(b) می‌نامند . مادّه ی - تاریک چاه پتانسیل - گرانشی ی - لازم برا ی - سقوط - باریونها را فراهم می‌آورد (پس از آن که از پلاسما ی - اولیّه جدا شدند). به این ترتیب است که در جهان ساختار (کهکشانی، خوشه‌ها ی - کهکشانی، و غیره) تشکیل می‌شود .

در کیهان‌شناسی یک میدان - نرده‌ای، به نام - اینفلاتون ^(c)، مسئول - بروز - یک دوره ی - انبساط - فرانوری است . گنجاندن - تورّم در چارچوب - فیزیک - ذرات، یعنی یکی کردن - اینفلاتون با یک ی از میدان‌ها ی - نرده‌ای ای که در مدل‌ها ی - موفق - ذرات - بنیادی هست، هنوز یک مشکل - حل نشده است . در تقریباً تمام - مدل‌ها ی - که تا کنون ارائه شده است [3]، اینفلاتون به صورت - یک میدان - نرده‌ای، که با تبدیل‌ها ی - پیمانه‌ای هم عوض نمی‌شود، با دست وارد - نظریّه می‌شود، و برا ی - وجود اش هیچ علت ی جز به دست آوردن - تورّم نیست . تصوّر - میدان ی که هیچ جای‌گاه - طبیعی ای در فیزیک - ذرات ندارد جذّاب نیست . به علاوه، جفت کردن - میدان ی که با تبدیل‌ها ی - پیمانه‌ای عوض نمی‌شود به مادّه چیزی نیست که آن را بتوان از اصول - تقارنی نتیجه گرفت، و بنا بر این این جفت کردن کاملاً دل‌بخواه است . در این حالت خلق - مادّه پس از دوره ی - تورّم، که به نحو ی اساسی به این جفت‌شدن‌ها وابسته است، معلوم نیست که چه‌گونه روی می‌دهد .

در مورد ماده‌ی تاریک وضعیت به‌تر است. در گسترش‌ها ی مدل استاندارد فیزیک ذرات نام‌زدها ی امیددهنده ای برای ماده‌ی تاریک هست [4]. ساده‌ترین گسترش ابرتقارنی ی مدل استاندارد (MSSM)^(d) از این نظر به خصوص موفق است [5]. تعداد درجه‌ها ی آزادی در این مدل دو برابر مدل استاندارد (بدون ابرتقارن) است، به این ترتیب که هر کوارک و لپتون یک هم‌زاد اسپین-0 دارد که آن‌ها را اسکوارک و اسلپتون می‌نامند؛ و هر میدان پیمانه‌ای و میدان هیگزیک هم‌زاد اسپین-1/2 دارد که آن‌ها را به ترتیب گیجینو و هیگزینو می‌نامند [6]. تصوّر بر این است که هم‌زادها ی ابرمتقارن میدان‌ها ی مدل استاندارد جرم‌ها یی در گستره ی 100 GeV تا 1 TeV دارند. یک تقارن گسسته که R هم‌پایه‌گی نام دارد تضمین می‌کند که سبک‌ترین ذره ی ابرمتقارن (LSP)^(e) پای‌دار است. اگر LSP یک نوترالینو، یعنی سبک‌ترین میدان در میان گیجینوها و هیگزینوها یی که فقط برهم‌کنش ضعیف دارند باشد، آن وقت نامزد ی طبیعی برای ماده‌ی تاریک سرد خواهد بود. در موارد ی که انگیزه‌ها ی خوب ی برای مطالعه هست، بخش‌ها یی از فضا ی پارامترها ی نظریه که چگالی ی LSP ی باقی‌مانده از مه‌بانگ را به درستی پیش‌بینی می‌کنند (تا LSP ماده‌ی تاریک سرد شمرده شود) تعیین شده است [7]. در برخورددهنده‌ها ی ذرات، LSP نقطه ی پایان و اپاشی ی ذره‌ها ی ابرمتقارن است، و به صورت یک انرژی ی گم‌شده خود را نشان می‌دهد. این که آیا می‌توان در برخورددهنده‌ها ی آینده، به خصوص در برخورددهنده ی بزرگ هادرونی^(f) (LHC)، این بخش از فضای پارامترها را دید از موضوع‌ها ی جالب پژوهشی است [8].

اخیراً در زمینه ی گنجاندن تورّم در MSSM هم پیش‌رفت‌ها یی حاصل شده است [9]. معلوم شده که پتانسیل نده‌ای در راستاها ی خاصّی از میدان‌ها ی اسلپتون و اسکوارک می‌تواند آن قدر تخت باشد که موجب تورّم بشود. بنا بر این می‌توان اینفلاتون را ترکیب ی از میدان‌ها ی اسلپتون و اسکوارک گرفت، و نه میدان ی مستقل که با دست وارد نظریه شده باشد. به علاوه، فضا ی پارامترها یی که برای تورّم موفق است، و فضا ی پارامترها ی مدل ی که می‌گوید نوترالینو همان ماده‌ی تاریک سرد است، با هم سازگار اند [10]. چون جفت شدن اینفلاتون با ماده درست همان جفت شدن‌ها ی پیمانه‌ای ی و یوکاوا ی مدل استاندارد است، خلق ماده پس از تورّم تضمین شده است، و می‌توان آن را به نحو مطمئنّی بررسی کرد [11]. و به این ترتیب نخستین مثال از یک مدل تورّمی داریم که می‌توان آن را در آزمایش‌ها یی روی زمین آزمود. ویژه‌گی‌ها ی چنین اینفلاتون ی را می‌توان در LHC، یا یک برخورددهنده ی خطّی ی بین‌المللی ی آینده کاوید.

سؤال ی که به ذهن می‌رسد این است که آیا نمی‌توان یک گام پیش رفت و مدل ی براساس MSSM یافت که اینفلاتون و ماده‌ی تاریک را یکی بکند؟ چنین سناریو یی از این نظر جذاب است که به نحو ی صرفه‌جویانه دو راز را بر یک اساس می‌گشاید. به علاوه، اگر اینفلاتون همان ماده‌ی تاریک باشد، آن وقت هاله ی کهکشان ما (و دیگر کهکشان‌ها) پر از اینفلاتون خواهد بود. و به این ترتیب

آشکارسازی ی- مستقیم- ماده ی- تاریک (درپس زنی ی- هسته در پراکنده گی ی- ذره ها ی- تاریک) و آشکارسازی ی- غیرمستقیم- آن (در پرتوها ی- گاما ی- پخش ی- نتیجه ی- واپاشی ی- ماده ی- تاریک اند) اطلاعات ی در مورد- اینفلاتون خواهد داد، ذره ای که به نظر می رسد گریزپایترین ذره جهان است. اخیراً یک سناریو ی- کارآمد با موفقیت اینفلاتون و ماده ی- تاریک را در چارچوب- مدل- استاندارد- ذرات- بنیادی یکی کرده است [12].

چون اینفلاتون نرده ای است، این سناریو مستلزم- آن است که LSP هم نرده ای باشد. در MSSM، تنها نامزد- نرده ای ی- ممکن (یعنی فقط با برهم کنش- ضعیف)، هم زاد- ابرمتقارن- نوترینوها ی- چپ دست است؛ اینها- اینوترینوها ی- چپ دست نامیده می شوند. اما، از جست و جوها ی- مستقیم چنین نتیجه شده است که اینوترینوها ی- چپ گرد نامزد- مناسب ی برای- ماده ی- تاریک نیستند. در MSSM، برای- آن که جرمها و مخلوط شدن ها ی- نوترینوها را توضیح بدهیم معمولاً نوترینوها ی- راست دست هم در نظر می گیریم. هم زاده ها ی- ابرمتقارن- اینها- اینوترینوها ی- راست دست اند، و اینها نام زده ها ی- قابل قبول ی برای- ماده ی- تاریک هستند. یک تعمیم- کمینه ی- MSSM که شامل- نوترینوها و اینوترینوها ی- راست گرد هم هست، با توسل به یک تقارن- پیمانه ای ی- دیگر- $U(1)$ به دست آمده است. این تقارن متناظر است با اختلاف- بین- عددها ی- باربونی و لپتونی. چنین تقارن ی به نحو ی طبیعی در بسیاری از تعمیمها ی- مدل- استاندارد دیده می شوند، و شرط- حذف شدن- نابهنجاریها این قید را می گذارد که سه نوترینو و سه اینوترینو وجود داشته باشد. اینوترینوها ی- راست گرد فقط بار- این $U(1)$ دارند، و بنا بر این کوچکترین تصحیحها ی- کوانتمی ی- ناشی از برهم کنشها ی- پیمانه ای را می گیرند. بنا بر این، خیل ی طبیعی است که سبکترین اینوترینو ی- راست گرد همان LSP باشد. اگر این تقارن- $U(1)$ در انرژیها ی- حدود- TeV بشکند، فراوانی ی- اینوترینوها ی- باقی مانده آن قدر هست که ماده ی- تاریک را توضیح دهد؛ و در عین- حال با کاوشها ی- تواترون^[8] در مورد- بوزونها ی- پیمانه ای ی- جدید هم سازگار باشد. به علاوه، این را هم تضمین می کند که نوترینوها ی- راست گرد خیل ی زود از پلاسما ی- اولیه جدا شوند تا تأثیر ی بر هسته زایی ی- مه بانگ (BBN) نگذارند.

یک نکته ی- خیل ی جالب این است که اگر این نوترینوها سرشت- دیراکی داشته باشند (یعنی پادنوترینو همان نوترینو نباشد)، آن وقت ترکیب ی از هیگز، اینوترینو ی- چپ گرد، و اینوترینو ی- راست گرد می تواند نقش- اینفلاتون را بازی کند [13] را هم ببینید). این ترکیب- خاص، که راستا ی- D - تخت نامیده می شود، متناظر است با میانگین- سه میدان- نرده ای. این راستا را شرط- تخت بودن- پتانسیل در مدلها ی- ابرمتقارن تحمیل می کند، و تخت بودن- پتانسیل لازمه ی- توژم است. توژم در نزدیکی ی- نقطه ی- خمیده گی ی- پتانسیل در این راستا روی می دهد (نقطه ای که در آن مشتق دوّم پتانسیل صفر است). چون پتانسیل در نزدیکی ی- این نقطه بسیار تخت است، توژم برای-

مدت ی طولانی ادامه می‌یابد! آن قدر طولانی که مشکل افق و مشکل تخت بودن فضا حل شود، و اُفت‌وخیزهای، از مرتبه ی 10^{-5} ، که در تابش زمینه ی کیهانی دیده شده است تولید شود. تولید اُفت‌وخیزهای با اندازه ی مناسب، عمیقاً به مقیاس جرم مشاهده شده در نوسان نوترینوها ی جو ی از مرتبه ی بزرگی ی 0.1 eV ، که توسط اَبَرکامیوکانده ^(h) آشکار شده، وابسته است.

با پایان یافتن توژم، اینفلاتون شروع به نوسان حول مبدا می‌کند. چون هر سه مؤلفه ی اینفلاتون برهم‌کنش‌ها ی پیمانه‌ای دارند، به میدان‌ها ی پیمانه‌ای و هم‌زادها ی ابرمتقارن آن‌ها جفت شده اند. بنا بر این نوسان‌ها ی مقدار چشم‌داشتی ی خلاء اینفلاتون جرم‌های وابسته به زمان به میدان‌ها ی پیمانه‌ای و هم‌زادها ی ابرمتقارن آن‌ها می‌دهد. این جرم‌ها هر بار که اینفلاتون مبدا را قطع کند [صفر شود] به نحو ی نابی در رو تغییر می‌کنند. این باعث می‌شود در هر چنین نوسان ی ذره‌ها ی پیمانه‌ای و هم‌زادها ی ابرمتقارن آن‌ها به نحو ی نااختلالی تولید شوند، این ذره‌ها سپس به ذره‌ها ی پرنرژی و می‌پاشند. کل فرآیند بسیار سریع روی می‌دهد، و باعث می‌شود حتماً ی گرمایی با دمای بسیار بیش از 10^{16} K (به وجود آید. همه ی میدان‌ها ی MSSM، به علاوه ی نوترینوها و اِسوترینوها ی راست‌گرد، در تعادل با این حتماً گرمایی وجود دارند. باید توجه کنیم که مؤلفه ی اِسوترینو ی راست‌گرد اینفلاتون و پاشی نکرده است: در ابتدا مؤلفه ی کوانتم‌ها ی وجه صفر اش بخش ی از چگاله ی بوزه - اینشتین بود (چگاله ی اینفلاتون)، در حال ی که پس از بازگرمایش کوانتم‌ها پیش با بقیه ی حتماً گرمایی در تعادل اند. با انبساط جهان، دما ی جهان کم می‌شود. وقت ی دما کم‌تر از جرم سکون اِسوترینوها ی راست‌گرد شد، این ذره‌ها غیرنسبیتی می‌شوند. سپس به علت برهم‌کنش‌ها ی $U(1)$ جدید به فرمیون‌ها ی مدل استاندارد وا می‌پاشند. این فرآیند تا مدت ی ادامه می‌یابد و باعث می‌شود اِسوترینوها ی هنوز هم توزیع گرمایی داشته باشند (که البته وزن بُلتسمان گونه‌ها ی غیرنسبیتی اش کم است). اما، آهنگ نابودی سرانجام کم‌تر از آهنگ انبساط نمایی ی کیهان می‌شود، که این نتیجه ی کاهش نمایی ی چگالی ی اِسوترینوها ی راست‌گرد است - چیزی که انجماد گرمایی نامیده می‌شود. بنا بر این چگالی ی عددی ی هم‌راه اِسوترینوها ی راست‌گرد ثابت می‌ماند (چگالی ی عددی ی هم‌راه یعنی تعداد در واحد حجم مختصاتی). چگالی ای که می‌ماند ماده ی تاریک سرد در جهان را توضیح می‌دهد.

این سناریو را می‌توان با آزمایش‌ها ی متعدد زمینی یا فضایی آزمود. سطح مقطع برهم‌کنش‌ها یی که منجر به آشکارسازی می‌شوند نوعاً از مرتبه ای است که با آزمایش‌ها ی نسل آینده ی کاوش‌ها ی مستقیم ماده ی تاریک در دسترس است. هم‌چنین، نابودی ی اِسوترینوها ی راست‌گرد در حاله ی کهنکشان ما ممکن است منجر به تابش گاما بشود، تابش ی که در مأموریت GLAST ⁽ⁱ⁾ (که قرار است در بهار 2008 پرتاب شود) دیده شود. در این سناریو، جرم اینفلاتون (که ناهم‌سان‌گردی ی تابش زمینه ی کیهانی آن را محدود می‌کند) و جرم اِسوترینو ی راست‌گرد (که

ماده‌ی تاریک را تشکیل می‌دهد) به هم وابسته اند. این دو با هم، جرم‌ها‌ی اسکوارک‌ها و گلوینوها را، از طریق معادله‌ها‌ی گروه‌بازبهنجارش، به هم مربوط می‌کنند. شاید LHC بتواند رابطه‌ی بین این جرم‌ها را بررسی کند. به علاوه، اگر LHC بتواند اسپین کوچک‌ترین ذره‌ی پادمقارن (LSP) را بسنجد، می‌تواند اِسنوترینو (با اسپین 0) و نوترالینو (با اسپین 1/2) را تمیز بدهد. سرانجام، آزمایش‌ها‌ی واپاشی‌ی بی‌نوترینو‌ی دوتایی، که نسل جدیدی از آن‌ها با دقت‌ها‌ی بسیار زیاد در راه است، در ارزیابی‌ی این سناریوها نقش بسیار مهمی دارند: این آزمایش‌ها تعیین خواهند کرد که نوترینوها ذره‌ها‌ی دیراکی اند یا مایورانایی.

نکته‌ی بسیار جالب این است که همه‌ی این‌ها را می‌توان با اینفلاتون‌ی که چیزی نیست جز برهم‌نهی‌ی چند میدان MSSM توضیح داد. این ترکیب خاص منجر به تورم‌ی موفق می‌شود. مؤلفه‌ی اِسنوترینو‌ی راست‌گرد آن مسئول ماده‌ی تاریک است، مؤلفه‌ی هیگز آن مسئول جرم‌دار شدن میدان‌ها، و بخش اِسنوترینو‌ی چپ‌گرد آن هم هم‌زاد ابرمقارن نوترینوها‌ی سبک است.

مرجع‌ها

1. For a review, see: A. D. Linde, "Particle physics and inflationary cosmology", [arXiv:hep-th/0503203](https://arxiv.org/abs/hep-th/0503203).
2. E. Komatsu, *et al.*, "Five-Year Wilkinson Microwave Anisotropy Probe (WMAP) Observations: Cosmological Interpretation" [arXiv:0803.0732](https://arxiv.org/abs/0803.0732).
3. D. H. Lyth, A. Riotto, "Particle physics models of inflation and the cosmological density perturbations", *Physics Reports*, vol. 314, p. 1 (1999).
4. For example, see: G. Bertone, D. Hooper, J. Silk, "Particle dark matter: Evidence, candidates and constraints", *Physics Reports*, vol. 405, p. 279 (2005).
5. For a review, see: G. Jungman, M. Kamionkowski, K. Griest, "Supersymmetric dark matter", *Physics Reports*, vol. 267, p. 195 (1996).
6. For a review, see: H. P. Nilles, "Supersymmetry, Supergravity and Particle Physics", *Physics Reports*, vol. 110, p. 1 (1984).
7. R. Arnowitt, B. Dutta, T. Kamon, N. Kolev, D. Toback, "Detection of SUSY in the stau-neutralino coannihilation regime at the LHC", *Physics Letters*, vol. B 639, p. 46 (2006).

8. R. Arnowitt, B. Dutta, A. Gurrola, T. Kamon, A. Krislock, D. Toback, “Determining the Dark Matter Relic Density in the m-SUGRA neutralino-stau Co-Annihilation Region at the LHC”, [arXiv:0802.2968](https://arxiv.org/abs/0802.2968).
9. R. Allahverdi, K. Enqvist, J. Garcia-Bellido, A. Mazumdar, “Gauge-invariant inflaton in the minimal supersymmetric standard model”, *Physical Review Letters*, vol. 97, 191304 (2006).
10. R. Allahverdi, B. Dutta, A. Mazumdar, “Probing the parameter space for an MSSM inflation and neutralino dark matter”, *Physical Review D*, vol. 75, 075018 (2007).
11. R. Allahverdi, K. Enqvist, J. Garcia-Bellido, A. Jokinen, A. Mazumdar, “MSSM flat direction inflation: slow roll, stability, fine tuning and reheating”, *Journal of Cosmology and Astroparticle Physics* Jun 2007, article 019.
12. R. Allahverdi, B. Dutta, A. Mazumdar, “Unifying inflation and dark matter with neutrino masses”, *Physical Review Letters*, vol. 99, 261301 (2007).
13. R. Allahverdi, A. Kusenko, A. Mazumdar, “A-term inflation and the smallness of the neutrino masses”, *Journal of Cosmology and Astroparticle Physics* Jul 2007, article 018.

نام‌های خاص

- a) Cosmic Microwave Background, b) Cold Dark Matter, c) inflaton,
- d) Minimal Supersymmetric Standard Model, e) Lightest Supersymmetric Particle,
- f) Large Hadron Collider (<http://lhc.web.cern.ch/lhc/>),
- g) Tevatron (<http://www-bdnew.fnal.gov/tevatron/>),
- h) Super-Kamiokande (<http://www-sk.icrr.u-tokyo.ac.jp/sk/index-e.html>),
- i) GLAST: The Gamma Ray Large Area Space Telescope (<http://glast.gsfc.nasa.gov/>)