مجلهٔ پژوهش فیزیک ایران، جلد ۲۰، شمارهٔ ۴، زمستان ۱۳۹۹
DOI: 10.47176/ijpr.20.4.71099

CC BY NC

شبیه‌سازی امکان آشکارسازی پرتوهای گامای گسیل شده از سحابی خرچنگ توسط آرایهٔ البرز-۱

یوسف پزشکیان[۱و۲] و امیر لاله طاهری[۳]

۱. گروه فیزیک، دانشگاه صنعتی سهند، تبریز
۲. رصدخانهٔ البرز، دانشگاه صنعتی شریف، تهران
۳. گروه فیزیک، دانشگاه زنجان، زنجان

پست الکترونیکی: pezeshkian@sut.ac.ir

(دریافت مقاله: ۱۳۹۹/۰۵/۰۵ ؛ دریافت نسخهٔ نهایی: ۱۳۹۹/۰۷/۲۹)

چکیده

سحابی خرچنگ با توجه به فعال بودن در ناحیهٔ پرتوهای گامای پرانرژی، به عنوان یک چشمهٔ استاندارد برای مدرج کردن رصدخانه‌ها و تلسکوپ‌های مختلف پرتوهای گاما به کار می‌رود. با توجه به این که انرژی پرتوهای گامای گسیل شده از سحابی خرچنگ تا مَقادیر بالاتر از ۱۰۰ TeV گزارش شده است، امکان آشکارسازی پرتوهای گامای گسیلی از این سحابی توسط آرایهٔ مناسبی از آشکارسازهای زمینی وجود دارد. آرایهٔ البرز-۱ برای آشکارسازی پرتوهای کیهانی در ناحیهٔ اطراف زانوی طیف پرتوها طراحی شده است. در این مقاله با شبیه‌سازی پرتوهای گاما با توجه به چیدمان و موقعیت جغرافیایی آرایهٔ البرز-۱، نشان می‌دهیم که آشکارسازی پرتوهای گامای سحابی خرچنگ در بازهٔ زمانی معقول چند سال منتفی است. شبیه‌سازی حاضر نشان می‌دهد داده‌گیری متوالی به مدت ۲ سال نرخ متوسط ثبت رخداد کمی بیشتر از ۱ ذره خواهد شد، که تفکیک آن از پس‌زمینهٔ پرتوهای کیهانی بسیار مشکل است. در نهایت پیشنهادهایی برای راه‌اندازی آرایه‌ای با قابلیت آشکارسازی پرتو گامای سحابی خرچنگ ارائه شده است.

واژه‌های کلیدی: پرتوهای کیهانی، سحابی خرچنگ، رصدخانهٔ البرز، نجوم پرتو گاما

۱. مقدمه

سحابی خرچنگ از قدیمی‌ترین اجرام شناخته شدهٔ آسمان است و اهمیت ویژه‌ای در نجوم رصدی دارد. این سحابی یک چشمهٔ فعال نزدیک به زمین است که سیگنال‌هایی در طول موج‌های مختلف گسیل می‌کند. ویژگی‌های منحصر به فرد سحابی خرچنگ آن را به مرجعی استاندارد برای مدرج کردنِ تلسکوپ‌های چرنکف و رصدخانه‌های زمینیِ پرتو گاما تبدیل کرده است [۱]. در اواخر قرن ۲۰ گروه کانگارو[۱] رصد پرتوهای گاما با انرژی بیش از ۵۰ TeV توسط سحابی خرچنگ را

۱. CANGAROO

گزارش کردند [۲]. تلسکوپ‌های هگرا[۱] در سال ۲۰۰۴ م. رصد پرتوهای گاما با انرژی ۸۰ TeV را گزارش کردند [۳]. در ۲۰۱۹ م. گروه تبت[۲]، ثبت ۲۵ رخداد فوتون‌گونه با انرژی بالای ۱۰۰ TeV را از سحابی خرچنگ گزارش کردند که با دقت آماری $5/6\sigma$ از پس زمینهٔ پرتوهای کیهانی تفکیک می‌شد [۴]. پرتوهای گاما با انرژی‌هایی از این مرتبه می‌توانند بهمن‌های هوایی قابل آشکارسازی توسط آرایه‌های آشکارسازهای ذرات در سطح زمین تولید کنند.

آرایهٔ البرز–۱ که قرار است در دانشگاه صنعتی شریف راه‌اندازی شود، متشکل از ۲۰ آشکارساز سوسوزن با ابعاد cm^2 ۵۰×۵۰ است که به‌منظور مطالعهٔ پرتوهای کیهانی در ناحیهٔ پایینِ زانویِ طیف طراحی شده است [۵]. در این مقاله امکان آشکارسازی پرتوهای گامای گسیل‌شده از سحابی خرچنگ توسط آرایهٔالبرز–۱ را بررسی می‌کنیم.

۲. شبیه‌سازی و نتایج آن

سحابی خرچنگ مدت محدودی از سال در مختصات قابل رصد در آسمان تهران قرار می‌گیرد. بنابراین لازم است مدت زمان و زاویهٔ سرسویی خرچنگ را در آسمان تهران استخراج کنیم. برای این منظور از نرم‌افزار *Starry Night Pro ۶*، استفاده کرده و اطلاعات رصدی خرچنگ را برای دو سال متوالی ۲۰۱۷ م. و ۲۰۱۸ م. استخراج کرده‌ایم. با توجه به این که آرایه‌های آشکارسازهای ذرات دوره فعالیت[۳] ۲۴ ساعتی دارند، فرقی بین روز و شب وجود ندارد و برخلاف تلسکوپ‌های نوری لازم نیست بازه‌های مربوط به روز و شب‌هایی که ماه در آسمان روشن است را حذف کنیم. همچنین باید با استفاده از شار پرتوهای گامای گسیلی از سحابی خرچنگ، تعداد پرتوهای گامایی را که در واحد زمان به واحد سطح زمین می‌رسند، محاسبه کنیم. در این شبیه‌سازی پرتوهای گاما توسط برنامهٔ کورسیکا [۶] نسخهٔ ۷/۴۰۰۰ تولید شده‌اند. مدل‌های برهم‌کنش هادرونی در هنگام نصب به‌صورت پیش‌فرض یعنی QGSJETII برای انرژی‌های بالا و GHEISHA برای انرژی‌های پایین انتخاب شده‌اند. انرژی پرتوهای گاما در بازه ۱ TeV تا ۹۰ TeV با فاصله‌های انرژی ۱۰ TeV انتخاب شده‌اند و در هر انرژی ۵۰۰ ذره و در بعضی از انرژی‌ها ۱۰۰۰ ذرهٔ گاما شبیه‌سازی شده‌اند. از سوی دیگر لازم است محاسبه شود که چند درصد از گاماهایی که به سطح آرایه می‌رسند آشکار خواهند شد. برای این منظور کد نویسی مستقلی به زبان فرترن صورت گرفته است که با تحلیل داده‌های کورسیکا احتمال آشکارسازی برای هر نقطه از آرایه در واحد زمان در واحد سطح را محاسبه می‌کند. با توجه به این که خرچنگ در این دو سال در تهران در زوایای کمتر از ۱۳ درجه رصد نمی‌شود، و در زوایای بالاتر از ۳۰ درجه هم احتمال آشکارسازی به صفر میل می‌کند، شبیه‌سازی کورسیکا را برای زوایای ۱۰ تا ۴۵ درجه با فواصل ۵ درجه تکرار کرده‌ایم (یعنی ۷ بازهٔ مختلف).

با در کنار هم قرار دادن نتایج حاصل از اقدامات توضیح داده‌شده، می‌توان به دست آورد که در دو سال (۲۰۱۷ و ۲۰۱۸)، چه تعداد پرتو گاما (در تمام زاویه‌ها و در تمام انرژی‌ها) توسط آرایهٔ البرز–۱ آشکار خواهد شد. در نهایت باید تعداد پرتوهای کیهانی پس‌زمینه (هسته‌های باردار) که ممکن است با پرتو گامای خرچنگ اشتباه گرفته شوند، محاسبه شود. برای این منظور از نتیجهٔ کارهای قبلی خود [۵] استفاده کرده‌ایم. بدین ترتیب معلوم خواهد شد که آیا امکان تفکیک پرتوهای گامای خرچنگ از پرتوهای کیهانی پس‌زمینه وجود دارد یا نه؟

در این مطالعه برای به دست آوردن شار پرتوهای کیهانی در سطح زمین از رابطه‌ای که توسط گروه تبت ارائه شده است، استفاده کرده‌ایم [۴]. طبق این مقاله، شار پرتوهای گامای خرچنگ با رابطهٔ (۱) منطبق است.

$$I(E)=(1/49\pm0/09)\times10^{-15}\left(\frac{E}{4_0\ TeV}\right)^{-2/91\pm0/04},\ TeV^{-1}cm^{-2}s^{-1} \quad (۱)$$

اگر واحد سطح را منطبق بر کارهای قبلی گروه پرتوهای کیهانی دانشگاه شریف [۷] $7\times7\ m^2$ بگیریم و مدت زمان رصد را یک ساعت و بازهٔ انرژی را هم $\Delta E=10\ TeV$ بگیریم، تعداد

۱. HEGRA

۲. Tibet ASγ Collaboration

۳. Duty cycle

پرتوهای گامایی که در هر ساعت بر واحد انرژی به واحد سطح آرایه می‌رسد برابر خواهد بود با:

$$\frac{dN}{dE}(E,E+\Delta E)=I(E)\times A\left(۴۹m^{۲}\times ۱۰۰۰۰\frac{cm^{۲}}{m^{۲}}\right)\times t\left(۱h\times\frac{۳۶۰۰s}{۱h}\right)=۱/۷۶۴\times۱۰^{۹}\times I(E), \quad (۲)$$

امکان آشکارسازی بخش اعظم پرتوهای گامایی که به سطح مشخص از آرایه می‌رسند، وجود ندارد. برای این که تشخیص بدهیم چه درصدی از پرتوهای گامای واردشده به سطح مشخص، توسط آرایهٔ البرز-۱ آشکارسازی خواهند شد، لازم است به سراغ شبیه‌سازی برویم. با توجه به این که تعداد بهمن‌های حاصل از پرتوهای گامایی که به سطح مشخصی از آرایه می‌رسند در انرژی‌های مختلف متفاوت است (طبق رابطهٔ ۱ شار فرودی به انرژی وابسته است) در نتیجه لازم است شبیه‌سازی در انرژی‌های مختلف انجام شود.

کد نوشته شده مشخص می‌کند که بهمنِ هوایی حاصل از پرتو گامایی که وارد جو زمین می‌شود و به طرف آرایه حرکت می‌کند، آیا شرط آشکارسازی را برآورده می‌کند یا نه؟ به عبارت دیگر آیا این پرتو گاما آشکار می‌شود یا نه؟ شرط آشکارسازی یا آن طور که متداول است شرط راه‌اندازی آرایه، این است که ۵ آشکارساز مرکزی آرایهٔ البرز-۱ به طور هم‌زمان عبور ذرات را گزارش کنند. برای درک فرایند شبیه‌سازی، یک انرژیِ مشخص مثلاً ۷۰ TeV را توضیح می‌دهیم، فرایند کار برای سایر انرژی‌ها هم مشابه خواهد بود.

گام ۱: در انرژی ۷۰ TeV، با استفاده از کد *کورسیکا*، ۱۰۰۰ بهمنِ گاما در زاویهٔ سرسویی بین ۱۳ تا ۳۵ درجه‌ای شبیه‌سازی شده است (خرچنگ در تهران در ۲۰۱۷ در زاویهٔ سرسویی کمتر از ۱۳ درجه رصد نمی‌شود، در زوایای بالاتر از ۳۵ درجه هم احتمال آشکارسازی به صفر میل می‌کند).

گام ۲: سطح زمین در محل آرایه به مربع‌هایی با ابعاد $۷\times۷\ m^{۲}$ تقسیم می‌شود. مربع مرکزی منطبق بر مرکز آرایه است و تعداد آنها ۲۱ مربع در ۲۱ مربع است.

گام ۳: کد برنامه در هر مربع برای هر یک از ۱۰۰۰ بهمن تولید شده اجرا می‌شود و معلوم می‌شود که چه تعداد از این ۱۰۰۰ بهمن در هر مربع آشکار خواهد شد (برنامه ۳ تا حلقه خواهد داشت: ۱- جاروب در راستای x؛ ۲- جاروب در راستای y و ۳- حلقهٔ مربوط به ۱۰۰۰ گاما). تعداد بهمن‌های آشکار شده در هر مربع در شکل ۱ نشان داده شده است.

اگر تعداد بهمن‌های آشکار شده را تقسیم بر ۱۰۰۰ کنیم، احتمال آشکارسازی در مربع i,j، ($\varepsilon_{i,j}$) به دست خواهد آمد.

اگر احتمال آشکارسازی کل را به صورت $\varepsilon_T=\frac{۱}{۴۴۱}\sum_{i,j=-۱۰}^{۱۰}\varepsilon_{i,j}$ تعریف کنیم (۴۴۱ تعداد پیکسل‌ها یا همان ۲۱×۲۱ ناحیه جاروب است)، ε_T تابعی از انرژی خواهد بود. در شکل ۲، ε_T را برحسب انرژی رسم کرده‌ایم. میله‌های خطا نشان دهندهٔ انحراف معیار میانگین مربوط به احتمال آشکارسازی کل در هر انرژی است. متوسط‌گیری و محاسبهٔ انحراف معیار میانگین با استفاده از نتایج مربوط به ۱۰۰۰ تا بهمن شبیه‌سازی شده (در انرژی‌های ۱۰، ۲۰ و ۳۰ TeV تعداد بهمن‌های شبیه‌سازی شده ۵۰۰ تا بودند) صورت گرفته است. داده‌ها به خوبی به تابع نمایی مرتبهٔ ۲ برازش می‌شوند. رابطهٔ احتمال آشکارسازی کل بر حسب انرژی در رابطهٔ ۳ نشان داده شده است.

$$\varepsilon_T(E/TeV)=\left(۲\times۱۰^{-۶}\right)(E/TeV)^{۲}-(۷\times۱۰^{-۵})(E/TeV)+۰/۰۰۰۷, \quad (۳)$$

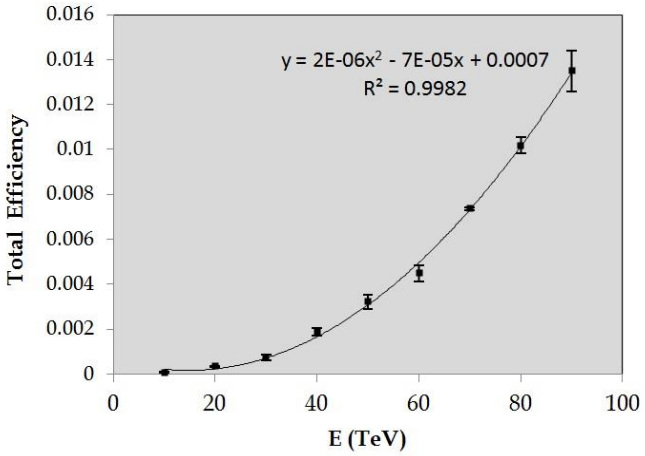
تعداد کل بهمن‌های قابل آشکارسازی در یک مربع برابر خواهد بود با تعداد گاماهای رسیده به سطح مربع ضرب در احتمال آشکارسازی: $\int_{E=۷۰TeV}^{E=۸۰TeV}\varepsilon_{i,j}\frac{dN}{dE}(E)dE$. اگر تعداد بهمن‌های قابل آشکارسازی در تمام مربع‌ها را جمع بزنیم، تعداد کل بهمن‌های قابل آشکارسازی پس از یک ساعت رصدِ مفید[۱]، به دست می‌آید:

$$N^{Simul.}_{Detected}(۷۰<E/TeV<۸۰)=\sum_{i,j=-۱۰}^{۱۰}\int_{۷۰TeV}^{۸۰TeV}\left(\varepsilon_{i,j}(E)\times\frac{dN}{dE}(E)\right)dE=۴۴۱\int_{۷۰TeV}^{۸۰TeV}\varepsilon_T(E)\frac{dN}{dE}(E)dE, \quad (۴)$$

۱. منظور از رصد مفید این است که سحابی خرچنگ در آسمان در زاویهٔ قابل رصد قرار داشته باشد.

0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0
0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	1	0	0	0	2	0	0	0	0	0	0	1
0	0	0	0	0	0	3	0	3	4	1	1	0	3	0	0	1	1	0	0	0	0
0	0	0	0	0	1	1	6	2	3	5	4	5	0	4	1	0	0	1	0	0	0
0	0	1	1	0	2	4	3	7	14	12	10	8	4	5	2	0	0	1	0	0	0
0	0	1	0	1	1	5	11	16	23	40	19	17	7	5	2	2	0	0	0	0	0
0	0	0	1	2	1	7	16	37	58	69	42	30	17	7	3	0	1	0	0	1	0
0	0	1	1	3	2	13	25	63	117	158	102	53	30	15	5	3	3	1	2	0	0
0	0	1	2	3	3	16	29	74	156	292	184	70	23	13	6	1	1	0	0	0	0
1	1	1	0	3	7	10	23	60	113	169	123	60	28	9	6	3	2	0	0	0	0
0	1	0	1	2	6	7	16	40	48	74	59	24	15	4	5	2	0	0	0	0	0
0	0	0	0	1	4	5	14	15	18	33	23	14	13	6	1	3	1	1	0	0	0
0	0	1	0	0	2	3	2	7	9	12	8	10	6	4	1	2	1	0	0	0	0
1	0	0	0	2	1	0	1	4	4	4	3	2	4	1	2	1	1	0	0	0	0
0	0	0	0	0	0	0	2	0	3	2	2	2	1	2	1	1	0	0	0	0	0
0	0	0	0	0	1	1	0	1	1	3	0	1	0	0	0	1	0	0	0	0	0
0	0	0	0	0	0	1	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0

شکل ۱. در هر یک از مربع‌ها ۱۰۰۰ بهمن گاما رسیده است و عدد هر مربع تعداد بهمن‌های آشکارشده را نشان می‌دهد. ابعاد مربع‌ها ۷ در ۷ مترمربع است.



شکل ۲. احتمال آشکارسازی کل به صورت تابعی از انرژی پرتوهای گاما.

این رابطه به ما می‌گوید در انرژی بین ۷۰ تا ۸۰ ترا الکترون ولت، چه تعداد پرتو گاما در یک روز قابل آشکارسازی است. با جایگذاری $\frac{dN}{dE}$ از رابطهٔ ۲ و ε_T از رابطهٔ ۳ در رابطهٔ ۴، و تغییر بازهٔ انتگرال از ۱۰ TeV تا ۹۰ TeV، جمع کل پرتوهای گامایی که در یک ساعت توسط آرایهٔ البرز-۱ آشکارسازی می‌شود، به دست می‌آید.

$$N_{Detected}^{Simul.} = N_{Detected}^{Simul.}{}^{(10<E/TeV<90)} = 1/764\times10^{9}\int_{E=10TeV}^{90TeV}\varepsilon_T(E)\mathrm{I}(E)dE = \quad (5)$$

$$N_{Detected}^{Simul.} = (1/6\pm0/1)\times10^{-4}\ 1/hour,$$

بدین ترتیب با فرض این که احتمال آشکارسازی یک پرتو گاما به زاویهٔ سرسویی وابسته نباشد، اگر آرایهٔ البرز-۱، یک ساعت سحابی خرچنگ را رصد کند، تعداد پرتوهای گامایی که می‌تواند آشکار کند، حدود ۰/۰۰۰۱۶ خواهد شد.

برای این که اثر حساسیت آرایه به زاویهٔ فرود را لحاظ کنیم باید رابطهٔ ۳ را برای زوایا با بازه‌های کوچک‌تر (در اینجا ۵ درجه‌ای) جداگانه به دست آوریم و انتگرال رابطهٔ ۵ را در هر بازه محاسبه کنیم. نتیجهٔ برازش رابطهٔ $\varepsilon_T(E) = aE^2 - bE + c$ برای داده‌های به دست آمده در زوایای مختلف در جدول ۱ ارائه شده است.

گام بعدی این است که مشخص کنیم در سال‌های ۲۰۱۷ و ۲۰۱۸ میلادی، در مجموع چند ساعت می‌توان خرچنگ را در آسمان تهران مشاهده کرد. وضعیت رصد سحابی خرچنگ در شهر تهران با کمک نرم‌افزار *Starry Night Pro ۶*، برای این دو سال استخراج شده و در جدول ۱ نشان داده شده است. با ضرب احتمال آشکارسازی در هر زاویه به تعداد ساعت‌های رصد، تعداد کل گاماهای آشکار شده در هر بازه زاویه به دست می‌آید (ستون آخر جدول ۱). بدین ترتیب شبیه‌سازی ما نشان می‌دهد که اگر تعداد پرتوهای گامای انرژی‌های مختلف را جمع کنیم، درمی‌یابیم که در مجموع در تمام زاویا و در تمام انرژی‌های پس از دو سال به طور متوسط ۱/۱۱±۰/۰۹ پرتو گامای گسیل شده از سحابی خرچنگ توسط آرایهٔ البرز-۱ آشکار خواهد شد[۱].

۳. تفکیک از شار پس‌زمینهٔ پرتوهای کیهانی

شرط لازم برای مشاهدهٔ خرچنگ، علاوه بر آشکارسازی پرتوهای گاما، امکان تفکیک پرتوهای گاما، از پرتوهای کیهانی

۱. اگر حساسیت آرایه به زاویهٔ فرود را در نظر نمی‌گرفتیم و تعداد کل به دست آمده از رابطهٔ ۵، یعنی $1/6\times10^{-4}$ را در تعداد ساعت‌های رصد مفید خرچنگ در دو سال، یعنی ۳۴۷۸ ضرب می‌کردیم به ۰/۵۷ پرتو گاما در دو سال می‌رسیدیم که تقریباً ۲ برابر کمتر از ۱/۱۱ است.

جدول ۱. پارامترهای به دست آمده برای برازش داده های شبیه‌سازی به تابع $\varepsilon_T(E)$ در ۵ بازهٔ زاویه‌ای رصد سحابی خرچنگ، خطاها مربوط به حد بالا و پایین شار پرتوهای گامای گسیلی از خرچنگ (رابطهٔ ۱) است.

زاویه (درجه)	ضرایب برازش a	b	c	R^2 رگرسیون	$\int_{10TeV}^{90TeV} \varepsilon_T \frac{dN}{dE} dE$ تعداد در هر ساعت	مدت زمان رصد خرچنگ در دو سال متوالی (ساعت)	تعداد گامای آشکار شده در ۲ سال
۱۰–۱۵	۰/۰۰۱۶	−۰/۰۰۱۴	۰/۴۱۵۹	۰/۹۳۸۶	۰/۰۰۰۸۷۶	۶۶۵	۰/۵۸۳(+۰/۰۴۷ −۰/۰۴۵)
۱۵–۲۰	۰/۰۰۲۴	−۰/۱۰۴۱	۱/۲۶۲۲	۰/۹۷۰	۰/۰۰۰۳۶۴	۹۰۱	۰/۳۲۸ (+۰/۰۲۶ −۰/۰۲۵)
۲۰–۲۵	۰/۰۰۰۶	−۰/۰۰۶۲	۰/۰۲۳۳	۰/۹۷۹۸	۰/۰۰۰۱۴۷	۶۸۸	۰/۱۰۱(+۰/۰−۰۰۶۶/۰۰۶۵)
۲۵–۳۰	۰/۰۰۰۴	−۰/۰۱۴۷	۰/۱۵۸	۰/۹۴۴۳	۰/۰۰۰۰۵۷۹	۶۲۱	۰/۰۳۶۰(+۰/۰−۰۰۲۶/۰۰۲۵)
۳۰–۳۵	۰/۰۰۰۲	−۰/۰۰۰۲	۰/۰۵۴۹	۰/۷۴۶۹	۰/۰۰۰۱۱۱	۶۰۳	۰/۰۶۷۲(+۰/۰−۰۰۵۵/۰۰۵۳)
تمام زوایا ۱۰–۳۵							۱/۱۱(+۰/۰−۰۹/۰۹)

زمینه‌ای است که از تمام جهات آسمان وارد جو زمین می‌شوند. محاسبهٔ شار پس‌زمینهٔ پرتوهای کیهانی به شبیه‌سازی‌های مفصل دیگری نیاز دارد، که قبلاً انجام شده است [۵ و ۷]. برای شرط راه‌اندازی ۵ آشکارساز مرکزی، تعداد کل رخدادهای قابل آشکارسازی در یک روز در تمام انرژی‌ها و از تمام جهت آسمان (۰ تا ۶۰ درجه سرسویی)، ۵۸۲۹ رخداد است. اگر فرض کنیم این تعداد به‌طور یکنواخت از تمام زوایای فضایی وارد شده‌اند، تعداد رخداد قابل آشکارسازی از واحد زاویه‌ای فضایی (۱ استرادیان) مساوی خواهد بود با $\frac{۵۸۲۹}{\pi}$. دقت زاویه‌ای آرایه نیز در [۷] گزارش شده است.

با توجه به حدود ۱۰ درجه دقت در اندازه‌گیری زاویهٔ سمتی و حدود ۲ درجه دقت در زاویهٔ سرسویی، دقت در اندازه‌گیری زاویهٔ فضایی مساوی خواهد بود با بنابراین تعداد

$$\Delta\Omega = sin(\theta)\Delta\theta\Delta\varphi \approx \left(sin(۲۰^\circ)\right)\left(۲^\circ\frac{\pi}{۱۸۰}\right)\left(۱۰^\circ\frac{\pi}{۱۸۰}\right) \approx ۰/۰۰۲۱$$

پرتوهای کیهانی که در هر روز ممکن است در همان زاویهٔ سحابی خرچنگ به آرایهٔ البرز−۱ برسند و تشخیص پرتو گاما را مشکل کنند برابر خواهد بود با ۳/۹۰، حال اگر همین عدد را برای سال ۲۰۱۷ و ۲۰۱۸ در نظر بگیریم و در ۱۴۵/۲۹ روزی که سحابی خرچنگ قابل مشاهده است ضرب کنیم خواهد شد ۵۶۶/۶. یعنی نسبت علامت به نوفه (SNR) خواهد شد ۰/۰۰۱۹۶ که عدد بسیار کوچکی است و نشان دهندهٔ آن است که رصد گامای گسیلی از خرچنگ بدون انجام اصلاحات و تغییراتی در آرایهٔ ناممکن است.

۴. نتیجه‌گیری و جمع‌بندی

چندین راه برای بهبود عملکرد آرایه در آشکارسازی پرتوهای گامای سحابی خرچنگ وجود دارد:

۱. اگر الکترونیک اجازهٔ طراحی پیچیده‌تری برای شرط راه‌اندازی بدهد، با همین چیدمان و فاصله نیز می‌توان آمار رخدادها را افزایش داد. مثلاً اگر شرط راه‌اندازی به جای «ثبت ذرهٔ هم‌زمان توسط ۵ آشکارساز مرکزی» باشد، این بود که «هرگاه ۱۰ تا از ۲۰ تا آشکارساز آرایهٔ هم‌زمان عبور ذره‌ای را گزارش دهند (هر ۱۰تایی دلخواه)» قطعاً تعداد رخدادها بسیار بالا می‌رفت. با استناد به جدول ۲ در مقالهٔ [۷] تعداد رخدادها از ۵۸۲۹ در شرط ۵ آشکارساز مرکزی به ۱۹۳۹۵ در شرط ۱۰ تا از ۲۰ تا آشکارساز می‌رسد، یعنی بیش از ۳ برابر افزایش در ثبت رخداد خواهیم داشت.

۲. افزایش تعداد آشکارسازها اگر با تغییر شرط راه‌اندازی همراه باشد می‌تواند مؤثر باشد. مثلاً اگر شرط راه‌اندازی بشود

«هر ۱۰ تایی دلخواه»، و ما به‌جای ۲۰ آشکارساز، ۳۰ آشکارساز داشته باشیم [۸]، رخدادهای گامای بیشتری را ثبت خواهیم کرد.

۳. با انتگرال گیری از رابطهٔ ۲، تعداد فوتون‌های گامایی که در هر ساعت در بازهٔ انرژی ۱ TeV تا ۱۰ TeV به آرایه می‌رسند، مساوی ۱/۴۹۸ به دست می‌آید. به همین ترتیب با انتگرال‌گیری از رابطهٔ ۲ در بازهٔ انرژی ۱۰ TeV تا ۲۰ TeV به عدد ۰/۰۱۳۷ خواهیم رسید. با مقایسهٔ این دو عدد، مشاهده می‌کنیم که تعداد فوتون‌های گامایی که در هر ساعت به آرایه می‌رسند در انرژی ۱ TeV حدود ۲ مرتبهٔ بزرگی بیشتر از تعداد فوتون‌هایی است که با انرژی ۱۰ TeV به آرایه می‌رسند، در حالی‌که راندمان آرایه (احتمال آشکارسازی) در انرژی ۱ TeV مساوی صفر است. با کم کردن فاصلهٔ آشکارسازها از یکدیگر و افزایش چگالی آشکارسازها، می‌توان حساسیت آرایه را به انرژی‌های کمتر افزایش داد. البته لازم است شبیه‌سازی شود تا معلوم شود که در چه فاصله‌ای ما خواهیم توانست در انرژی ۱ TeV پرتو گاما ثبت کنیم.

۴. یک پارامتر مهم دیگر نزدیک بودن آرایه به بیشینهٔ بهمن است. آرایه‌های زمینی را معمولاً در ارتفاع‌های حتی‌الامکان بالا بنا می‌کنند تا به ناحیهٔ بیشینهٔ بهمن نزدیک‌تر باشد. تهران از نظر ارتفاع از سطح دریا مکان مناسبی برای ساخت آرایهٔ آشکارسازهای زمینی نیست. اگر آرایه به دامنه‌های کوه البرز در استان کرج که درواقع قرار بود در آنجا بنا شود (یا هر مکان دیگری با ارتفاع از سطح دریای بالاتر)، منتقل شود با افزایش حساسیت آرایه به پرتوهای گاما مواجه خواهیم شد.

در نهایت باید تأکید داشته باشیم که افزایش آمار رخدادهای گاما به تنهایی کافی نیست، آنچه اهمیت دارد وجود روشی برای تفکیک رخدادهای پرتو گاما از سایر رخدادهای پرتوهای کیهانی است. مهم‌ترین گام برای تفکیک پرتوهای گاما از سایر پرتوهای کیهانی امکان به دست آوردن تابع توزیع ذرات بهمن در سطح زمین است. برای این منظور لازم است، آشکارسازها علاوه بر ثبت زمان، انرژی به جا مانده (که معیاری از تعداد ذرات است) را نیز ثبت کنند.

مراجع

1. S Cui, Y Liu, Y Liu, and X Ma, *Astropart. Phys*. **54** (2014) 86.
2. T Tanimori et al., *Astrophys. J*. **492**, 1 (1998) L33.
3. F Aharonian et al., *Astrophys. J*. **614**, 2 (2004) 897.
4. M Amenomori et al., *Phys. Rev. Lett.* **123**, 5 (2019) 1.
5. Y Pezeshkian, "*Studies related to establishment of an array including 20 scintillation detectors*," PhD Thesis, Sharif University of Technology (2015).
6. D Heck, J Knapp, J N Capdevielle, G Schatz, and T Thouw, "*CORSIKA: a Monte Carlo code to simulate extensive air showers*" (1998).
7. S Abdollahi, M Bahmanabadi, Y Pezeshkian, and S Mortazavi Moghaddam, *Astropart. Phys*. **76** (2016) 1.
8. S Mortazavi Moghaddam, P Khalaj, M Bahmanabadi, D Purmohammad, and S Abdollahi, *Astropart. Phys*. **35**, 12 (2012) 792.