



▲ شکل ۱: در نظریه ریسمان، جواب‌های انرژی بالا و در ابعاد بالاتر (که در بالای تصویر مشاهده می‌کنید) متعلق به جواب‌های چهاربعدی نظریه میدان کوانتومی ۵ هستند (دایره‌های آبی پایین) و جواب‌های بهنجار را تشکیل می‌دهند. به این ناحیه چشم‌انداز می‌گوییم و خارج از این ناحیه را ناحیه مردابی می‌نامیم که ...

# پیش‌بینی‌های کیهان‌شناختی از مرداب نظریه ریسمان

دکتر کامران وفا  
مترجمین: علی رادپی - احمد رضا اعرابی

شد جواب‌هایی که سازگار نیستند در «ناحیه مردابی» قرار دارند. این مرتب‌سازی نظریه میدان کوانتومی، با گرانش، به یک ابزار نظری غیرمنتظره ولی قدرتمند تبدیل شده است که راه‌حل‌های بالقوه‌ای برای مشکلات تنظیم - دقیق<sup>۱</sup> ارائه می‌دهد.

علاوه بر این با نقشه‌برداری از این ناحیه مردابی، نظریه پردازان تئوری ریسمان، توصیف انرژی تاریک و پویایی آغازین جهان را پیش‌بینی کرده‌اند.

## مشکلات تنظیم - دقیق

مشکلاتی که پژوهشگران فیزیک ذرات را به خود مشغول می‌دارد به صورت‌های مختلفی بروز می‌کند. به‌عنوان مثال، مدل استاندارد دوازده بوزون پیمانه‌ای<sup>۲</sup> یا حامل‌های نیرو<sup>۳</sup> دارد که شامل فوتون‌ها<sup>۴</sup>، بوزون‌های برداری ضعیف<sup>۱</sup> و گلوئون‌ها<sup>۵</sup> هستند. اما چرا اندازه این گروه پیمانه‌ای این قدر کوچک است؟ اگر همه گروه‌های پیمانه‌ای از نظر ریاضی امکان‌پذیر باشند و هیچ یک از دیگری محتمل‌تر نباشد، به احتمال زیاد اندازه بسیار بزرگی دارند - تازه اگر بی‌نهایت نباشند. حتی اگر کسی این گروه پیمانه‌ای را بپذیرد باید بتواند توضیح دهد

## اشاره

بیش از یک دهه است که پژوهشگران نظریه ریسمان<sup>۱</sup> تلاش دارند مدل‌های بهنجار<sup>۲</sup> را از بین مجموعه مدل‌های نابهنجار<sup>۳</sup> متمایز نمایند. جالب اینکه تلاش در این دسته‌بندی منجر به پیش‌بینی‌های قابل اندازه‌گیری در مورد انرژی تاریک نیز شده است.

**کلیدواژه‌ها:** نظریه ریسمان، نظریه میدان کوانتومی، مدل استاندارد، انرژی تاریک، نظریه گرانش کوانتومی

مدل استاندارد فیزیک ذرات یک «نظریه میدان کوانتومی» است که به صورت بی‌نظیری برهم‌کنش‌های الکتروضعیف و قوی بین ذرات را تبیین می‌کند. با این حال بسیاری از ابهامات در مورد ورودی‌های مدل باقی مانده است، مانند جرم‌ها و اتصالات دوگانه<sup>۴</sup>، که به نظر می‌رسد دقیقاً را از بین مجموعه‌هایی تقریباً نامتناهی انتخاب شده‌اند. برای توضیح این تنظیم‌های دقیق، پژوهشگران طیف گسترده‌ای از میدان‌های کوانتومی را، که فراتر از مدل استاندارد هستند، بر ساخته‌اند. با این حال کارهای اخیر در نظریه ریسمان نشان‌دهنده این نکته است که بسیاری از جواب‌های به‌دست آمده با تئوری گرانش کوانتومی سازگاری ندارند.

در سال ۲۰۰۵ تلاش برای مشخص کردن شرایطی که مدل‌های میدان کوانتومی باید داشته باشند تا با نظریه گرانش کوانتومی هم سازگار باشند، آغاز و در نتیجه گفته

که جرم‌های مشاهده شده و جفت‌شدگی ذرات در مدل استاندارد از کجا آمده‌اند. به‌طور خاص درک مقدار جرم بوزون هیگز سخت است. اگر محاسبه جرم بوزون هیگز را با در نظر گرفتن تصحیح‌های مختلف نظریه کوانتوم حلقه‌ای<sup>۱۲</sup> انجام دهیم، مقدار به دست آمده باید به جرم پلانک نزدیک باشد:

$$M = \sqrt{\frac{c}{G}} \approx 10^{19} \text{ GeV}$$

که شانزده مرتبه از مقدار مشاهده شده بیشتر است. این اختلاف بزرگ اغلب سلسله‌مراتب یا «اختلاف اندازه و ابعاد»<sup>۱۳</sup> نامیده می‌شود. برای ظاهر نشدن این اصلاحات کوانتومی باید پارامترها را در تئوری به صورت دقیق تنظیم کرد. همین‌گونه، برای توضیح پارامترهای کیهان‌شناختی نظیر انرژی تاریک و عمر جهان این تنظیم دقیق ضروری به نظر می‌رسد.

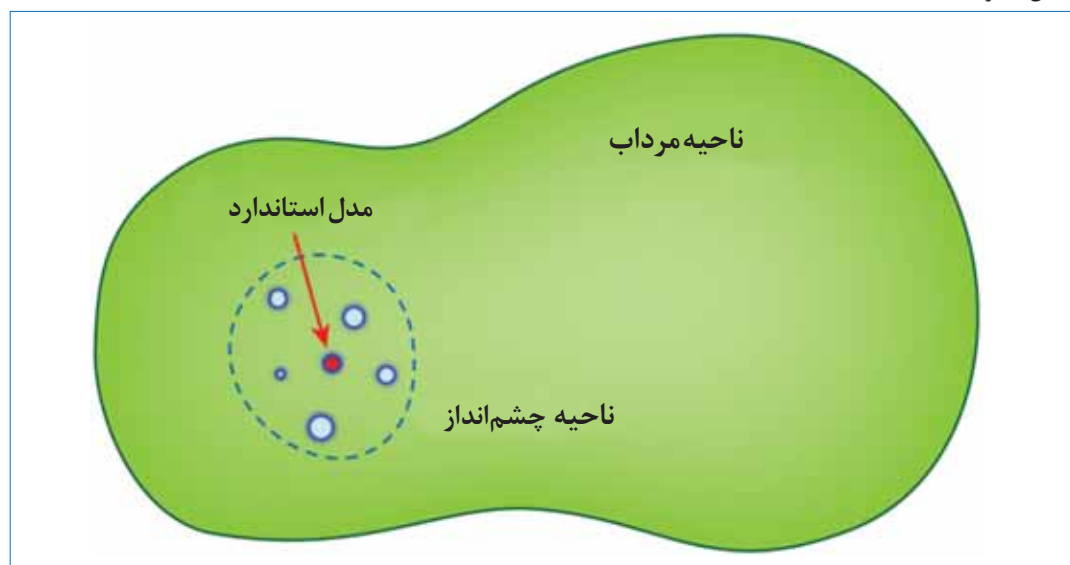
با اجتناب از این تنظیمات - دقیق، پژوهشگران فیزیک ذرات به دنبال نظریات میدان‌های کوانتومی رفتند که گرچه شامل مدل استاندارد است ولی به نوعی از آن فراتر است. به‌عنوان مثال، یکی از ایده‌های ارائه شده برای توضیح کوچک بودن جرم مشاهده شده بوزون هیگز، فرض وجود ذرات ابرمتقارن<sup>۱۴</sup> است، که این امر اصلاحات کوانتومی را که منجر به بزرگ به‌دست آمدن جرم بوزون هیگز شده بود کنار می‌گذارد. اما چشم‌انداز این ذرات ابرمتقارن در بهترین حالت نیز تاریک است و بعید به نظر می‌رسد که با نسل فعلی شتاب‌دهنده‌های ذرات نتیجه‌ای حاصل شود.

منصفانه است بگوییم که با وجود چند دهه تلاش فیزیک‌دانان برجسته، هنوز مدل میدان کوانتومی که مشکلات تنظیم - دقیق را برطرف کرده باشد، یافت نشده است. شاید این عدم موفقیت به این برمی‌گردد که گرانش از مدل‌های جایگزین کنار گذاشته شده است. استدلالی هم که برای این کنار گذاشتن به کار رفته این است که گرانش بین ذرات تنها در انرژی‌های بالا اهمیت پیدا می‌کند. بنابراین با توجه به فیزیک شناخته شده کنونی، مدلی از میدان کوانتومی اهمیت پیدا می‌کند که در انرژی‌های پایین هم با گرانش سازگار باشد. انجام چنین بررسی‌های توأم با گرانش ما را به سمت مدل‌هایی فراتر از مدل استاندارد می‌برد، همان‌گونه که نتایج تحقیقات اخیر نظریه ریسمان - که شگفتی‌ساز هم بوده است - این را نشان می‌دهد.

### جهان ریسمان

نظریه ریسمان مناسب‌ترین جایگزین برای توصیف کوانتم مکانیک گرانشی است. این نظریه در دهه یا یازده بعد تعریف شده است و این بدین معنی است که باید ابعاد اضافی را فشرده نماییم - به‌عنوان مثال با چرخش آن‌ها به دور حلقه‌های کوچک - تا با جهان چهاربعدی ما سازگار باشد. سناریوهای متفاوت فشرده‌سازی، تئوری‌های کوانتومی چهاربعدی با انرژی کم متفاوتی را تولید می‌کنند که در کنار هم ناحیه به اصطلاح چشم‌انداز را تشکیل می‌دهند (شکل ۱). جایی در درون این ناحیه مدل استاندارد میدان کوانتومی با نظریه ریسمان سازگاری دارد. اما ناحیه چشم‌انداز چقدر بزرگ است؟ آیا این ناحیه شامل تمام مدل‌های میدان

با نقشه‌برداری  
از این ناحیه  
مردابی،  
نظریه پردازان  
تئوری  
ریسمان،  
توصیف  
انرژی تاریک  
و پویایی  
آغازین جهان  
را پیش‌بینی  
کرده‌اند



▲ شکل ۲: نمودار ون، وضعیت ناحیه مردابی و قسمت چشم‌انداز را نشان می‌دهد. مشاهده می‌کنید که مدل استاندارد در ناحیه چشم‌انداز قرار دارد.

**تعیین معیارهایی که بتواند مدل‌های میدان کوانتومی در ناحیه مردابی را از چشم‌انداز جدا کند، امروزه یکی از حوزه‌های فعال پژوهش در نظریه ریسمان است**

کوانتومی ممکن می‌شود؟ اگر پاسخ مثبت بود نظریه ریسمان نمی‌توانست بینشی فراتر از مدل استاندارد به ما ارائه دهد. با این حال به نظر می‌رسد شواهد در حال رشدی وجود دارد که نمی‌توانیم تمامی مدل‌های میدان کوانتومی انرژی کم، حاصل از فشرده‌سازی نظریه ریسمان، را بپذیریم<sup>۱۵</sup> و در واقع اکثریت مدل‌های میدان کوانتومی متعلق به ناحیه مردابی هستند که خارج از ناحیه چشم‌انداز است (شکل ۲).

تعیین معیارهایی که بتواند مدل‌های میدان کوانتومی در ناحیه مردابی را از چشم‌انداز جدا کند، امروزه یکی از حوزه‌های فعال پژوهش در نظریه ریسمان است. از آنجا که ما اطلاعاتی از لیست کامل فشرده‌سازی‌های ثابت نظریه ریسمان نداریم، نمی‌توانیم در مورد مرز بین این دو ناحیه مطمئن باشیم.

اما با توجه به ده‌ها سال تحقیقات انجام شده در نظریه ریسمان امروز می‌توانیم یک سری فشرده‌سازی ارائه کنیم و وجه مشترکی را بین مدل‌های میدان کوانتومی در انرژی‌های پایین به دست آوریم. سپس معیارهایی جهانی را برای قرار دادن این مدل‌ها در ناحیه مردابی یا چشم‌انداز معرفی کنیم. نمونه‌ای از چنین معیارهایی حدس گرانس ضعیف<sup>۱۶</sup> است که بیان می‌دارد گرانس همواره ضعیف‌ترین نیرو در هر مدل میدان کوانتومی سازگار با نظریه ریسمان است.

برخی از شواهد برای این حدس، از مطالعات مربوط به فیزیک سیاه‌چاله و خصوصیات ترمودینامیکی‌اش ناشی می‌شود. اخیراً، شبیه‌سازی‌های عددی انجام شده نیز حدس گرانس ضعیف را تأیید می‌کند و نشان می‌دهد که این حدس مانع از بروز نقاط تکین برای سایر نیروها می‌شود. علاوه بر حدس ضعیف بودن گرانس، رویکرد ارائه مرداب منجر به حدس و گمان‌هایی در مورد «حداکثر تعداد ذرات کم جرم مجاز» شده است که به خوبی موافق این واقعیت است که مدل استاندارد فقط شامل تعداد انگشت‌شماری از ذرات بنیادی می‌شود. حدس دیگر، «حدس فاصله مرداب<sup>۱۷</sup>» نامیده می‌شود و مربوط به تغییرات شدید یکی از ابعاد هنگام فشرده‌سازی است؛ مثلاً رشد شدید اندازه. به‌عنوان مثال با افزایش قطر حلقه‌ها تعدادی ذره در جهان ما اجازه حضور می‌یابند. این مجموعه از ذرات جدید را «برج حالات سبک<sup>۱۸</sup>» می‌نامند که می‌توانند پیامد بسیاری داشته باشند. به‌عنوان مثال، اگر این برج حالات سبک در ابتدای جهان وجود داشته بوده، می‌توانسته میزان تورم و انبساط اولیه جهان را تحت تأثیر قرار دهد. بنابراین حدس فاصله مرداب، می‌تواند محدودیت‌های جالب توجهی را در مدل‌های انبساط جهان ایجاد کند.

## انرژی تاریک و ناحیه مرداب

اخیراً، پژوهشگران در پاسخ به مشکلات موجود در توضیح انرژی تاریک، در نظریه ریسمان، معیارهای اضافی مرداب را پیش نهاد کرده‌اند. این حدس‌ها هم اکنون در بین نظریه‌پردازان ریسمان مورد بحث قرار می‌گیرد، اما اگر واقعیت داشته باشد منجر به پیش‌بینی‌هایی در مورد تاریخ انبساط کیهانی خواهد شد که ممکن است در آینده نزدیک مورد آزمایش قرار گیرند. حدس‌ها مربوط به مدل‌هایی از انرژی تاریک، شامل یک میدان اسکالر  $(\phi)$  است که می‌توان آن را شبیه به میدان هیگز تصور کرد. میدان اسکالر می‌تواند منبع انرژی تاریک باشد، در این صورت پتانسیل  $V(\phi)$  برابر چگالی انرژی تاریک  $\Lambda$  خواهد بود. محاسبات تئوری ریسمان نشان می‌دهد که شیب این پتانسیل یعنی  $V'$  باید غیرصفر باشد. به‌طور خاص این شیب باید در نامساوی زیر نیز صدق کند:

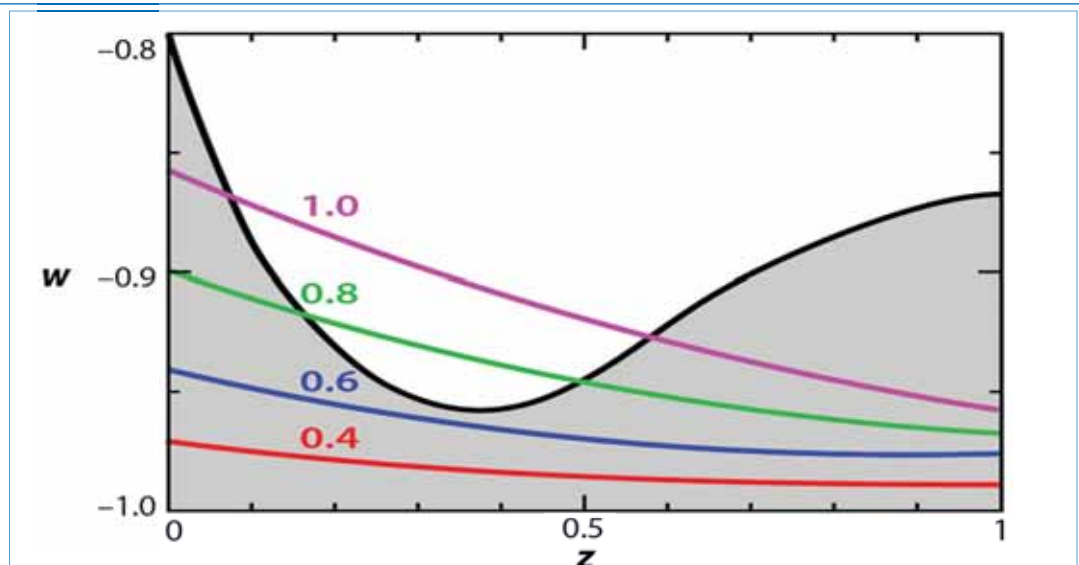
$$|V'| > \frac{cV}{M_p} > 0$$

که در این رابطه  $C$  عدد وابسته به طول پلانک است. اگر نامساوی بالا صحیح باشد بدین معنی است که انرژی تاریک، همان‌طور که بسیاری از کیهان‌شناس‌ها تصور می‌کنند، ثابت کیهانی نیست بلکه جایگزین آن انرژی تاریکی است که با گذشت زمان در حال تغییر است. محدودیت‌ها در مشاهدات فعلی با این مدل انرژی تاریک، تا هنگامی که  $c < 0.5$  باشد، سازگار خواهد بود و مشاهداتی که در آینده انجام خواهد شد، قادر خواهد بود مقادیر دیگری را برای  $C$  در نظر بگیرد (شکل ۳).

حدس‌های مرداب برای انرژی تاریک ممکن است به مشکلات تنظیم دقیق در کیهان‌شناسی کمک کند. اول اینکه مقدار کمی انرژی تاریک وجود دارد که در مقایسه با مقیاس پلانک ناچیز است یعنی  $M_p^4 \approx 10^{-122}$ . دلیل این کوچکی احتمالاً به ماهیت نامایی حدس‌های مردابی انرژی تاریک باز می‌گردد  $(V \sim e^{2\phi} \rightarrow V' = \lambda V)$  که احتمالاً چگالی انرژی را به سمت مقادیر کم سوق داده است. چالش مرتبط دیگر، به اصطلاح، یک مشکل تصادفی است و عمر جهان را که در ارتباط با انرژی تاریک است بسیار نزدیک به مقدار واقعی آن (۱۴ میلیارد سال) به دست

$$\text{می‌آورد؛ } \tau_\Lambda = \frac{M_p}{\sqrt{\Lambda}} = 10^{\text{یعنی ده میلیارد سال}}$$

حدس‌های مرداب، پیشنهادهایی را ارائه می‌کنند؛ بدین ترتیب که یا جهان ما همان‌طور که می‌دانیم به پایان می‌رسد و یا به دلیل اینکه میدان  $\phi$  قابلیت تونل زدن به



▲ شکل ۳: این نمودار چگالی انرژی تاریک  $W$  را بر حسب جابه‌جایی قرمز تابش کیهانی ( $z$ ) نمایش می‌دهد. اگر انرژی تاریک را به‌عنوان ثابت کیهانی در نظر بگیریم آنگاه  $w = -1$ . خط سیاه نیز مقدار ماکزیمم  $W$  را نشان می‌دهد که مربوط به مشاهدات ابرنواخترها، تابش ماکروویو، زمینه کیهانی و توزیع کهکشان‌ها می‌باشد. منحنی‌های رنگی نیز پیش‌بینی‌های نظریه ریسمان مربوط به انرژی تاریک برای مقادیر مختلف  $C$  هستند.

### مشکل هابل

اگر حدس مرداب برای انرژی تاریک درست باشد، پیش‌بینی می‌کند که مدل استاندارد کیهان‌شناسی مهیاناگ ( $\Lambda$ CDM) که در آن انرژی تاریک ثابت است نمی‌تواند درست باشد. کاملاً مستقل از حدس‌های مردابی در مورد مشاهدات تجربی اخیر اختلاف‌نظرهای کیهانی وجود داشته است: اندازه‌گیری‌های محلی ثابت هابل ( $H_0$ ) با پیش‌بینی که از ( $\Lambda$ CDM) براساس داده‌های پس‌زمینه ماکروویو کیهانی به دست می‌آید موافقت ندارد. یا در اندازه‌گیری‌های خطای سیستماتیک وجود دارد یا ( $\Lambda$ CDM) مدل صحیحی نیست. گزینه دوم با ایده‌های مرداب هماهنگی دارد. در واقع، برج‌های سبکی که از پیمایش  $\phi$  بیرون می‌آیند بخشی از ماده تاریک را تشکیل می‌دهند و شیوه‌ای که این ذرات با گذشت زمان تکامل می‌یابند می‌تواند به کاهش اختلاف  $H_0$  کمک کند (گرچه آن را کاملاً از بین نمی‌برد). چندین وسیله تجربی برای بررسی وجود دارد، مانند دستگاه طیف‌سنجی انرژی تاریک<sup>۲۱</sup> و ماهواره اقلیدس<sup>۲۲</sup>، که می‌توانند تصویر بهتری از انرژی و ماده تاریک و همچنین اندازه ثابت هابل به ما بدهند. در پنج الی ده سال آینده ممکن است مثلاً بدانیم انرژی تاریک ثابت است یا خیر. اگر انرژی تاریک ثابت باشد ضربه‌ای جدی بر نظریه ریسمان خواهد بود، اما اگر متغیر باشد جای این سؤال وجود دارد که آیا این مشاهدات می‌تواند اولین اثبات تجربی برای ایده‌هایی ناشی از تئوری ریسمان باشد؟ پاسخ را فقط زمان خواهد داد. اما به هر حال به نظر می‌رسد ما در زمان جالبی زندگی می‌کنیم.

<https://www.rosdhamag.ir/u/1Xh>  
<https://www.rosdhamag.ir/u/1Xx>

حالت جدیدی را دارد، تمام ماده به برج حالات سبک تبدیل خواهد شد. در هر دو مورد طول عمر پیش‌بینی شده برای جهان باید کمتر از چند تریلیون سال باشد؛ بدین معنی که یک ناظر باید سن جهان را کمتر از  $10^{10} \tau_8$  برآورد کند. اگر این استدلال وجود درست باشد، دیگر اتفاقی به نظر نمی‌رسد که سن جهان را در حدود  $\tau_8$  محاسبه کنیم.

### تنظیم جرم

حدس مرداب همراه با استدلال‌های بالا در مورد انرژی تاریک می‌تواند به ما در درک جرم هیگز کمک کند. همچنان که میدان اسکالر  $\phi$  افزایش می‌یابد یا مقدار پتانسیل آن کاهش می‌یابد، یک برج حالات سبک پدیدار می‌شود. جرم‌های این حالات سبک (مطابق استدلال‌های مختلف) تقریباً برابر جرم معادل انرژی تاریک، یعنی  $\frac{ev}{c^2} \approx 10^{-3} \Lambda^{\frac{1}{4}}$  می‌باشد. این مقدار جرم نزدیک به جرم تخمینی نوترینوهاست؛  $m_\nu$ . این ممکن است یک اتفاق تصادفی نباشد، زیرا برج حالات‌های سبک ممکن است با نوترینوها و همچنین بوزون هیگز ارتباط داشته باشد. جرم‌های این ذرات می‌توانند با مکانیسم شناخته‌شده‌ای در فیزیک ذرات به نام «مکانیسم الکلنگ<sup>۱۹</sup>» مرتبط شوند که البته جرم مورد انتظار  $M_p$  را به دست نمی‌دهند ولی در عوض یک مقدار میانی  $M_H = \sqrt{m_\nu M_p}$  را در نظر می‌گیرند. حتی اگر این‌ها پیش‌بینی‌های محکمی نداشته باشند، به این نکته اشاره دارند که موضوعات تنظیم - دقیق مدل استاندارد ممکن است در متن برنامه ریسمان مرداب مورد بررسی قرار گیرند.

- پی‌نوشت‌ها
1. String swampland
  2. good model
  3. "Swampland" model
  4. Quantum Field Theory (QFT)
  5. Coupling strengths
  6. Fine - tuning
  7. Gauge bosons
  8. Force Carriers
  9. Photon
  10. Weak vector bosons
  11. Gluons
  12. Quantum loops
  13. Hierarchy problem
  14. Supersymmetric Particles
  15. c. vafa, "The string landscape and the Swampland"
  16. The weak gravity conjecture
  17. The swmpland distance conjecture
  18. Tower of light states
  19. The Seesaw mechanism
  20. The Lambda Cold Dark Matter
  21. The Dark Energy Spectroscopic Instrument (DESI)
  22. Euclid satellite

