

Appendix C – Applications of the Gravitational Force on Photons in MAT-Gravity

C.1. مقدمه / Introduction

فارسی

در ضمیمه B نشان دادیم که در چارچوب MAT-Gravity، فوتون‌ها تحت تأثیر یک نیروی گرانشی واقعی قرار می‌گیرند که از ضرب «جرم مؤثر فوتون» در شتاب گرانشی ویژه‌ی نور به‌دست می‌آید. نتیجه نهایی به صورت زیر بود:

$$F = m_{\text{eff}} g_l = - \frac{4hf GM}{c^4 r^2}$$

که در آن:

f- فرکانس فوتون،

M- جرم منبع گرانش،

r - فاصله تا مرکز جرم،

G - ثابت گرانش،

h - ثابت پلانک و c سرعت نور است.

این ضمیمه به بررسی کاربردها و پیامدهای نظری و تجربی این نیرو می‌پردازد.

English

In Appendix B we showed that within the MAT-Gravity framework, photons experience a real gravitational force obtained by multiplying the photon's effective mass by the light-specific gravitational acceleration. The final result was

$$F = m_{\text{eff}} g_l = - \frac{4hf GM}{c^4 r^2}$$

where $\backslash(f\backslash)$ is the photon frequency, $\backslash(M\backslash)$ is the mass of the gravitating body, $\backslash(r\backslash)$ is the distance to its center, and $\backslash(G, h, c\backslash)$ have their usual meanings .

This appendix explores theoretical and experimental applications of this force.

C.2. وابستگی به فرکانس و پیامدهای آن

Frequency Dependence and Its Implications

فارسی

در نگاه اول، رابطه بالا نشان می‌دهد که:

$$F \propto f$$

بنابراین فوتون‌های پرانرژی‌تر (فرکانس بالاتر) باید نیروی گرانشی بزرگتری تجربه کنند.

اما از سوی دیگر، تکانه فوتون نیز متناسب با فرکانس است:

$$p = \frac{E}{c} = \frac{hf}{c} \Rightarrow p \propto f$$

در محاسبه زاویه انحراف (مثلاً $\Delta\theta \sim \Delta p_{\perp}/p$)، در مرتبه اول، ضریب f در صورت و مخرج ساده می‌شود و یک پیش‌بینی ظاهراً بدون وابستگی به فرکانس** برای زاویه انحراف به دست می‌آید. همین امر با مشاهدات فعلی لنز گرانشی (که وابستگی طیفی آشکار نشان نمی‌دهند) سازگار است.

با این حال، هر جا که:

- میدان (Φ) ناهمگن و غیراسفریک باشد،

- یا اثرهای مرتبه دوم در معادلات مسیر فوتون وارد شوند،

ممکن است وابستگی‌های ضعیف ولی واقعی به فرکانس ظاهر شوند. این همان «عدسی‌گرفتگی رنگی» در مرتبه دوم است که می‌تواند امضای آزمون‌پذیر MAT-Gravity باشد.

English (summary)

Although $(F \propto f)$, the photon momentum also scales as $(p \propto f)$, so in first-order deflection calculations the frequency cancels out, yielding a frequency-independent bending angle. However, in inhomogeneous or non-spherical (Φ) fields, and at second order in the equations of motion, residual frequency dependence (chromatic lensing) can appear, providing a potential observational signature of MAT-Gravity.

C.3. فوتون‌های پرانرژی در میدان‌های گرانشی قوی

High-Energy Photons in Strong Gravitational Fields

فارسی

برای فوتون‌های گاما با فرکانس‌های مرتبه:

$$f \sim 10^{19} - 10^{22} \text{ Hz}$$

اندازه نیروی گرانشی متناظر:

$$F_{\gamma} \sim \left(\frac{f_{\gamma}}{f_{\text{visible}}} \right) F_{\text{visible}}$$

است. برای نور مرئی با $(f_{\text{visible}} \sim 10^{14} \text{ Hz})$ ، یک فوتون گاما با (10^{20} Hz) حدوداً
 $\sim 10^6$

برابر نیروی گرانشی موثر روی فوتون مرئی را حس می‌کند. این افزایش به‌ظاهر چشمگیر، در زاویه انحراف مرتبه اول خنثی می‌شود، اما:

- در نزدیکی سیاهچاله‌ها،

- در فوران‌های پرانرژی (GRB)،

- و در جت‌های کهکشانی،

اثرهای مرتبه دوم و پرتو-پرتو $(\text{photon} - \text{photon through}(\Phi))$ می‌توانند نسبت به رصد فوتون‌های با انرژی‌های مختلف حساس شوند.

پیشنهاد تجربی: مقایسه دقیق نقشه‌های آسمان در باندهای X و گاما برای منابعی که لنز گرانشی قوی تجربه می‌کنند، و جست‌وجو برای انحراف‌های کوچک انرژی وابسته.

English (short)

Ultra-high-energy photons in GRB jets and near black holes experience a much larger raw gravitational force. While first-order deflection remains frequency-independent, higher-order effects and interactions mediated by $\backslash(\Phi\backslash)$ may generate measurable energy-dependent deviations in strong-field astrophysical environments.

C.4. امکان عدسی‌گرفتگی رنگی مرتبه دوم

Second-Order Chromatic Lensing

فارسی

در MAT-Gravity، مسیر فوتون از معادله‌ای شبیه به معادله حرکت در یک میدان موثر $\backslash(\Phi\backslash)$ پیروی می‌کند. اگر پتانسیل موثر برای نور به صورت:

$$\Phi_{\text{eff}}(r, f) = \Phi_0(r) + \epsilon(r) f + \mathcal{O}(f^2)$$

نوشته شود، اصطلاح $(\epsilon(r) f)$ می‌تواند منجر به:

- تغییرات انرژی-وابسته در مسیر

- و در نهایت به زاویه انحراف ضعیف وابسته به فرکانس

شود. این نوع عدسی‌گرفتگی رنگی باید:

1. بسیار کوچک‌تر از اثر اصلی باشد،

2. در سیستم‌های قوی (که اختلاف مسیر بزرگ است) بهتر قابل مشاهده باشد،

3. از اثرات پلاسمایی (مانند تأخیر انتشار فرکانس-وابسته در محیط‌های پلاسما) تفکیک شود.

English (summary)

Second-order corrections in the effective potential for photons may introduce a weak, but principled, chromatic dependence in gravitational lensing. Disentangling this from plasma-induced dispersion would constitute a decisive test of MAT-Gravity.

C.5. آزمایش‌های زمینی با پرتو لیزر

Laboratory-Scale Laser Experiments

فارسی

اگر نیروی گرانشی روی فوتون واقعی است، در اصل می‌توان با یک پرتو لیزر بلند و پایدار، انحراف بسیار کوچک آن را در میدان گرانشی زمین اندازه گرفت. چالش اصلی، کوچک بودن مقدار اثر است، اما ایده مفهومی چنین است:

- یک تونل افقی با طول ($L \sim 10 - 100$) متر،

- لیزر تکمد با توان بالا و کوهیرنس زیاد،

- اپتیک پایدار با تداخل‌سنجی حساس (مثلاً نوع مایکلسون یا فابری-پرو)،

- اندازه‌گیری جابه‌جایی شیفته نقطه تداخل ناشی از انحراف زیر میکرورادیان.

در MAT-Gravity، بزرگ بودن ضریب ۴ در شتاب مخصوص فوتون ($g_l = 4 g_{\text{Newton}}$) برای نور باعث می‌شود که **در اصل** حساسیت لازم به‌طور نظری دستیافتنی‌تر باشد، هرچند در عمل هنوز بسیار چالش‌برانگیز است.

English (short)

A high-stability, long-baseline laser interferometer could, in principle, detect the tiny gravitational bending of a horizontal laser beam in Earth's field, providing a direct laboratory measurement of gravitational force on light within MAT-Gravity.

C.6. پیوند با دینامیک غیرخطی نور در موجبرها

****Connection to Nonlinear Photonics and Waveguides****

فارسی

در موجبرها و فیبرهای نوری، نور رفتارهایی مثل:

- سرعت گروهی کاهش‌یافته،

- جرم مؤثر غیرصفر (در مدل‌های شبه‌ذره‌ای)،

- برهم‌کنش‌های غیرخطی (Kerr, Raman, ...)

از خود نشان می‌دهد. چون در MAT-Gravity فوتون‌ها در حضور میدان (Φ) نوعی جرم مؤثر به‌دست می‌آورند، می‌توان قیاسی میان:

- «جرم مؤثر نوری» در موجبر

- و «جرم مؤثر گرانشی» در میدان (Φ)

برقرار کرد. این قیاس می‌تواند:

- شهود ما را دربارهٔ انتشار نور در میدان‌های گرانشی تقویت کند،

- و برعکس، ایده‌هایی از MAT-Gravity را برای طراحی تجربیات اپتیکی کنترل‌شده در آزمایشگاه به کار گیرد (شبیه‌سازی آنالوگ‌های گرانشی با فیبر).

English (short)

Effective mass concepts in nonlinear optics provide a useful analogue for understanding light propagation in a non-uniform (Φ) field, and vice versa. Waveguides may thus serve as analogue laboratories for MAT-Gravity-like dynamics.

C.7. انرژی میدان (Φ) ، انرژی خلأ و انرژی تاریک

Energy in the (Φ) Field, Vacuum Energy, and Dark Energy

فارسی

اگر میدان (Φ) واقعاً مادی است و انرژی‌بردار، آنگاه:

1. خود (Φ) به صورت یک مخزن انرژی و فشار در فضا عمل می‌کند؛

2. فوتون‌ها با عبور از نواحی مختلف (Φ) ، این انرژی را «نمونه‌برداری» می‌کنند؛

3. می‌توان از مشاهدهٔ دقیق پرتوهای نوری دوردست که از نواحی با چگالی (Φ) متفاوت گذشته‌اند، برای استنتاج خواص انرژی و فشار میان‌ستاره‌ای/میان‌کهکشانی استفاده کرد.

این دیدگاه اجازه می‌دهد:

- انرژی تاریک و فشار مؤثر کیهان را به‌صورت یک ویژگی جمعی میدان (Φ) تفسیر کنیم،

- و نور را ابزار کلیدی برای نقشه‌برداری از این انرژی در مقیاس‌های بزرگ کیهانی بدانیم.

English (short)

If (Φ) is a material, energy-carrying field, then cosmic light acts as a probe of its energy and pressure content. This opens a possible bridge between MAT-Gravity and phenomena usually attributed to dark energy.

Summary

فارسی

نیروی گرانشی بر فوتون که از رابطه:

$$F = -\frac{4hf GM}{c^4 r^2}$$

به دست می‌آید، نه تنها یک اصلاح مفهومی نسبت به توصیف‌های سنتی است، بلکه مجموعه‌ای از پیشنهادهای تجربی و رصدی را به همراه دارد: از آزمایش‌های زمینی با لیزر گرفته تا تحلیل‌های دقیق لنز گرانشی در حوزه‌های X و گاما، و نیز کاربردهای آنالوگ در اپتیک غیرخطی. این ضمیمه چارچوبی برای توسعه این ایده‌ها در آینده فراهم می‌کند.

۲. بخش مستقل در متن اصلی مقاله

می‌توان این را مثلاً در بخش Discussion یا Applications قرار داد.

عنوان پیشنهادی

فارسی:

«کاربردهای نیروی گرانشی بر فوتون در MAT-Gravity»

English

“Applications of the Gravitational Force on Photons in MAT-Gravity”

ساختار پیشنهادی برای بدنه بخش

1. مرور کوتاه نتیجه اصلی:

۳-۴ خط که یادآوری کند فوتون نیروی واقعی حس می‌کند و فرمول نیرو را دوباره بنویسد.

2. زیربخش ۱ – سازگاری با مشاهدات لنز گرانشی:

توضیح اینکه چگونه با وجود $(F \propto f)$ ، زاویه انحراف در مرتبه اول بی‌وابسته به فرکانس است و بنابراین با داده‌های فعلی ناسازگار نیست.

3. زیربخش ۲ – پیش‌بینی‌های جدید:

- chromatic lensing مرتبه دوم

- رفتار انرژی‌وابسته فوتون‌های گاما در میدان‌های قوی

- امکان بررسی داده‌های موجود برای نشانه‌های کوچک انرژی‌وابسته

4. زیربخش ۳ – پیشنهاد تجربی آزمایشگاهی:

about long-baseline laser bending test. مختصر

5. زیربخش ۴ – ارتباط با انرژی میدان (Φ) و انرژی تاریک:**

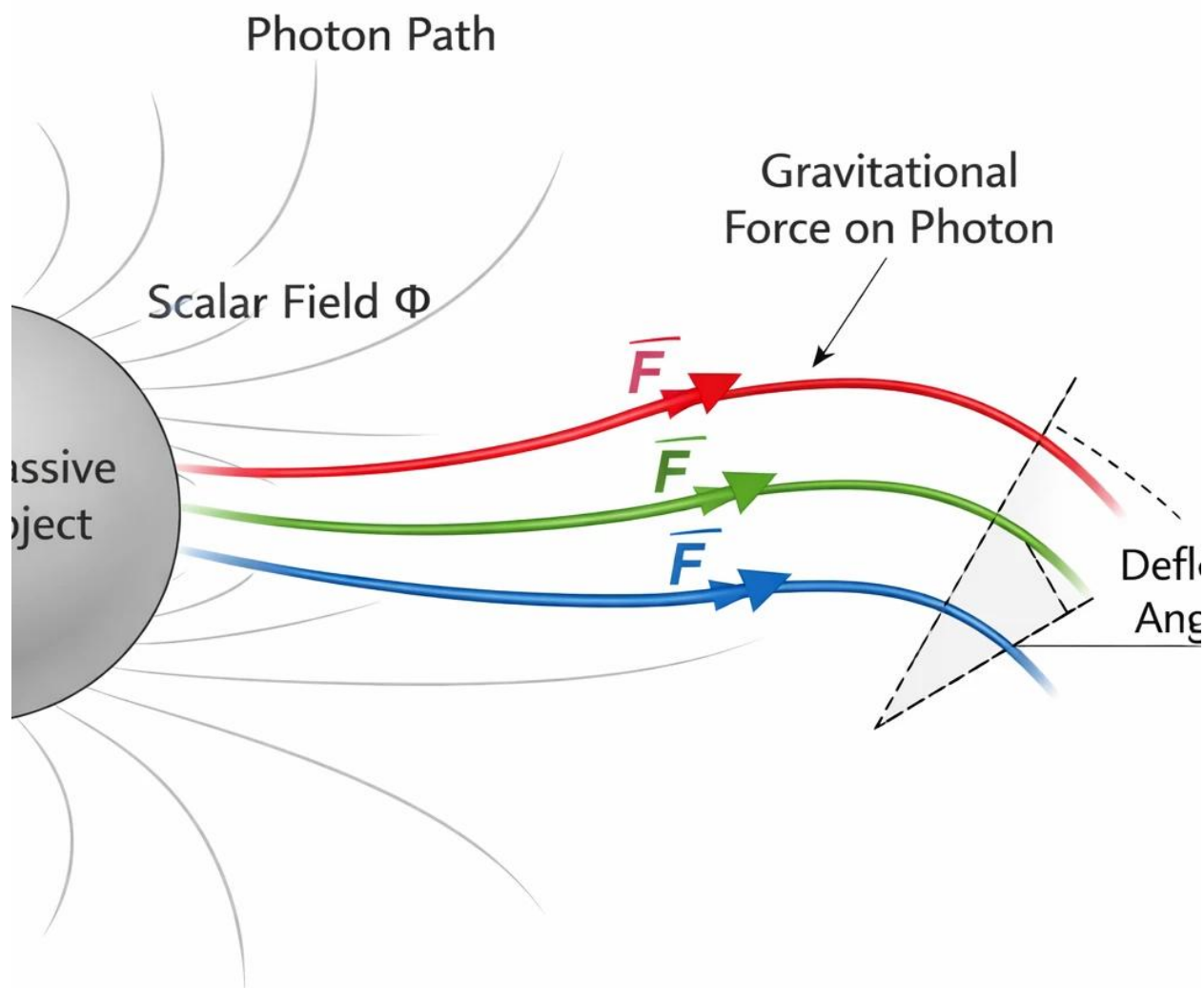
۲-۳ پاراگراف از C.7 را به زبان فشرده‌تر، بدون جزئیات ضمیمه.

اگر بخواهی، در پیام بعدی می‌توانم متن کامل این بخش را (آماده برای قرارگیری در متن اصلی) به‌صورت مرتب و ویرایش‌شده به تو بدهم.

۳. شکل گرافیکی پیشنهادی

تو قبلاً یک تصویر با نام

`image\_gen\_bb324e37-ebd1-41ab-9298-afcb05e7f4ee\_0.png`



داری (که ابزار تولید کرده). برای تکمیل کار، اینجا طرح یک شکل مفهومی را به صورت دقیق توصیف می‌کنم تا:

- یا با همین ابزار تصویرسازی ات بسازی،

- یا به طراح گرافیک/Illustrator بدهی.

عنوان شکل (برای مقاله)

فارسی:

«نمای شماتیک نیروی گرانشی بر فوتون در چارچوب MAT-Gravity»

English

“Schematic representation of the gravitational force on a photon in MAT-Gravity”

توضیح نوشتاری (caption) پیشنهادی

فارسی:

«فوتونی با فرکانس (f) در حال عبور از نزدیکی جرمی با جرم M نشان داده شده است. میدان (Φ) به صورت لایه‌های equipotential نمایش داده می‌شود. نیروی گرانشی وارد بر فوتون، با برداری به سمت جرم نشان داده شده و اندازه آن متناسب با ($F \propto f$) است. در عین حال، پیکان تکانه فوتون ($p \propto f$) نیز نمایش داده شده تا نشان شود که در محاسبه زاویه انحراف مرتبه اول ($\Delta\theta$)، وابستگی فرکانسی در صورت و مخرج تا حد زیادی خنثی می‌شود. نواحی با ناهمگنی میدان (Φ) (مثلاً ناشی از توزیع جرم غیریکنواخت) به عنوان مناطقی هایلایت شده‌اند که در آن‌ها انتظار می‌رود اثرهای مرتبه دوم و عدسی‌گرفتنی رنگی ظاهر شوند.»

English (caption)

“A photon of frequency f passing near a mass M . The (Φ) -field is represented by equipotential contours. The gravitational force on the photon, ($F \propto f$), is indicated by a vector pointing towards the mass, while the photon momentum ($p \propto f$) is drawn to emphasize the near-cancellation of frequency dependence in the first-order deflection angle $\Delta\theta$. Regions of strong (Φ) -inhomogeneity are highlighted as sites where second-order effects and chromatic lensing may arise”.

توضیح جزئیات بصری (برای طراح یا برای پرامپت تصویرسازی)

- زمینه: فضای دوبعدی (صفحه)، یک جرم مرکزی (مانند ستاره/سیاهچاله) در سمت چپ.

- اطراف جرم: خطوط همپتانسیل (Φ) (حلقه‌های بسته یا منحنی‌های خمیده).

- مسیری از نور: خطی خمیده که از سمت راست وارد شده و از کنار جرم می‌گذرد.

- روی مسیر:

- یک فوتون نمادین (مثلاً نقطه‌ی درخشان یا موج کوچک).

- پیکان تکانه ($\vec{p}$) تقریباً مماس بر مسیر.

- پیکان نیروی گرانشی ($\vec{F}_g$) به سمت جرم.

- اگر بخواهی، دو فوتون با فرکانس متفاوت را نشان ده:

- فوتون آبی (فرکانس بالاتر)، پیکان F کمی بلندتر،

- فوتون قرمز (فرکانس پایین‌تر)، پیکان F کوتاه‌تر؛

و در caption توضیح بدهی که در مرتبه اول این تفاوت در زاویه نهایی تقریباً خنثی می‌شود.