نسبیتِ عام علیه مکانیک کوانتمی

فرهنگ لران

چکیده

- در مکانیکِ نیوتنی با تعیینِ وضعیتِ یک سامانه در هر لحظه از زمان نه تنها وضعیتِ دست‌گاه در آینده معلوم می‌شود بل‌که می‌توان وضعیتِ آن در گذشته را هم تعیین کرد. به این معنا، اطلاعاتِ مربوط به ساختارِ یک دست‌گاهِ نیوتنی در طولِ زمان حفظ می‌شود و قابلِ بازیابی ست. در مکانیکِ کوانتمی هم با دانستنِ تابع موجِ دست‌گاه در هر لحظه، می‌شود تابعِ موجِ گذشته‌یِ آن را بازیابی کرد. به این معنا، می‌توانیم ادعا کنیم که در جهانِ ما اطلاعات گم و ناپدید نمی‌شود. فیزیکِ سیاه‌چاله‌ها، این نتیجه‌گیری را به چالش می‌کشد.
- معلوم شده است که سیاه‌چاله‌ها آنتروپی دارند و مقدارِ این آنتروپی هم با اندازه‌یِ سطحِ افق روی‌دادِ آن‌ها متناسب است. چون این آنتروپی ناصفر است باید بتوانیم ریزحالت‌هایِ نظیرِ یک سیاه‌چاله را شناسایی کنیم. همین‌طور باید بفهمیم چرا آنتروپی با سطحِ افقِ روی‌داد داده می‌شود در حالی که در سامانه‌هایِ متعارف، آنتروپی تابعی از حجم است.
- هم‌چنین می‌دانیم که یک سیاه‌چاله‌یِ منزوی، تابشی هم‌چون یک جسمِ سیاه دارد و در اثرِ آن تابش به تدریج تبخیر می‌شود. نتایجِ اولیه حاکی از این بود که فرآیندِ شکل‌گیری و تبخیرِ یک سیاه‌چاله با مکانیکِ کوانتمی نمی‌خواند و در طیِ این فرآیند بخشی از اطلاعات گم می‌شود. بحث بر سرِ درستیِ این نتیجه هنوز ادامه دارد.
- در این سخن‌رانی، پس از بررسیِ فرایندِ شکل‌گیریِ سیاه‌چاله‌ها در نظریه‌یِ نسبیتِ عامِ اینشتین، ترمودینامیکِ سیاه‌چاله‌ها و مساله‌یِ اطلاعات را مرور می‌کنیم.

این سخن‌رانی در باشگاه فیزیک اصفهان ارائه شده است.

کوتوله‌یِ سفید

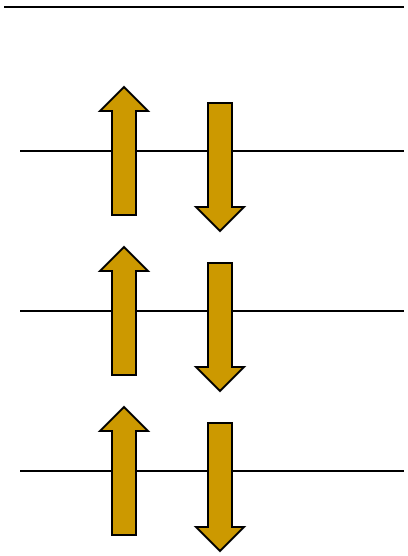
- کوتوله‌یِ سفید، ستاره‌ای است که کوره‌یِ هسته‌ای اش خاموش شده و گاز الکترونیِ آن، به واسطه‌یِ اصلِ طردِ پاولی، جلویِ رمبشِ ستاره در اثرِ گرانش را می‌گیرد.
- انرژیِ ستاره عمدتاً از حاصلِ جمع انرژیِ فرمی و انرژیِ گرانشی می‌آید و شعاعِ ستاره در وضعیتِ تعادل، نظیرِ کمینه‌یِ این انرژی است.
- مقدارِ انرژیِ فرمی به تعدادِ الکترون‌ها بسته‌گی دارد چرا که بر طبقِ اصلِ طردِ پاولی، در هر ترازِ انرژی فقط دو الکترون جا می‌گیرند.
- هرچند این تصویر، در دمایِ صفر مطلق درست است ولی با دقتِ خوبی وضعیتِ یک کوتوله‌یِ سفید را هم توضیح می‌دهد.

کوتوڵەی ِ سفید

$$E = \frac{3}{5}E_F - \frac{3}{5}\frac{GM^2}{R}$$

$E = E_F$ →

$E = 0$ →



- در صفحه‌یِ بعد می‌بینیم که شعاعِ ستاره تابعِ صعودی از تعدادِ الکترون‌ها است. در اثرِ فرایندِ معکوسِ واپاشیِ بتا، به تدریج از تعدادِ الکترون‌ها کم می‌شود و شعاعِ ستاره کاهش می‌یابد.
- در طیِ این فرایند تعدادِ نوترون‌ها افزایش می‌یابد و نهایتاً ستاره‌ی نوترونی شکل می‌گیرد.
- توجه کنید که چون نوترینو یک ذره‌یِ گریزپا ست، این فرایند تا پیش از شکل‌گیریِ ستاره‌یِ نوترونی به تعادل نمی‌رسد.

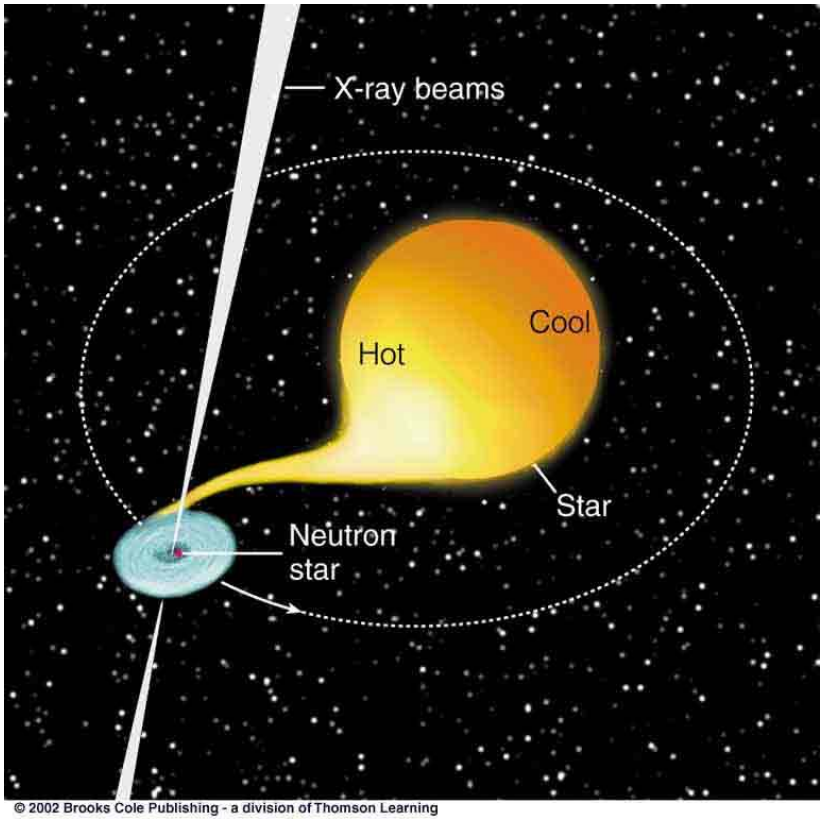
کوتوڵەی ِ سفید

$$R \propto \frac{N_e^{5/3}}{N_n^{2}}$$

$$E_F \propto N_e^{-8/3}$$

$$e + p \rightarrow n + \nu_e$$

ستاره‌یِ نوترونی

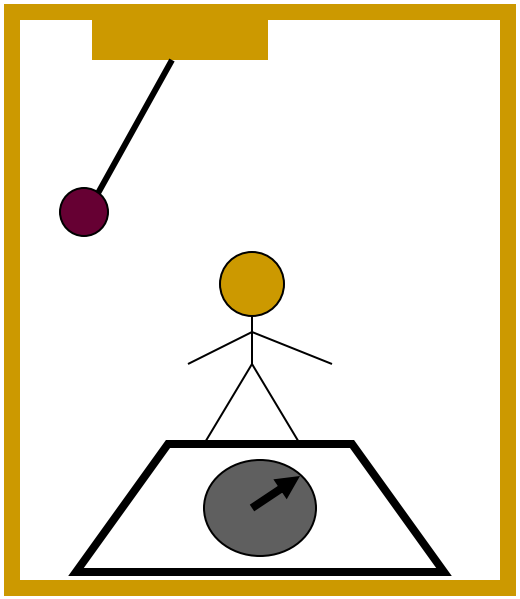


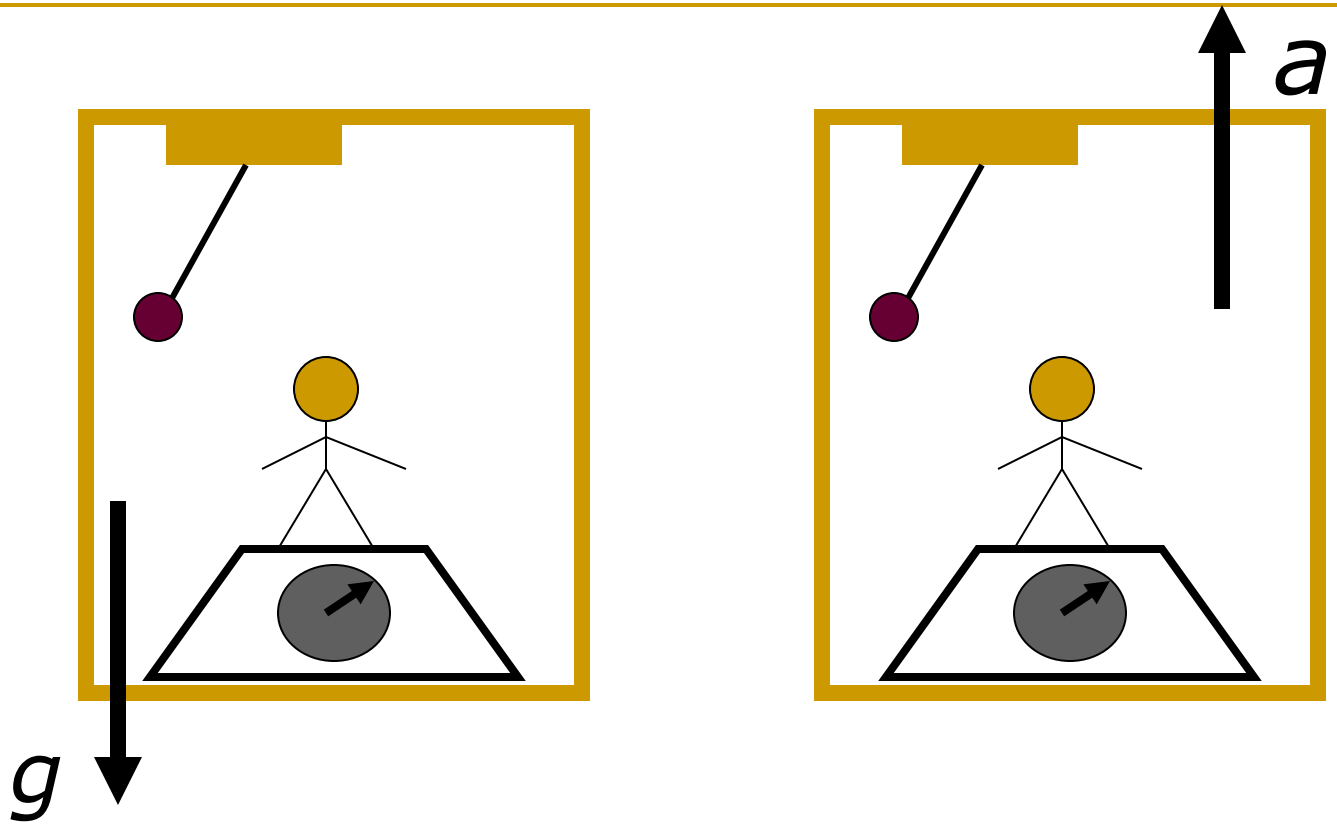
© 2002 Brooks Cole Publishing - a division of Thomson Learning

- شعاعِ یک ستاره‌یِ نوترونی به جرمِ یک و نیم برابر جرمِ خورشید، حدودِ یازده کیلومتر است.

اصل ِ هم‌ارزی

داستان خیلی ساده است. کسی را تصور کنید که در اتاقکی خودش را وزن می‌کند و یا ضرب‌آهنگ ِ آونگی که از سقف آویزان شده را می‌سنجد.





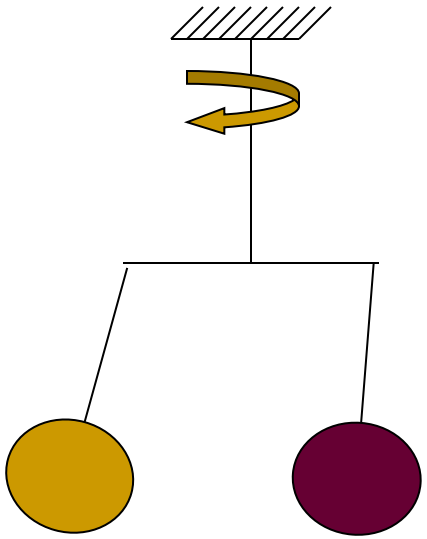
اگر اتاقک ِ او پنجره نداشته باشد، چه راهی هست که او بفهمد آیا اتاقکش بخشی از یک ساختمان روی ِ کره‌ی ِ زمین است یا بخشی از یک موشک ِ فضاپیما که دارد با شتاب ِ $a = g$ پرواز می‌کند؟

اصل ِ هم ارزی می گوید چنین راهی وجود ندارد.

البته این یک اصل است که فعلاً در آزمایشگاه دلیلی بر نادرستی اش یافته نشده است.

$$F = \frac{GMm^*}{r^2} = ma \Rightarrow a = \left(\frac{GM}{r^2}\right)\frac{m^*}{m}$$

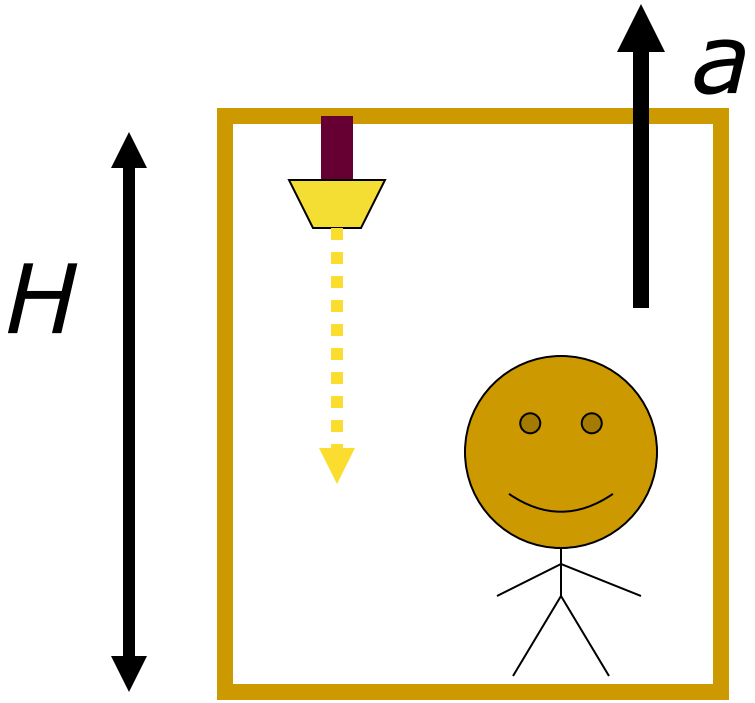
$$a = \left(\frac{GM}{r^2} \right) \frac{m^*}{m}$$



در آزمایشِ اُتوُش معلوم شد که اجسامِ گوناگون با شتابِ یکسانی در گرانشِ خورشید سقوط می‌کنند.

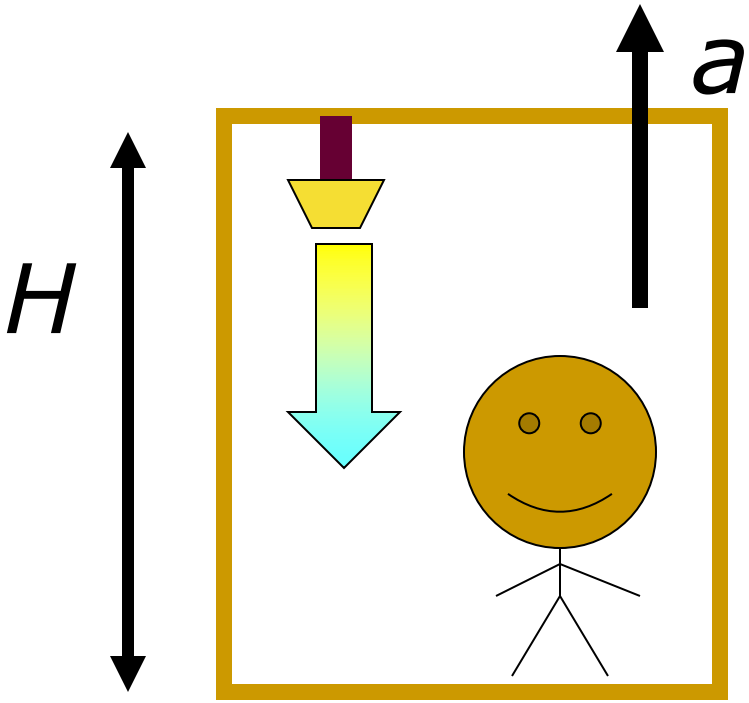
اثر ِ گرانش بر ساعت‌ها (انتقال ِ به سرخ ِ گرانشی)

فرض کنید در سفینه‌ی ِ شتاب‌داری یک لامپ ِ سدیم می‌درخشد.



انتقالِ به آبی

- فرض کنید در لحظه‌ای که لامپ روشن می‌شود، فضاپیما ساکن است. زمانی که نور به آشکارساز می‌رسد، سرعتِ فضاپیما ناصفر است. یعنی آشکارساز عملاً نسبت به منبعی که نور را گسیل کرده در حرکت است. پس جابه‌جایی دپلر در بسامد رخ می‌دهد و نوری که دریافت می‌شود کمی به سمتِ آبی گرایش یافته است.

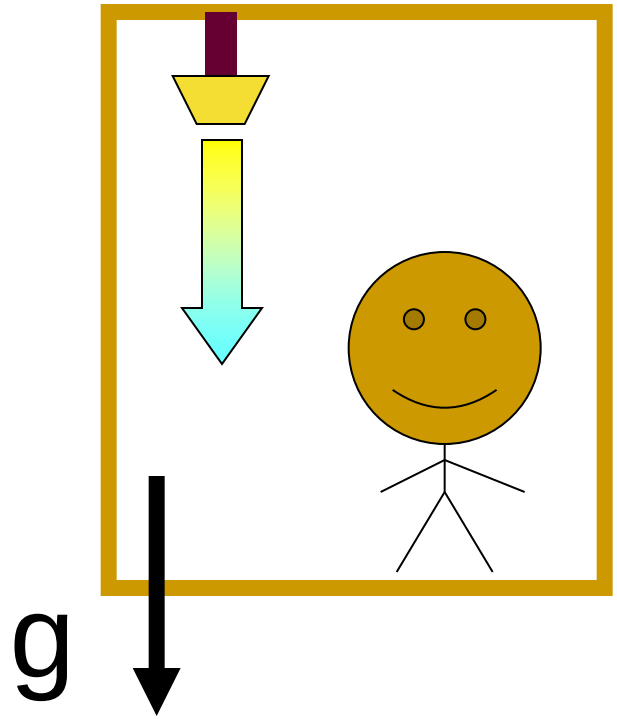


$$\Delta u = at$$

$$\nu' = \nu\sqrt{\frac{1+\Delta u/c}{1-\Delta u/c}} \approx \nu\left(1+\Delta u/c\right)$$

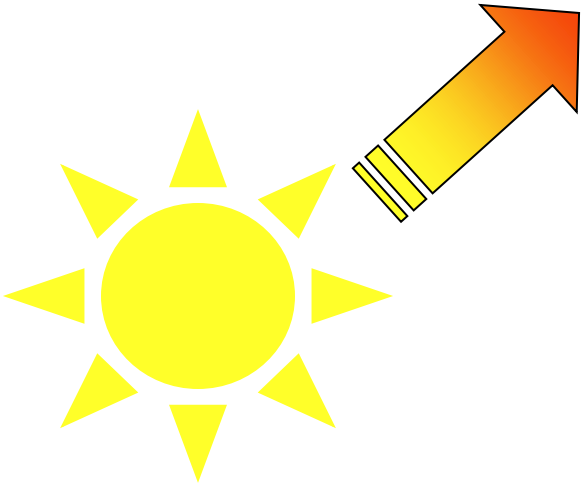
$$\frac{\nu'-\nu}{\nu} = \frac{aH}{c^2}$$

پس اصل ِ هم ارزی ایجاب می کند که نوری که لامپ ِ بالای ِ سر شما می تاباند در اثر ِ سقوط در میدان گرانشی زمین موقعی که به چشم ِ شما می‌رسد دچار ِ انتقال دوپلر شده باشد.



انتقالِ به سرخِ گرانشی

در این صفحه تغییرِ بسامدِ ناشی از گرانشِ نوری که از خورشید به ما می‌رسد را نمایش داده‌ام. به این پدیده که نتیجه‌ی اصل هم‌ارزی است انتقال به قرمز می‌گویند.



$$\frac{\Delta \nu}{\nu} = -\frac{GM}{Rc^2}$$

می‌شود بگوییم که نور موقعِ صعود در میدانِ گرانشِ خورشید انرژی از دست می‌دهد پس بسامدش کم می‌شود.

سیاه‌چاله

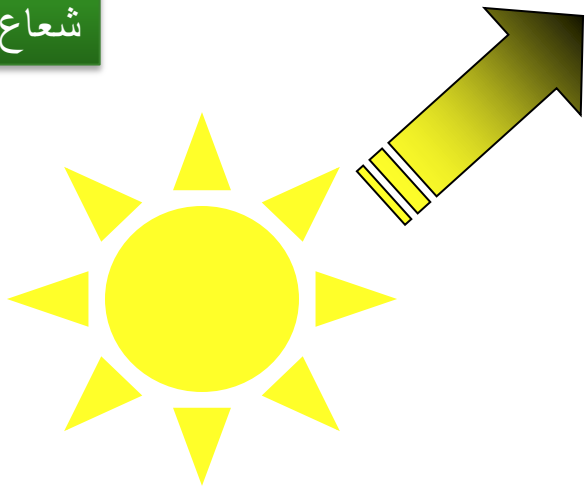
$$f' = \sqrt{1 - \frac{2GM}{R}}\, f$$

جرمِ ستاره

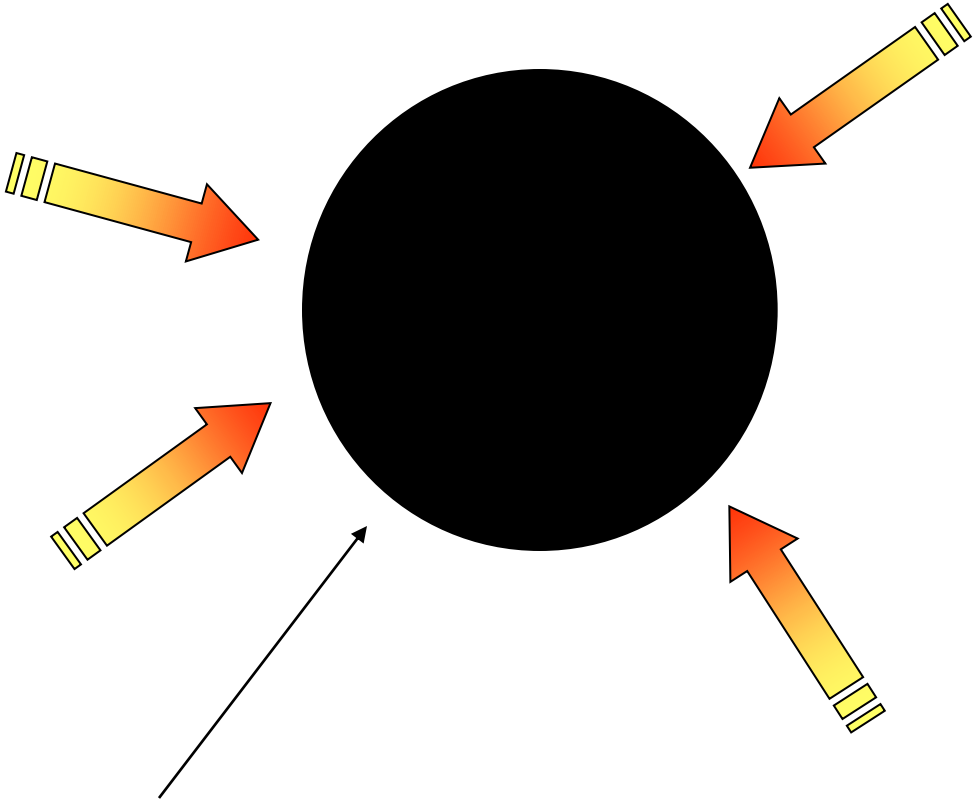
بسامدِ نورِ ارسال شده

بسامدِ دریافت شده

شعاعِ ستاره

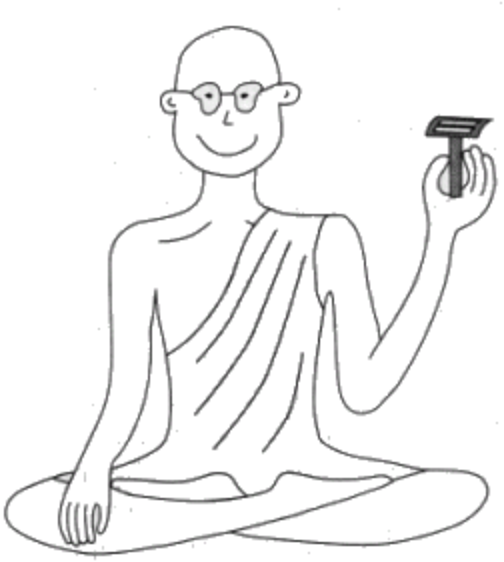


ممکن است که انتقالِ به قرمز آن‌چنان شدید باشد که بسامدِ نوری که به آشکارساز می‌رسد صفر باشد.
در این صورت، عملاً نوری به آشکارساز نمی‌رسد و ستاره، سیاه دیده می‌شود.



افقِ روی‌داد، دروازه‌یِ سیاه‌چاله اس

قضیه‌ی ِ بی مویی No-hair theorem

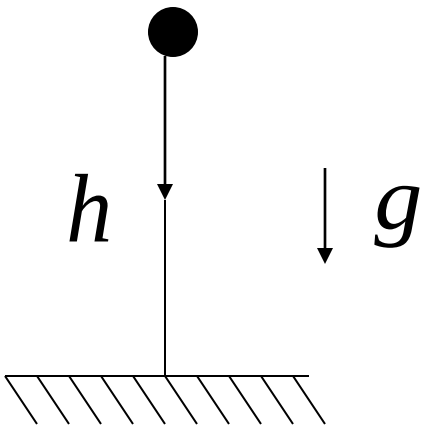


همه‌ی ِ سیاه‌چاله‌ها با جرم و بارالکتریکی و تکانه‌ی مداری‌شان تعیین می‌شوند.

آنتروپی سیاه‌چاله

$$S = \frac{c^3 k_B}{4G\hbar} A$$

تحلیلِ ابعادی



$$T = (h/g)^{1/2}$$

$$A = \frac{m^2 G^2}{c^4}$$

رابطه‌یِ جرم و سطحِ افقِ رو

$$S = \frac{c^3 k_B}{G h} A$$

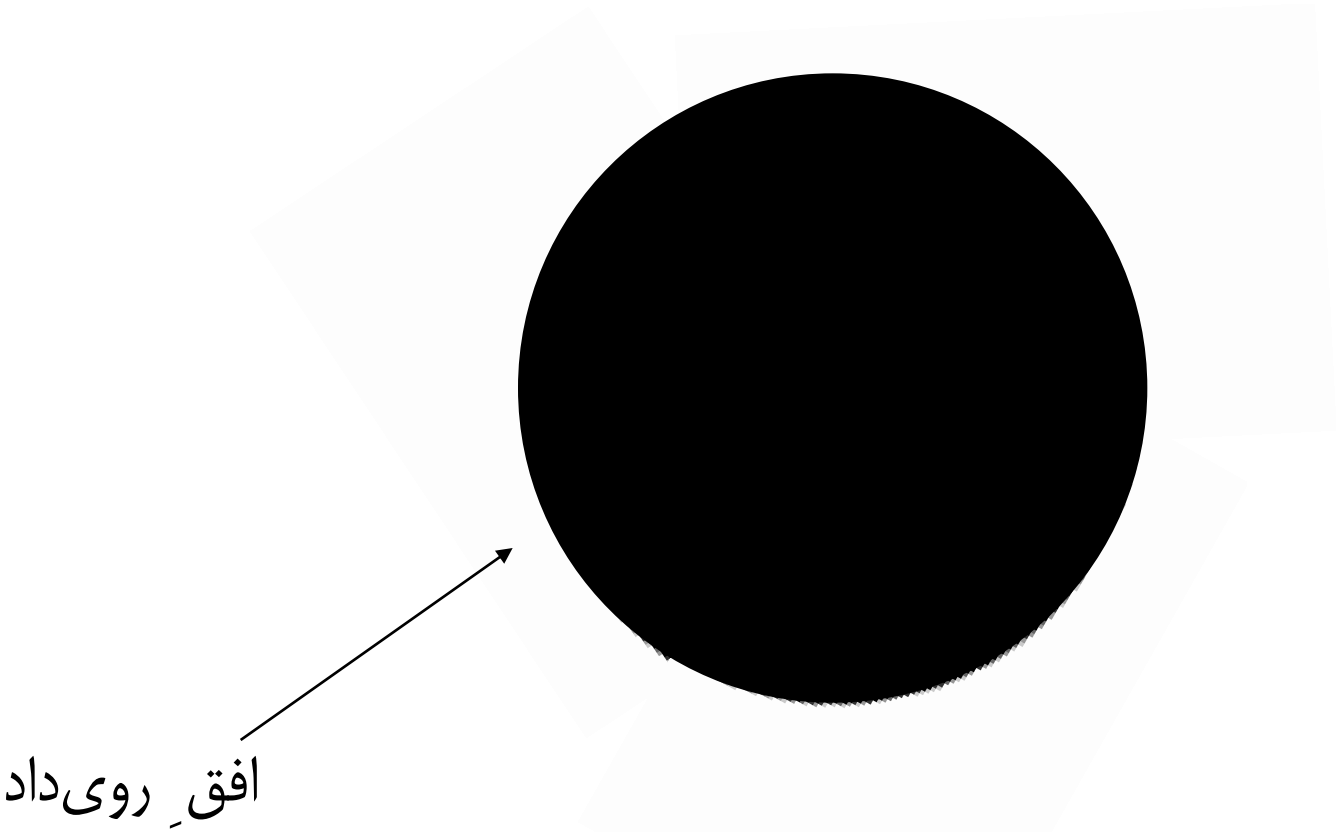
رابطه‌یِ آنتروپی و سطحِ افقِ رو

$$\theta_H = \frac{c^3 h}{G k_B} \frac{1}{m}$$

دمایِ هاوکینگ

$$d\left(mc^2\right) = \theta_H \, dS$$

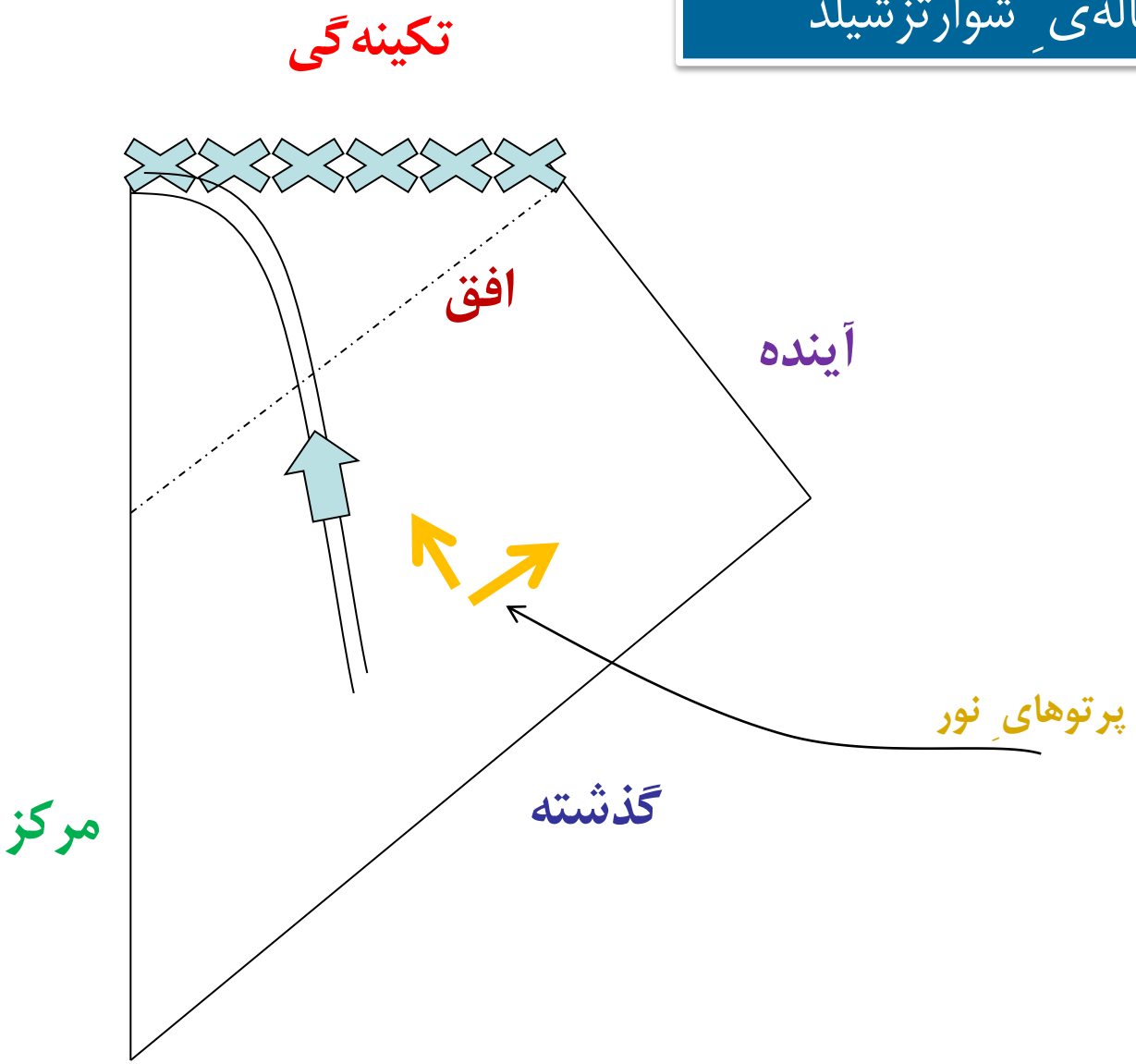
سیاه‌چاله‌ها می‌درخشند. به این درخشش، تابشِ هاوکینگ می‌گویند.



زمانِ تبخیرِ یک سیاه‌چاله‌ی منزوی

$$t^* = \frac{G^2}{3c^4 h} m^3 \approx 10^{71} \left(\frac{m}{M_*} \right)^3 \ s$$

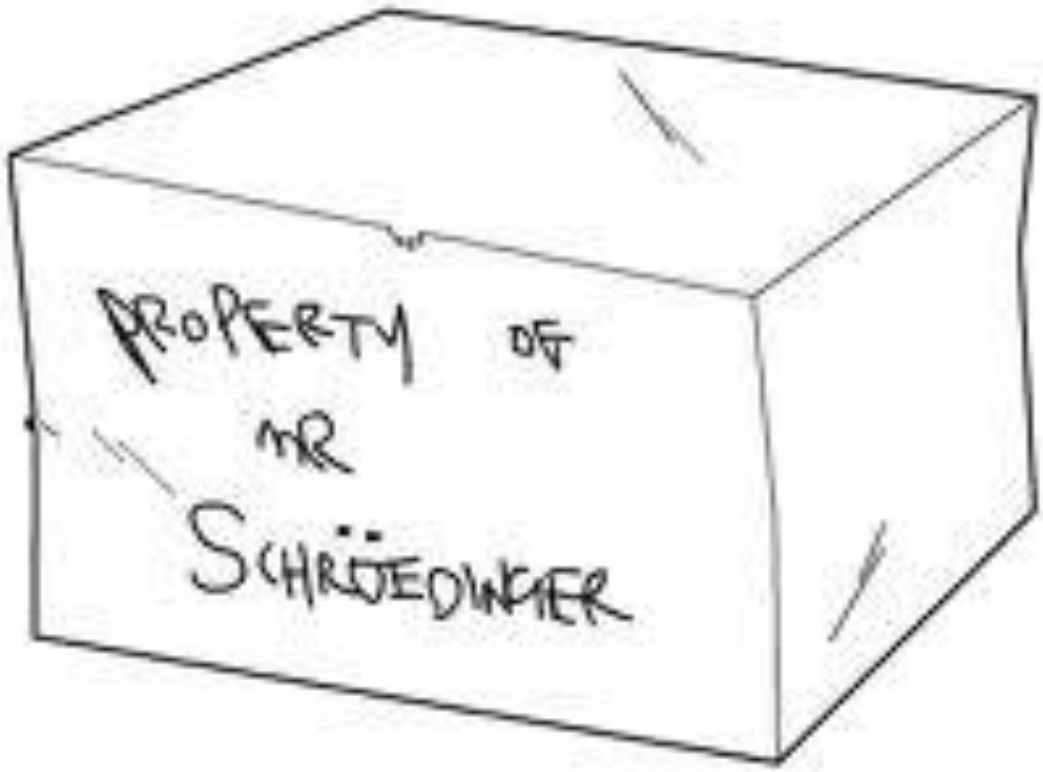
ساختارِ علیِ فضازمانِ یک سیاه‌چاله‌یِ شوارتزشیلد

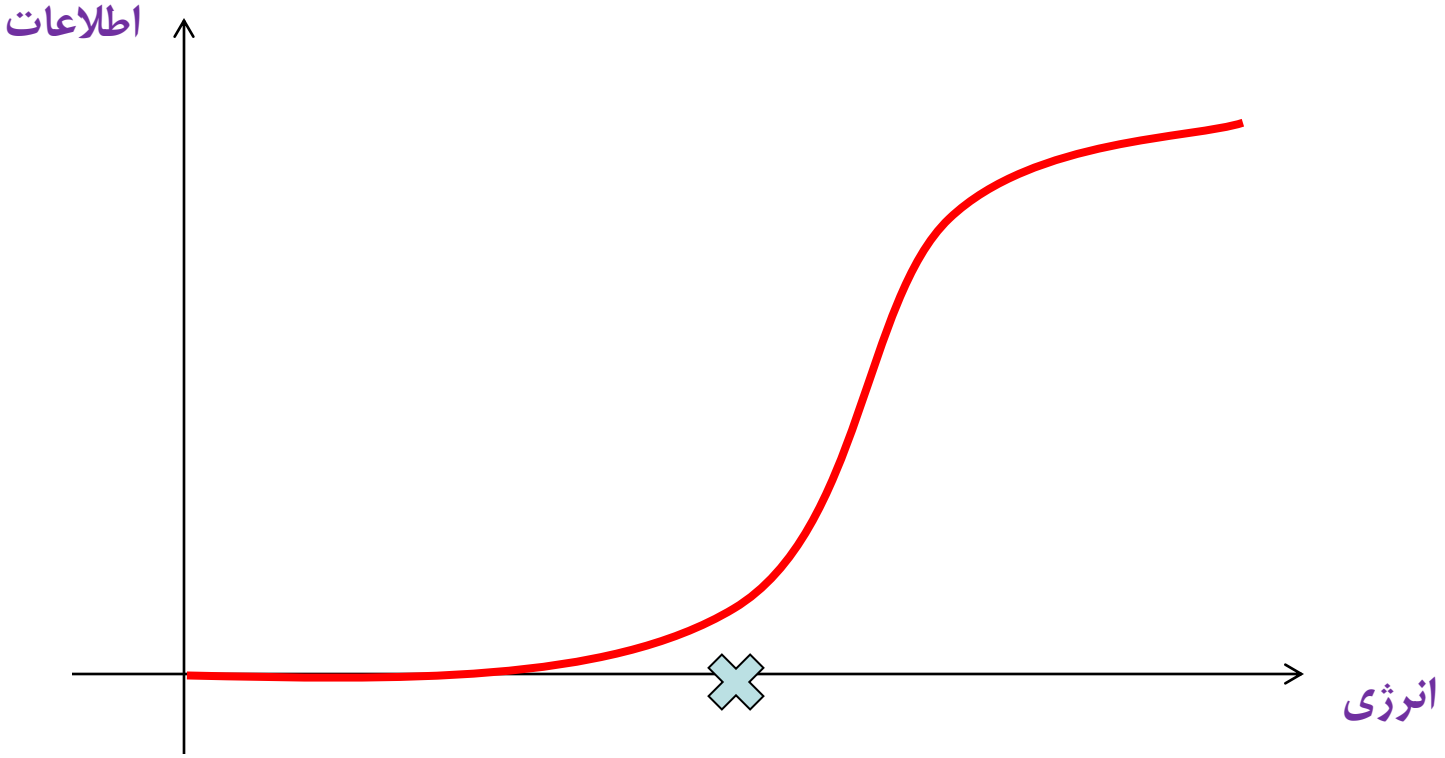


مساله‌یِ اطلاعات

- موضوعِ بحث در دو صفحه‌یِ بعد این است که در یک فرایندِ شیمیایی مثلِ انفجارِ بمب که از مکانیکِ کوانتمی پی‌روی می‌کند، هیچ اطلاعاتی نابود نمی‌شود.
- اگر محتوایِ یک جعبه توسطِ بمبی منفجر شود، همه‌یِ اطلاعات مربوط به محتوایِ جعبه در تابشِ حاصل از انفجار ذخیره شده است.
- پس از آن که نیمی از انرژیِ حاصل از انفجار به بیرون تابید، این اطلاعات به بیرون نشت می‌کند.
- یک سیاه‌چاله‌یِ خیلی سنگین، حتی پس از آن که نیمی از جرمش در اثرِ تابشِ هاوکینگ از دست برود هم‌چنان یک سیاه‌چاله‌یِ سنگین به حساب می‌آید.
- اطلاعاتِ مربوط به آن‌چه که سیاه‌چاله را ساخته در پشتِ افقِ روی‌داد پنهان است و ظاهراً تا زمانی که سیاه‌چاله کاملاً تبخیر نشود، کسی به این اطلاعات دست‌رسی ندارد.
- بررسیِ این تفاوتِ بنیادی بینِ تبخیرِ یک سیاه‌چاله و فرایندهایی که از مکانیکِ کوانتمی پی‌روی می‌کنند، ممکن است درکِ ما از قوانینِ بنیادیِ طبیعت یعنی مکانیکِ کوانتمی و اصلِ هم‌ارزی را تغییر دهد.

آزمایشِ بمب در جعبه




اطلاعات
انرژی