بسم الله الرحمن الرحیم

دانشگاه شهید بهشتی

دانشکده علوم

گروه فیزیک

پایان نامه دوره کارشناسی ارشد فیزیک نظری

(شاخه گرانش)

ماشین زمان

در نسبیت عام

پژوهشگر:

یاسر توکلی

استاد راهنما:

دکتر هادی صالحی

استاد مشاور:

دکتر شهرام جلال زاده

شهریور ماه ۱۳۸۷

تاریخ ....
شماره ....
پیوست..........................

دانشگاه شهید بهشتی

بسمه تعالی

« صورتجلسه دفاع پایان نامه دانشجویان دوره کارشناسی ارشد»

تهران ۱۹۸۳۹۶۳۱۱۳ اوین
تلفن: ۲۹۹۰۱

بازگشت به مجوز دفاع شماره ۴۱/۶۸/۲۰/د مورخ ۱۳۸۷/۱۱/۵ جلسه هیأت داوران ارزیابی پایان نامه آقای یاسر توکلی به شماره شناسنامه ۳۰ صادره ازنورمتولد ۱۳۶۱ دانشجوی دوره کارشناسی ارشد ناپیوسته رشته فیزیک- ذرات بنیادي و نظریه میدانها

با عنوان :

ماشین زمان در نسبیت عام

به راهنمائی:

دکترمحمدهادی صالحی کرمانی

طبق دعوت قبلی در تاریخ ۱۳۸۷/۱۱/۱۹ تشکیل گردید و براساس رأی هیأت داوری و با عنایت به ماده ۲۰ آئین نامه کارشناسی ارشد مورخ ۷۵/۱۰/۲۵ پایان نامه مزبور با نمره ۱۸٫۲۵ و درجه عالی مورد تصویب قرار گرفت.

۱ -استاد راهنما: آقای دکتر محمد هادی صالحی کرمانی

۲- استاد مشاور:آقای دکتر شهرام جلال زاده.

۳- استاد داور: آقای دکتر محمد نوری زنوز

۴- استاد داورونماینده تحصیلات تکمیلی : آقای دکتر مهرداد فرهودی

تقدیم به پدر و مادر مهربان و گرامیم

ماشین زمان

چکیده:

در این پایان نامه مروری خواهیم کرد بر پژوهش هایی که در چند دههٔ گذشته بر روی خم های زمان گونهٔ بسته (CTCs) انجام گرفته است. همچنین چگونگی امکان وجود ماشین زمان را در ناحیه ای از فضا– زمان بررسی خواهیم کرد. به عبارت دیگر امکان انجام سفر در زمان را از دیدگاه نسبیت عام مورد مطالعه خواهیم داد، که همیشه با چالش ها، سوالات و معماهای زیادی در فیزیک و فلسفه همراه بوده است. سوالاتی از این قبیل که: آیا قوانین فیزیک مانع از وجود و یا تشکیل CTC ها در ساختار فضا– زمان های کلاسیک می شوند؟ و اگر چنین است با چه مکانیسم فیزیکی از تشکیل چنین خم هایی جلوگیری می کند؟ آیا قوانین فیزیک می توانند با روش اصولی و منطقی با فضا– زمان های شامل CTC ها سازگار باشند؟ و یا آنکه لزوما با تشکیل چنین خم هایی و در نتیجه با فضا– زمانی که این خم ها را ایجاد می کند، ناسازگارند ؟ از طرف دیگر با چه نگرشی به گرانش کوانتومی می توان به چنین سوالاتی پاسخ داد؟ در ابتدا مروری به مبانی نسبیتی ساختار فضا– زمانی خواهیم داشت و سپس چگونگی تشکیل CTC ها را در فضا– زمان های قابل پیشگویی از نسبیت عام مورد بررسی قرار خواهیم داد و سپس مدلی از معادلات میدان اینشتین ارائه خواهیم کرد و چگونگی و شرایط ایجاد ماشین زمان را در این مدل را توصیف و تفسیر خواهیم نمود.

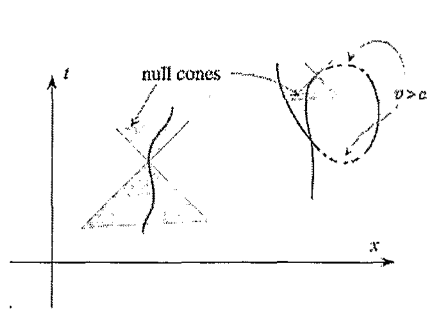
فهرست مطالب:

فصل اول

مقدمه

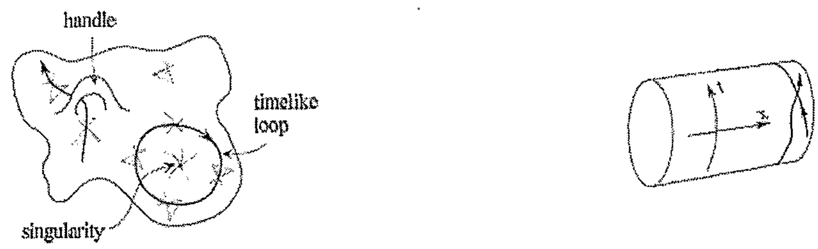
بحث وجود ماشین زمان (از دیدگاه علمی- تخیلی) به قرن نوزدهم بر می گردد[۲]، یعنی خیلی قبل از این که مفهوم فضا- زمان شناخته شود. با این وجود، نسبیت اینشتین بود که برای اولین بار زبانی مناسب را برای بحث و مطالعه روی ماشین زمان فراهم ساخت.

از دیدگاه نسبیت خاص، جهان ما یک فضا- زمان مینکوفسکی است و تاریخ زندگی یک ذره نقطه گونه، یک خم[1] در این فضا- زمان می باشد، (شکل ۱). در این حالت می توان با یک روش کاملا منطقی و معنی دار، مساله وجود ماشین زمان را - یعنی امکان اینکه یک ناظر بتواند با آینده خودش دیدار کند- فرمولبندی کرد. در اینجا می توان این سوال را مطرح کرد که آیا جهان- خط مربوط به یک ذره ممکن است خودش را قطع کند. واضح است که برای ساختن یک حلقه لازم است که با توجه به شکل ۱ جهان- خط مربوط به آن ذره در خارج از مخروط نوری قرار گیرد. یک ذره با چنین جهان- خطی می بایست سرعتی بالاتر از سرعت نور داشته باشد، ولی تاکنون هیچ تاکیونی[2] - ذرات بنیادی با سرعتی بیشتر از سرعت نور- مشاهده نشده است، همین دلیل است که امکان وجود ماشین زمان را در نسبیت خاص غیر ممکن ساخته است.



شکل (۱): در نسبیت خاص، ماشین زمان وجود ندارد.

curve [1]
Tachyon [2]



(الف) (ب)

شکل ۲: حلقه های زمان گونه وابسته به هندسه یا توپولوژی غیر بدیهی فضا- زمان موجود.

در نسبیت عام وضعیت متفاوت و غیر بدیهی تراست. بر اساس این نظریه فضا- زمان ما یک خمینهٔ[۱] همـوار لورنتزی می باشد، یعنی در ناحیه های به اندازه کافی کوچک، می بایست *تقریباً مینکوفسکی* باشـد، امـا در مقیاسهای بزرگ (یعنی طولهایی که معادله اینشتین در آن با یک چشمهٔ ماده منطقی برقرار باشد)، ممکـن است هرگونه هندسه یا توپولوژی ای داشته باشد. ممکن است در چنین فـضا- زمـانی تکینگـی[۲] و دسـته[۳] وجود داشته باشد، (شکل ۲ الف). و مخروط های نوری در چنین فضا-زمانی لزوماً در یک امتداد نیستند. به طور خاص، در چنین فضا-زمان هایی تشکیل خم های زمانگونهٔ بسته[۴] (CTCs)، امکانپذیر می باشد.

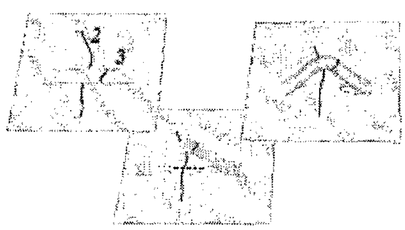
یک مثال ساده از این دسته، فضای مینکوفسکی است که روی یک استوانه قرار گرفته اسـت. (شـکل ۲ ب) به طور موضعی همه چیز در این فضا-زمان ساده است، اما با توجه به غیر بدیهی بودن ساختار عمـومی این فضا-زمان، یک ناظر می تواند با گذشته اش دیدار کند. با این وجود، چنـین فـضا-زمـان هـایی [۳و۴]، نمی توانند "**ماشین زمان**" نامیده شوند، زیرا CTC ها همیشه در آنها وجود دارد. یعنی که چنین نیست که گاهی اوقات خلق شوند. در این رابطه، یک مثال بهتر، فـضای DP[۵] مـی باشـد [۵] ، کـه در ادامـه بـه توصیف آن خواهیم پرداخت. همانطور کـه در (شـکل۳ الـف) نـشان داده شـده اسـت، دو بـرش از فـضای

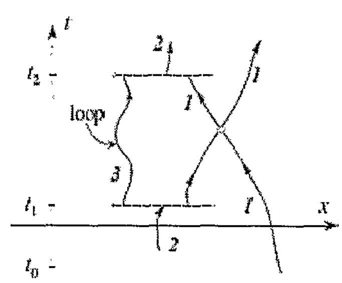
---

manifold [1]
singularity [2]
handle [3]
Closed Timelike Curve [4]
Deutsch-Politzer [5]

مینکوفسکی را در نظر می گیریم، و قسمت بالایی برش پایین تر را به قسمت پایینی برش بالاتر می چسبانیم و بر عکس. بنابراین یک استوانه که به صفحه چسبیده است ظاهر می گردد. راحت تر است که فضا-زمان بدست آمده را در صفحهٔ مینکوفسکی نشان دهیم (شکل۳ ب)، و توجه داریم که هر خمی که به قطعهٔ پایینی می رسد می بایست از قطعهٔ بالایی ادامه یابد، و برعکس.

فضای DP حلقه های زمانگونه ای را در بر می گیرد که همگی در راستای آیندهٔ یک ناحیهٔ علّی مناسب قرار گرفته اند، بنابراین مناسب است که نام *ماشین زمان* را برای آن برگزینیم. البته این مدل برای حل مشکل *ساختن* یک ماشین زمان مناسب نمی باشد (زیرا که این مدل، برای اینکه فضا-زمانی را *مجبورکنیم* تا به یک ماشین زمان تحول یابد، راه حلی ارائه نمی دهد.)، اما برای مطالعهٔ اینکه، اگر به دلایلی یک ماشین زمان بتواند بوجود آید چه اتفاقی می تواند رخ دهد، مناسب و کافی است.





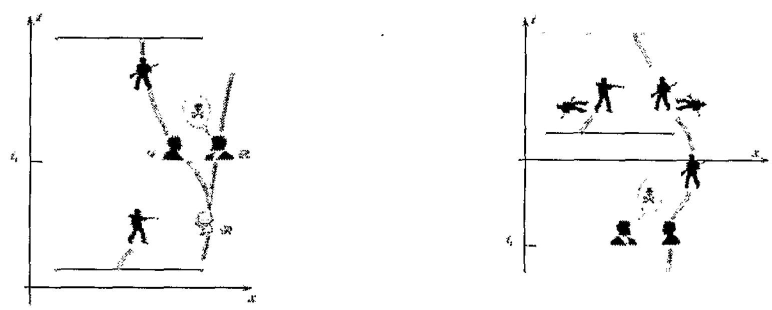
شکل(۳) : (الف) تهیه یک ماشین زمان از فضا-زمان DP در صفحهٔ مینکوفسکی. (ب) همهٔ خط ها (۱،۲،۳) واقعاً پیوسته هستند.

گاهی اوقات به این نکته فکر کرده ایم که وجود یک ماشین زمان ممکن است به تناقضات بسیار پریشان کننده ای در مقابل احساسات و آرزوهای معمولمان منجر شود. و یا حتی اثبات کنندهٔ عدم وجود چنین سیستمی باشد. هم اکنون ما بر این اظهارات پافشاری می کنیم. بیایید از پارادوکس پدر بزرگ[1] شروع کنیم، که داستانی است از یک پژوهشگر R ، که از پسرش، g ، می خواهد که به گذشته برود و او را (R) دردوران کودکیش بکشد(شکل ۴ الف)، اما مشکل اینجاست که : اگر g موفق شود، آنگاه آن کودک بزرگ نخواهد شد که چنین پسری داشته باشد تا بتواند او را بکشد. که اثبات کنندهٔ این

Grand father paradox [1]

است که پسر، g ، موفق نمی شود که آن کودک را بکشد. کیفیت این داستان بـه انـدازۀ کـافی مفـصل نیست، بنابر این روش های زیادی برای بیان آن وجود دارد. سؤالی که مطرح می شود این است که چرا g موفق نمی شود؟

در جواب این سؤال می توان گفت که ممکن است تفنگ عمل نکند[1] و یا تیر انداز می تواند اشتباه کند. با این وجود، اگر ما بارها امثال آن پسر را مسلّح کنیم، در آن صورت فقط تیر اندازان ناشی تفنگ - های قابل اعتماد و مناسبی بدست می آورند، که البته این اتفاق خیلی عجیب به نظر می رسد. چرا ما



شکل (۴): پارادوکسی که یک حل ساده را ارضاء میکند در شکل نشان داده شده است. هنگـامی کـه شـرایط اولیـه در $t_i \in (t_1, t_2)$ به وسیلۀ غلبه بر آزمایش (الف) و در غیر این صورت (ب) تحت تأثیر قرار می گیرد.

نمی توانیم یک تفنگ خوب در اختیار یک تیرانداز ماهر قرار دهیم؟ آیا ایـن یـک محـدودیت در آزادی اراده و خواست ما نیست؟

در واقع جواب پارادوکس پدربزرگ کاملاً ساده است. نکته اینجاست که فقط افرادی بـرای آزمـایش در دسترس هستند که پدر بزرگشان به هر دلیلی کشته نشده اند. بنابراین، آنچه مانع از این می شود که نتوانیم یک تیرانداز ماهر با یک تفنگ مناسب را مأمور چنین کاری بکنـیم محـدودیت در آزادی اراده و خواست ما نیست، بلکه علّت آن کمبود چنین تیر اندازانی است. در نتیجه حتّی با بهترین تفنگ هـم در غیاب تیر انداز ماهر نمی توانیم به چنین هدفی دست یابیم.

[1] The gun can jam

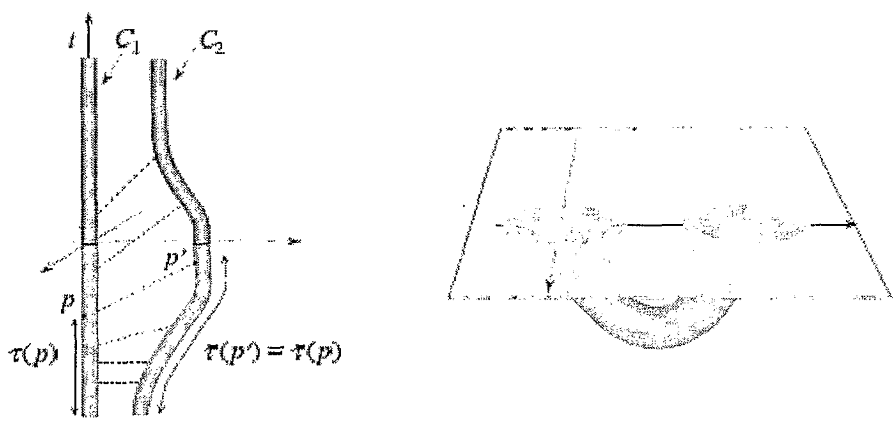
با کمی تحلیل بیشتر می توان نشان داد که [۶] برای اجتناب از چنین مسائل ساده ای، می بایست آزمایش هایی را در نظر بگیریم که قابل انجام باشند، قبل از اینکه ماشین زمان در دسترس گردد[۵]. فرض کنید شخصی از دیگری می خواهد تا منتظر بماند تا ماشین زمان ساخته شود (در زمانی در آینده)، سپس وارد آن شود و خودش را در دوران جوانی بکشد (شکل۴ ب). این وضعیت در ماشین زمان دقیقاً همان پارادوکس پدربزرگ است. اگر شخص آزمون در لحظه ای که با شخص زمان جوانیش ملاقات می کند مرده باشد، نمی تواند خود جوانش را بکشد، پس چگونه او مرده است؟ و اگر او زنده است و تیر اندازی می کند، چگونه می تواند پس از مرگ خود زنده باشد؟ در زمان کنونی شرایط اولیه به آنچه در داخل یک ماشین زمان رخ می دهد وابسته نیست، و این پارادوکس راه حل ساده ای ندارد. به اضافه، فرمول بندی این حالت بر حسب ذرات نقطه ای، (که به ما اجازه می دهد، هر وضعیتی را بسنجیم) به هیچ وجه قابل حل نیست [۶].

چگونه می توان بر پارادوکس سفر در زمان غلبه کرد؟ بهترین و بنیادی ترین کار این است که مانع از نقض اصل علّیت در ماشین زمان شویم. اگرچه این کار چندان آسان نمی باشد. موریس[۱]، تورن[۲] و یورتسور[۳](MTY) در سال ۱۹۸۸ مقاله ای منتشر کردند که در آن فضا-زمانی همانند M را (که در شکل ۵ نشان داده شده است) در نظر گرفتند. از نظر هندسی M می تواند با استفاده از جدا کردن دو استوانهٔ بستهٔ C_1 و C_2 از فضای مینکوفسکی و چسباندن مرزهای حفره های حاصل، $B_{1,2} \equiv Bd\, C_{1,2}$، به یکدیگر بدست می آید. (محل تقاطع استوانه ها با به اندازهٔ کافی خم شدن در نزدیکی مرزهای $B_1 = B_2$ یکنواخت و هموار می شود.) استوانه ها موازی با محور t در نظر گرفته می شوند به جز اینکه C_2 یک بستگی در $-1 < t < 1$ دارد. گلوگاه باید رابطهٔ زیر را ارضاء کند:

$$p = p' \qquad \Rightarrow \qquad \tau(p) = \tau(p') \quad , \qquad\qquad (*)$$

---

[1] M. S. Morris
[2] K. S. Thorne
[3] U. Yurtsever



شکل (۵): الف- خطوط نقطه چین در شکل نقاط یکسان را به یکدیگر متصل می کنند. ب- قسمت t=-2 از M.

به طوریکه $\tau(x)$ طول بلندترین خم زمانگونه ای است که در $B_{1,2}$ قرار می گیرد و x را با سطح $t=-2$ متصل می کند.(توجه شود که متریک را لورنتزی در نظر می گیریم). به واسطهٔ مرز، τ در B_2 کند تر از B_1 با زمان رشد می کند (پارادوکس دو قلوها). در نتیجه حرکت نسبی دهانه ها باعث می شود که خم های علّی در داخل دهانه ها یکدیگر را قطع کنند، در فصل سوم این مدل را با جزئیات بیشتری بررسی خواهیم کرد.

ما در فصل دوم، مروری خواهیم داشت به مبانی نسبیت عام که در توضیح و تحلیل ساختار ریاضی نظریه مان به آن نیاز داریم، چرا که ماشین زمان و خم های زمانگونهٔ بسته (CTC ها) در بستری علّیتی از خمینهٔ[1] فضا- زمان تشکیل می گردد. بنابراین لازم است که بینشی عمیق تر به ساختار هندسی و علیتی از فضا- زمان داشته باشیم. در فصل سوم با توجه به اطلاعات و دانشی که از فصل دوم از ساختار علیتی فضا- زمان به دست آورده ایم، چگونگی و شرایط لازم را از دیدگاه نسبیت عام برای تشکیل CTC ها و ایجاد ناحیه خاص از فضا- زمان که تشکیل این خم ها را تضمین می کند (ماشین زمان)، مورد بررسی و تجزیه و تحلیل قرار می دهیم و به ذکر چند مثال از فضا- زمان هایی که شامل CTC ها هستند می پردازیم و شرایط و ویژگیهای این فضا- زمان ها را مورد بررسی قرار خواهیم داد. سرانجام در فصل چهارم مدلی (در داخل یک ستارهٔ در حال رمبش) ارائه می دهیم و با توجه به

---

[1] Manifold

شرایطی که پیش تر بدان پرداخته ایم ثابت می کنیم که این مدل می تواند یک ساختار علیتی از فضا- زمان خاصی (که یک حل از معادلات میدان اینشتین است) را توصیف کند که به نوعی تضمین کنندهٔ تشکیل CTC ها است و می تواند مدلی پیشنهادی برای ماشین زمان باشد که کلیهٔ شرایط لازم را که نسبیت عام ایجاب می کند، به خوبی ارضاء کند.

منابع فصل اول:

[1] L. S. de Camp "The Best-Laid Scheme", *in The Wheels of IF* (New York: Berkley, 1970).

[2] H. G. Wells "The Time Machine", in *The Definitive Time Machine* (Bloomington: Indiana University Press, 1987).

[3] K. Godel, Rev. Mod. Phys 21, 447 (1949).

[4] F. J. Tipler, Phys. Rev. D 9, 2203 (1974).

[5] D. Deutsch, Phys. Rev. D 44, 3197 (1991);
H. D. Politzer, Phys. Rev. D 46, 4470 (1992).

[6] S. Krasnikov, Phys. Rev. D 65, 064013 (2002).

[7] M. S. Morris, K. S. Thorne, and U. Yurtsever, Phys. Rev. Letters 61, 1446 (1988).

[8] For discussion and references see, for instance: Ref. [6];
M. Visser, Lorentzian wormholes, (New York: AIP Press, 1996);
P. J. Nahin, Time Machines, (New York: Springer-Verlag, 1999);
J. Earman and C. Smeenk, in Reverberations of the Shaky Game, (Eds. R. Jones and P. Ehrlich, to be published by University of Chicago Press).

[9] S. W. Hawking, Phys. Rev. D 46, 603 (1992)

[10] J. R. Gott, Phys. Rev. Lett. 66, 1126 (1991)

[11] S. Krasnikov, Class. Quantum Grav. 19, 4109 (2002).

فصل دوم

ساختارهای علّی در نسبیت عام

۲–۱ مقدمه:

در این فصل به مبانی نسبیت عام و توضیح ساختارهای علّی فضا-زمان و چگونگی تحـول خـم هـای زمانگونه خواهیم پرداخت. خم های زمانگونه، خم هایی از یک خمینهٔ[1] چهـار بعـدی فـضا-زمـانی (۱+۳ بعدی) هستند که طی تحول خود همواره در داخل مخروط نوری (یعنی مخروطی نوری وابسته به یـک رویداد که ساختارهای علّی را حفظ می کند.) قرار می گیرند، و بنابراین نشاندهندهٔ تحولات فضا-زمـانی واقعی و فیزیکی می باشند.

در قسمت ۲-۲ از این فصل به توضیح و ارائه تعریف افق یک سیاهچاله می پردازیم، که این تعریف ها در فصل های آینده برای توضیح ساختار فضا-زمان و تحول خم های زمان گونه ضروری می باشند.

ساختارهای علی فضا-زمان در نسبیت (خاص و عام) به طـور مفـصل در [۱] و [۲] بررسـی شـده است، که در قسمت ۲-۳ به بیان خلاصه ای از آن اکتفا خواهیم کرد. به هر رویداد، P ، در فـضا-زمـان یک مخروط نوری، مطابق شکل (۲) فصل اول نسبت می دهیم. نیمه بالایی مخروط نوری *آینده* و نیمه پایینی آن *گذشته* نامیده می شود. رویدادهایی که در داخل مخروط نوری قرار می گیرند، نمایش دهندهٔ رویدادهایی هستند که می توانند به وسیله ی ذرات مادی از نقطه ی P شروع شوند. ایـن رویـدادها *با تقدّم زمانی آینده*[2] P را تعریف می کنند. تقدم زمانی آینده P به همـراه تمـام رویـدادهای روی خـود

---

[1] Manifold
[2] Chronological future

مخروط نوری، *آینده علّی*[1] نقطه ی P را تعریف می کنند، که از نظر فیزیکی نمایش دهندهٔ رویدادهایی هستند که می توانند از گسیل یک سیگنال در نقطه ی P ایجاد شده باشند.

در نسبیت عام، ساختارهای علّی فضا-زمان به صورت موضعی دارای همان کیفیت ساختارهای علّی نسبیت خاص (فضا-زمان تخت) می باشند. با این وجود، این ساختارها به خاطر غیر بدیهی بودن توپولوژی، تکینگی های موجود در فضا-زمان و یا *پیچ و تاب خوردن* امتداد های مخروط نوری در حرکت از نقطه ای به نقطه دیگر، از لحاظ عمومی، دارای تفاوتهای اساسی می باشند.

۲-۲ افق ها در نسبیت عام:

افق ها ساختارهای تئوری ای هستند که به طور کیفی دو ویژگی برجسته را نشان می دهند:

۱- افق ها، پوسته های یکطرفه ای هستند که به نور و ماده فقط اجازهٔ سیر در یک امتداد را می دهد.

۲- زمان در نزدیکی یک افق کند و کند تر می شود تا اینکه سرانجام در روی افق متوقف می گردد.

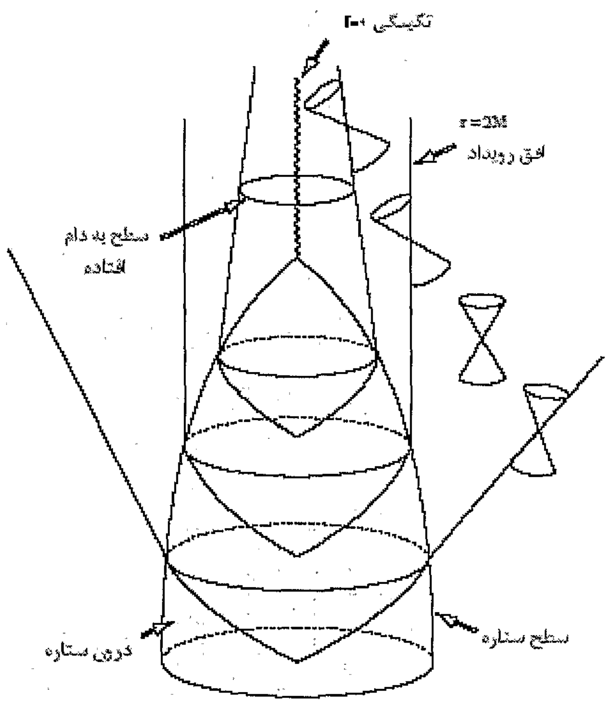
برای بررسی جزئیات بیشتر ریاضی می توان به [۱] مراجعه کرد. در نسبیت عام حداقل چهار گونهٔ جالب از افق ها وجود دارد که می تواند در فضا-زمان ایجاد شود. هر کدام از این گونه ها با توجه به شدت میدانهای گرانشی می توانند تشکیل گردند. باید توجه کرد که ممکن است میدانهای گرانشی خیلی قوی بدون تشکیل هیچ افقی نیز وجود داشته باشد، و یا برعکس، ممکن است گونهٔ خاصی از افق ها بدون حضور هیچ میدان گرانشی نیز بوجود آیند.

۲-۳ -۱ افق رویداد[2]:

یک افق رویداد (یا افق مطلق) به فضا-زمانهایی اطلاق می شود که از ناحیه های به طور مجانبی تخت تشکیل شده باشد.

تعریف: برای هر ناحیه به طور مجانبی تخت، افق رویداد آینده یا گذشته مربوطه، مرز ناحیه ای است که در آن خم ها (خم های زمانگونه یا نور گونه) می توانند به طور مجانبی به بینهایت نول آینده[3] یا گذشته برسند.

Causal future 1
Event horizon 2
Future null infinity 3



شکل (۱): رمبش یک ستارهٔ کروی که به تشکیل سطوح به دام افتاده، افق رویداد، و تکینگی فضا- زمان منجـر مـی-شود.

در واقع جبهه موج بحرانی که فقط از همگرا شدن اجتناب می کند افق رویداد است، یعنی مـرز ناحیـه ای از فضا-زمان است که از آن امکان فرار به بینهایت در طول یک خم غیر فـضاگونه (زمانگونـه یـا نـور گونه) در امتداد آینده وجود ندارد. در اینجا به بیان چند ویژگی اساسی از افق رویداد می پردازیم:

۱- افق رویداد یک ابرسطح نول است که به وسیله تکه ژئودزیک های نول تولیـد شـده اسـت کـه نقاط انتهایی آینده[1] ندارند، ولی دارای نقاط انتهایی گذشته[2] می باشند (در نقطه انتشار).

۲- واگرایی مولد ژئودزیک های نول در مدت فاز رمبش مثبت است و در حالـت مـستقل از زمـان نهایی صفر می باشد. این واگرایی هیچ گاه منفی نیست.

۳- سطح یک تقاطع دوبعدی از افق، به طور یکنواخت از صفر به مقدار نهایی $16\pi M^2$ افزایش می-یابد.

---

[1] Future end-popint
[2] Past end-point

یافتن افق رویداد (اگر وجود داشته باشد) نیازمند داشتن اطلاعات کافی از هندسهٔ فضا-زمان می باشد. هر چیزی از پشت یک افق رویداد برای همیشه به دام افتاده است و هرگز نمی تواند از آن خارج شود. (برای بررسی جزئیات بیشتر می توان به [۱] مراجعه کرد.)

۲-۳-۲ افق ظاهری[1]:

افق ظاهری را می توان به طور موضعی بر حسب سطوح به دام افتاده[2] تعریف کرد. یک سطح دو بعدی (دو-سطح) فضاگونه و بسته را در نظر می گیریم. در هر نقطه از این دو-سطح دو ژئودزیک نول وجود دارد که بر سطح عمود هستند، که از آنها می توان برای تعریف داخل و خارج جبهه های موج در حال انتشار استفاده کرد. اگر هر دو سطح درونی و بیرونی جبهه های موج در حال انتشار به صورت تابعی از زمان کاهش یابند، آنگاه دو-سطح اولیه یک سطح به دام افتاده است و هر کسی در روی این سطح، در درون یک افق ظاهری قرار دارد. به بیان دقیق تر، اگر گسترش هر دو مجموعه از ژئودزیک های نول عمود، منفی باشد، آنگاه دو-سطح یک سطح به دام افتاده خواهد بود.

هر چیزی در پشت افق ظاهری مجبور است (حداقل در ابتدا) به سمت درون سیر کند. این مطلب به خودی خود ، تضمین کنندهٔ این نیست که هر چیزی در عقب یک افق ظاهری برای همیشه به دام افتاده باقی می ماند.

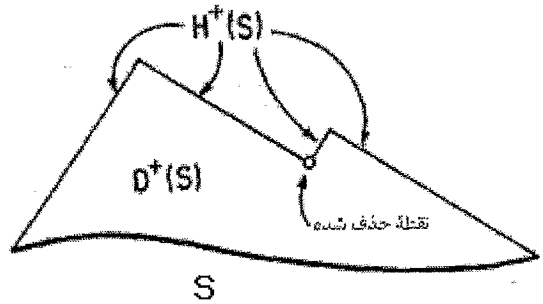
۲-۳-۳ افق کوشی[3]:

فرض می کنیم که یک ابر سطح فضاگونهٔ Σ در دست داشته باشیم، و چند دادهٔ اولیه روی آن مشخص باشد. این داده های اولیه از اطلاعاتی از قبیل مکان های ذرات، سرعتهایشان، شکل گیری برخی از میدان ها و نرخ زمانی تغییرات آنها و یا حتی هندسهٔ فضایی و سرعت تغییرات آن تشکیل شده اند. می-توان معادلات مناسبی را برای حرکت به منظور بدست آوردن پیشگویی های یکتایی برای برخی نواحی $D(\Sigma)$ ، یعنی حوزهٔ وابستگی Σ، حل کرد. مرز حوزهٔ وابستگی، یک افق کوشی از سطح Σ می-

---

Apparent horizon [1]
trapped surfaces [2]
Cauchy horizon [3]

باشد، که با $H(\Sigma)$ نمایش داده می شوند. شکل (۲) افق کوشی یک مجموعهٔ آکرونال S (که در بخش های دیگر به آن خواهیم پرداخت) را نشان می دهد.



شکل (۲): یک دیاگرام فضا- زمانی که افق کوشی یک مجموعهٔ ویژهٔ آکرونال S را نشان می دهد.

تعریف: برای یک سطح فضاگونهٔ Σ افق کوشی آیندهٔ وابسته به آن، به صورت مرز ناحیه ای تعریف می شود که همهٔ خم های علّی با امتداد گذشته که از آن می آیند، سطح Σ را قطع می کنند. (شکل ۲)

۲–۳ –۴ افق ذره[1]:

افق ذره، یک مفهوم وابسته به ناظر است. یک افق ذره زمانی رخ می دهد که یک ناظر معین هیچ گاه تحت تاثیر کل فضا-زمان قرار نگیرد و یا قادر نباشد کل فضا-زمان را مشاهده کند.

تعریف: برای یک خم علّی γ افق ذرهٔ آیندهٔ وابسته به آن به صورت مرز ناحیه ای تعریف می شود که خم های علّی ای که از آن می آیند، بتوانند به برخی نقاط روی γ برسند.

۲–۳ ساختارهای علّی در نسبیت عام:

در این قسمت به طور خلاصه به بیان و توصیف ساختارهای علّی در نسبیت عام می پردازیم که در توصیف ساختارهای فضا-زمانی که در بر گیرنده خم های زمانگونه بسته هستند، به کار می آیند.

تعریف (۱): یک خم علّی خمی است که فضاگونه نباشد، یعنی اینکه زمانگونه یا نورگونه **باشد.**

اثرات فیزیکی که یک ناظر یا پیامهای رادیویی می توانند ارسال کنند، به ترتیب محدود به حرکت در طول خم های زمانگونه و نورگونه است. این مطلب موید این واقعیت است که اثرات فیزیکی به طور

---
[1] Particle horizon

موضعی[1] نمی توانند با سرعت بیشتر از نور سیر کنند. بنابراین اگر دو نقطه در فضا-زمان به وسیله خم - های علّی با هم در ارتباط باشند، می توانند با ارسال یک پیام رادیویی (یک موج الکترومغناطیس که با سرعت نور حرکت می کند.) و یا با استفاده از حرکت یک ناظر (با سرعت کمتر از سرعت نور) با یکدیگر در ارتباط باشند.

به دلایل تکنیکی بهتر آن است که تعریف زیر را ارائه کنیم:

تعریف (۲): یک خم با تقدّم زمانی[2] خمی است که زمانگونه باشد.

خم های با ترتیب زمانی برای ارسال کننده هایی مناسب است که محدود به پیام های دستی (یا پیام- هایی که توسط یک ناظر با سرعت کمتر از سرعت نور سیر می کنند.) می باشند. قضایای بسیاری که بر اساس تحلیل خم های علّی می باشند، تشابه بسیار نزدیکی به قضایای مربوط به خم های با تقدم زمانی دارند. از طرف دیگر این دو دیدگاه از لحاظ منطقی متمایز بوده و نمی توان کورکورانه جهان با تقدم زمانی را جایگزین جهان علّی کرد. برای پیشبرد این منظور عبارت " جهت گیری زمانی[1] " را می توان مورد استفاده قرار داد. به این دلیل ما تعریف زیر را در نظر می گیریم:

تعریف (۳): یک فضا-زمان لورنتزی M جهت گیری زمانی دارد، اگر و تنها اگر در هر جایی یک میدان برداری زمانگونه، پیوسته و غیر صفر را ارضا کند.

این عبارت به این معنی است که ناظری که در یک نقطه از فضا-زمان قرار دارد، می بایست قادر باشد که مخروط زمانی را به دو قسمت *مخروط نوری آینده* و *مخروط نوری گذشته* تقسیم کند. همه فضا- زمان های بحث شده در این فصل و فصل های آینده از نوع چنین فضا-زمان هایی می باشند، یعنی دارای جهت گیری زمانی هستند (بحث های فیزیکی کاملتری در این مورد را می توان در[۱] و [۲] یافت).

اگر فضا-زمانی با جهت گیری زمانی باشند، آنگاه برای هر نقطه $p \in M$ می توان مجموعه های آینده علّی و گذشته علّی را برای آن تعریف کرد:

Locally [3]
Chronological curve [4]

تعریف (۴): اگر M یک فضا-زمان با جهت گیری زمانی باشد، آنگاه $\forall p \in M$ ، آینـده علّـی نقطـه p که با $J^{+}(p)$ نمایش داده می شود، به صورت زیر تعریف می شود:

$$J^{+}(p) \equiv \left\{ q \in M \middle| \begin{array}{c} \text{یک خم زمانگونه در امتداد آینده، } \lambda(t) \text{، وجود دارد به طوریکه} \\ \lambda(t) : \lambda(0) = p, \lambda(1) = q \end{array} \right\}$$

به طور مشابه، گذشته علّی نقطه p با $J^{-}(p)$ نمایش داده می شود و بر حسب خم های علّی بـا جهـت گیری گذشته تعریف می شود.

خم های علّی با گسترش غیر صفر فرض می شوند، بنابراین تحت شرایط معمولی $p \notin J^{+}(p)$.

تعریف (۵): آینده با تقدم زمانی[2] نقطه $p \in M$ با $I^{+}(p)$ نمایش داده می شود و مجموعه وقایعی را در بر می گیرد که می توانند به وسیله خم زمانگونه با امتداد آینده[3] کـه از نقطـه p آغـاز شـده اسـت، بـه یکدیگر متصل شوند.

$I^{+}(p)$ همیشه یک زیر مجموعه باز از M می باشد.

توجه داشته باشید که در حالت کلی $p \notin I^{+}(p)$، اما اگر خم مورد نظر یک خم زمانگونه بسته باشد که ابتدا و انتهای آن در نقطه p است، آنگاه p در $I^{+}(p)$ وجود نخواهد داشت.

به طور مشابه می توان، گذشته با تقدم زمانی[4] نقطه p را که با $I^{-}(p)$ نمایش داده می شود، بر حـسب خم های علّی با جهت گیری گذشته تعریف کرد.

تعریف (۶): اگر یک فضا-زمان M شامل یک خم علّی بسته $\gamma(t)$ باشد، آنگاه M یک ماشین زمان بـا ممنوعیت علیتی[1] را در بر می گیرد و خم $\gamma(t)$ مسیر یک ماشین زمان را طی خواهد کرد.

تعریف (۷): اگر یک فضا-زمان M یک خم با تقدم زمانی بسته $\gamma(t)$ را در بر گیرد، یعنی خم زمانگونه بسته (CTC) آنگاه M یک ماشین زمان با ممنوعیت در تقدم زمانی را شامل می گـردد و خـم $\gamma(t)$ مسیر یک ماشین زمان را طی خواهد کرد.

توجه داشته باشید که همه ماشین های زمـان دارای ممنوعیـت تقـدم زمـانی، ماشـین هـای زمـان بـا ممنوعیت علیتی می باشند. ممکن است ماشین زمانی داشته باشیم که ممنوعیت علیتی داشته باشد، اما

---

[1] time-orientability
[2] Chronological future
[3] Future directed
[4] Chronological past