

1. Teori Klasik

SW Hawking

Dalam kuliah ini Roger Penrose dan saya akan mengemukakan sudut pandang kami yang terkait tetapi agak berbeda tentang sifat ruang dan waktu. Kami akan berbicara secara bergantian dan masing-masing akan memberikan tiga ceramah, diikuti dengan diskusi tentang pendekatan kami yang berbeda. Saya harus menekankan bahwa ini akan menjadi kuliah teknis. Kita akan mengasumsikan pengetahuan dasar tentang relativitas umum dan teori kuantum.

Ada artikel pendek oleh Richard Feynman yang menjelaskan pengalamannya di sebuah konferensi tentang relativitas umum. Saya pikir itu adalah konferensi Warsawa pada tahun 1962. Itu berkomentar dengan sangat tidak baik tentang kompetensi umum orang-orang di sana dan relevansi dari apa yang mereka lakukan. Relativitas umum itu segera memperoleh reputasi yang jauh lebih baik, dan lebih banyak minat, dalam ukuran yang cukup besar karena pekerjaan Roger. Sampai saat itu, relativitas umum telah dirumuskan sebagai seperangkat persamaan diferensial parsial yang berantakan dalam satu sistem koordinat. Orang-orang sangat senang ketika mereka menemukan solusi sehingga mereka tidak peduli bahwa itu mungkin tidak memiliki arti fisik. Namun, Roger membawa konsep modern seperti pemintal dan metode global. Dia adalah orang pertama yang menunjukkan bahwa seseorang dapat menemukan sifat umum tanpa menyelesaikan persamaan dengan tepat. Itu adalah teorema singularitas pertamanya yang memperkenalkan saya pada studi tentang struktur kausal dan mengilhami karya klasik saya tentang singularitas dan lubang hitam.

Saya pikir Roger dan saya cukup setuju pada karya klasik. Namun, kami berbeda dalam pendekatan kami terhadap gravitasi kuantum dan tentu saja terhadap teori kuantum itu sendiri. Meskipun saya dianggap sebagai radikal berbahaya oleh fisikawan partikel karena mengusulkan bahwa mungkin ada hilangnya koherensi kuantum, saya jelas seorang konservatif dibandingkan dengan Roger. Saya mengambil sudut pandang positif bahwa teori fisika hanyalah model matematika dan tidak ada artinya untuk menanyakan apakah itu sesuai dengan kenyataan. Yang bisa ditanyakan hanyalah bahwa prediksinya harus sesuai dengan pengamatan. Saya pikir Roger adalah seorang Platonis di hati tetapi dia harus menjawab untuk dirinya sendiri.

Meskipun ada saran bahwa ruangwaktu mungkin memiliki struktur terpisah, saya tidak melihat alasan untuk meninggalkan teori kontinum yang telah begitu sukses. Umum relativitas adalah teori indah yang setuju dengan setiap pengamatan yang telah dilakukan. Ini mungkin memerlukan modifikasi pada skala Planck tetapi saya tidak berpikir itu akan mempengaruhi banyak prediksi yang dapat diperoleh darinya. Ini mungkin hanya pendekatan energi rendah untuk beberapa teori yang lebih mendasar, seperti teori string, tapi saya pikir teori string sudah terlalu banyak dijual. Pertama-tama, tidak jelas bahwa relativitas umum, ketika digabungkan dengan berbagai bidang lain dalam teori supergravitasi, tidak dapat memberikan teori kuantum yang masuk akal. Laporan dari

kematian supergravitasi adalah berlebihan. Satu tahun semua orang percaya bahwa supergravitasi itu terbatas. Tahun berikutnya mode berubah dan semua orang mengatakan bahwa supergravitasi pasti memiliki divergensi meskipun tidak ada yang benar-benar ditemukan. Alasan kedua saya untuk tidak membahas teori string adalah karena teori tersebut tidak membuat prediksi yang dapat diuji. Sebaliknya, penerapan langsung teori kuantum pada relativitas umum, yang akan saya bicarakan, telah membuat dua prediksi yang dapat diuji. Salah satu prediksi ini, perkembangan gangguan kecil selama inflasi, tampaknya dikonfirmasi oleh pengamatan baru-baru ini tentang fluktuasi latar belakang gelombang mikro. Prediksi lain, bahwa lubang hitam harus memancar secara termal, pada prinsipnya dapat diuji. Yang harus kita lakukan adalah menemukan lubang hitam purba. Sayangnya, sepertinya tidak banyak yang berkeliaran di leher hutan ini. Jika ada kita akan tahu bagaimana mengkuantisasi gravitasi.

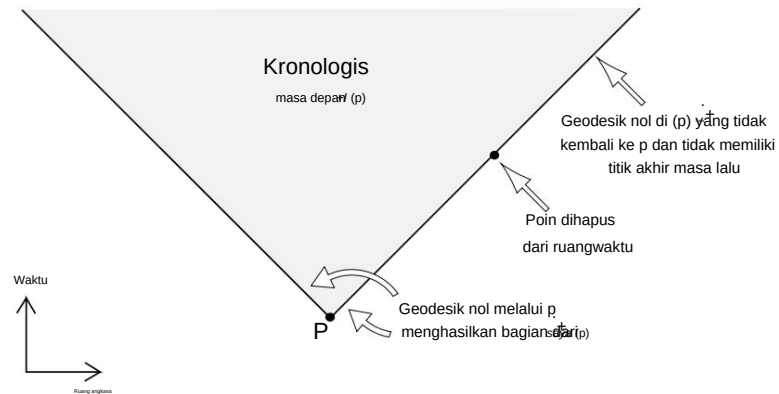
Tak satu pun dari prediksi ini akan berubah bahkan jika teori string adalah teori alam yang pamungkas. Tetapi teori string, setidaknya pada perkembangannya saat ini, tidak mampu membuat prediksi ini kecuali dengan menggunakan relativitas umum sebagai teori hemat energi. Saya menduga ini mungkin selalu terjadi dan mungkin tidak ada prediksi yang dapat diamati dari teori string yang juga tidak dapat diprediksi dari relativitas umum atau supergravitasi. Jika ini benar, itu menimbulkan pertanyaan apakah teori string adalah teori ilmiah yang asli. Apakah keindahan dan kelengkapan matematis cukup tanpa adanya prediksi yang diuji secara observasional. Bukan berarti teori string dalam bentuknya yang sekarang indah atau lengkap.

Untuk alasan ini, saya akan berbicara tentang relativitas umum dalam kuliah ini. Saya akan berkonsentrasi pada dua bidang di mana gravitasi tampaknya mengarah ke fitur yang sama sekali berbeda dari teori medan lainnya. Yang pertama adalah gagasan bahwa gravitasi harus menyebabkan ruang-waktu memiliki awal dan mungkin akhir. Yang kedua adalah penemuan bahwa tampaknya ada entropi gravitasi intrinsik yang bukan hasil dari butiran kasar. Beberapa orang telah mengklaim bahwa prediksi ini hanyalah artefak dari pendekatan semi klasik. Mereka mengatakan bahwa teori string, teori gravitasi kuantum yang sebenarnya, akan menghapus singularitas dan akan memperkenalkan korelasi dalam radiasi dari lubang hitam sehingga hanya mendekati termal dalam arti butiran kasar. Akan sangat membosankan jika seperti ini. Gravitasi akan sama seperti bidang lainnya. Tapi saya percaya itu sangat berbeda, karena membentuk arena di mana ia bertindak, tidak seperti bidang lain yang bertindak di latar belakang ruang-waktu yang tetap. Inilah yang mengarah pada kemungkinan waktu memiliki permulaan. Ini juga mengarah ke wilayah alam semesta yang tidak dapat diamati, yang pada gilirannya memunculkan konsep entropi gravitasi sebagai ukuran dari apa yang tidak dapat kita ketahui.

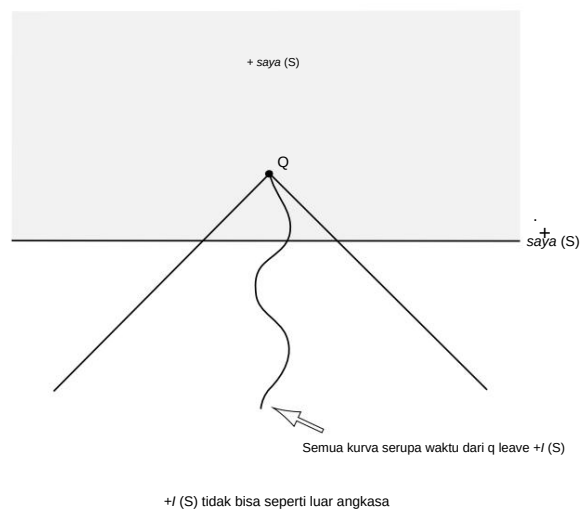
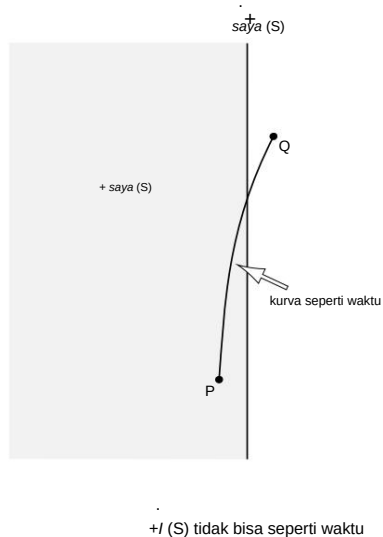
Dalam kuliah ini saya akan meninjau pekerjaan dalam relativitas umum klasik yang mengarah pada ide-ide ini. Dalam kuliah kedua dan ketiga saya akan menunjukkan bagaimana mereka diubah dan diperluas

ketika seseorang pergi ke teori kuantum. Kuliah dua tentang lubang hitam dan kuliah tiga tentang kosmologi kuantum.

Teknik penting untuk menyelidiki singularitas dan lubang hitam yang diperkenalkan oleh Roger, dan yang saya bantu kembangkan, adalah studi tentang struktur kausal global ruangwaktu.

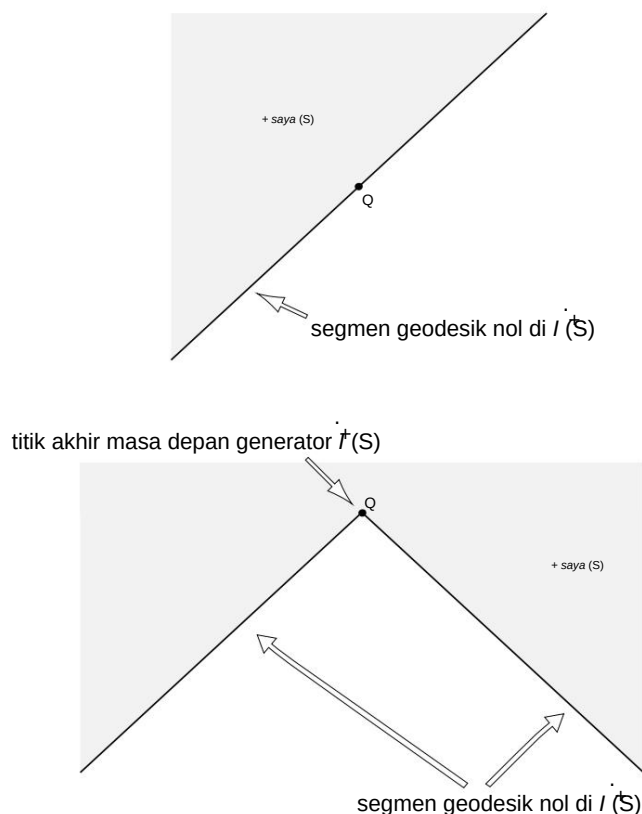


Definisikan $I^+(p)$ sebagai himpunan semua titik ruangwaktu M yang dapat dicapai dari p dengan waktu yang diarahkan di masa depan seperti kurva. Seseorang dapat menganggap $I^+(p)$ sebagai himpunan semua peristiwa yang dapat dipengaruhi oleh apa yang terjadi pada p . Ada definisi serupa di mana plus diganti dengan minus dan masa depan dengan masa lalu. Saya akan menganggap definisi seperti itu sebagai bukti dengan sendirinya.



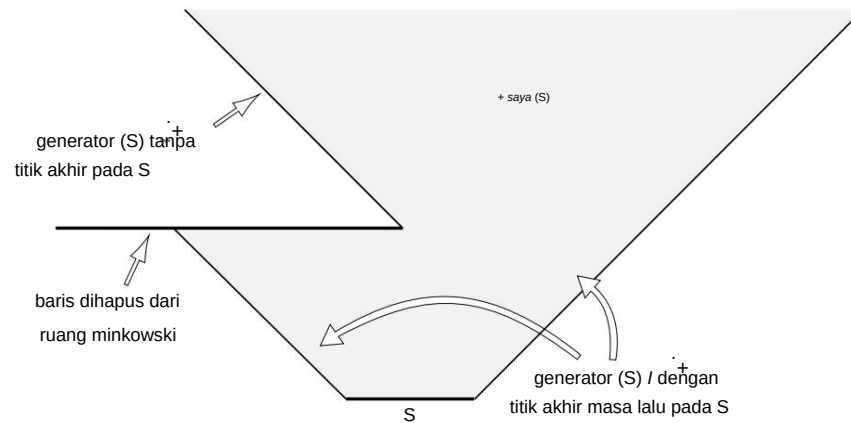
Satu sekarang menganggap batas melihat $I^+(p)$ dan batas masa depan $I^-(p)$ sebagai himpunan titik-titik. Karena pada dasarnya, titik q tepat di luar batas akan menjadi masa depan titik p tepat di dalam. Batas juga tidak dapat

masa depan menjadi seperti ruang, kecuali pada himpunan S itu sendiri. Karena dalam kasus itu setiap kurva terarah masa lalu dari titik q , tepat ke masa depan batas, akan melintasi batas dan meninggalkan masa depan S . Itu akan menjadi kontradiksi dengan fakta bahwa q ada di masa depan S .



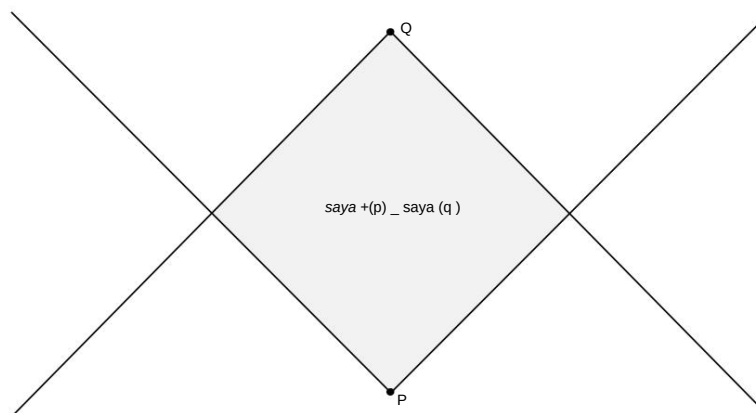
Oleh karena itu orang menyimpulkan bahwa batas masa depan adalah nol selain di S itu sendiri. Lebih tepatnya, jika q berada di batas masa depan tetapi tidak dalam penutupan S , ada segmen geodesik nol berarah masa lalu melalui q yang terletak di batas. Mungkin ada lebih dari satu segmen geodesik nol melalui q yang terletak di batas, tetapi dalam kasus itu q akan menjadi titik akhir segmen di masa depan. Dengan kata lain, batas masa depan S dibangkitkan oleh geodesik nol yang memiliki titik akhir masa depan dalam batas dan melewati interior masa depan jika mereka memotong generator lain. Di sisi lain, generator geodesik nol dapat memiliki titik akhir masa lalu hanya pada S . Namun, dimungkinkan untuk memiliki ruang-waktu di mana ada generator batas masa depan himpunan S yang tidak pernah memotong S . Generator seperti itu dapat tidak memiliki titik akhir masa lalu.

Contoh sederhananya adalah ruang Minkowski dengan segmen garis horizontal dihilangkan. Jika himpunan S terletak di belakang garis horizontal, maka garis tersebut akan membentuk bayangan dan akan ada titik-titik di masa depan garis yang tidak berada di masa depan S . Akan ada pembangkit batas dari garis tersebut. masa depan S yang kembali ke ujung horizontal



garis. Namun, karena titik akhir garis horizontal telah dihilangkan dari ruang-waktu, generator batas ini tidak akan memiliki titik akhir masa lalu. Ruangwaktu ini tidak lengkap, tetapi seseorang dapat menyembuhkannya dengan mengalikan metrik dengan faktor konformal yang sesuai di dekat ujung garis horizontal. Meskipun ruang-ruang seperti ini sangat artifisial, ruang-ruang itu penting untuk menunjukkan betapa hati-hatinya Anda dalam mempelajari struktur kausal. Faktanya Roger Penrose, yang merupakan salah satu penguji PhD saya, menunjukkan bahwa ruang seperti yang baru saja saya gambarkan adalah contoh tandingan dari beberapa klaim yang saya buat dalam tesis saya.

Untuk menunjukkan bahwa setiap generator batas masa depan memiliki titik akhir masa lalu pada himpunan, kita harus memaksakan beberapa kondisi global pada struktur kausal. Kondisi yang paling kuat dan paling penting secara fisik adalah hiperbolisitas global.



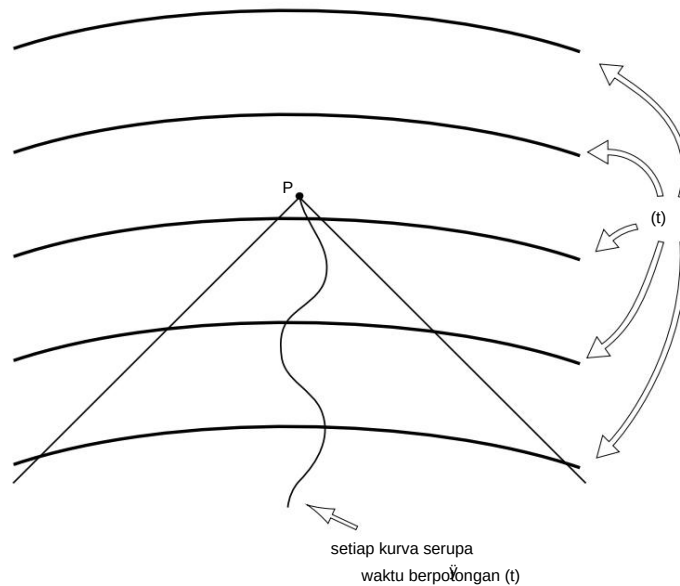
Suatu himpunan terbuka U dikatakan hiperbolik global jika:

- 1) untuk setiap pasangan titik p dan q di U perpotongan masa depan p dan masa lalu q memiliki penutupan rapat.

Dengan kata lain, itu adalah wilayah berbentuk berlian yang dibatasi. 2) kausalitas yang kuat berlaku pada U .

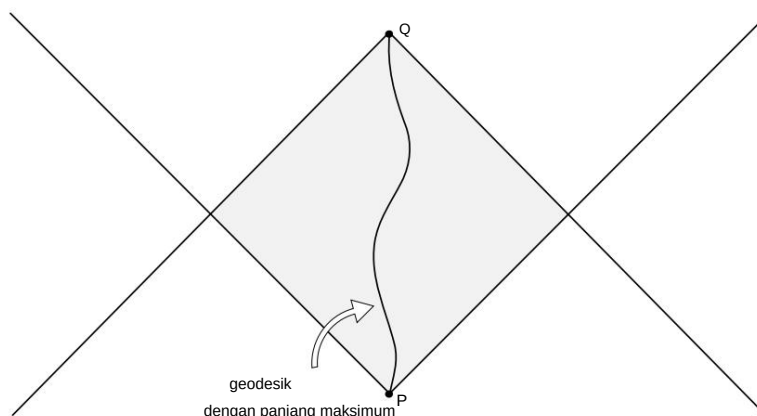
Artinya, tidak ada waktu tertutup atau hampir tertutup seperti

kurva yang terdapat pada U .

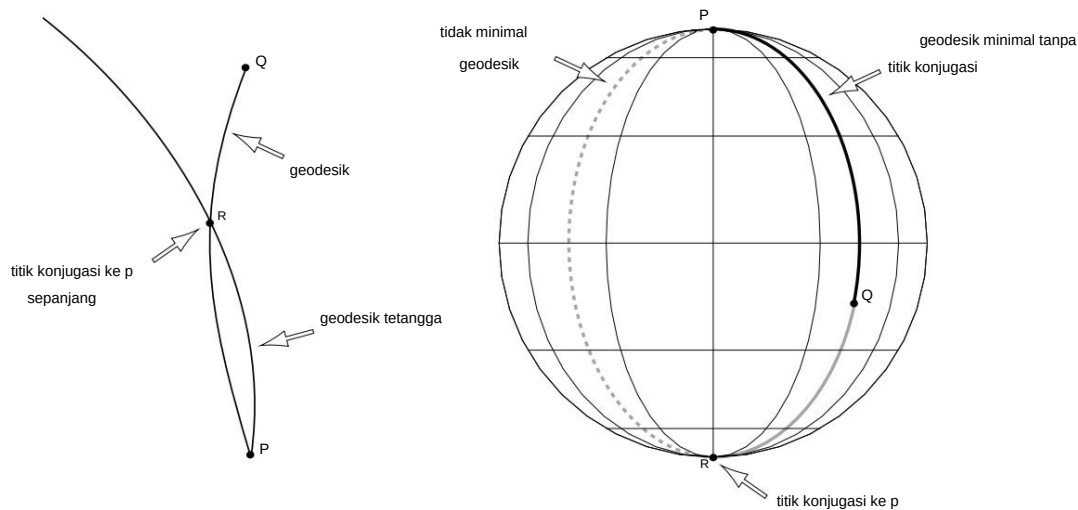


Signifikansi fisik hiperbolik global berasal dari fakta bahwa hal itu menyiratkan bahwa ada keluarga permukaan Cauchy (t) untuk U . Permukaan Cauchy untuk U adalah permukaan seperti ruang atau nol yang berpotongan setiap waktu seperti kurva di U sekali dan sekali saja. Seseorang dapat memprediksi apa yang akan terjadi di U dari data pada permukaan Cauchy, dan seseorang dapat merumuskan teori medan kuantum yang berperilaku baik pada latar belakang hiperbolik global. Apakah seseorang dapat merumuskan teori medan kuantum yang masuk akal pada latar belakang hiperbolik non global masih kurang jelas. Jadi hiperbolisitas global mungkin merupakan kebutuhan fisik. Tetapi sudut pandang saya adalah bahwa seseorang tidak boleh berasumsi karena itu mungkin mengesampingkan sesuatu yang coba diberitahukan oleh gravitasi kepada kita. Sebaliknya orang harus menyimpulkan bahwa wilayah ruang-waktu tertentu secara global hiperbolik dari asumsi lain yang masuk akal secara fisik.

Signifikansi hiperbolisitas global untuk teorema singularitas berasal dari berikut ini: rendah.



Misalkan U hiperbolik global dan misalkan p dan q adalah titik-titik dari U yang dapat dihubungkan dengan kurva suka waktu atau kurva nol. Kemudian ada waktu suka atau nol geodesik antara p dan q yang memaksimalkan panjang waktu seperti atau kurva nol dari p ke q . Metode pembuktiannya adalah dengan menunjukkan ruang sepanjang waktu seperti atau kurva nol dari p ke q kompak dalam topologi tertentu. Satu kemudian menunjukkan bahwa panjang kurva adalah fungsi semi kontinu atas pada ruang ini. Oleh karena itu harus mencapai maksimum dan kurva panjang maksimum akan menjadi geodesik karena jika tidak, variasi kecil akan memberikan kurva yang lebih panjang.



Seseorang sekarang dapat mempertimbangkan variasi kedua dari panjang geodesik. Kita dapat menunjukkan bahwa dapat divariasikan ke kurva yang lebih panjang jika ada geodesik bertetangga sangat kecil dari p yang memotong lagi pada titik r antara p dan q . Titik r dikatakan konjugasi ke p . Hal ini dapat diilustrasikan dengan mempertimbangkan dua titik p dan q di permukaan bumi. Tanpa kehilangan keumuman, kita dapat menganggap p berada di kutub utara. Karena Bumi memiliki metrik pasti positif daripada metrik Lorentzian, ada geodesik dengan panjang minimal, bukan geodesik dengan panjang maksimum. Geodesik minimal ini akan berupa garis bujur yang membentang dari kutub utara hingga titik q . Tetapi akan ada geodesik lain dari p ke q yang mengalir dari belakang dari kutub utara ke kutub selatan dan kemudian naik ke q . Geodesik ini berisi konjugat titik ke p di kutub selatan di mana semua geodesik dari p berpotongan. Kedua geodesik dari p ke q adalah titik stasioner dengan panjang di bawah variasi kecil. Tetapi sekarang dalam metrik definit positif, variasi kedua dari geodesik yang mengandung titik konjugasi dapat memberikan kurva yang lebih pendek dari p ke q . Jadi, dalam contoh Bumi, kita dapat menyimpulkan bahwa geodesik yang turun ke kutub selatan dan kemudian muncul bukanlah kurva terpendek dari p ke q . Contoh ini sangat jelas.

Namun, dalam kasus ruangwaktu seseorang dapat menunjukkan bahwa di bawah asumsi tertentu ada

harus menjadi wilayah hiperbolik global di mana harus ada titik konjugasi pada setiap geodesik antara dua titik. Hal ini menimbulkan kontradiksi yang menunjukkan bahwa asumsi kelengkapan geodesik, yang dapat dianggap sebagai definisi ruangwaktu non-tunggal, adalah salah.

Alasan seseorang mendapatkan titik konjugasi dalam ruang-waktu adalah karena gravitasi adalah gaya tarik menarik. Oleh karena itu kurva ruang-waktu sedemikian rupa sehingga geodesik tetangga ditekuk ke arah satu sama lain daripada menjauh. Hal ini dapat dilihat dari persamaan Raychaudhuri atau Newman-Penrose, yang akan saya tulis dalam bentuk terpadu.

Persamaan Raychaudhuri - Newman - Penrose

$$\frac{d}{dv} = 2 + \dot{\gamma}_{ij}\dot{\gamma}^{ij} + \frac{1}{n} R_{ab} l^a l^b$$

di mana $n = 2$ untuk geodesik nol

$n = 3$ untuk geodesik serupa waktu

Di sini v adalah parameter affine sepanjang kongruensi geodesik, dengan vektor tangen l^a yang ortogonal hypersurface. Besaran adalah laju rata-rata konvergensi geodesik, sedangkan mengukur geser. Istilah $R_{ab} l^a l^b$ efek dari masalah konvergensi dari geodesik. ^B memberikan gravitasi langsung

persamaan Einstein

$$R_{ab} - \frac{1}{2} g_{ab} R = 8\pi T_{ab}$$

Kondisi Energi Lemah

$$T_{ab} v^a v^b \geq 0$$

untuk setiap vektor serupa waktu v^a .

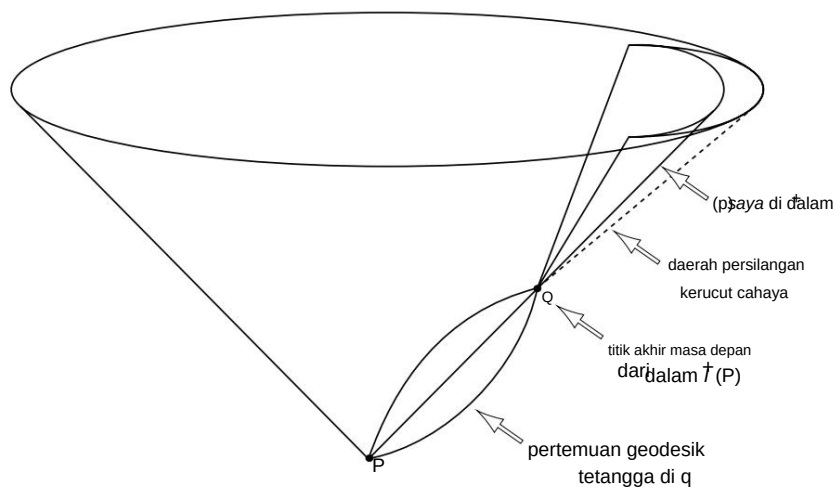
Dengan persamaan Einstein, akan menjadi non-negatif untuk sembarang vektor nol l^a jika materi memenuhi apa yang disebut kondisi energi lemah. Ini mengatakan bahwa kerapatan energi T_{00} tidak negatif dalam bingkai apa pun. Kondisi energi yang lemah dipatuhi oleh tensor momentum energi klasik dari setiap materi yang wajar, seperti skalar atau medan magnet elektro atau cairan dengan

persamaan keadaan yang masuk akal. Namun mungkin tidak dipenuhi secara lokal oleh nilai ekspektasi mekanika kuantum dari tensor momentum energi. Ini akan relevan di my kuliah kedua dan ketiga.

Misalkan kondisi energi lemah berlaku, dan bahwa geodesik nol dari titik p mulai konvergen lagi dan bahwa memiliki nilai positif 0 . Kemudian persamaan Newman Penrose akan mengimplikasikan bahwa konvergensi akan menjadi tak hingga di titik q dalam jarak parameter affine

$\frac{1}{1-p_0}$ jika geodesik nol dapat diperpanjang sejauh itu.

Jika $\gamma = 0$ pada $v = v_0$ maka $\dot{\gamma} = 1 + v_0 \dot{\gamma}$. Jadi ada titik konjugasi sebelum $v = v_0 + 1$.



Geodesik nol yang bertetangga tak terhingga dari p akan berpotongan di q . Ini berarti titik q akan terkonjugasi ke p sepanjang geodesik nol yang menghubungkannya. Untuk titik-titik pada di luar titik konjugasi q akan terdapat variasi yang memberikan kurva seperti waktu dari p .

Dengan demikian tidak dapat terletak pada batas masa depan p di luar titik konjugasi q . Jadi akan memiliki titik akhir masa depan sebagai pembangkit batas masa depan p .

Situasi dengan waktu seperti geodesik serupa, kecuali bahwa konr energi kuat Disi yang diperlukan untuk membuat $R_{ab}l^a l^b$ non negatif untuk setiap waktu seperti vektor l^a adalah, as namanya, agak lebih kuat. Namun secara fisik masih masuk akal, setidaknya dalam arti rata-rata, dalam teori klasik. Jika kondisi energi kuat bertahan, dan waktu seperti geodesik dari p mulai konvergen lagi, maka akan ada titik q yang konjugasi ke p .

Akhirnya ada kondisi energi generik. Ini mengatakan bahwa pertama-tama kondisi energi yang kuat berlaku. Kedua, setiap kali geodesik suka atau nol bertemu beberapa titik di mana

Kondisi Energi Kuat

$$T_{ab}v^a v^b = -\frac{1}{2} \rho v^a v_a$$

ada beberapa kelengkungan yang tidak secara khusus selaras dengan geodesik. Kondisi energi generik tidak dipenuhi oleh sejumlah solusi eksak yang diketahui. Tapi ini agak istimewa. Orang akan mengharapkannya untuk dipenuhi oleh solusi yang "generik" dalam arti yang tepat. Jika kondisi energi generik berlaku, setiap geodesik akan menghadapi wilayah pemfokusan gravitasi. Ini akan menyiratkan bahwa ada pasangan titik konjugasi jika seseorang dapat memperpanjang geodesik cukup jauh di setiap arah.

Kondisi Energi Generik

1. Kondisi energi yang kuat bertahan.
2. Setiap geodesik timelike atau null berisi titik di mana $R_{ab}v^a v^b \neq 0$.

Orang biasanya menganggap singularitas ruang-waktu sebagai wilayah di mana kelengkungannya menjadi besar tanpa batas. Namun, masalah dengan definisi itu adalah bahwa seseorang dapat dengan mudah mengabaikan titik tunggal dan mengatakan bahwa manifold yang tersisa adalah seluruh ruang-waktu. Oleh karena itu lebih baik untuk mendefinisikan ruang-waktu sebagai manifold maksimal yang metriknya sangat halus. Satu kemudian dapat mengenali terjadinya singularitas dengan adanya geodesik tidak lengkap yang tidak dapat diperluas ke nilai tak terbatas dari parameter affine.

Definisi Singularitas

Ruangwaktu adalah singular jika mirip waktu atau nol secara geodesi tidak lengkap, tetapi tidak dapat disematkan dalam ruangwaktu yang lebih besar.

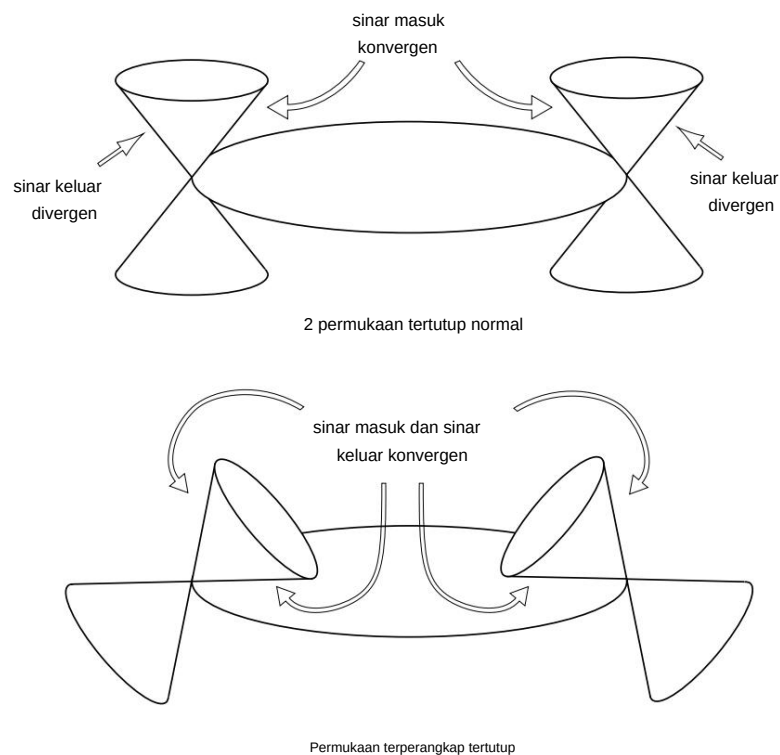
Definisi ini mencerminkan fitur singularitas yang paling tidak menyenangkan, bahwa mungkin ada partikel yang sejarahnya memiliki awal atau akhir pada waktu yang terbatas. Ada beberapa contoh di mana ketidaklengkapan geodesik dapat terjadi dengan kelengkungan tetap dibatasi, tetapi diperkirakan bahwa secara umum kelengkungan akan menyimpang sepanjang geodesik tidak lengkap. Ini penting jika seseorang ingin menggunakan efek kuantum untuk memecahkan masalah yang diangkat oleh singularitas dalam relativitas umum klasik.

Antara 1965 dan 1970 Penrose dan saya menggunakan teknik yang telah saya jelaskan untuk membuktikan sejumlah teorema singularitas. Teorema ini memiliki tiga jenis kondisi. Pertama ada kondisi energi seperti kondisi energi lemah, kuat atau generik. Kemudian ada beberapa kondisi global pada struktur kausal seperti bahwa tidak boleh ada waktu tertutup seperti kurva. Dan akhirnya, ada beberapa kondisi dimana gravitasi begitu kuat di beberapa wilayah sehingga tidak ada yang bisa lolos.

Teorema Singularitas

1. Kondisi energi.
2. Kondisi struktur global.
3. Gravitasi cukup kuat untuk menjebak suatu wilayah.

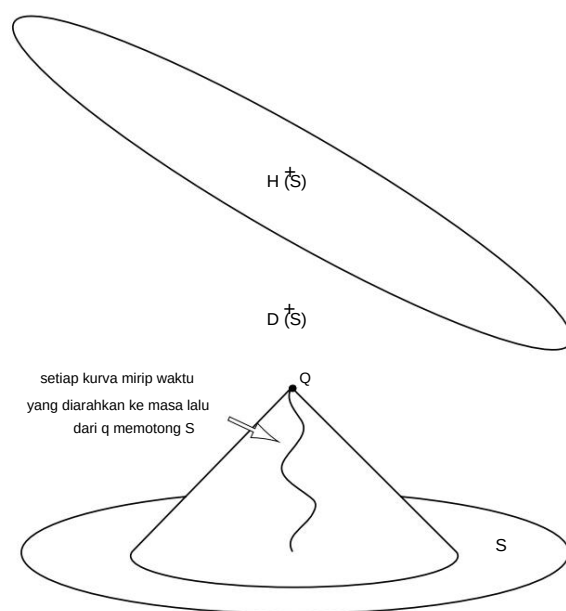
Kondisi ketiga ini bisa diekspresikan dengan berbagai cara.



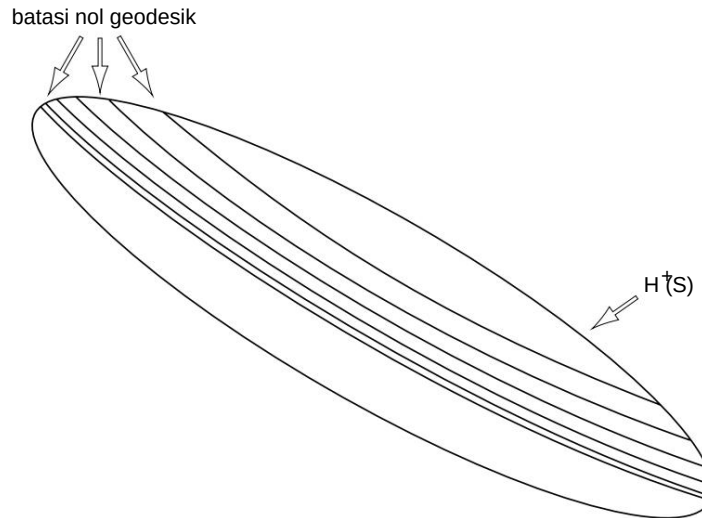
Salah satu cara adalah bahwa penampang spasial alam semesta tertutup, karena itu tidak ada wilayah luar untuk melarikan diri. Lain adalah bahwa ada apa yang disebut permukaan terperangkap tertutup. Ini adalah dua permukaan tertutup sedemikian rupa sehingga baik geodesik ortogonal yang masuk dan keluar menjadi konvergen. Biasanya jika Anda memiliki dua permukaan bo

di ruang Minkowski, geodesik nol yang masuk konvergen tetapi yang keluar menyimpang. Tetapi dalam keruntuhan bintang, medan gravitasi bisa begitu kuat sehingga kerucut cahaya miring ke dalam. Ini berarti bahwa bahkan geodesik nol yang keluar pun konvergen.

Berbagai teorema singularitas menunjukkan bahwa ruang-waktu pastilah seperti waktu atau nol secara geodesi tidak lengkap jika kombinasi yang berbeda dari ketiga jenis kondisi tersebut berlaku. Seseorang dapat melemahkan satu kondisi jika seseorang mengasumsikan versi yang lebih kuat dari dua lainnya. Saya akan mengilustrasikan ini dengan menjelaskan teorema Hawking-Penrose. Ini memiliki kondisi energi generik, yang terkuat dari tiga kondisi energi. Kondisi global cukup lemah, sehingga tidak boleh ada waktu tertutup seperti kurva. Dan kondisi no escape adalah yang paling umum, bahwa harus ada permukaan yang terperangkap atau ruang tertutup seperti tiga permukaan.



Untuk mempermudah, saya hanya akan membuat sketsa bukti untuk kasus ruang tertutup seperti tiga permukaan S . Kita dapat mendefinisikan pengembangan Cauchy di masa depan $D^+(S)$ menjadi daerah titik q dari mana setiap waktu berarah masa lalu seperti kurva berpotongan dengan S . Perkembangan Cauchy adalah wilayah ruangwaktu yang dapat diprediksi dari data di S . Sekarang anggaplah bahwa perkembangan Cauchy di masa depan adalah kompak. Ini menyiratkan bahwa perkembangan Cauchy akan memiliki batas masa depan yang disebut cakrawala Cauchy, $H^+(S)$. Dengan argumen yang mirip dengan batas masa depan suatu titik, cakrawala Cauchy akan dihasilkan oleh segmen geodesik nol tanpa titik akhir masa lalu. Namun, karena perkembangan Cauchy diasumsikan kompak, cakrawala Cauchy juga akan kompak. Ini berarti bahwa generator geodesik nol akan berputar dan



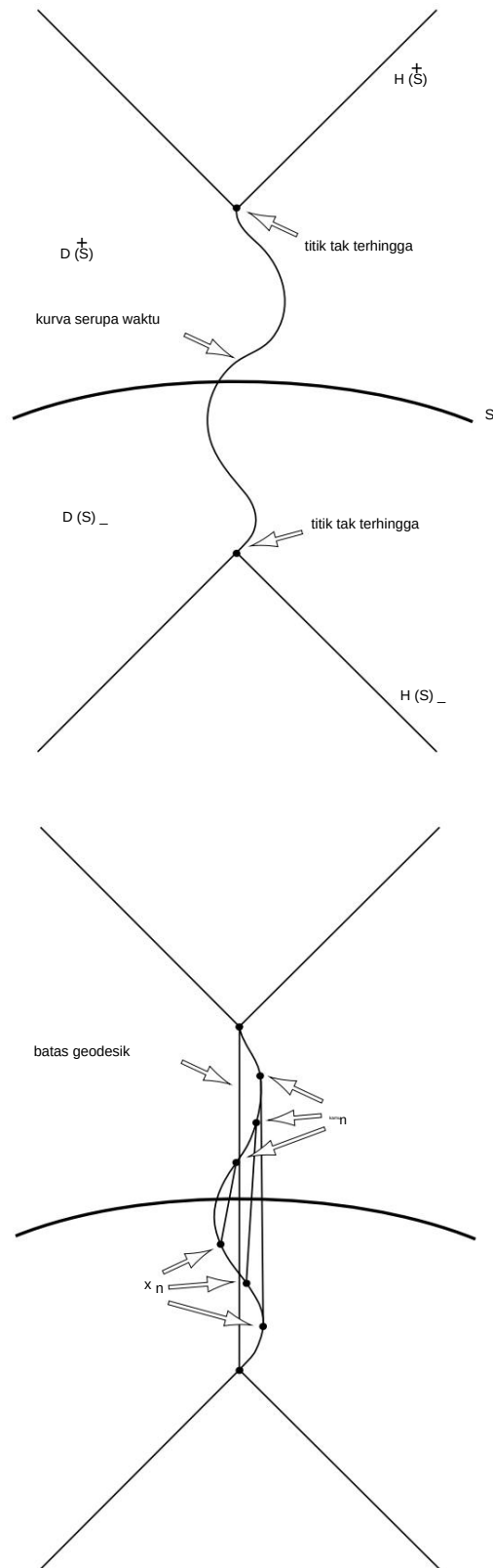
bulat di dalam satu set kompak. Mereka akan mendekati batas nol geodesik yang tidak akan memiliki titik akhir masa lalu atau masa depan di cakrawala Cauchy. Tetapi jika secara geodesi lengkap, kondisi energi generik akan menyiratkan bahwa itu akan mengandung titik konjugasi p dan q . Titik-titik pada di luar p dan q dapat dihubungkan dengan kurva seperti waktu. Tetapi ini akan menjadi kontradiksi karena tidak ada dua titik cakrawala Cauchy yang dapat dipisahkan oleh waktu.

Oleh karena itu baik tidak lengkap secara geodesi dan teorema terbukti atau pengembangan Cauchy masa depan dari S tidak kompak.

Dalam kasus terakhir, seseorang dapat menunjukkan ada kurva seperti waktu yang diarahkan di masa depan, dari S yang tidak pernah meninggalkan masa depan Perkembangan Cauchy dari S . Argumen yang agak mirip menunjukkan bahwa dapat diperluas ke masa lalu ke kurva yang tidak pernah meninggalkan masa lalu Pengembangan Cauchy $D^-(S)$.

Sekarang perhatikan barisan titik x_n pada yang mengarah ke masa lalu dan barisan serupa y_n yang mengarah ke masa depan. Untuk setiap nilai n titik x_n dan y_n adalah waktu seperti dipisahkan dan berada dalam pengembangan Cauchy hiperbolik global dari S . Jadi ada waktu seperti geodesik dengan panjang maksimum n dari x_n ke y_n . Semua n akan melintasi ruang padat seperti permukaan S . Ini berarti bahwa akan ada waktu seperti geodesik dalam pengembangan Cauchy yang merupakan batas waktu seperti geodesik n . Entah tidak akan lengkap, dalam hal ini teorema terbukti. Atau akan mengandung titik konjugasi karena kondisi energi generik. Tetapi dalam kasus itu n akan berisi titik-titik konjugasi untuk n yang cukup besar. Ini akan menjadi kontradiksi karena n dianggap sebagai kurva dengan panjang maksimum. Oleh karena itu orang dapat menyimpulkan bahwa ruang-waktu adalah seperti waktu atau nol secara geodesi tidak lengkap. Dengan kata lain ada singularitas.

Teorema memprediksi singularitas dalam dua situasi. Salah satunya adalah di masa depan di



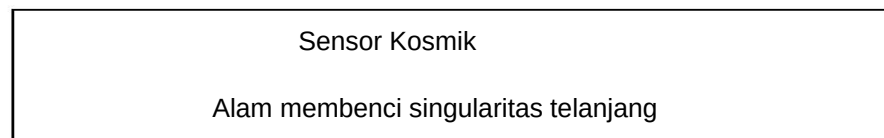
keruntuhan gravitasi bintang dan benda masif lainnya. Singularitas seperti itu akan menjadi

akhir waktu, setidaknya untuk partikel yang bergerak pada geodesik yang tidak lengkap. Situasi lain di mana singularitas diprediksi terjadi di masa lalu pada awal ekspansi alam semesta saat ini. Hal ini menyebabkan ditinggalkannya upaya (terutama oleh Rusia) untuk menyatakan bahwa ada fase kontrak sebelumnya dan lompatan non-tunggal ke dalam ekspansi.

Sebaliknya, hampir semua orang sekarang percaya bahwa alam semesta, dan waktu itu sendiri, berawal dari Big Bang. Ini adalah penemuan yang jauh lebih penting daripada beberapa partikel lain yang tidak stabil tetapi bukan yang telah diakui dengan baik oleh hadiah Nobel.

Prediksi singularitas berarti bahwa relativitas umum klasik bukanlah teori yang lengkap. Karena titik-titik singular harus dipotong dari manifold ruangwaktu, seseorang tidak dapat menentukan persamaan medan di sana dan tidak dapat memprediksi apa yang akan keluar dari singularitas.

Dengan singularitas di masa lalu, satu-satunya cara untuk mengatasi masalah ini tampaknya adalah dengan menarik gravitasi kuantum. Saya akan kembali ke ini dalam kuliah ketiga saya. Namun singularitas yang diprediksi di masa depan tampaknya memiliki properti yang disebut Penrose, Cosmic Censorship. Yaitu mereka dengan mudah terjadi di tempat-tempat seperti lubang hitam yang tersembunyi dari pengamat eksternal. Jadi setiap gangguan prediktabilitas yang mungkin terjadi pada singularitas ini tidak akan mempengaruhi apa yang terjadi di dunia luar, setidaknya tidak menurut teori klasik.

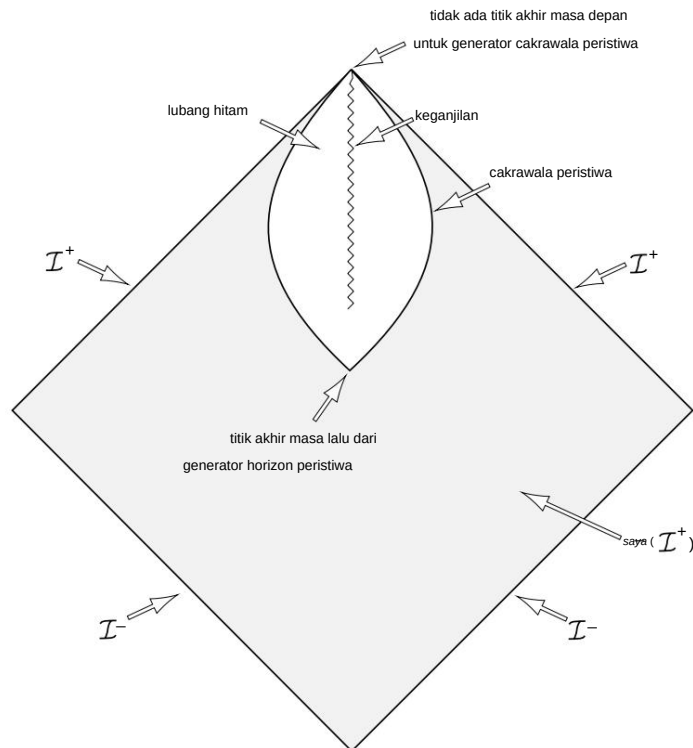


Namun, seperti yang akan saya tunjukkan di kuliah berikutnya, ada ketidakpastian dalam teori kuantum. Hal ini terkait dengan fakta bahwa medan gravitasi dapat memiliki entropi intrinsik yang bukan hanya hasil dari butiran kasar. Entropi gravitasi, dan fakta bahwa waktu memiliki awal dan mungkin memiliki akhir, adalah dua tema kuliah saya karena keduanya adalah cara gravitasi berbeda dari medan fisik lainnya.

Fakta bahwa gravitasi memiliki kuantitas yang berperilaku seperti entropi pertama kali diperhatikan dalam teori klasik murni. Itu tergantung pada Konjektur Sensor Kosmik Penrose. Ini tidak terbukti tetapi diyakini benar untuk data awal umum yang sesuai dan persamaan keadaan.

Saya akan menggunakan bentuk yang lemah dari Sensor Kosmik.

Satu membuat perkiraan memperlakukan wilayah di sekitar bintang yang runtuh sebagai datar tanpa gejala. Kemudian, seperti yang ditunjukkan Penrose, seseorang dapat secara selaras menyematkan manifold ruangwaktu M dalam manifold dengan batas M^- . Batas M akan menjadi permukaan nol dan akan terdiri dari dua komponen, masa depan dan masa lalu tanpa batas nol, yang disebut I^+ dan I^- . Saya akan mengatakan bahwa Sensor Kosmik yang lemah berlaku jika dua kondisi terpenuhi. Pertama, diasumsikan bahwa nol



generator geodesik I^+ lengkap dalam metrik konformal tertentu. Ini menyiratkan bahwa pengamat yang jauh dari keruntuhan hidup sampai usia tua dan tidak musnah oleh singularitas petir yang dikirim dari bintang yang runtuh. Kedua, diasumsikan bahwa masa lalu I^+ adalah hiperbolik global. Ini berarti tidak ada singularitas telanjang yang bisa dilihat dari jarak jauh. Penrose memiliki bentuk Cosmic Censorship yang lebih kuat yang mengasumsikan bahwa seluruh ruang-waktu adalah hiperbolik global. Tetapi bentuk yang lemah akan cukup untuk tujuan saya.

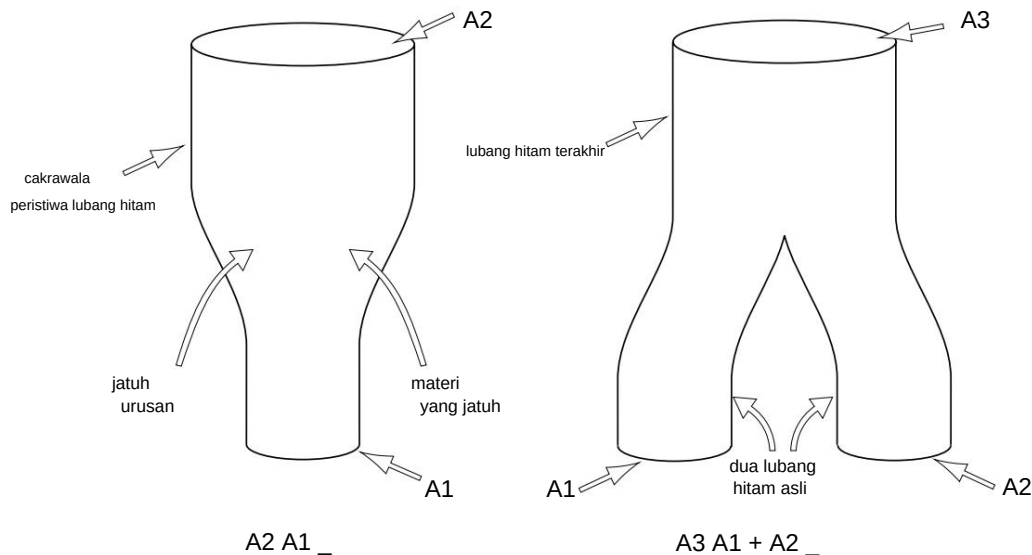
Sensor Kosmik Lemah

1. I^+ dan I^- selesai.
2. $I^-(I^+)$ adalah hiperbolik global.

Jika Cosmic Censorship lemah memegang singularitas yang diprediksi akan terjadi keruntuhan gravitasi tidak dapat terlihat dari I^+ . Artinya, pasti ada wilayah ruangwaktu yang tidak melewati I^+ . Wilayah ini dikatakan sebagai lubang hitam karena tidak ada cahaya atau apa pun yang dapat melarikan diri darinya hingga tak terhingga. Batas wilayah lubang hitam disebut horizon peristiwa. Karena itu juga merupakan batas masa lalu I^+ , cakrawala peristiwa akan dihasilkan oleh segmen geodesik nol yang mungkin memiliki titik akhir masa lalu tetapi tidak memiliki titik akhir masa depan. Oleh karena itu, jika kondisi energi lemah berlaku

generator cakrawala tidak bisa konvergen. Karena jika mereka, mereka akan berpotongan satu sama lain dalam jarak yang terbatas.

Ini menyiratkan bahwa luas penampang horizon peristiwa tidak akan pernah berkurang seiring waktu dan secara umum akan meningkat. Apalagi jika dua lubang hitam bertabrakan dan bergabung bersama, luas lubang hitam terakhir akan lebih besar dari jumlah luas lubang hitam aslinya.



Ini sangat mirip dengan perilaku entropi menurut hukum kedua termodinamika. Entropi tidak pernah bisa berkurang dan entropi sistem total lebih besar dari jumlah bagian-bagian penyusunnya.

Hukum Kedua Mekanika Lubang Hitam

$A \geq 0$

Hukum Kedua Termodinamika

$S \geq 0$

Kesamaan dengan termodinamika meningkat dengan apa yang disebut Hukum Pertama Mekanika Lubang Hitam. Ini menghubungkan perubahan massa lubang hitam dengan perubahan luas horizon peristiwa dan perubahan momentum sudut dan muatan listriknya. Seseorang dapat membandingkan ini dengan Hukum Pertama Termodinamika yang memberikan perubahan energi internal dalam hal perubahan entropi dan kerja eksternal yang dilakukan pada sistem. Kita melihat bahwa jika luas cakrawala peristiwa dianalogikan dengan entropi, maka kuantitas yang dianalogikan dengan suhu adalah apa yang disebut gravitasi permukaan lubang hitam. Ini adalah sebuah

Hukum Pertama Mekanika Lubang Hitam

$$E = \frac{K}{8\pi} A + J + Q$$

Hukum Pertama Termodinamika

$$E = T\dot{S} + P\dot{V}$$

ukuran kekuatan medan gravitasi di cakrawala peristiwa. Kesamaan dengan termodinamika semakin meningkat dengan apa yang disebut Hukum Ke-nol Mekanika Lubang Hitam: gravitasi permukaan adalah sama di mana-mana di cakrawala peristiwa lubang hitam independen waktu.

Hukum Nol Mekanika Lubang Hitam

adalah sama di mana-mana di cakrawala waktu yang independen lubang hitam.

Hukum Ke-nol Termodinamika

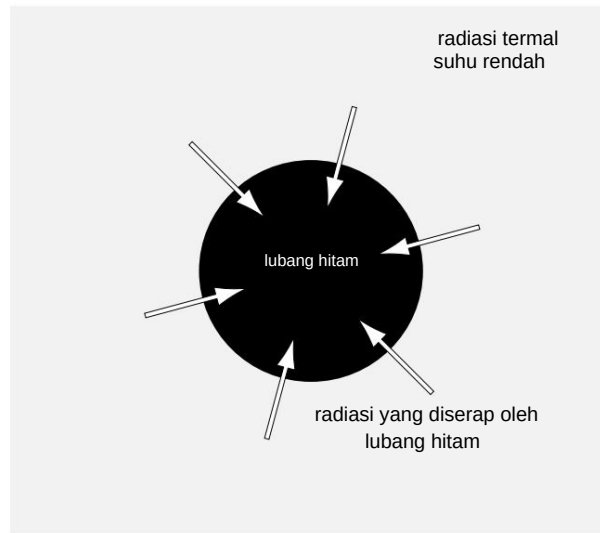
T adalah sama di mana-mana untuk sistem dalam kesetimbangan termal.

Didorong oleh kesamaan ini, Bekenstein mengusulkan bahwa beberapa kelipatan area horizon peristiwa sebenarnya adalah entropi lubang hitam. Dia menyarankan Hukum Kedua umum: jumlah entropi lubang hitam ini dan entropi materi di luar lubang hitam tidak akan pernah berkurang.

Hukum Kedua Umum

$$(S + cA) \geq 0$$

Namun usulan ini tidak konsisten. Jika lubang hitam memiliki entropi yang sebanding dengan luas cakrawala, mereka juga harus memiliki suhu non-nol yang sebanding dengan gravitasi permukaan. Pertimbangkan lubang hitam yang bersentuhan dengan radiasi termal pada suhu yang lebih rendah dari suhu lubang hitam. Lubang hitam akan menyerap sebagian radiasi tetapi tidak akan dapat mengirimkan apapun keluar, karena menurut teori klasik tidak ada yang bisa



keluar dari lubang hitam. Dengan demikian, seseorang memiliki aliran panas dari radiasi termal suhu rendah ke lubang hitam suhu tinggi. Ini akan melanggar Hukum Kedua yang digeneralisasikan karena hilangnya entropi dari radiasi termal akan lebih besar daripada peningkatan entropi lubang hitam. Namun, seperti yang akan kita lihat dalam kuliah saya berikutnya, konsistensi dipulihkan ketika ditemukan bahwa lubang hitam mengirimkan radiasi yang persis termal.

Ini adalah hasil yang terlalu indah untuk menjadi kebetulan atau hanya perkiraan. Jadi tampaknya lubang hitam benar-benar memiliki entropi gravitasi intrinsik. Seperti yang akan saya tunjukkan, ini terkait dengan topologi lubang hitam yang tidak sepele. Entropi intrinsik berarti bahwa gravitasi memperkenalkan tingkat ketidakpastian ekstra di atas dan di atas ketidakpastian yang biasanya dikaitkan dengan teori kuantum. Jadi Einstein salah ketika dia mengatakan "Tuhan tidak bermain dadu". Pertimbangan lubang hitam menunjukkan, tidak hanya bahwa Tuhan bermain dadu, tetapi Dia terkadang membingungkan kita dengan melemparkannya ke tempat yang tidak terlihat.



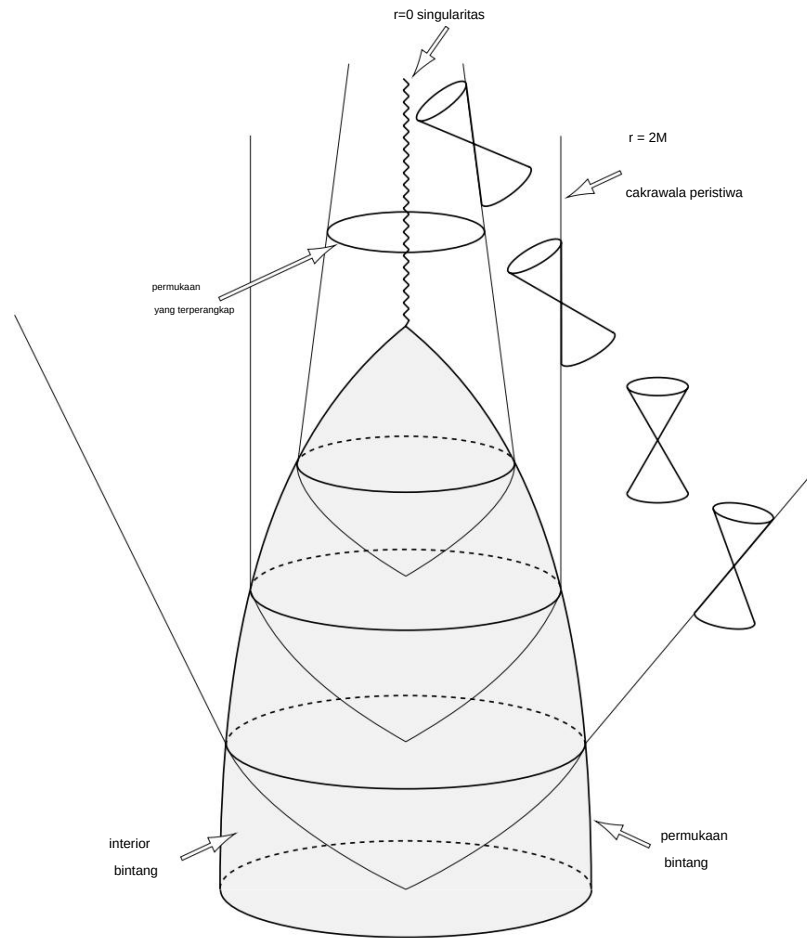
2. Lubang Hitam Kuantum

SW Hawking

Dalam kuliah kedua saya, saya akan berbicara tentang teori kuantum lubang hitam. Tampaknya mengarah ke tingkat ketidakpastian baru dalam fisika di atas dan di atas ketidakpastian biasa yang terkait dengan mekanika kuantum. Ini karena lubang hitam tampaknya memiliki entropi intrinsik dan kehilangan informasi dari wilayah alam semesta kita. Saya harus mengatakan bahwa klaim ini kontroversial: banyak orang yang bekerja pada gravitasi kuantum, termasuk hampir semua yang memasukinya dari fisika partikel, secara naluriah akan menolak gagasan bahwa informasi tentang keadaan kuantum suatu sistem dapat hilang. Namun mereka hanya memiliki sedikit keberhasilan dalam menunjukkan bagaimana informasi bisa keluar dari lubang hitam. Akhirnya saya percaya mereka akan dipaksa untuk menerima saran saya bahwa itu hilang, sama seperti mereka dipaksa untuk setuju bahwa lubang hitam memancar, yang bertentangan dengan semua prasangka mereka.

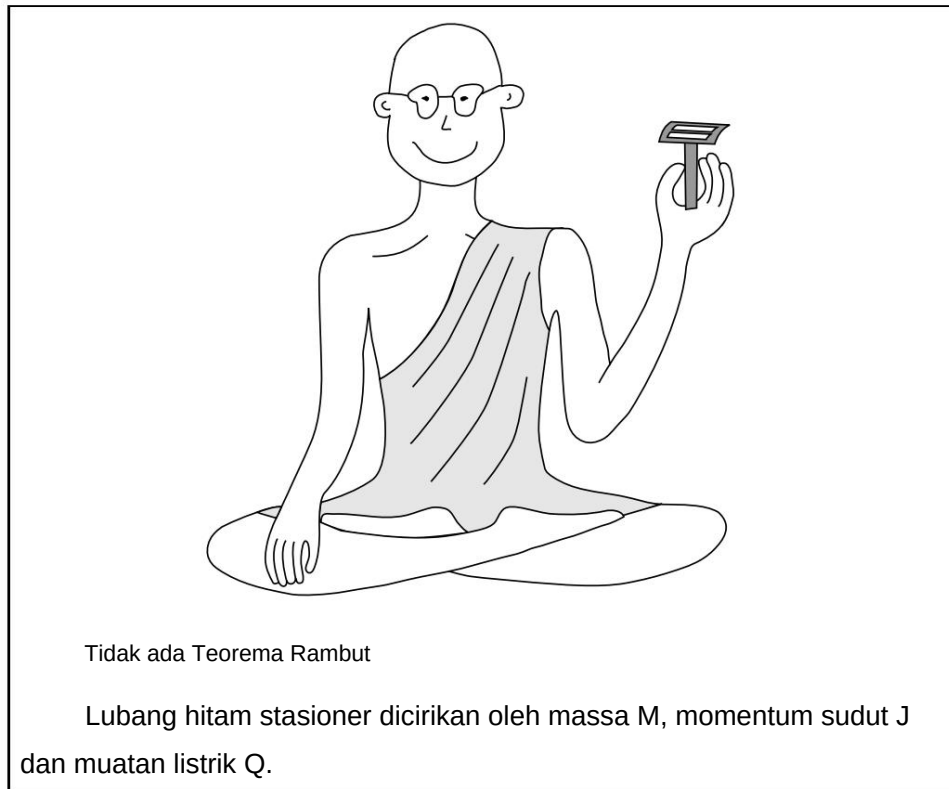
Saya harus mulai dengan mengingatkan Anda tentang teori klasik lubang hitam. Kita melihat dalam kuliah terakhir bahwa gravitasi selalu menarik, setidaknya dalam situasi normal. Jika gravitasi terkadang menarik dan terkadang menjijikkan, seperti elektro-dinamika, kita tidak akan pernah menyadarinya sama sekali karena gravitasinya sekitar 1040 kali lebih lemah. Hanya karena gravitasi selalu memiliki tanda yang sama maka gaya gravitasi antara partikel dari dua benda makroskopik seperti kita dan Bumi bertambah untuk memberikan gaya yang dapat kita rasakan.

Fakta bahwa gravitasi itu menarik berarti bahwa ia akan cenderung menarik materi di alam semesta bersama-sama untuk membentuk objek-objek seperti bintang dan galaksi. Ini dapat mendukung diri mereka sendiri untuk sementara waktu melawan kontraksi lebih lanjut oleh tekanan termal, dalam kasus bintang, atau dengan rotasi dan gerakan internal, dalam kasus galaksi. Namun, akhirnya panas atau momentum sudut akan terbawa dan benda akan mulai menyusut. Jika massanya kurang dari sekitar satu setengah kali massa Matahari, kontraksi dapat dihentikan oleh tekanan degenerasi elektron atau neutron. Objek akan menetap menjadi katai putih atau bintang neutron masing-masing. Namun, jika massa lebih besar dari batas ini, tidak ada yang dapat menahannya dan menghentikannya untuk terus berkontraksi. Setelah menyusut ke ukuran kritis tertentu, medan gravitasi di permukaannya akan sangat kuat sehingga kerucut cahaya akan ditekuk ke dalam seperti pada diagram di halaman berikut. Saya ingin menggambar Anda gambar empat dimensi. Namun, pemotongan pemerintah berarti bahwa universitas Cambridge hanya mampu membeli layar dua dimensi. Oleh karena itu saya telah menunjukkan waktu dalam arah vertikal dan menggunakan perspektif untuk menunjukkan dua dari tiga arah ruang. Anda dapat melihat bahwa bahkan sinar cahaya yang keluar ditekuk ke arah satu sama lain sehingga konvergen daripada divergen. Artinya terdapat permukaan terperangkap tertutup yang merupakan salah satu kondisi alternatif ketiga dari teorema Hawking-Penrose.



Jika Cosmic Censorship Conjecture benar, permukaan yang terperangkap dan singularitas yang diprediksi tidak dapat terlihat dari jauh. Jadi pasti ada wilayah ruang-waktu yang darinya tidak mungkin untuk melarikan diri hingga tak terhingga. Wilayah ini dikatakan sebagai lubang hitam.

Batasnya disebut cakrawala peristiwa dan merupakan permukaan nol yang dibentuk oleh sinar cahaya yang gagal lolos hingga tak terhingga. Seperti yang kita lihat di kuliah terakhir, luas penampang horizon peristiwa tidak pernah bisa berkurang, setidaknya dalam teori klasik. Ini, dan perhitungan gangguan dari keruntuhan bola, menunjukkan bahwa lubang hitam akan menetap ke keadaan stasioner. Teorema tanpa rambut, yang dibuktikan oleh kerja gabungan dari Israel, Carter, Robinson dan saya sendiri, menunjukkan bahwa satu-satunya lubang hitam stasioner tanpa adanya medan materi adalah solusi Kerr. Ini dicirikan oleh dua parameter, massa M dan momentum sudut J . Teorema tidak ada rambut diperpanjang oleh Robinson untuk kasus di mana ada medan elektromagnetik. Ini menambahkan parameter ketiga Q , muatan listrik. Teorema tidak ada rambut belum dibuktikan untuk bidang Yang-Mills, tetapi satu-satunya perbedaan tampaknya adalah penambahan satu atau lebih bilangan bulat yang memberi label keluarga diskrit dari solusi tidak stabil. Dapat ditunjukkan bahwa tidak ada lagi derajat kebebasan yang kontinu



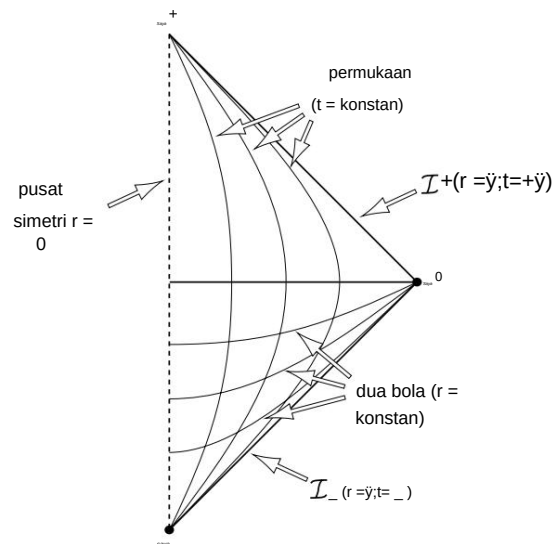
lubang hitam Einstein-Yang-Mills independen waktu.

Apa yang ditunjukkan oleh teorema tanpa rambut adalah bahwa sejumlah besar informasi hilang ketika sebuah benda runtuh membentuk lubang hitam. Tubuh yang runtuh dijelaskan oleh sejumlah besar parameter. Ada jenis materi dan momen multipol dari distribusi massa. Namun lubang hitam yang terbentuk sepenuhnya tidak bergantung pada jenis materi dan dengan cepat kehilangan semua momen multipol kecuali dua yang pertama: momen monopol, yang merupakan massa, dan momen dipol, yang merupakan momentum sudut.

Hilangnya informasi ini tidak terlalu penting dalam teori klasik. Dapat dikatakan bahwa semua informasi tentang tubuh yang runtuh itu masih berada di dalam lubang hitam. Akan sangat sulit bagi pengamat di luar lubang hitam untuk menentukan seperti apa benda yang runtuh itu. Namun, dalam teori klasik itu masih mungkin pada prinsipnya. Pengamat tidak akan pernah benar-benar melupakan tubuh yang runtuh. Sebaliknya, itu akan tampak melambat dan menjadi sangat redup saat mendekati cakrawala peristiwa. Tapi pengamat masih bisa melihat terbuat dari apa dan bagaimana massa itu didistribusikan. Namun, teori kuantum mengubah semua ini. Pertama, benda yang runtuh hanya akan mengirimkan foton dalam jumlah terbatas sebelum melintasi cakrawala peristiwa. Mereka tidak akan cukup untuk membawa semua informasi tentang tubuh yang runtuh. Ini berarti bahwa dalam teori kuantum tidak mungkin pengamat luar dapat mengukur keadaan benda yang runtuh. Orang mungkin tidak menganggap ini penting

terlalu banyak karena informasinya akan tetap berada di dalam lubang hitam meskipun seseorang tidak bisa mengukurnya dari luar. Tapi di sinilah efek kedua teori kuantum pada lubang hitam masuk. Seperti yang akan saya tunjukkan, teori kuantum akan menyebabkan lubang hitam memancar dan kehilangan massa. Akhirnya tampaknya mereka akan menghilang sepenuhnya, membawa serta informasi di dalamnya. Saya akan memberikan argumen bahwa informasi ini benar-benar hilang dan tidak kembali dalam beberapa bentuk. Seperti yang akan saya tunjukkan, hilangnya informasi ini akan memperkenalkan tingkat ketidakpastian baru ke dalam fisika di atas dan di atas ketidakpastian biasa yang terkait dengan teori kuantum. Sayangnya, tidak seperti Prinsip Ketidakpastian Heisenberg, tingkat ekstra ini akan agak sulit dikonfirmasi secara eksperimental dalam kasus lubang hitam. Tapi seperti yang akan saya jelaskan di kuliah ketiga saya, ada perasaan di mana kita mungkin telah mengamatinya dalam pengukuran fluktuasi pada latar belakang gelombang mikro.

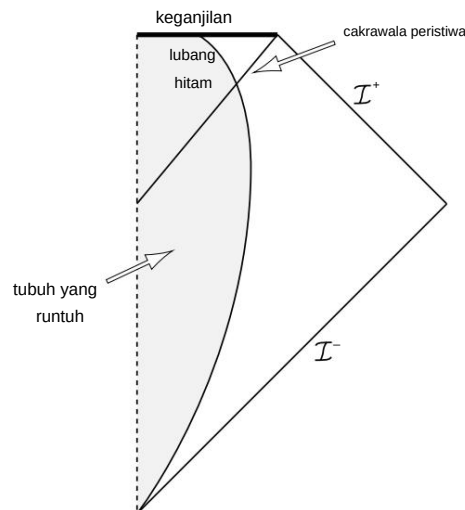
Fakta bahwa teori kuantum menyebabkan lubang hitam memancar pertama kali ditemukan dengan melakukan teori medan kuantum dengan latar belakang lubang hitam yang terbentuk oleh keruntuhan. Untuk melihat bagaimana hal ini terjadi, akan sangat membantu untuk menggunakan apa yang biasanya disebut diagram Penrose. Namun, saya pikir Penrose sendiri akan setuju bahwa mereka benar-benar harus disebut diagram Carter karena Carter adalah orang pertama yang menggunakannya secara sistematis. Dalam keruntuhan bola, ruangwaktu tidak akan bergantung pada sudut θ . Semua geometri akan terjadi di bidang $\theta = \text{konstan}$. Karena setiap bidang dua dimensi sesuai dengan ruang datar, seseorang dapat menggambarkan struktur sebab akibat dengan diagram di mana garis nol pada bidang $\theta = \text{konstan}$ berada pada $\pm 45^\circ$ terhadap vertikal.



Mari kita mulai dengan ruang Minkowski yang datar. Itu memiliki diagram Carter-Penrose yang merupakan segitiga yang berdiri di salah satu sudutnya. Dua sisi diagonal di sebelah kanan sesuai dengan ketakhinggaan nol masa lalu dan masa depan yang saya rujuk dalam kuliah pertama saya. Ini benar-benar tak terhingga tetapi semua jarak menyusut oleh faktor konformal ketika seseorang mendekati nol masa lalu atau masa depan

ketakterbatasan. Setiap titik segitiga ini sesuai dengan dua bola berjari-jari r . $r = 0$ pada garis vertikal di sebelah kiri, yang mewakili pusat simetri, dan $r \rightarrow \infty$ di sebelah kanan diagram.

Seseorang dapat dengan mudah melihat dari diagram bahwa setiap titik dalam ruang Minkowski berada di masa lalu dari masa depan nol tak terhingga I^+ . Ini berarti tidak ada lubang hitam dan tidak ada cakrawala peristiwa. Namun, jika seseorang memiliki benda bulat yang runtuh, diagramnya agak berbeda.



Itu terlihat sama di masa lalu tetapi sekarang bagian atas segitiga telah dipotong dan diganti dengan batas horizontal. Ini adalah singularitas yang diprediksi oleh teorema Hawking-Penrose.

Kita sekarang dapat melihat bahwa ada titik-titik di bawah garis horizontal ini yang tidak berada di masa lalu dari masa depan nol tak terhingga I^+ . Dengan kata lain ada lubang hitam. Cakrawala peristiwa, batas lubang hitam, adalah garis diagonal yang turun dari sudut kanan atas dan bertemu dengan garis vertikal yang sesuai dengan pusat simetri.

Seseorang dapat mempertimbangkan medan skalar pada latar belakang ini. Jika ruangwaktu bebas waktu, solusi persamaan gelombang, yang hanya berisi frekuensi positif pada scri minus, juga akan menjadi frekuensi positif pada scri plus. Ini berarti bahwa tidak akan ada penciptaan partikel, dan tidak akan ada partikel yang keluar pada scri plus, jika tidak ada partikel skalar pada awalnya.

Namun, metrik bergantung pada waktu selama keruntuhan. Ini akan menyebabkan solusi yang berfrekuensi positif pada I^- menjadi sebagian berfrekuensi negatif ketika sampai ke I^+ .

Seseorang dapat menghitung pencampuran ini dengan mengambil gelombang dengan ketergantungan waktu $e^{i\omega t}$ pada I^+ dan menyebarkan kembali ke I^- . Ketika seseorang melakukan itu, dia menemukan bahwa bagian gelombang yang lewat di dekat cakrawala bergeser sangat biru. Hebatnya ternyata pencampuran itu terlepas dari detail-detail keruntuhan di batas akhir zaman. Itu hanya tergantung pada

gravitasi permukaan yang mengukur kekuatan medan gravitasi di cakrawala lubang hitam. Pencampuran frekuensi positif dan negatif mengarah pada penciptaan partikel.

Ketika saya pertama kali mempelajari efek ini pada tahun 1973 saya berharap saya akan menemukan ledakan emisi selama keruntuhan tetapi kemudian penciptaan partikel akan mati dan satu akan ditinggalkan dengan lubang hitam yang benar-benar hitam. Yang sangat mengejutkan saya, saya menemukan bahwa setelah ledakan selama keruntuhan, tetap ada tingkat penciptaan dan emisi partikel yang stabil. Apalagi emisinya persis termal dengan suhu 2γ . Inilah yang diperlukan untuk membuat gagasan yang konsisten bahwa lubang hitam memiliki entropi yang sebanding dengan luas cakrawala peristiwanya. Selain itu, konstanta proporsionalitas tetap menjadi $ah = 1$. Ini membuat satuan luas 10^{66} cm^2 seperempat dalam satuan Planck, di mana $G = c = \hbar = 1$. Ini akan memiliki entropi sebesar urutan 1078. Ini akan mencerminkan sejumlah besar keadaan berbeda yang dapat dibuat.

Radiasi Termal Lubang Hitam	
Suhu $T =$	$\frac{\kappa}{2\gamma}$
Entropi $S =$	$\frac{1}{4}A$

Ketika saya membuat penemuan asli saya tentang radiasi dari lubang hitam, tampaknya merupakan keajaiban bahwa perhitungan yang agak berantakan akan menghasilkan emisi yang persis termal. Namun, kerja sama dengan Jim Hartle dan Gary Gibbons mengungkap alasan yang dalam. Untuk menjelaskannya saya akan mulai dengan contoh metrik Schwarzschild.

Metrik Schwarzschild	
$ds^2 =$	$1 - \frac{2M}{R} dt^2 + \left(1 - \frac{2M}{R}\right)^{-1} dr^2 + r^2(d\gamma^2 + \sin^2 \gamma d\delta^2)$

Ini mewakili medan gravitasi tempat lubang hitam akan menetap jika tidak berputar. Dalam koordinat r dan t biasa ada singularitas yang tampak pada jari-jari Schwarzschild $r = 2M$. Namun, ini hanya disebabkan oleh pilihan koordinat yang buruk.

Seseorang dapat memilih koordinat lain di mana metriknya teratur di sana.

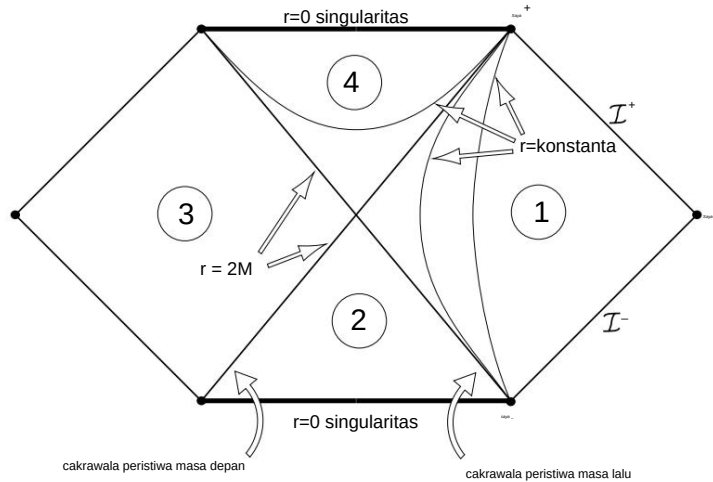


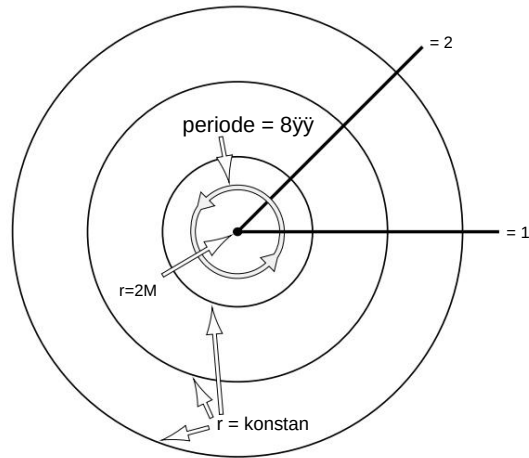
Diagram Carter-Penrose berbentuk berlian dengan bagian atas dan bawah yang rata. Ini dibagi menjadi empat daerah oleh dua permukaan nol di mana $r = 2M$. Wilayah di sebelah kanan, ditandai 1 pada diagram adalah ruang datar asimtotik di mana kita seharusnya hidup. Ia memiliki ketaklingkaan nol masa lalu dan masa depan I^- dan I^+ seperti ruangwaktu datar. Ada lagi wilayah datar asimtotik 3 di sebelah kiri yang tampaknya sesuai dengan alam semesta lain yang terhubung dengan kita hanya melalui lubang cacing. Namun, seperti yang akan kita lihat, itu terhubung ke wilayah kita melalui waktu imajiner. Permukaan nol dari kiri bawah ke kanan atas adalah batas wilayah dari mana seseorang dapat melarikan diri hingga tak terhingga di sebelah kanan. Jadi itu adalah cakrawala peristiwa masa depan. Julukan masa depan ditambahkan untuk membedakannya dari horizon peristiwa masa lalu yang dimulai dari kanan bawah ke kiri atas.

Mari kita kembali ke metrik Schwarzschild dalam koordinat r dan t asli. Jika seseorang menempatkan $t = i\tau$ satu mendapat metrik pasti positif. Saya akan mengacu pada metrik definit positif seperti Euclidean meskipun mungkin melengkung. Dalam metrik Euclidean-Schwarzschild ada lagi singularitas nyata pada $r = 2M$. Namun, seseorang dapat mendefinisikan koordinat radial baru x menjadi $4M(1 - 2Mr)^{-1/2}$.

Metrik Euclidean-Schwarzschild

$$ds^2 = dx^2 + \frac{d\tau^2}{4M^2} + \frac{r^2}{4M^2} (dx^2 + \sin^2 \theta d\phi^2)$$

Metrik pada bidang x kemudian menjadi seperti asal koordinat kutub jika koordinat diidentifikasi dengan periode $8\pi M$. Demikian pula metrik lubang hitam Euclidean lainnya akan memiliki singularitas yang jelas di cakrawala mereka yang dapat dihilangkan dengan mengidentifikasi



koordinat waktu imajiner dengan periode $\frac{2\ddot{y}}{\kappa}$.

Jadi apa pentingnya memiliki waktu imajiner yang diidentikkan dengan suatu periode.

Untuk melihat ini pertimbangkan amplitudo untuk beralih dari beberapa konfigurasi medan 1 pada permukaan t_1 ke konfigurasi 2 pada permukaan t_2 . Ini akan diberikan oleh elemen matriks $e^{iH(t_2-t_1)}$. Namun, amplitudo ini juga dapat direpresentasikan sebagai integral lintasan pada semua medan antara t_1 dan t_2 yang sesuai dengan medan 1 dan 2 yang diberikan pada dua permukaan.



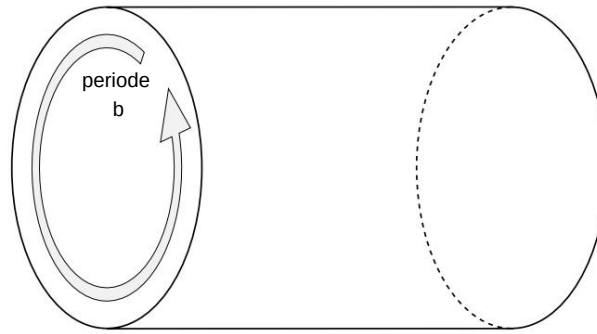
$$\langle 2, t_2 | 1, t_1 \rangle = \langle 2 | \exp(iH(t_2 - t_1)) | 1 \rangle$$

$$= ZD[\ddot{y}] \exp(iI[\ddot{y}])$$

Satu sekarang memilih pemisahan waktu $(t_2 - t_1)$ menjadi imajiner murni dan sama dengan . Kita juga menempatkan medan awal 1 sama dengan medan akhir 2 dan menjumlahkan seluruh basis keadaan n . Di sebelah kiri memiliki nilai harapan $e^{i\ddot{y}H}$ yang dijumlahkan untuk semua keadaan.

Ini hanyalah fungsi partisi termodinamika Z pada suhu $T = 1$.

Di sebelah kanan persamaan satu memiliki integral jalur. Satu menempatkan $1 = 2$ dan



$$t_2 - t_1 = i\beta, \beta = 1$$

$$Z = \sum_n \langle \exp(i\beta H) | n \rangle$$

$$= \sum_n D[\beta] \exp(i\beta E_n)$$

menjumlahkan semua konfigurasi bidang n . Ini berarti bahwa secara efektif seseorang melakukan integral lintasan pada semua bidang pada ruang-waktu yang diidentifikasi secara periodik dalam arah waktu imajiner dengan periode β . Jadi, fungsi partisi untuk medan pada suhu T diberikan oleh integral lintasan pada semua medan pada ruang-waktu Euclidean. Ruangwaktu ini periodik dalam arah waktu imajiner dengan periode $\beta = T^{-1}$.

Jika seseorang melakukan integral lintasan dalam ruang-waktu datar yang diidentifikasi dengan periode β dalam arah waktu imajiner, diperoleh hasil yang biasa untuk fungsi partisi radiasi benda hitam.

Namun, seperti yang baru saja kita lihat, solusi Euclidean-Schwarzschild juga periodik dalam β . Ini berarti bahwa waktu imajiner dengan periode $\frac{2\pi}{\kappa}$ bidang dengan latar belakang Schwarzschild akan berperilaku seolah-olah mereka berada dalam keadaan termal dengan suhu $\frac{\kappa}{2\pi}$.

Periodisitas dalam waktu imajiner menjelaskan mengapa perhitungan yang berantakan dari pencampuran frekuensi menyebabkan radiasi yang persis termal. Namun, derivasi ini menghindari masalah frekuensi yang sangat tinggi yang mengambil bagian dalam pendekatan pencampuran frekuensi. Ini juga dapat diterapkan ketika ada interaksi antara medan kuantum di latar belakang. Fakta bahwa integral lintasan berada pada latar periodik menyiratkan bahwa semua besaran fisis seperti nilai harapan akan bersifat termal. Ini akan sangat sulit untuk ditetapkan dalam pendekatan pencampuran frekuensi.

Seseorang dapat memperluas interaksi ini untuk memasukkan interaksi dengan medan gravitasi itu sendiri. Satu dimulai dengan metrik latar belakang g_0 seperti metrik Euclidean-Schwarzschild yang merupakan solusi dari persamaan medan klasik. Seseorang kemudian dapat memperluas aksi I dalam deret pangkat dalam gangguan g tentang g_0 .

$$I[g] = I[g_0] + I_2(\ddot{y}g)^2 + I_3(\ddot{y}g)^3 + \dots$$

Istilah linier menghilang karena latar belakang adalah solusi dari persamaan medan. Istilah kuadrat dapat dianggap menggambarkan graviton di latar belakang sedangkan istilah kubik dan lebih tinggi menggambarkan interaksi antara graviton. Integral jalur di atas suku-suku kuadrat berhingga. Ada divergensi yang tidak dapat direnormalisasi pada dua loop dalam gravitasi murni tetapi ini dibatalkan dengan fermion dalam teori supergravitasi. Tidak diketahui apakah teori supergravitasi memiliki divergensi pada tiga putaran atau lebih tinggi karena tidak ada yang berani atau cukup bodoh untuk mencoba perhitungannya. Beberapa pekerjaan baru-baru ini menunjukkan bahwa mereka mungkin terbatas untuk semua pesanan. Tetapi bahkan jika ada divergensi loop yang lebih tinggi, mereka akan membuat perbedaan yang sangat kecil kecuali ketika latar belakang melengkung pada skala panjang Planck, 10^{-33} cm.

Yang lebih menarik dari suku orde tinggi adalah suku orde nol, aksi dari metrik latar belakang g_0 .

$$saya = \frac{1}{16\pi} \int d^4x \sqrt{-g} + \frac{1}{8\pi} \int d^3x \sqrt{-g} \dot{Z}(\pm \text{jam})$$

Tindakan Einstein-Hilbert yang biasa untuk relativitas umum adalah integral volume dari kelengkungan skalar R . Ini adalah nol untuk solusi vakum sehingga orang mungkin berpikir bahwa tindakan solusi Euclidean-Schwarzschild adalah nol. Namun, ada juga istilah permukaan dalam aksi yang sebanding dengan integral K , jejak bentuk dasar kedua dari permukaan batas. Ketika seseorang memasukkan ini dan mengurangi istilah permukaan untuk ruang datar seseorang menemukan aksi metrik Euclidean-Schwarzschild adalah $\frac{2}{16\pi}$ di mana adalah periode dalam waktu imajiner di tak hingga. Jadi kontribusi dominan pada integral jalur untuk fungsi partisi Z adalah $e^{\frac{2}{16\pi}}$.

$$Z = X \exp(-\ddot{y} E_n) = \exp\left(-\frac{2}{16\pi}\right)$$

Jika seseorang membedakan $\log Z$ sehubungan dengan periode diperoleh nilai harapan energi, atau dengan kata lain, massa.

$$\langle E \rangle = - \frac{d}{d\ddot{y}} (\log Z) = \frac{2}{8\pi}$$

Jadi ini memberikan massa $M = \frac{B}{8\pi}$. Ini menegaskan hubungan antara massa dan periode, atau suhu terbalik, yang telah kita ketahui. Namun, seseorang dapat melangkah lebih jauh. Oleh

argumen termodinamika standar, log dari fungsi partisi sama dengan dikurangi energi bebas F dibagi dengan suhu T .

$$\log Z = -\frac{F}{T}$$

Dan energi bebas adalah massa atau energi ditambah suhu dikalikan dengan entropi S .

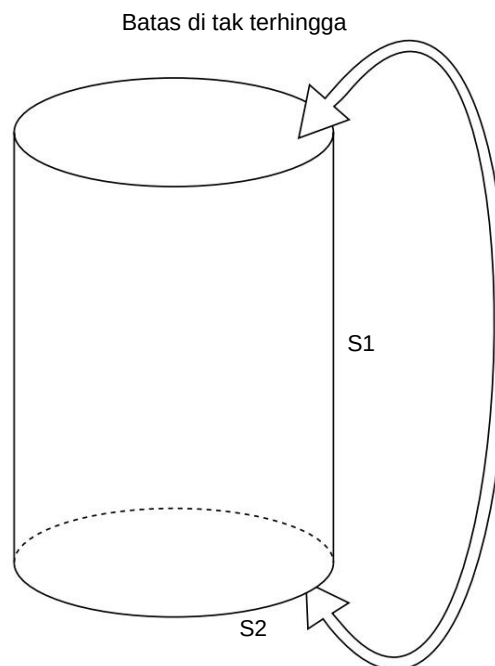
$$F = \langle E \rangle - TS$$

Menempatkan semua ini bersama-sama kita melihat bahwa aksi lubang hitam memberikan entropi $4\pi M^2$.

$$S = \frac{2}{16\pi} = 4\pi M^2 = \frac{1}{4}A$$

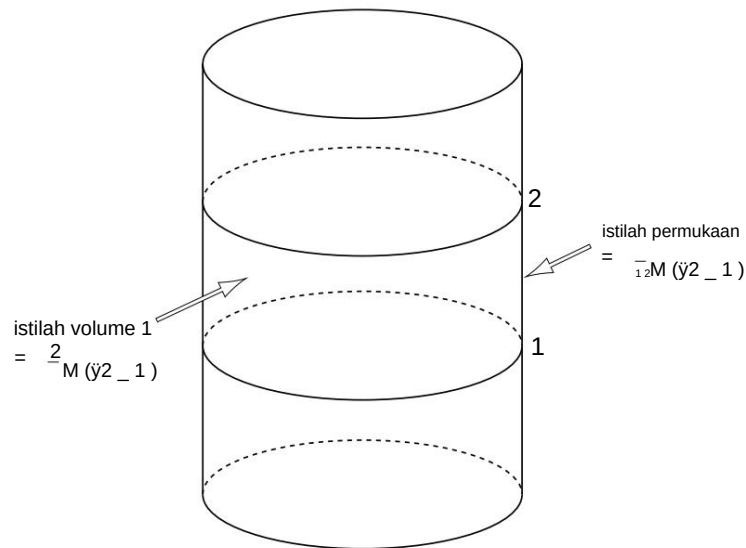
Inilah yang diperlukan untuk membuat hukum lubang hitam sama dengan hukum termodinamika.

Mengapa seseorang mendapatkan entropi gravitasi intrinsik ini yang tidak memiliki paralel dalam teori medan kuantum lainnya. Alasannya adalah gravitasi memungkinkan topologi yang berbeda untuk manifold ruangwaktu.



Dalam kasus kita mempertimbangkan solusi Euclidean-Schwarzschild memiliki batas di tak terhingga yang memiliki topologi $S^2 \times S^1$. S^2 adalah ruang besar seperti dua bola di tak terhingga dan

S1 sesuai dengan arah waktu imajiner yang diidentifikasi secara berkala. Seseorang dapat mengisi batas ini dengan metrik dari setidaknya dua topologi yang berbeda. Salah satunya tentu saja adalah metrik Euclidean-Schwarzschild. Ini memiliki topologi $R^2 \times S^2$, yaitu bidang Euclidean dua kali dua bola. Yang lainnya adalah $R^3 \times S^1$, topologi ruang datar Euclidean yang diidentifikasi secara berkala dalam arah waktu imajiner. Kedua topologi ini memiliki bilangan Euler yang berbeda. Bilangan Euler dari ruang datar yang diidentifikasi secara periodik adalah nol, sedangkan dari solusi Euclidean-Schwarzschild adalah dua.

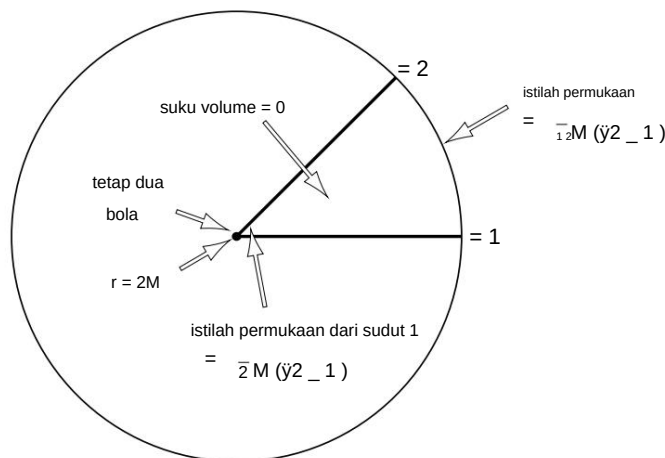


$$\text{Aksi total} = M(\dot{y}^2_1)$$

Signifikansinya adalah sebagai berikut: pada topologi ruang datar yang diidentifikasi secara periodik dapat ditemukan fungsi waktu periodik yang gradiennya tidak di mana nol dan yang sesuai dengan koordinat waktu imajiner pada batas tak hingga. Satu kemudian dapat bekerja di luar aksi daerah antara dua permukaan 1 dan 2. Akan ada dua kontribusi untuk aksi, integral volume atas materi Lagrangian, ditambah Lagrangian Einstein-Hilbert dan suku permukaan. Jika penyelesaiannya bebas waktu, suku permukaan di atas = 1 akan dibatalkan dengan suku permukaan di atas = 2. Jadi satu-satunya kontribusi bersih ke istilah permukaan berasal dari batas di tak terhingga. Ini memberikan setengah massa kali interval waktu imajiner $(\dot{y}^2_1)$. Jika massa bukan nol harus ada medan materi bukan nol untuk menciptakan massa. Satu dapat menunjukkan bahwa integral volume atas materi Lagrangian ditambah Einstein-Hilbert Lagrangian juga memberikan $2M(\dot{y}^2_1)$. Jadi aksi totalnya adalah $M(\dot{y}^2_1)$. Jika seseorang memasukkan kontribusi ini ke log fungsi partisi ke dalam rumus energi maka, seseorang menemukan nilai harapan energi menjadi massa,

seperti yang diharapkan. Namun, entropi yang disumbangkan oleh bidang latar belakang adalah nol.

Namun situasinya berbeda dengan solusi Euclidean-Schwarzschild.



Total aksi termasuk kontribusi tendangan sudut = $M(\dot{y}^2 - 1)$

Total aksi tanpa kontribusi tendangan sudut = $2 - \frac{1}{2} M(\dot{y}^2 - 1)$

Karena bilangan Euler adalah dua daripada nol, seseorang tidak dapat menemukan fungsi waktu yang gradien di mana-mana bukan nol. Yang terbaik yang dapat dilakukan adalah memilih koordinat waktu imajiner dari solusi Schwarzschild. Ini memiliki dua bola tetap di cakrawala di mana berperilaku seperti koordinat sudut. Jika kita sekarang mengerjakan aksi antara dua permukaan konstanta integral volume menghilang karena tidak ada medan materi dan skalar

kelengkungan adalah nol. Istilah permukaan jejak K di tak hingga lagi memberikan $\frac{1}{2} M(\dot{y}^2 - 1)$ dan permukaan lain di cakrawala di mana permukaan 1 dan 2 bertemu dalam $2M(\dot{y}^2 - 1)$.

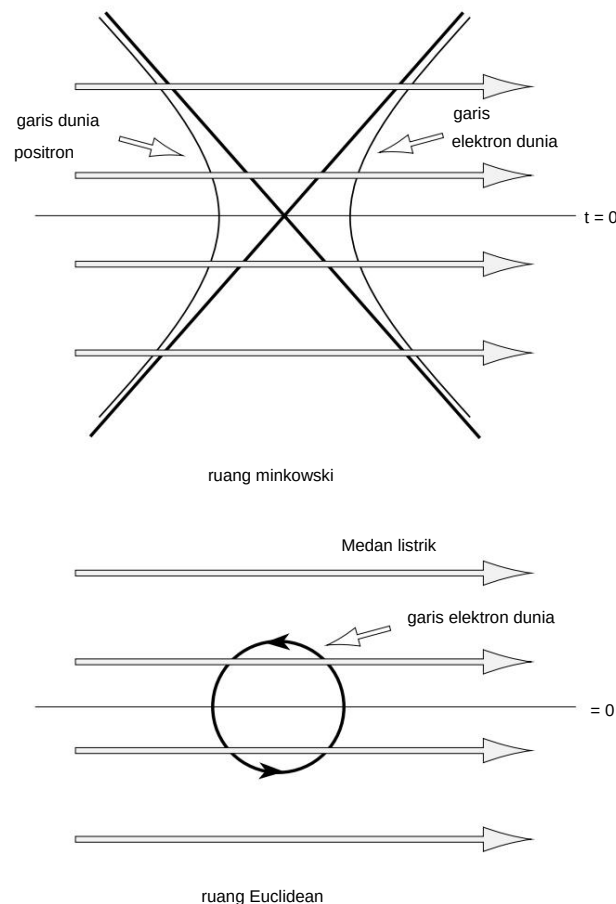
sudut. Seseorang dapat mengevaluasi istilah permukaan ini dan menemukan bahwa itu juga sama dengan $\frac{1}{2} M(\dot{y}^2 - 1)$

Jadi aksi total untuk daerah antara 1 dan 2 adalah $M(\dot{y}^2 - 1)$. Jika seseorang menggunakan tindakan ini dengan $2 - 1 = 1$ orang akan menemukan bahwa entropi adalah nol. Namun, ketika seseorang melihat aksi solusi Euclidean Schwarzschild dari sudut pandang empat dimensi daripada $3+1$, tidak ada alasan untuk menyertakan istilah permukaan di cakrawala karena metriknya teratur di sana. Meninggalkan istilah permukaan di cakrawala mengurangi aksi sebesar seperempat luas cakrawala, yang hanya merupakan entropi gravitasi intrinsik lubang hitam.

Fakta bahwa entropi lubang hitam terhubung dengan invarian topologi, bilangan Euler, adalah argumen kuat bahwa itu akan tetap ada bahkan jika kita harus pergi ke

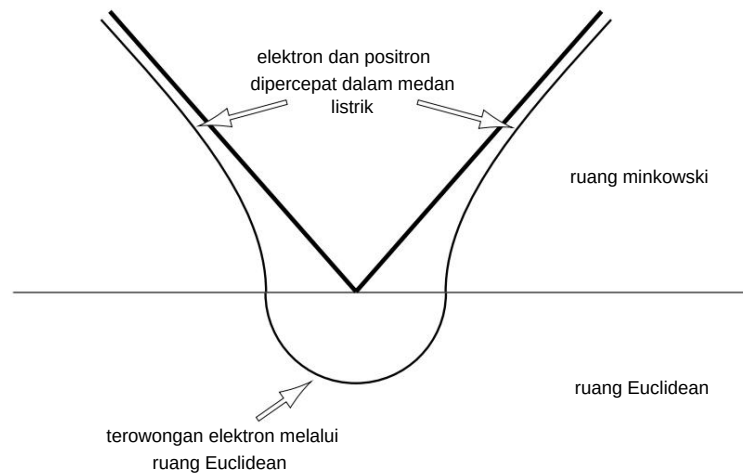
teori yang lebih mendasar. Ide ini merupakan kutukan bagi sebagian besar fisikawan partikel yang sangat konservatif dan ingin membuat segala sesuatu seperti teori Yang-Mills. Mereka setuju bahwa radiasi dari lubang hitam tampaknya bersifat termal dan tidak bergantung pada bagaimana lubang itu terbentuk jika lubangnya besar dibandingkan dengan panjang Planck. Tetapi mereka akan mengklaim bahwa ketika lubang hitam kehilangan massa dan turun ke ukuran Planck, relativitas umum kuantum akan runtuh dan semua taruhan akan dibatalkan. Namun, saya akan menjelaskan eksperimen pemikiran dengan lubang hitam di mana informasi tampaknya hilang namun kelengkungan di luar cakrawala selalu tetap kecil.

Telah diketahui selama beberapa waktu bahwa seseorang dapat membuat pasangan partikel bermuatan positif dan negatif dalam medan listrik yang kuat. Salah satu cara untuk melihat ini adalah untuk mencatat bahwa dalam ruang Euclidean datar sebuah partikel bermuatan q seperti elektron akan bergerak dalam lingkaran dalam medan listrik yang seragam E . Seseorang dapat secara analitis melanjutkan gerakan ini dari waktu imajiner ke waktu nyata t . Seseorang mendapat sepasang partikel bermuatan positif dan negatif yang dipercepat menjauh satu sama lain yang ditarik oleh medan listrik.



Proses pembuatan pasangan dijelaskan dengan memotong dua diagram menjadi dua

garis $t = 0$ atau $x = 0$. Satu kemudian bergabung dengan bagian atas diagram ruang Minkowski ke bagian bawah diagram ruang Euclidean.



Ini memberikan gambaran di mana partikel bermuatan positif dan negatif sebenarnya adalah partikel yang sama. Ini terowongan melalui ruang Euclidean untuk mendapatkan dari satu garis dunia ruang Minkowski ke yang lain. Untuk pendekatan pertama, probabilitas untuk penciptaan pasangan adalah e^{-1} di mana

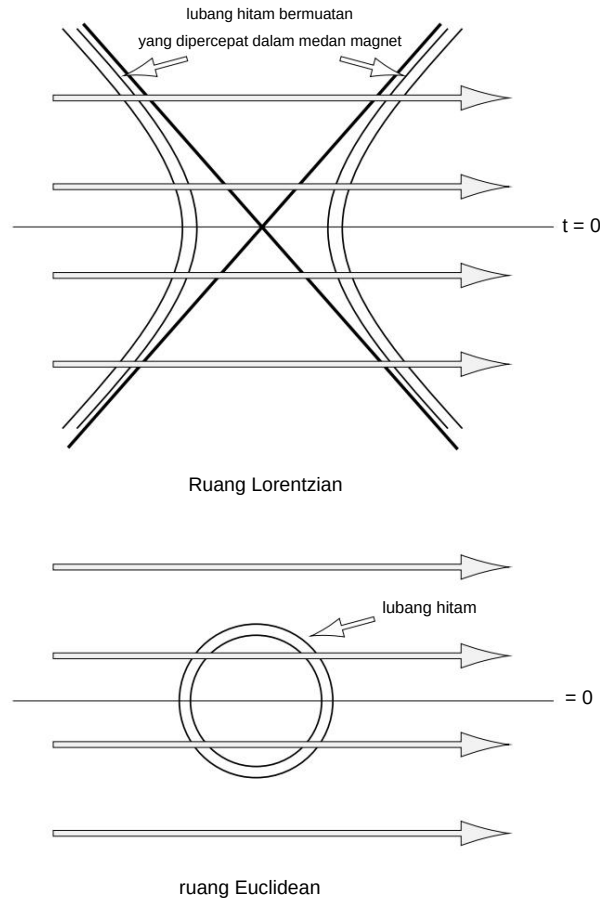
$$\text{Tindakan Euclidean } I = \frac{2\gamma m^2}{qE}.$$

Penciptaan pasangan oleh medan listrik yang kuat telah diamati secara eksperimental dan tingkatnya sesuai dengan perkiraan ini.

Lubang hitam juga dapat membawa muatan listrik sehingga orang mungkin berharap bahwa mereka juga dapat diciptakan berpasangan. Namun lajunya akan kecil dibandingkan dengan pasangan elektron positron karena rasio massa terhadap muatan adalah 1020 kali lebih besar. Ini berarti bahwa setiap medan listrik akan dinetralkan oleh penciptaan pasangan elektron positron jauh sebelum ada kemungkinan yang signifikan dari pasangan menciptakan lubang hitam. Namun ada juga solusi lubang hitam dengan muatan magnet. Lubang hitam seperti itu tidak dapat dihasilkan oleh keruntuhan gravitasi karena tidak ada partikel elementer yang bermuatan magnetis. Tapi orang mungkin berharap bahwa mereka bisa menjadi pasangan yang diciptakan dalam medan magnet yang kuat. Dalam hal ini tidak akan ada persaingan dari penciptaan partikel biasa karena partikel biasa tidak membawa muatan magnet.

Jadi medan magnet bisa menjadi cukup kuat sehingga ada peluang signifikan untuk menciptakan sepasang lubang hitam bermuatan magnetis.

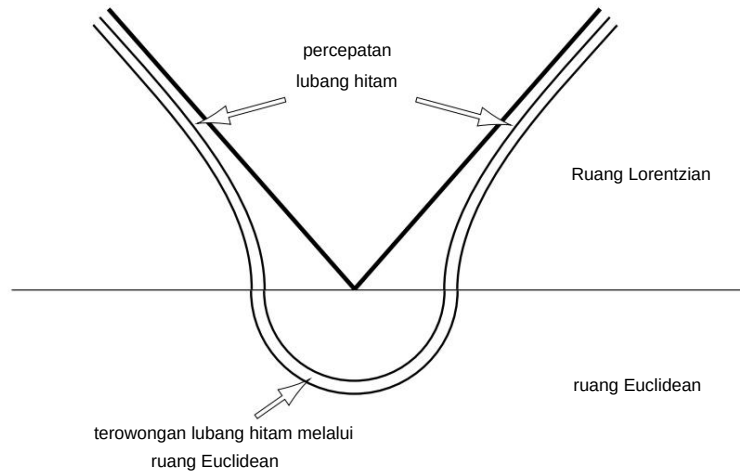
Pada tahun 1976 Ernst menemukan solusi yang mewakili dua lubang hitam bermuatan magnet bergerak menjauh satu sama lain dalam medan magnet.



Jika seseorang secara analitis melanjutkannya ke waktu imajiner, seseorang memiliki gambaran yang sangat mirip dengan penciptaan pasangan elektron. Lubang hitam bergerak pada lingkaran dalam ruang Euclidean yang melengkung seperti halnya elektron bergerak dalam lingkaran di ruang Euclidean yang datar. Ada komplikasi dalam kasus lubang hitam karena koordinat waktu imajiner adalah periodik tentang cakrawala lubang hitam serta tentang pusat lingkaran tempat lubang hitam bergerak. Satu punya untuk menyesuaikan massa untuk mengisi rasio lubang hitam untuk membuat periode ini sama. Secara fisis ini berarti bahwa seseorang memilih parameter lubang hitam sehingga suhu lubang hitam sama dengan suhu yang dilihatnya karena berakselerasi. Suhu lubang hitam yang bermuatan magnetis cenderung nol karena muatannya cenderung ke massa dalam satuan Planck. Jadi untuk medan magnet yang lemah, dan karenanya percepatan rendah, seseorang selalu dapat mencocokkan periode.

Seperti dalam kasus penciptaan pasangan elektron, seseorang dapat menggambarkan penciptaan pasangan lubang hitam dengan menggabungkan bagian bawah dari solusi Euclidean waktu imajiner ke bagian atas dari solusi Lorentzian waktu nyata.

Seseorang dapat menganggap lubang hitam sebagai terowongan melalui wilayah Euclidean dan muncul sebagai sepasang lubang hitam bermuatan berlawanan yang berakselerasi menjauh satu sama lain.

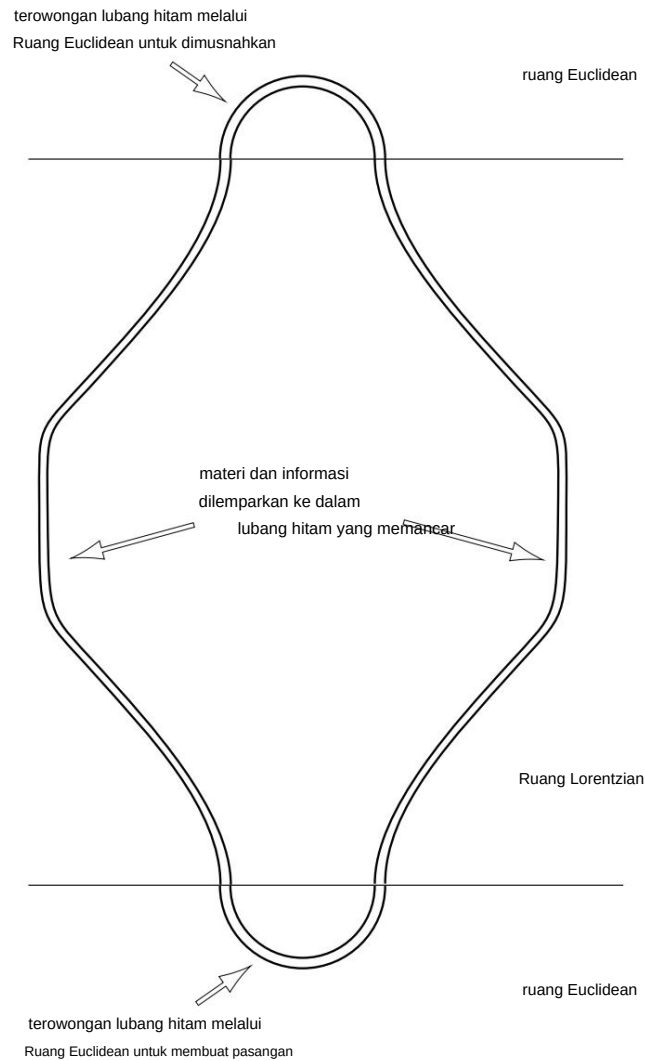


terpisah oleh medan magnet. Solusi lubang hitam yang dipercepat tidak datar asimtotik karena cenderung memiliki medan magnet seragam di tak terhingga. Namun, seseorang dapat menggunakannya untuk memperkirakan tingkat penciptaan pasangan lubang hitam di wilayah medan magnet lokal.

Orang bisa membayangkan bahwa setelah diciptakan, lubang hitam bergerak berjauhan ke daerah-daerah tanpa medan magnet. Seseorang kemudian dapat memperlakukan setiap lubang hitam secara terpisah sebagai lubang hitam di ruang datar tanpa gejala. Seseorang dapat melemparkan sejumlah besar materi dan informasi secara sewenang-wenang ke dalam setiap lubang. Lubang-lubang itu kemudian akan memancar dan kehilangan massa. Namun, mereka tidak bisa kehilangan muatan magnet karena tidak ada partikel bermuatan magnet. Dengan demikian mereka akhirnya akan kembali ke keadaan semula dengan massa yang sedikit lebih besar dari muatannya. Seseorang kemudian dapat menyatukan kembali kedua lubang itu dan membiarkannya saling memusnahkan. Proses pemusnahan dapat dianggap sebagai kebalikan waktu dari penciptaan pasangan. Jadi itu diwakili oleh bagian atas dari solusi Euclidean bergabung dengan bagian bawah dari solusi Lorentzian. Di antara penciptaan pasangan dan pemusnahan, seseorang dapat memiliki periode Lorentzian yang panjang di mana lubang hitam bergerak berjauhan, mengakresi materi, memancar, dan kemudian bersatu kembali. Tetapi topologi medan gravitasi akan menjadi topologi solusi Euclidean Ernst. Ini adalah $S^2 \times S^2$ dikurangi satu titik.

Orang mungkin khawatir bahwa Hukum Umum Termodinamika Kedua akan menjadi dilanggar ketika lubang hitam dimusnahkan karena area cakrawala lubang hitam akan memiliki lenyap. Namun ternyata area dari horizon akselerasi dalam solusi Ernst berkurang dari area yang akan dimiliki jika tidak ada penciptaan pasangan. Ini adalah perhitungan yang agak rumit karena area cakrawala akselerasi tidak terbatas di keduanya

kasus. Namun demikian, ada pengertian yang terdefinisi dengan baik di mana perbedaannya terbatas dan sama dengan area cakrawala lubang hitam ditambah perbedaan dalam aksi solusi dengan dan tanpa penciptaan pasangan. Ini dapat dipahami dengan mengatakan bahwa penciptaan pasangan adalah energi nol

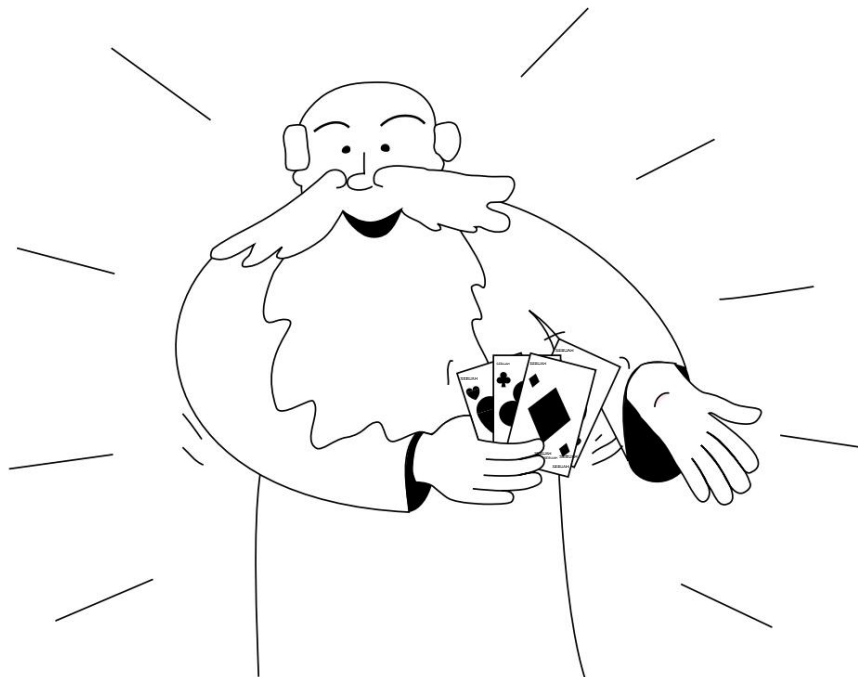


proses; Hamiltonian dengan penciptaan pasangan sama dengan Hamiltonian tanpa. Saya sangat berterima kasih kepada Simon Ross dan Gary Horowitz karena telah menghitung pengurangan ini tepat pada waktunya untuk kuliah ini. Keajaiban seperti ini, dan maksud saya hasilnya bukan karena mereka mendapatkannya, yang meyakinkan saya bahwa termodinamika lubang hitam tidak bisa hanya menjadi perkiraan energi rendah. Saya percaya bahwa entropi gravitasi tidak akan hilang bahkan jika kita harus pergi ke teori gravitasi kuantum yang lebih mendasar.

Seseorang dapat melihat dari eksperimen pemikiran ini bahwa seseorang mendapatkan entropi gravitasi intrinsik dan kehilangan informasi ketika topologi ruang-waktu berbeda dengan topologi ruang Minkowski yang datar. Jika lubang hitam yang dibuat pasangan itu besar dibandingkan dengan ukuran Planck, lengkungan di luar cakrawala akan di mana-mana kecil dibandingkan dengan skala Planck. Ini berarti pendekatan yang saya buat untuk mengabaikan kubik dan istilah yang lebih tinggi dalam gangguan harus baik. Dengan demikian kesimpulan bahwa informasi dapat hilang dalam lubang hitam harus dapat diandalkan.

Jika informasi hilang dalam lubang hitam makroskopik, itu juga harus hilang dalam proses di mana lubang hitam virtual mikroskopis muncul karena fluktuasi kuantum metrik. Orang bisa membayangkan bahwa partikel dan informasi bisa jatuh ke dalam lubang ini dan tersesat. Mungkin di situlah semua kaus kaki aneh itu pergi. Kuantitas seperti energi dan muatan listrik, yang digabungkan ke medan pengukur, akan dilestarikan tetapi informasi lain dan muatan global akan hilang. Ini akan memiliki implikasi yang luas untuk teori kuantum.

Biasanya diasumsikan bahwa sistem dalam keadaan kuantum murni berevolusi secara kesatuan melalui suksesi keadaan kuantum murni. Tetapi jika ada hilangnya informasi melalui kemunculan dan hilangnya lubang hitam, tidak akan ada evolusi kesatuan. Sebaliknya, hilangnya informasi akan berarti bahwa keadaan akhir setelah lubang hitam menghilang adalah apa yang disebut keadaan kuantum campuran. Ini dapat dianggap sebagai ansambel keadaan kuantum murni yang berbeda, masing-masing dengan probabilitasnya sendiri. Tetapi karena tidak pasti dalam satu keadaan, seseorang tidak dapat mengurangi kemungkinan keadaan akhir menjadi nol dengan mengganggu keadaan kuantum apa pun. Ini berarti bahwa gravitasi memperkenalkan tingkat ketidakpastian baru ke dalam fisika di atas dan di atas ketidakpastian yang biasanya dikaitkan dengan teori kuantum. Saya akan menunjukkan dalam kuliah berikutnya bahwa kita mungkin telah mengamati ketidakpastian ekstra ini. Ini berarti mengakhiri harapan determinisme ilmiah bahwa kita dapat memprediksi masa depan dengan pasti. Tampaknya Tuhan masih memiliki beberapa trik di lengan bajunya.



3. Kosmologi Kuantum

SW Hawking

Dalam kuliah ketiga saya, saya akan beralih ke kosmologi. Kosmologi dulunya dianggap sebagai ilmu semu dan pelestarian fisikawan yang mungkin telah melakukan pekerjaan yang berguna di tahun-tahun awal mereka tetapi menjadi mistik di masa kecil mereka. Ada dua alasan untuk ini.

Yang pertama adalah hampir tidak ada observasi yang dapat diandalkan. Memang, sampai tahun 1920-an, satu-satunya pengamatan kosmologis yang penting adalah bahwa langit di malam hari gelap. Tetapi orang-orang tidak menghargai pentingnya hal ini. Namun, dalam beberapa tahun terakhir jangkauan dan kualitas pengamatan kosmologis telah meningkat pesat dengan perkembangan teknologi. Jadi keberatan terhadap kosmologi sebagai ilmu yang tidak memiliki dasar pengamatan tidak berlaku lagi.

Namun, ada keberatan kedua dan lebih serius. Kosmologi tidak dapat memprediksi apa pun tentang alam semesta kecuali jika ia membuat beberapa asumsi tentang kondisi awal.

Tanpa asumsi seperti itu, yang bisa dikatakan hanyalah bahwa segala sesuatunya seperti sekarang karena mereka seperti pada tahap sebelumnya. Namun banyak orang percaya bahwa sains seharusnya hanya memperhatikan hukum lokal yang mengatur bagaimana alam semesta berevolusi dalam waktu. Mereka akan merasa bahwa kondisi batas untuk alam semesta yang menentukan bagaimana alam semesta dimulai adalah pertanyaan untuk metafisika atau agama daripada sains.

Situasi ini diperburuk oleh teorema yang telah dibuktikan oleh Roger dan saya. Ini menunjukkan bahwa menurut relativitas umum seharusnya ada singularitas di masa lalu kita. Pada singularitas ini persamaan medan tidak dapat didefinisikan. Jadi relativitas umum klasik membawa kehancurannya sendiri: ia memprediksi bahwa ia tidak dapat memprediksi alam semesta.

Meskipun banyak orang menyambut kesimpulan ini, itu selalu sangat mengganggu saya. Jika hukum fisika bisa runtuh di awal alam semesta, mengapa mereka tidak bisa rusak di mana pun. Dalam teori kuantum itu adalah prinsip bahwa apa pun bisa terjadi jika tidak mutlak dilarang. Begitu seseorang mengizinkan bahwa sejarah tunggal dapat mengambil bagian dalam integral jalur, mereka dapat terjadi di mana saja dan prediktabilitas akan hilang sepenuhnya.

Jika hukum fisika rusak pada singularitas, mereka bisa rusak di mana saja.

Satu-satunya cara untuk memiliki teori ilmiah adalah jika hukum fisika berlaku di mana-mana termasuk di awal alam semesta. Seseorang dapat menganggap ini sebagai kemenangan bagi prinsip-prinsip demokrasi: Mengapa permulaan alam semesta harus dikecualikan dari hukum yang berlaku untuk hal-hal lain. Jika semua poin sama, seseorang tidak dapat membiarkan beberapa menjadi lebih sama dari yang lain.

Untuk menerapkan gagasan bahwa hukum fisika berlaku di mana-mana, seseorang harus mengambil jalur integral hanya pada metrik non-tunggal. Seseorang tahu dalam kasus integral jalur biasa

bahwa ukuran terkonsentrasi pada jalur yang tidak dapat dibedakan. Tapi ini adalah penyelesaian dalam beberapa topologi yang sesuai dari himpunan jalur mulus dengan tindakan yang terdefinisi dengan baik. Demikian pula, orang akan berharap bahwa integral jalur untuk gravitasi kuantum harus diambil alih penyelesaian ruang metrik halus. Yang tidak dapat disertakan oleh integral jalur adalah metrik dengan singularitas yang tindakannya tidak ditentukan.

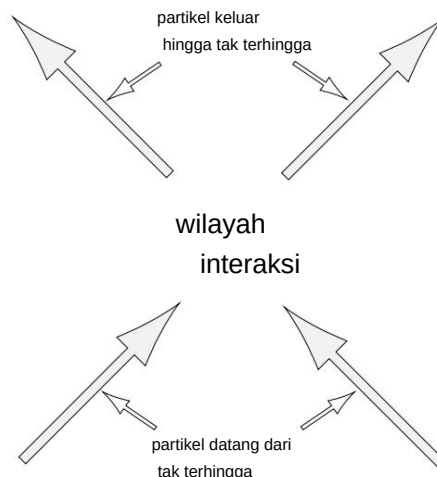
Dalam kasus lubang hitam, kita melihat bahwa integral jalur harus diambil alih Euclidean, yaitu metrik definit positif. Ini berarti bahwa singularitas lubang hitam, seperti solusi Schwarzschild, tidak muncul pada metrik Euclidean yang tidak masuk ke dalam cakrawala. Sebaliknya cakrawala seperti asal koordinat kutub. Oleh karena itu, tindakan metrik Euclidean didefinisikan dengan baik. Orang dapat menganggap ini sebagai versi kuantum dari Sensor Kosmik: penghancuran struktur pada singularitas seharusnya tidak memengaruhi pengukuran fisik apa pun.

Tampaknya, oleh karena itu, integral jalur untuk gravitasi kuantum harus diambil alih metrik Euclidean non-tunggal. Tapi apa yang seharusnya menjadi kondisi batas pada metrik ini. Ada dua, dan hanya dua, pilihan alami. Yang pertama adalah metrik yang mendekati metrik Euclidean datar di luar himpunan kompak. Kemungkinan kedua adalah metrik pada manifold yang kompak dan tanpa batas.

Pilihan alami untuk integral jalur untuk gravitasi kuantum

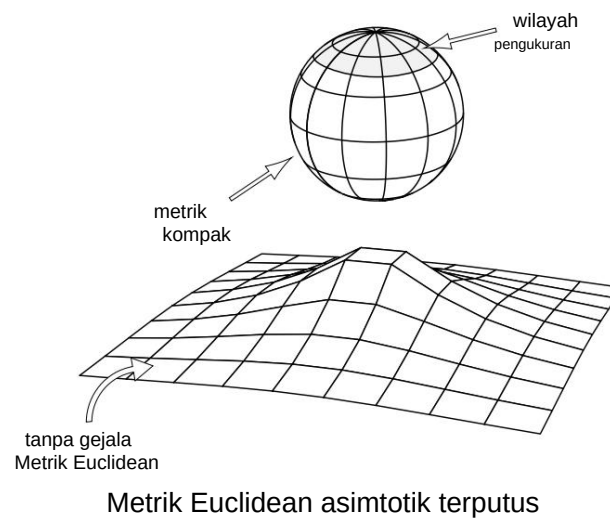
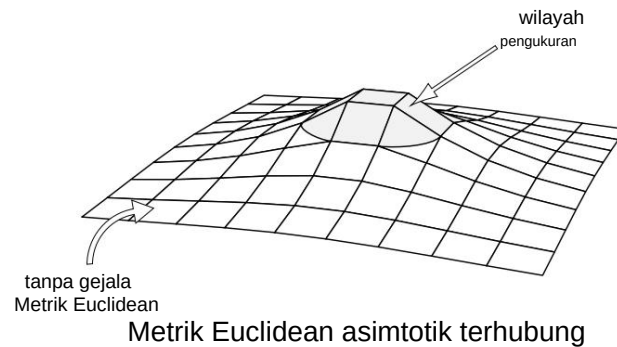
1. Metrik Euclidean Asimtotik.
2. Metrik ringkas tanpa batas.

Kelas pertama dari metrik Euclidean asimtotik jelas sesuai untuk perhitungan scattering.



Dalam satu ini mengirimkan partikel dari tak terhingga dan mengamati apa yang keluar lagi hingga tak terhingga. Semua pengukuran dilakukan pada tak terhingga di mana seseorang memiliki metrik latar belakang datar dan seseorang dapat menafsirkan fluktuasi kecil di bidang sebagai partikel dengan cara biasa. Orang tidak bertanya apa yang terjadi di wilayah interaksi di tengah. Itulah sebabnya seseorang melakukan integral jalan pada semua kemungkinan sejarah untuk wilayah interaksi, yaitu, pada semua secara asimtotik metrik Euclidean.

Namun, dalam kosmologi orang tertarik pada pengukuran yang dibuat di wilayah terbatas daripada di tak terhingga. Kita berada di bagian dalam alam semesta tidak melihat ke dalam dari luar. Untuk melihat perbedaan apa yang dibuat, pertama-tama mari kita asumsikan bahwa integral jalur untuk kosmologi akan diambil alih semua metrik Euclidean asimtotik.



Maka akan ada dua kontribusi untuk probabilitas pengukuran di wilayah yang terbatas.

Yang pertama akan berasal dari metrik Euclidean asimtotik yang terhubung. Yang kedua akan berasal dari metrik terputus yang terdiri dari ruang-waktu kompak yang berisi wilayah pengukuran dan metrik Euclidean asimtotik terpisah. Satu tidak dapat mengecualikan metrik terputus dari integral jalur karena mereka dapat didekati dengan con

metrik terhubung di mana komponen yang berbeda bergabung dengan tabung tipis atau lubang cacing dengan tindakan yang dapat diabaikan.

Wilayah kompak ruangwaktu yang terputus tidak akan mempengaruhi perhitungan hamburan karena mereka tidak terhubung ke tak terhingga, di mana semua pengukuran dilakukan. Tetapi mereka akan mempengaruhi pengukuran dalam kosmologi yang dibuat di wilayah yang terbatas. Memang, kontribusi dari metrik yang tidak terhubung seperti itu akan mendominasi kontribusi dari yang terhubung

metrik Euclidean asimtotik. Jadi, bahkan jika seseorang mengambil integral jalur untuk kosmologi menjadi lebih dari semua metrik Euclidean asimtotik, efeknya akan hampir sama seperti jika integral jalur telah di atas semua metrik kompak. Oleh karena itu, tampaknya lebih alami untuk mengambil integral jalur agar kosmologi berada di atas semua metrik kompak tanpa batas, seperti yang diusulkan Jim Hartle dan saya pada tahun 1983.

Proposal Tanpa Batas (Hartle dan Hawking)

Integral jalur untuk gravitasi kuantum harus diambil alih semua kompak metrik Euclidean.

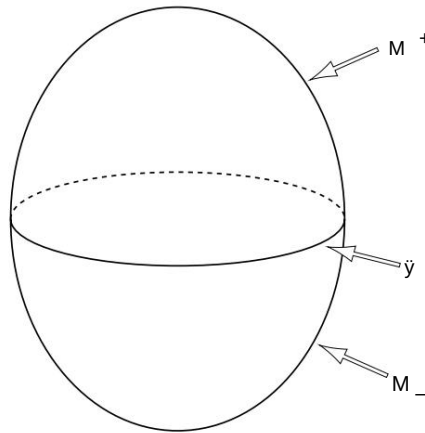
Seseorang dapat memparafrasekan ini sebagai Kondisi Batas Alam Semesta Adalah Bahwa Ia Tidak Memiliki Batas.

Di sisa kuliah ini saya akan menunjukkan bahwa proposal tanpa batas ini tampaknya menjelaskan alam semesta tempat kita tinggal. Itu adalah alam semesta yang mengembang isotropik dan homogen dengan gangguan kecil. Kita dapat mengamati spektrum dan statistik gangguan ini dalam fluktuasi latar belakang gelombang mikro. Hasilnya sejauh ini sesuai dengan prediksi proposal tanpa batas. Ini akan menjadi ujian nyata dari proposal dan seluruh program gravitasi kuantum Euclidean ketika pengamatan latar belakang gelombang mikro diperluas ke skala sudut yang lebih kecil.

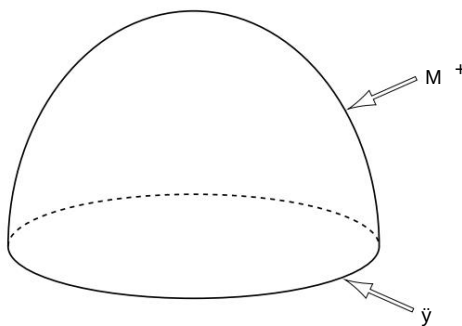
Untuk menggunakan proposal tanpa batas untuk membuat prediksi, akan berguna untuk memperkenalkan sebuah konsep yang dapat menggambarkan keadaan alam semesta pada satu waktu.

Pertimbangkan probabilitas bahwa manifold ruangwaktu M berisi manifold tiga dimensi tertanam dengan metrik induksi h_{ij} . Ini diberikan oleh integral jalur pada semua metrik g_{ij} pada M yang menginduksi h_{ij} pada Σ . Jika M dihubungkan secara sederhana, yang akan saya asumsikan, permukaan akan membagi M menjadi dua bagian M_+ dan M_- .

Dalam hal ini, peluang untuk memiliki metrik h_{ij} dapat difaktorkan. Ini adalah produk dari dua fungsi gelombang Ψ_+ dan Ψ_- . Ini diberikan oleh integral jalur pada semua metrik pada M_+ dan M_- masing-masing, yang menginduksi tiga metrik yang diberikan h_{ij} pada Σ . Dalam kebanyakan kasus, dua fungsi gelombang akan sama dan saya akan menghilangkan superskrip $+$ dan $-$ disebut



Probabilitas hij metrik induksi pada $= Z$ metrik pada M yang $d[g]$ e $\dot{y}$ l



Peluang dia $= +(\text{dia}) \times (\text{dia})$

di mana $+(hij) = Z$ metrik pada M^+ yang $d[g]$ e $\dot{y}$ l

fungsi gelombang alam semesta. Jika ada medan materi, fungsi gelombang juga akan bergantung pada nilainya 0 pada. Tapi itu tidak akan bergantung secara eksplisit pada waktu karena tidak ada koordinat waktu yang disukai di alam semesta tertutup. Usulan tanpa batas menyiratkan bahwa fungsi gelombang alam semesta diberikan oleh integral lintasan di atas medan pada manifold kompak M^+ yang satu-satunya batasnya adalah permukaan. Integral jalur diambil alih semua metrik dan medan materi pada M^+ yang sesuai dengan hij metrik dan medan materi 0

Seseorang dapat menggambarkan posisi permukaan dengan fungsi dari tiga koordinat x_i pada. Tetapi fungsi gelombang yang didefinisikan oleh integral lintasan tidak dapat bergantung pada atau pada pilihan

dari koordinat x_i . Ini menyiratkan bahwa fungsi gelombang harus mematuhi empat persamaan diferensial fungsional. Tiga dari persamaan ini disebut kendala momentum.

Persamaan Kendala Momentum

$$\frac{h_{ij}}{\sqrt{-g}} \delta^j = 0$$

Mereka mengungkapkan fakta bahwa fungsi gelombang harus sama untuk 3 metrik h_{ij} yang berbeda yang dapat diperoleh satu sama lain dengan transformasi koordinat x_i . Persamaan keempat disebut persamaan Wheeler-DeWitt.

Wheeler - Persamaan DeWitt

$$G_{ijkl} \frac{\delta^2}{\delta h_{ij} \delta h_{kl}} \Psi = 0$$

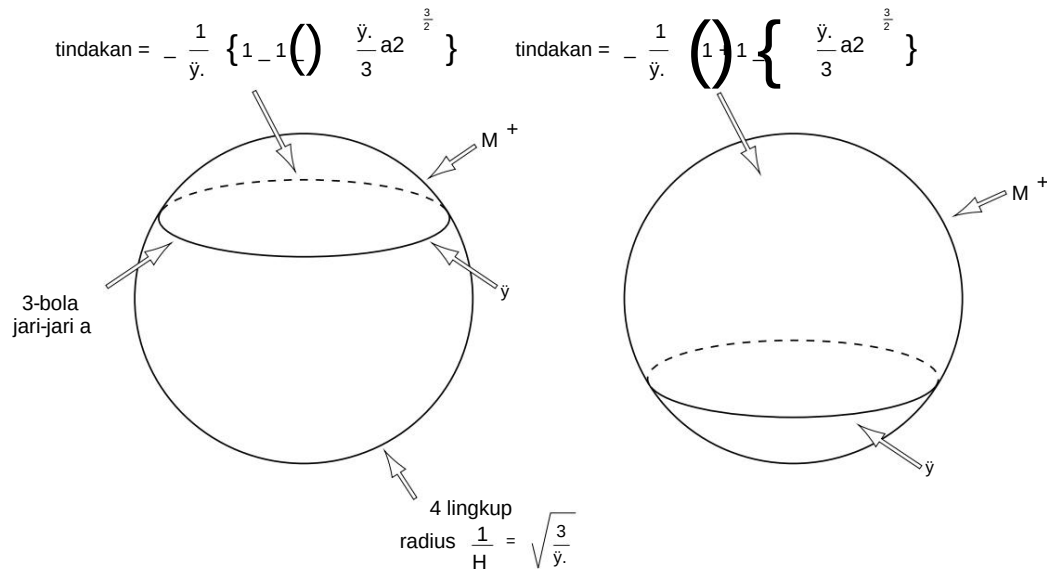
Ini sesuai dengan independensi fungsi gelombang pada Ψ . Orang dapat menganggapnya sebagai persamaan Schrödinger untuk alam semesta. Tetapi tidak ada istilah turunan waktu karena fungsi gelombang tidak bergantung pada waktu secara eksplisit.

Untuk memperkirakan fungsi gelombang alam semesta, seseorang dapat menggunakan pendekatan titik pelana ke integral jalur seperti dalam kasus lubang hitam. Satu menemukan metrik Euclidean g_0 pada manifold M^4 yang memenuhi persamaan medan dan menginduksi h_{ij} metrik pada batas Σ . Seseorang kemudian dapat memperluas aksi dalam rangkaian kekuatan di sekitar metrik latar belakang g_0 .

$$I[g] = I[g_0] + \frac{1}{2} \int \delta g_{\mu\nu} \delta g^{\mu\nu} + \dots$$

Seperti sebelumnya istilah linier dalam gangguan menghilang. Suku kuadrat dapat dianggap memberikan kontribusi graviton di latar belakang dan suku orde tinggi sebagai interaksi antara graviton. Ini dapat diabaikan ketika jari-jari kelengkungan latar belakang besar dibandingkan dengan skala Planck. Karena itu

$$\delta^2 I = \frac{1}{2} \int \delta g_{\mu\nu} \delta g^{\mu\nu} + \dots$$



Seseorang dapat melihat seperti apa fungsi gelombang dari contoh sederhana. Pertimbangkan situasi di mana tidak ada medan materi tetapi ada konstanta kosmologis positif.

Mari kita ambil permukaan menjadi tiga bola dan metrik hij menjadi tiga bulat

metrik bola jari-jari a. Maka manifold M^+ yang dibatasi oleh dapat diambil sebagai

empat bola. Metrik yang memenuhi persamaan medan adalah bagian dari empat bola berjari-jari di mana $\frac{1}{H}$

$H^2 = \frac{\ddot{y}}{3}$

$$\text{saya} = \frac{1}{16\ddot{y} Z (R - 2\ddot{y}) (-g)} \quad \frac{1}{2} d^4x + \frac{1}{8\ddot{y} Z K (\pm \text{jam})} \quad \frac{1}{2} d^3x$$

Untuk tiga bola dengan jari-jari kurang dari ada dua solusi Euclidean yang mungkin:

baik M^+ bisa kurang dari satu belahan atau bisa lebih. Namun ada argumen

yang menunjukkan bahwa seseorang harus memilih solusi yang sesuai dengan kurang dari satu belahan.

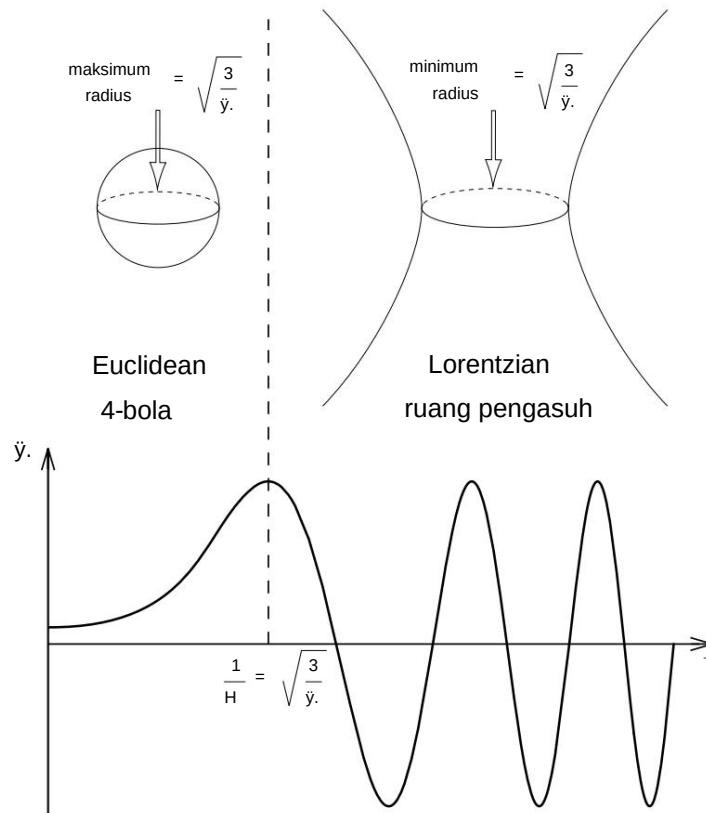
Gambar berikut menunjukkan kontribusi fungsi gelombang yang berasal dari

aksi metrik g_0 . Ketika jari-jari kurang dari eksponensial seperti ea^2 , $\frac{1}{H}$ fungsi gelombang bertambah

Namun, ketika a lebih besar dari $\frac{1}{H}$ seseorang dapat melanjutkan secara analitis hasilnya untuk a yang lebih kecil dan memperoleh fungsi gelombang yang berosilasi sangat cepat.

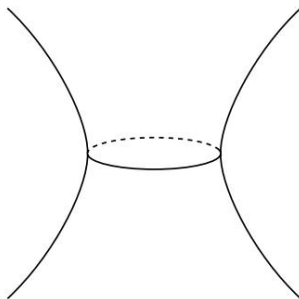
Fungsi gelombang ini dapat diinterpretasikan sebagai berikut. Solusi waktu nyata dari Einstein persamaan dengan suku $\ddot{y}$ dan simetri maksimal adalah ruang de Sitter. Ini bisa disematkan sebagai hiperboloid dalam ruang Minkowski lima dimensi.

Seseorang dapat menganggapnya sebagai alam semesta tertutup yang menyusut dari ukuran tak terbatas menjadi minimum radius dan kemudian mengembang lagi secara eksponensial. Metrik dapat ditulis dalam bentuk a Alam semesta Friedmann dengan faktor skala $\cosh Ht$. Putting = itu mengubah $\cosh$ menjadi $\cos$ memberikan metrik Euclidean pada empat bidang radius $\frac{1}{H}$.



Lorentzian - Metrik Pengasuh

$$ds^2 = dt^2 + \frac{1}{H^2} \cosh Ht (dr^2 + \sin^2 r (d\theta^2 + \sin^2 \theta d\phi^2))$$

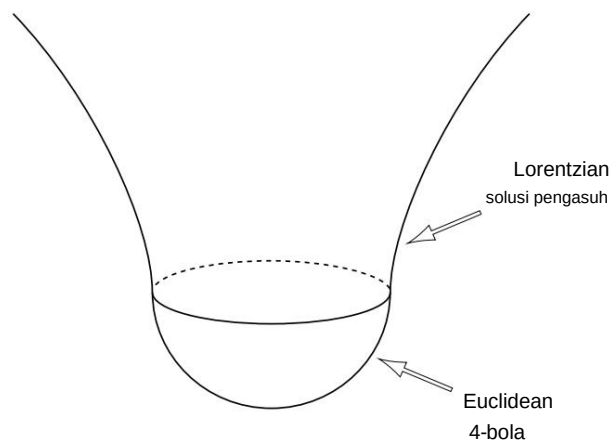
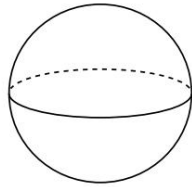


Jadi orang mendapat gagasan bahwa fungsi gelombang yang bervariasi secara eksponensial dengan tiga metrik hij sesuai dengan metrik Euclidean waktu imajiner. Di sisi lain, gelombang fungsi yang beresilasi cepat sesuai dengan metrik Lorentzian waktu nyata.

Seperti dalam kasus penciptaan lubang hitam berpasangan, seseorang dapat menggambarkan yang spontan penciptaan alam semesta yang mengembang secara eksponensial. Satu bergabung dengan bagian bawah Euclidean empat bola ke bagian atas hiperboloid Lorentzian.

Metrik Euclidean

$$ds^2 = dy^2 + \frac{1}{H^2} \cos Hy (dr^2 + \sin^2 r (dy^2 + \sin^2 dy^2))$$



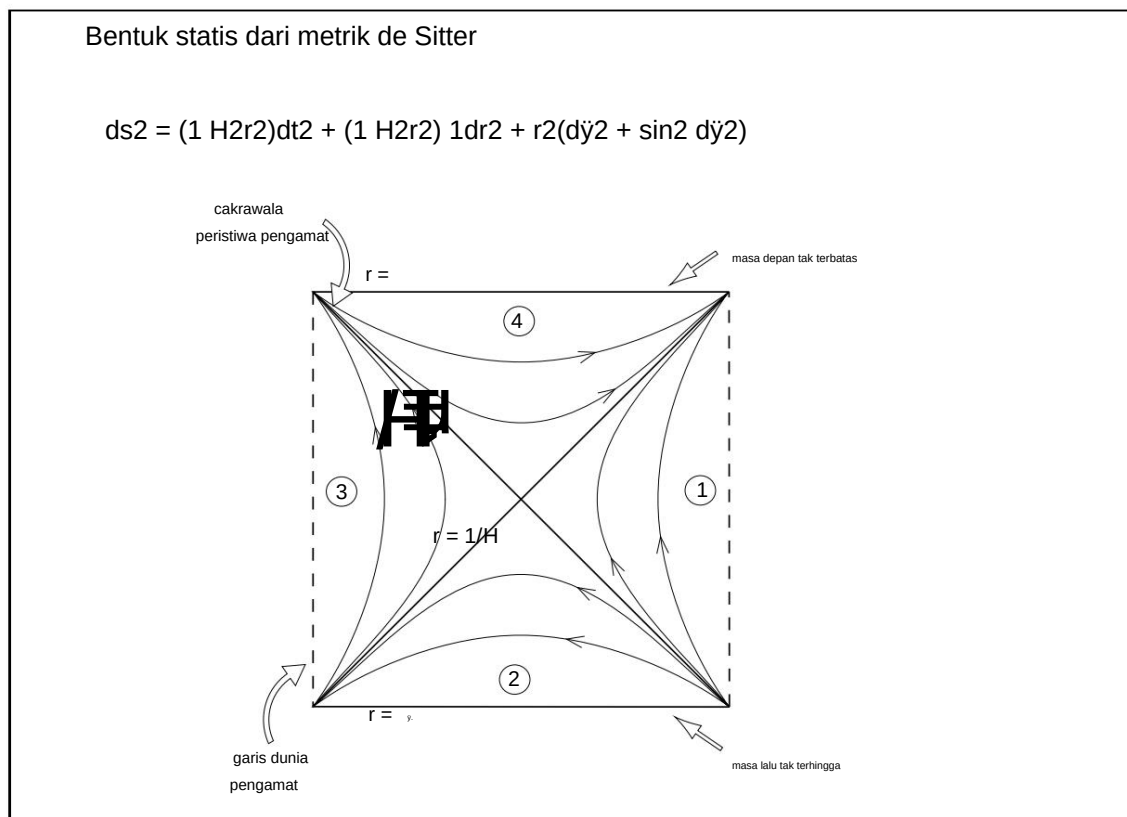
Berbeda dengan penciptaan pasangan lubang hitam, orang tidak dapat mengatakan bahwa alam semesta de Sitter diciptakan dari energi medan di ruang yang sudah ada sebelumnya. Sebaliknya, itu benar-benar akan diciptakan dari ketiadaan: tidak hanya dari ruang hampa tetapi dari ketiadaan sama sekali karena tidak ada apa pun di luar alam semesta. Dalam rezim Euclidean, alam semesta de Sitter hanyalah ruang tertutup seperti permukaan Bumi tetapi dengan dua dimensi lagi. Jika konstanta kosmologis kecil dibandingkan dengan nilai Planck, kelengkungan empat bola Euclidean seharusnya kecil. Ini berarti bahwa pendekatan titik pelana ke integral jalur harus baik, dan bahwa perhitungan fungsi gelombang alam semesta tidak akan terpengaruh oleh ketidaktahuan kita tentang apa yang terjadi pada kelengkungan yang sangat tinggi.

Seseorang juga dapat memecahkan persamaan medan untuk metrik batas yang tidak tepat putaran tiga bola metrik. Jika jari-jari tiga bola kurang dari metrik Euclidean nyata, $\frac{1}{H^2}$ solusinya adalah Aksinya akan nyata dan fungsi gelombang akan teredam secara eksponensial dibandingkan dengan bola bundar tiga dengan volume yang sama. Jika jari-jari tiga bola lebih besar dari jari-jari kritis ini akan ada dua solusi konjugasi kompleks dan fungsi gelombang akan beresonansi cepat dengan perubahan kecil dalam H .

Setiap pengukuran yang dibuat dalam kosmologi dapat dirumuskan dalam bentuk fungsi gelombang.

Dengan demikian, proposal tanpa batas menjadikan kosmologi sebagai ilmu karena seseorang dapat memprediksi hasil pengamatan apa pun. Kasus yang baru saja kita bahas tentang medan materi apa pun dan konstanta kosmologis saja tidak sesuai dengan alam semesta tempat kita tinggal. Namun demikian, ini adalah contoh yang berguna, karena merupakan model sederhana yang dapat diselesaikan dengan cukup eksplisit dan karena, seperti yang akan kita lihat, tampaknya sesuai dengan tahap awal alam semesta.

Meskipun tidak jelas dari fungsi gelombang, alam semesta de Sitter memiliki sifat termal seperti lubang hitam. Seseorang dapat melihat ini dengan menulis metrik de Sitter dalam bentuk statis seperti solusi Schwarzschild.



singularitas nyata di $r = 1/H$ dapat menghapusnya dengan menambahkan konstanta kosmologis Λ ke persamaan Schwarzschild, yaitu Ada cakrawala peristiwa. Hal ini dapat dilihat dari diagram Carter-Penrose yang berbentuk persegi. Garis vertikal putus-putus di sebelah kiri mewakili pusat simetri bola di mana jari-jari r kedua bola menjadi nol. Ada pusat simetri bola lainnya yang diwakili oleh garis vertikal putus-putus di sebelah kanan. Garis horizontal di bagian atas dan bawah mewakili ketidakterbatasan masa lalu dan masa depan yang seperti ruang dalam kasus ini. Garis diagonal dari kiri atas ke kanan bawah adalah batas masa lalu seorang pengamat di pusat simetri sebelah kiri. Dengan demikian bisa disebut cakrawala peristiwanya. Namun, seorang pengamat yang garis dunianya berakhir di

tempat yang berbeda di masa depan tak terhitung akan memiliki cakrawala peristiwa yang berbeda. Jadi, cakrawala peristiwa adalah masalah pribadi di ruang de Sitter.

Jika seseorang kembali ke bentuk statis dari metrik de Sitter dan menempatkan τ ia mendapatkan metrik Euclidean. Ada singularitas jelas di cakrawala. Namun, dengan mendefinisikan koordinat radial baru dan mengidentifikasi dengan metrik periode yang hanya empat bola. Karena koordinat waktu Euclidean biasa periodik, ruang de Sitter dan semua medan kuantum di dalamnya akan berperilaku seolah-olah berada pada suhu $\frac{H}{2\pi}$.

Seperti yang akan kita lihat, kita dapat mengamati konsekuensi suhu ini dalam fluktuasi latar belakang gelombang mikro. Seseorang juga dapat menerapkan argumen yang mirip dengan kasus lubang hitam pada aksi solusi Euclidean-de Sitter. Seseorang menemukan bahwa ia memiliki entropi intrinsik dari $\frac{A_H}{4}$, yang merupakan seperempat dari luas horizon peristiwa. Sekali lagi entropi ini muncul karena alasan topologi: bilangan Euler dari empat bola adalah dua. Ini berarti bahwa tidak mungkin ada koordinat waktu global pada ruang Euclidean-de Sitter. Seseorang dapat menafsirkan entropi kosmologis ini sebagai cerminan kurangnya pengetahuan pengamat tentang alam semesta di luarnya cakrawala peristiwanya.

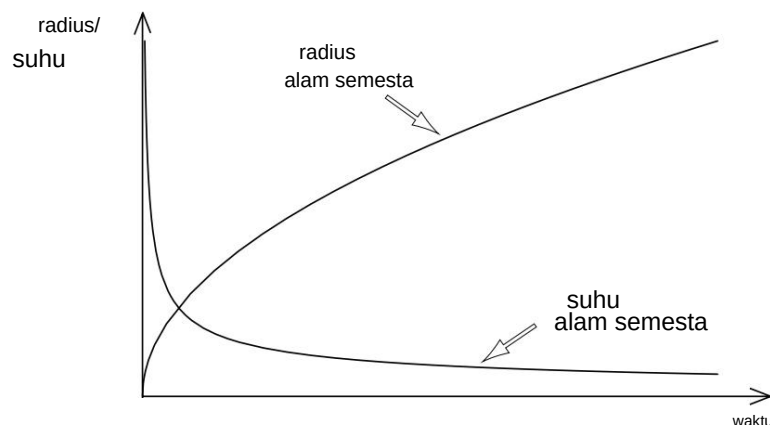
Metrik Euclidean periodik dengan periode		$\frac{2\pi}{H}$
$\ddot{y}$	$\ddot{y}$	Suhu = $\frac{H}{2\pi}$
$\ddot{y}$	$\ddot{y}$	Luas cakrawala peristiwa = $\frac{4\pi}{H^2}$
$\ddot{y}$	$\ddot{y}$	Entropi = $\frac{\pi}{H^2}$

Ruang De Sitter bukanlah model yang baik dari alam semesta yang kita tinggali karena ia kosong dan mengembang secara eksponensial. Kami mengamati bahwa alam semesta mengandung materi dan kami menyimpulkan dari latar belakang gelombang mikro dan kelimpahan elemen cahaya yang pasti jauh lebih panas dan lebih padat di masa lalu. Skema paling sederhana yang konsisten dengan pengamatan kami disebut model Hot Big Bang.

Dalam skenario ini, alam semesta dimulai pada singularitas yang dipenuhi radiasi pada suhu tak terbatas. Saat mengembang, radiasi mendingin dan kerapatan energinya turun. Akhirnya densitas energi radiasi menjadi kurang dari densitas materi non relativistik yang telah mendominasi pemuai dengan faktor terakhir seribu. Namun kita masih dapat mengamati sisa-sisa radiasi di latar belakang radiasi gelombang mikro pada suhu sekitar 3 derajat di atas nol mutlak.

Masalah dengan model Hot Big Bang adalah masalah dengan semua kosmologi tanpa teori kondisi awal: ia tidak memiliki kekuatan prediksi. Karena relativitas umum akan

Model Big Bang Panas



memecah pada singularitas, apa pun bisa keluar dari Big Bang. Jadi mengapa alam semesta begitu homogen dan isotropik dalam skala besar namun dengan ketidakaturan lokal seperti galaksi dan bintang. Dan mengapa alam semesta begitu dekat dengan garis pemisah antara runtuh lagi dan mengembang tanpa batas. Untuk menjadi sedekat kita sekarang, tingkat ekspansi sejak dini harus dipilih dengan sangat akurat. Jika laju pemuaian satu detik setelah Big Bang berkurang satu bagian pada tahun 10¹⁰, alam semesta akan runtuh setelah beberapa juta tahun. Jika lebih besar satu bagian dalam 10¹⁰, alam semesta pada dasarnya akan kosong setelah beberapa juta tahun. Dalam kedua kasus itu tidak akan berlangsung cukup lama bagi kehidupan untuk berkembang. Jadi seseorang harus mengacu pada prinsip antropik atau menemukan penjelasan fisik mengapa alam semesta seperti itu.

Model Hot Big Bang tidak menjelaskan alasannya :

1. Alam semesta hampir homogen dan isotropik tetapi dengan gangguan kecil bari.
2. Alam semesta mengembang hampir persis pada tingkat kritis untuk menghindari ko meleset lagi.

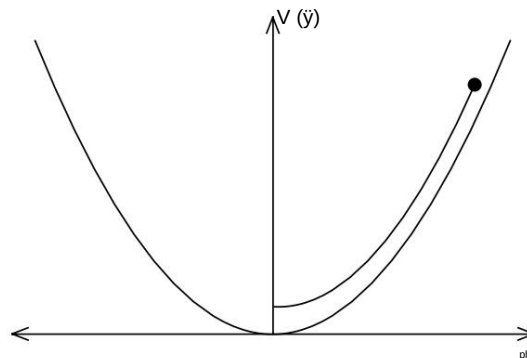
Beberapa orang mengklaim bahwa apa yang disebut inflasi menghilangkan kebutuhan akan teori kondisi awal. Idennya adalah bahwa alam semesta dapat dimulai pada Big Bang di hampir semua keadaan. Di bagian-bagian alam semesta di mana kondisinya cocok akan ada periode ekspansi eksponensial yang disebut inflasi. Hal ini tidak hanya dapat meningkatkan ukuran wilayah dengan faktor yang sangat besar seperti 10³⁰ atau lebih, tetapi juga akan membuat wilayah tersebut homogen dan isotropik dan meluas hanya pada tingkat kritis untuk menghindari keruntuhan lagi.

Klaimnya adalah bahwa kehidupan cerdas hanya akan berkembang di daerah yang mengembang. Kami

Oleh karena itu, tidak perlu heran bahwa wilayah kita homogen dan isotropik dan berkembang hanya pada tingkat kritis.

Namun, inflasi saja tidak dapat menjelaskan keadaan alam semesta saat ini. Seseorang dapat melihat ini dengan mengambil keadaan apa pun untuk alam semesta sekarang dan menjalankannya kembali ke masa lalu. Asalkan mengandung materi yang cukup, teorema singularitas akan menyiratkan bahwa ada singularitas di masa lalu. Seseorang dapat memilih kondisi awal alam semesta pada Big Bang sebagai kondisi awal model ini. Dengan cara ini, seseorang dapat menunjukkan bahwa kondisi awal yang sewenang-wenang pada Big Bang dapat mengarah ke keadaan apa pun sekarang. Seseorang bahkan tidak dapat berargumen bahwa sebagian besar keadaan awal mengarah ke keadaan seperti yang kita amati hari ini: ukuran alami dari kedua kondisi awal yang mengarah ke alam semesta seperti kita dan yang tidak adalah tak terbatas. Karena itu, seseorang tidak bisa mengklaim bahwa yang satu lebih besar dari yang lain.

Di sisi lain, kita melihat dalam kasus gravitasi dengan konstanta kosmologis tetapi tidak ada medan materi bahwa kondisi tanpa batas dapat mengarah ke alam semesta yang dapat diprediksi dalam batas-batas teori kuantum. Model khusus ini tidak menggambarkan alam semesta tempat kita tinggal, yang penuh dengan materi dan memiliki konstanta kosmologis nol atau sangat kecil. Namun orang bisa mendapatkan model yang lebih realistis dengan menjatuhkan konstanta kosmologis dan memasukkan bidang materi. Secara khusus, seseorang tampaknya membutuhkan medan skalar dengan potensial $V(\phi)$. Saya akan berasumsi bahwa V memiliki nilai minimum nol pada $\phi = 0$. Contoh sederhana adalah medan skalar masif $V = \frac{1}{2}m^2\phi^2$.



Energi - Tensor Momentum dari Medan Skalar

$$T_{ab} = \frac{1}{2} g_{ab} \dot{\phi}^2 - g_{ab} V(\phi)$$

Kita dapat melihat dari tensor momentum energi bahwa jika gradien kecil, $V(\ddot{y})$ bertindak seperti konstanta kosmologis yang efektif.

Fungsi gelombang sekarang akan bergantung pada nilai 0 dari pada, serta pada induksi metrik hij. Seseorang dapat memecahkan persamaan medan untuk metrik bulat tiga bola kecil dan nilai besar 0. Solusi dengan batas tersebut kira-kira merupakan bagian dari empat bola dan medan yang hampir konstan. Ini seperti kasus de Sitter dengan potensial $V(\ddot{y}_0)$ memainkan peran konstanta kosmologis. Demikian pula, jika jari-jari a dari tiga bola sedikit lebih besar dari jari-jari empat bola Euclidean, akan ada dua solusi konjugasi kompleks. Ini akan menjadi seperti setengah dari empat bola Euclidean yang digabungkan ke dalam solusi Lorentzian de Sitter dengan yang hampir konstan. Jadi proposal tanpa batas memprediksi penciptaan spontan dari alam semesta yang mengembang secara eksponensial dalam model ini dan juga dalam kasus de Sitter.

Satu sekarang dapat mempertimbangkan evolusi model ini. Berbeda dengan kasus de Sitter, itu tidak akan terus tanpa batas dengan ekspansi eksponensial. Medan skalar akan menurun ke minimum pada $\ddot{y} = 0$. Namun, jika nilai awal lebih besar dari nilai Planck, laju penggulungan akan lebih lambat dibandingkan dengan skala waktu ekspansi.

Dengan demikian alam semesta akan mengembang hampir secara eksponensial dengan faktor yang besar. Ketika medan skalar turun ke urutan satu, ia akan mulai berosilasi sekitar $\ddot{y} = 0$. Untuk sebagian besar potensial V , osilasi akan cepat dibandingkan dengan waktu ekspansi. Biasanya diasumsikan bahwa energi dalam osilasi medan skalar ini akan diubah menjadi pasangan partikel lain dan akan memanaskan alam semesta. Ini, bagaimanapun, tergantung pada asumsi tentang panah waktu. Saya akan kembali ke ini segera.

Ekspansi eksponensial oleh faktor besar akan meninggalkan alam semesta dengan laju ekspansi kritis yang hampir sama persis. Dengan demikian, proposal tanpa batas dapat menjelaskan mengapa alam semesta masih begitu dekat dengan laju ekspansi kritis. Untuk melihat apa yang diprediksinya untuk homogenitas dan isotropi alam semesta, kita harus mempertimbangkan tiga metrik hij yang merupakan gangguan dari metrik bulat tiga bola. Satu dapat memperluas ini dalam hal harmonik bola. Ada tiga macam: harmonik skalar, harmonik vektor dan harmonik tensor. Harmoni vektor hanya sesuai dengan perubahan koordinat x_i pada tiga bidang yang berurutan dan tidak memainkan peran dinamis. Harmonik tensor berhubungan dengan gelombang gravitasi di alam semesta yang mengembang, sedangkan harmonik skalar sebagian berhubungan dengan kebebasan koordinat dan sebagian lagi dengan gangguan densitas.

Satu dapat menulis fungsi gelombang sebagai produk dari fungsi gelombang 0 untuk putaran tiga bola metrik radius a kali gelombang berfungsi untuk koefisien harmonik.

$$[h_{ij}, 0] = 0(a,) a(a_n) b(b_n) c(c_n) d(d_n)$$

Harmonik tensor - Gelombang gravitasi

Harmoni vektor - Pengukur

Harmoni skalar - Gangguan densitas

Kita kemudian dapat memperluas persamaan Wheeler-DeWitt untuk fungsi gelombang ke semua orde dalam radius a dan medan skalar rata-rata, tetapi ke orde pertama dalam gangguan. Satu mendapatkan serangkaian persamaan Schrödinger untuk laju perubahan fungsi gelombang gangguan sehubungan dengan koordinat waktu dari metrik latar belakang.

Persamaan Schrödinger

$$-\frac{(\partial_n)^2}{2a^3} = \frac{1}{2a^3} - \frac{2}{n} \frac{d}{dt} \ln a + \frac{1}{2} \frac{d^2}{dt^2} \ln a + \frac{1}{2} \frac{d}{dt} \ln a \frac{d}{dt} \ln a$$

Seseorang dapat menggunakan kondisi tanpa batas untuk mendapatkan kondisi awal untuk fungsi gelombang gangguan. Satu memecahkan persamaan medan untuk tiga bola kecil tapi sedikit terdistorsi. Ini memberikan fungsi gelombang gangguan dalam periode yang berkembang secara eksponensial.

Seseorang kemudian dapat mengembangkannya menggunakan persamaan Schrödinger.

Harmonik tensor yang sesuai dengan gelombang gravitasi adalah yang paling sederhana untuk dipertimbangkan. Mereka tidak memiliki derajat kebebasan yang terukur dan mereka tidak berinteraksi langsung dengan gangguan materi. Seseorang dapat menggunakan kondisi tanpa batas untuk menyelesaikan fungsi gelombang awal dari koefisien ∂_n harmonik tensor dalam metrik yang terganggu.

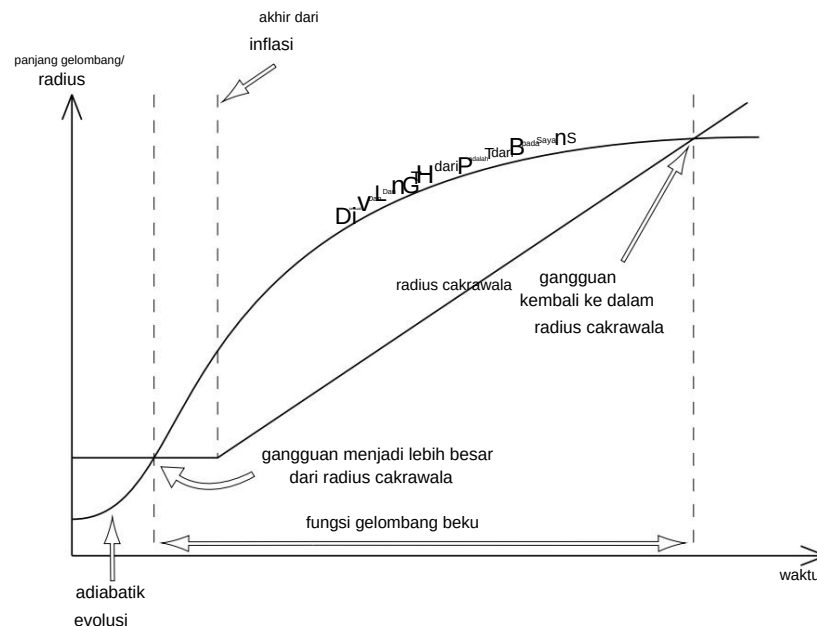
Keadaan Dasar

$$(\partial_n)^2 e^{\gamma} = \frac{1}{2} \frac{d^2}{dt^2} \ln a + \frac{1}{2} \frac{d}{dt} \ln a \frac{d}{dt} \ln a$$

dimana $x = a \frac{3}{2} \frac{d}{dt} \ln a$ dan $= \frac{n}{2}$

Satu menemukan bahwa itu adalah fungsi gelombang keadaan dasar untuk osilator harmonik pada frekuensi gelombang gravitasi. Saat alam semesta mengembang, frekuensinya akan turun. Sementara frekuensi lebih besar dari laju ekspansi a/a , persamaan Schrödinger akan memungkinkan fungsi gelombang berelaksasi secara adiabatik dan mode akan tetap dalam keadaannya. Bahkan pada akhirnya, bagaimanapun, frekuensinya akan menjadi kurang dari laju ekspansi yang kira-kira

konstan selama ekspansi eksponensial. Ketika ini terjadi persamaan Schrödinger tidak akan lagi dapat mengubah fungsi gelombang cukup cepat sehingga dapat tetap berada di keadaan dasar saat frekuensi berubah. Sebaliknya itu akan membeku dalam bentuk yang dimilikinya ketika frekuensi turun di bawah tingkat ekspansi.



Setelah akhir era ekspansi eksponensial, tingkat ekspansi akan berkurang lebih cepat dari frekuensi modus. Ini setara dengan mengatakan bahwa peristiwa pengamat cakrawala, kebalikan dari laju ekspansi, meningkat lebih cepat dari panjang gelombang mode. Dengan demikian panjang gelombang akan lebih panjang dari cakrawala selama periode inflasi dan akan kembali dalam cakrawala nanti. Ketika itu terjadi, fungsi gelombang akan tetap sama seperti ketika fungsi gelombang dibekukan. Namun, frekuensinya akan jauh lebih rendah. Oleh karena itu, fungsi gelombang akan sesuai dengan keadaan yang sangat tereksitasi daripada dengan keadaan dasar seperti yang terjadi ketika fungsi gelombang membeku. Eksitasi kuantum dari mode gelombang gravitasi akan menghasilkan fluktuasi sudut di latar belakang gelombang mikro yang amplitudonya adalah laju ekspansi (dalam satuan Planck) pada saat fungsi gelombang membeku. Jadi pengamatan COBE fluktuasi satu bagian dalam 10⁵ dalam microwave latar belakang menempatkan batas atas sekitar 10⁻⁵ dalam satuan Planck pada kepadatan energi ketika fungsi gelombang membeku. Ini cukup rendah sehingga perkiraan yang saya gunakan harus akurat.

Namun, harmonik tensor gelombang gravitasi hanya memberikan batas atas pada densitas pada saat pembekuan. Alasannya adalah ternyata harmonik skalar memberikan fluktuasi yang lebih besar pada latar belakang gelombang mikro. Ada dua harmonik skalar

derajat kebebasan dalam tiga metrik hij dan satu dalam medan skalar. Namun dua derajat skalar ini sesuai dengan kebebasan koordinat. Jadi hanya ada satu derajat kebebasan skalar fisik dan itu sesuai dengan gangguan kerapatan.

Analisis untuk gangguan skalar sangat mirip dengan analisis harmonik tensor jika menggunakan satu pilihan koordinat untuk periode hingga pembekuan fungsi gelombang dan yang lainnya setelah itu. Dalam mengonversi dari satu sistem koordinat ke sistem koordinat lainnya, amplitudo dikalikan dengan faktor laju ekspansi dibagi dengan laju rata-rata perubahan ϕ . Faktor ini akan tergantung pada kemiringan potensi, tetapi setidaknya 10 untuk potensi yang wajar. Ini berarti fluktuasi latar belakang gelombang mikro yang dihasilkan oleh gangguan kerapatan setidaknya 10 kali lebih besar daripada gelombang gravitasi. Jadi batas atas rapat energi pada saat fungsi gelombang membeku hanya 10-12 rapat Planck. Ini baik dalam kisaran validitas perkiraan yang saya gunakan. Jadi sepertinya kita tidak membutuhkan teori string bahkan untuk awal alam semesta.

Spektrum fluktuasi dengan skala sudut sesuai dengan akurasi pengamatan saat ini dengan prediksi bahwa itu harus hampir bebas skala. Dan ukuran gangguan densitas hanya itu yang diperlukan untuk menjelaskan pembentukan galaksi dan bintang. Jadi tampaknya proposal tanpa batas dapat menjelaskan semua struktur alam semesta termasuk ketidakhomogenan kecil seperti kita.

Orang dapat menganggap gangguan di latar belakang gelombang mikro sebagai yang timbul dari fluktuasi termal dalam medan skalar. Periode inflasi memiliki suhu tingkat ekspansi lebih dari 2×10^{26} karena kira-kira periodik dalam waktu imajiner.

Jadi, dalam arti tertentu, kita tidak perlu menemukan lubang hitam primordial kecil: kita telah mengamati suhu gravitasi intrinsik sekitar 10^{26} derajat, atau 10^{26} suhu Planck.

Prediksi COBE ditambah gangguan gelombang gravitasi	γ	batas atas kepadatan energi 10^{10} kepadatan Planck
ditambah gangguan kepadatan		batas atas kepadatan energi 10^{12} kepadatan Planck
suhu gravitasi intrinsik alam semesta awal	γ	10^{26} suhu Planck = 1026 derajat

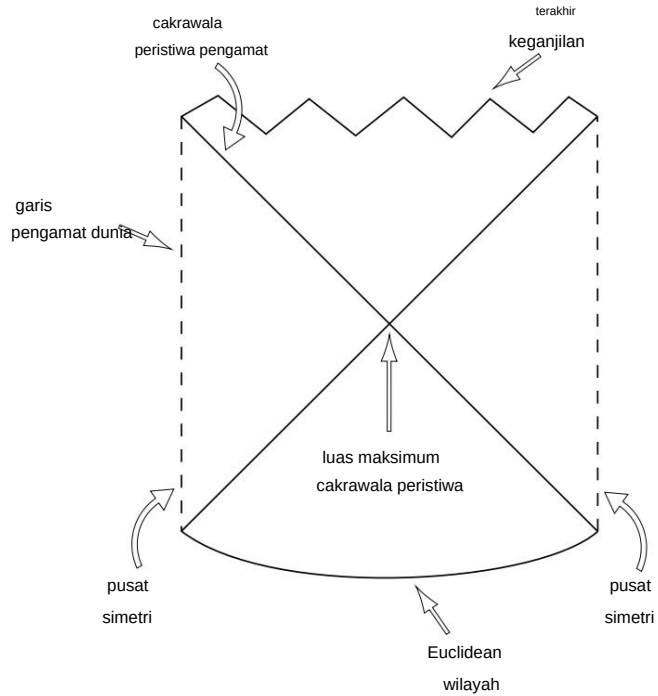
Bagaimana dengan entropi intrinsik yang terkait dengan cakrawala peristiwa kosmologis. Bisa

kita mengamati ini. Saya pikir kita bisa dan itu sesuai dengan fakta bahwa objek seperti galaksi dan bintang adalah objek klasik meskipun mereka dibentuk oleh fluktuasi kuantum. Jika kita melihat alam semesta pada permukaan seperti ruang yang mencakup seluruh alam semesta pada satu waktu, maka ia berada dalam keadaan kuantum tunggal yang dijelaskan oleh fungsi gelombang. Namun, kita tidak pernah dapat melihat lebih dari setengah dan kita sama sekali tidak mengetahui seperti apa alam semesta di luar kerucut cahaya masa lalu kita. Ini berarti bahwa dalam menghitung probabilitas pengamatan, kita harus menjumlahkan semua kemungkinan untuk bagian dari yang tidak kita amati. Efek dari penjumlahan adalah untuk mengubah bagian alam semesta yang kita amati dari keadaan kuantum tunggal menjadi apa yang disebut keadaan campuran, ansambel statistik dari berbagai kemungkinan. Dekohherensi seperti itu, demikian sebutannya, diperlukan jika suatu sistem ingin berperilaku secara klasik daripada sistem kuantum. Orang biasanya mencoba menjelaskan dekohherensi dengan interaksi dengan sistem eksternal, seperti mandi panas, yang tidak diukur. Dalam kasus alam semesta tidak ada sistem eksternal, tetapi saya akan menyarankan bahwa alasan kita mengamati perilaku klasik adalah karena kita hanya dapat melihat sebagian dari alam semesta. Orang mungkin berpikir bahwa pada akhir zaman seseorang akan dapat melihat seluruh alam semesta dan cakrawala peristiwa akan menghilang. Tapi ini tidak terjadi. Usulan tanpa batas menyiratkan bahwa alam semesta tertutup secara spasial. Sebuah alam semesta tertutup akan runtuh lagi sebelum seorang pengamat memiliki waktu untuk melihat seluruh alam semesta. Saya telah mencoba untuk menunjukkan entropi alam semesta seperti itu akan menjadi seperempat dari luas cakrawala peristiwa pada saat ekspansi maksimum. Namun, saat ini, saya tampaknya mendapatkan faktor 4. Jelas saya berada di jalur yang salah atau saya melewatkan sesuatu.

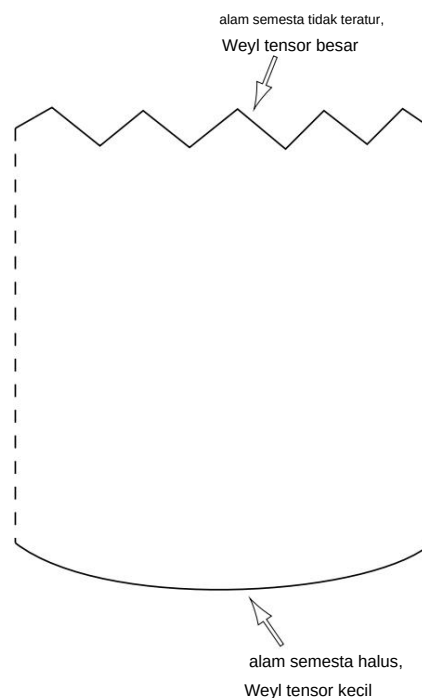
Saya akan mengakhiri kuliah ini dengan topik di mana Roger dan saya memiliki pandangan yang sangat berbeda, panah waktu. Ada perbedaan yang sangat jelas antara arah waktu maju dan mundur di wilayah alam semesta kita. Kita hanya perlu menonton film yang diputar mundur untuk melihat perbedaannya. Alih-alih cangkir jatuh dari meja dan pecah, mereka akan memperbaiki diri dan melompat kembali ke meja. Andai saja kehidupan nyata seperti itu.

Hukum lokal yang dipatuhi medan fisik adalah simetris waktu, atau lebih tepatnya, invarian CPT. Jadi perbedaan yang diamati antara masa lalu dan masa depan harus datang dari kondisi batas alam semesta. Mari kita anggap bahwa alam semesta tertutup secara spasial dan mengembang ke ukuran maksimum dan runtuh lagi. Seperti yang telah ditekankan Roger, alam semesta akan sangat berbeda di kedua ujung sejarah ini. Pada apa yang kita sebut awal alam semesta, tampaknya sangat halus dan teratur. Namun, ketika runtuh lagi, kami berharap itu sangat tidak teratur dan tidak teratur. Karena ada lebih banyak konfigurasi yang tidak teratur daripada konfigurasi yang teratur, ini berarti bahwa kondisi awal harus dipilih dengan sangat tepat.

Tampaknya, oleh karena itu, harus ada kondisi batas yang berbeda di kedua ujungnya



waktu. Usulan Roger adalah bahwa tensor Weyl harus menghilang di satu ujung waktu tetapi tidak di ujung lainnya. Tensor Weyl adalah bagian dari kelengkungan ruangwaktu yang tidak ditentukan secara lokal oleh materi melalui persamaan Einstein. Itu akan menjadi kecil dalam tahap awal yang teratur. Tapi besar di alam semesta yang runtuh. Jadi proposal ini akan membedakan dua ujung waktu dan mungkin menjelaskan panah waktu.



Saya pikir proposal Roger adalah Weyl dalam lebih dari satu arti kata. Pertama, ini bukan CPT invarian. Roger melihat ini sebagai suatu kebajikan tetapi saya merasa seseorang harus mempertahankan simetri kecuali ada alasan kuat untuk melepaskannya. Seperti yang akan saya katakan, tidak perlu menyerah CPT. Kedua, jika tensor Weyl tepat nol di alam semesta awal, maka ia akan benar-benar homogen dan isotropik dan akan tetap demikian sepanjang waktu. Hipotesis Weyl Roger tidak dapat menjelaskan fluktuasi di latar belakang maupun gangguan yang memunculkan galaksi dan benda-benda seperti kita.

Keberatan terhadap hipotesis tensor Weyl

1. Tidak CPT invarian.
2. Tensor Weyl tidak mungkin benar-benar nol. Tidak menjelaskan fluktuasi kecil asi.

Terlepas dari semua ini, saya pikir Roger telah meletakkan jarinya pada perbedaan penting antara kedua ujung waktu. Tetapi fakta bahwa tensor Weyl kecil di satu ujung tidak boleh dipaksakan sebagai kondisi batas ad hoc, tetapi harus disimpulkan dari prinsip yang lebih mendasar, proposal tanpa batas. Seperti yang telah kita lihat, ini menyiratkan bahwa gangguan sekitar setengah bola empat Euclidean bergabung dengan setengah solusi Lorentzian-de Sitter berada dalam keadaan dasarnya. Artinya, mereka sekecil mungkin, konsisten dengan Prinsip Ketidakpastian. Ini kemudian akan menyiratkan kondisi tensor Weyl Roger: tensor Weyl tidak akan benar-benar nol tetapi akan sedekat mungkin dengan nol.

Pada awalnya saya berpikir bahwa argumen tentang gangguan yang berada di keadaan dasarnya akan berlaku di kedua ujung siklus kontraksi ekspansi. Alam semesta akan mulai mulus dan teratur dan akan menjadi lebih tidak teratur dan tidak teratur saat mengembang. Namun, saya pikir itu harus kembali ke keadaan mulus dan teratur karena semakin kecil. Ini akan menyiratkan bahwa panah waktu termodinamika harus terbalik dalam fase kontraksi. Cangkir akan memperbaiki diri dan melompat kembali ke atas meja. Orang akan menjadi lebih muda, bukan lebih tua, karena alam semesta menjadi lebih kecil lagi. Tidak baik menunggu alam semesta runtuh lagi untuk kembali ke masa muda kita karena itu akan memakan waktu terlalu lama. Tetapi jika panah waktu berbalik arah ketika alam semesta berkontraksi, itu mungkin juga berbalik arah di dalam lubang hitam. Namun, saya tidak akan merekomendasikan melompat ke dalam lubang hitam sebagai cara untuk memperpanjang hidup seseorang.

Saya menulis makalah yang mengklaim bahwa panah waktu akan berbalik ketika alam semesta berkontraksi lagi. Tetapi setelah itu, diskusi dengan Don Page dan Raymond Laflamme meyakinkan saya bahwa saya telah membuat kesalahan terbesar saya, atau setidaknya kesalahan terbesar saya dalam

fisika: alam semesta tidak akan kembali ke keadaan mulus dalam keruntuhan. Ini berarti bahwa panah waktu tidak akan berbalik. Itu akan terus menunjuk ke arah yang sama seperti pada ekspansi.

Bagaimana kedua ujung waktu bisa berbeda. Mengapa gangguan harus kecil di satu ujung tetapi tidak di ujung lainnya. Alasannya adalah ada dua kemungkinan solusi kompleks dari persamaan medan yang cocok dengan batas tiga bola kecil. Salah satunya adalah seperti yang telah saya jelaskan sebelumnya: kira-kira setengah dari empat bola Euclidean bergabung dengan sebagian kecil dari solusi Lorentzian-de Sitter. Solusi lain yang mungkin memiliki setengah Euclidean empat bola yang sama bergabung dengan solusi Lorentzian yang meluas ke radius yang sangat besar dan kemudian berkontraksi lagi ke radius kecil dari batas yang diberikan. Jelas, satu solusi sesuai dengan satu ujung waktu dan yang lain dengan yang lain. Perbedaan antara kedua ujung berasal dari fakta bahwa gangguan dalam tiga metrik hij sangat teredam dalam kasus solusi pertama dengan hanya periode Lorentzian yang singkat. Namun gangguan bisa sangat besar tanpa teredam secara signifikan dalam kasus solusi yang mengembang dan berkontraksi lagi. Hal ini menimbulkan perbedaan antara dua ujung waktu yang telah ditunjukkan Roger. Di satu sisi alam semesta sangat halus dan tensor Weyl sangat kecil. Namun, itu tidak bisa benar-benar nol karena itu akan menjadi pelanggaran terhadap Prinsip Ketidakpastian. Sebaliknya akan ada fluktuasi kecil yang kemudian tumbuh menjadi galaksi dan benda-benda seperti kita. Sebaliknya, alam semesta akan menjadi sangat tidak teratur dan kacau di ujung lain waktu dengan tensor Weyl yang biasanya besar. Ini akan menjelaskan panah waktu yang diamati dan mengapa cangkir jatuh dari meja dan pecah daripada memperbaiki diri dan melompat kembali.

Karena panah waktu tidak akan mundur, dan seiring berjalannya waktu, lebih baik saya mengakhiri kuliah saya. Saya telah menekankan apa yang saya anggap dua fitur paling luar biasa yang telah saya pelajari dalam penelitian saya tentang ruang dan waktu: pertama, bahwa gravitasi menggulung ruang-waktu sehingga memiliki awal dan akhir. Kedua, bahwa ada hubungan yang mendalam antara gravitasi dan termodinamika yang muncul karena gravitasi itu sendiri menentukan topologi manifold tempat ia bekerja.

Lengkungan positif ruangwaktu menghasilkan singularitas di mana relativitas umum klasik runtuh. Sensor Kosmik mungkin melindungi kita dari singularitas lubang hitam, tetapi kita melihat Ledakan Besar dalam ketelanjangan frontal penuh. Relativitas umum klasik tidak dapat memprediksi bagaimana alam semesta akan dimulai. Namun relativitas umum kuantum, bersama dengan proposal tanpa batas, memprediksi alam semesta seperti yang kita amati dan bahkan tampaknya memprediksi spektrum fluktuasi yang diamati pada latar belakang gelombang mikro. Namun, meskipun teori kuantum mengembalikan prediktabilitas yang hilang dari teori klasik, ia tidak melakukannya sepenuhnya. Karena kita tidak dapat melihat seluruh ruang-waktu karena lubang hitam dan

cakrawala peristiwa kosmologis, pengamatan kami dijelaskan oleh ansambel keadaan kuantum daripada oleh satu keadaan. Ini memperkenalkan tingkat ketidakpastian ekstra tetapi mungkin juga mengapa alam semesta tampak klasik. Ini akan menyelamatkan kucing Schrödinger dari keadaan setengah hidup dan setengah mati.

Untuk menghilangkan prediktabilitas dari fisika dan kemudian mengembalikannya lagi, tapi dalam arti yang dikurangi, adalah kisah yang cukup sukses. Saya mengistirahatkan kasus saya.