

信息丢失疑难
是什么

解决之道-Z-
model

倍制虫洞法的
工作逻辑

黑洞内核:Z-
structure

Z-structure
的量子化

总结与展望
1-43

黑洞的自发辐射

曾定方 北京工业大学理论物理系

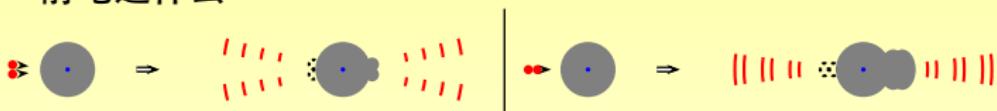
February 16, 2022

ref: eprint:2112.12531 &

NPB2020, NPB2019, NPB2018, NPB2017

- 一 信息丢失疑难-直观表述-熵表述-Hawking 辐射的机制问题 - Mathur 小修正定理
 - 二 破解信息丢失疑难的新方案-纠缠概念和薛定谔的猫-原子辐射的 JC-model-向黑洞辐射的推广 Z-model 及正确的佩奇曲线-单粒子辐射的 WW 近似与热谱-Z-model 的启示
 - 三 从倍制虫洞法看 Z-model 以及从 Z-model 看倍制虫洞法-倍制虫洞法批判-它到底干了啥?-与 API+FWT 对比
 - 四 Z-model 中的黑洞结构-严格解 I-严格解 II-修正的彭卡图-视界内物理的麦氏妖视角-跟 API 的联系-经典严格解的量子化 - 正则模糊球及其弦论对比-波函数简并度计数与面积律熵公式-关于实数剖分的一条新定理
 - 五 内视界结构小结与全文总结
- 信息丢失疑难是什么
解决之道-Z-model
倍制虫洞法的工作逻辑
黑洞内核:Z-structure
Z-structure 的量子化
总结与展望
2-43

- ◆ S. Hawking(1976) 是最早觉察到黑洞信息丢失疑难的科学家，这是他最重要的科学发现，也是当前理论物理研究最有可能被突破的问题
- ♣ 通俗地，一个黑洞吃掉一只鸡跟吃掉一条鱼之后发生的变化完全相同，人们不可能根据它放的屁、出的汗... 推测出它之前吃过什么



- ♣ 这实际上是一种夸张和过度简化，物理学家的鸡是球形鸡，鱼也是球形鱼



左边: 黑洞 + 球形鸡 (外红内青双层球壳)
右边: 黑洞 + 球形鱼 (外青内红双层球壳)

信息丢失疑难
是什么

解决之道-Z-
model

倍制虫洞法的
工作逻辑

黑洞内核:Z-
structure

Z-structure
的量子化

总结与展望
3-43

- ♠ 量子力学中，信息由波函数或者密度矩阵描述，信息守恒是 QM 的一个基本假设，即孤立系统量子态的演化总是幺正的

$$\psi_i \xrightarrow[\text{evol.}]{\text{phys.}} U\psi_i \equiv \psi_f, \quad U^\dagger U = \mathbb{I} \quad (1)$$

否则几率不守恒即 $\psi_i^\dagger \psi_i = 1$ 而 $\psi_f^\dagger \psi_f \neq 1$ 的事件将会发生，这意味着客观存在的物理对象可能会凭空消失，本不存在的客体却会无缘无故地产生

- ♣ 黑洞如果真像 Hawking 描述的那样通过热辐射将自己早期吞吃的物理对象排出去，则一个物理对象在从落入黑洞到变成 Hawking 粒子过程中的某处必定破坏了幺正性，这意味着广义相对论和量子力学之间存在冲突
- ◊ 人们普遍不相信这么低水平的冲突会存在，因此近五十年来，出现了大量试图解决这一冲突的努力，为定量刻画物理态的信息，…

信息丢失疑难
是什么

解决之道-Z-
model

倍制虫洞法的
工作逻辑

黑洞内核:Z-
structure

Z-structure
的量子化

总结与展望
4-43

纯态、混态、密度矩阵、纠缠熵的概念 (以猫为例)

“猫 & 放射性核” 整体总处于纯态 $\psi_{cR} = |c\cdot\text{镭}\rangle + |d\cdot\text{氡}\rangle$ (2)

“单独的猫”or“单独的放射性核”都处于混合态

$$\rho_c \equiv |c\rangle\langle c| + |d\rangle\langle d| \text{ or } \rho_R \equiv |R_a\rangle\langle R_a| + |R_n\rangle\langle R_n| \quad (3)$$

♣ 密度矩阵比波函数能刻画更大的量子态空间，已知密度矩阵，vN 熵或精细熵计算公式为

$$S = -\text{tr} \rho \ln \rho \quad (4)$$

-本质纠缠熵



♣ 纯态系统的密度矩阵 $\rho = |\psi\rangle\langle\psi|$ 总可表示为一个态矢量跟它自身共轭的并积，这种矩阵的秩为 1，熵为零

♡ 混态系统密度矩阵最简情况下也只能表示为两个态-共轭态并积的和 $\rho = |\psi_1\rangle\langle\psi_1| + |\psi_2\rangle\langle\psi_2|$ ，相应的熵总大于零

QM 宏正性原理意味着一个孤立的纯态系统不可能通过物理的演化变为混态或反之，否则系统的熵/信息将不守恒

信息丢失疑难
是什么

解决之道-Z-
model

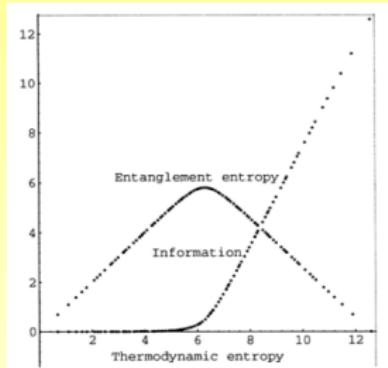
倍制虫洞法的
工作逻辑

黑洞内核:Z-
structure

Z-structure
的量子化

总结与展望
5-43

- A 基于纠缠熵一般性定义, D.Page(1993-94) 证明, 如果霍金辐射是么正的, 则一个黑洞跟它辐射产物的纠缠熵 $S_{B,R}$ 随时间的变化趋势应该是先增后减初末态一样多的, 而编码在辐射产物中的信息在佩奇时刻之前近似为零, 之后单调递增



$$S_R = -\text{tr} \rho_R \ln \rho_R \quad (5)$$

$$I_R = \ln k_R - S_R \quad (6)$$

$k_R \sim$ 辐射产物态空间维度

- B 同时人们普遍认为霍金辐射是热辐射, 不携带任何信息
- C 编码在初始黑洞量子态中的信息如何通过霍金辐射被带到了辐射产物中就构成了信息丢失疑难的熵表述

Zeng: 热辐射不携带信息? 佩奇时刻前的 $I_R=0$ 近似为零, 难道那之前的么正辐射也不携带信息? 完整的黑洞辐射演化不是平衡态过程, 温度在变化, $kT(t)$ 不携带信息? 't Hooft, Mathur

信息丢失疑难是什么

解决之道-Z-model

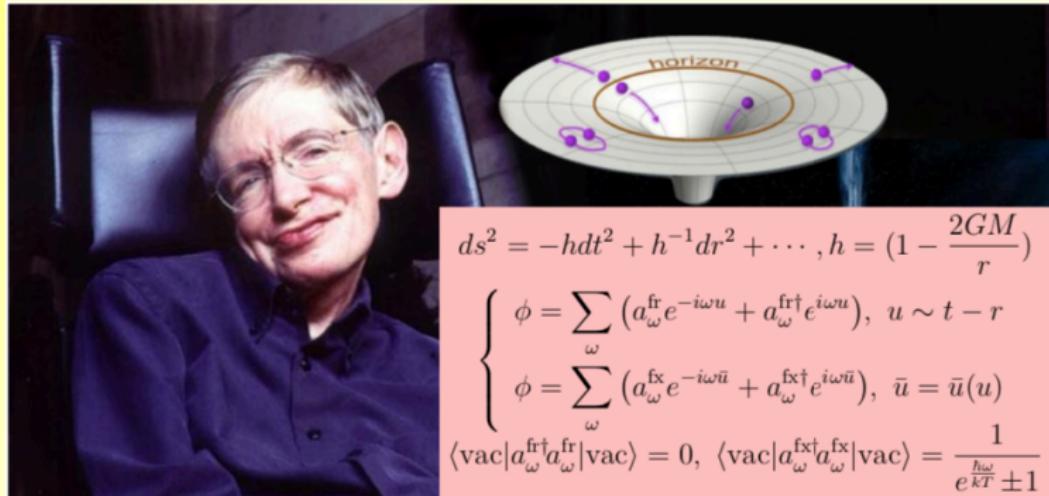
倍制虫洞法的工作逻辑

黑洞内核:Z-structure

Z-structure 的量子化

总结与展望
6-43

Hawking 是如何发现黑洞信息丢失疑难的呢?



$$ds^2 = -h dt^2 + h^{-1} dr^2 + \dots, h = \left(1 - \frac{2GM}{r}\right)$$

$$\begin{cases} \phi = \sum_{\omega} (a_{\omega}^{\text{fr}} e^{-i\omega u} + a_{\omega}^{\text{fr}\dagger} e^{i\omega u}), & u \sim t - r \\ \phi = \sum_{\omega} (a_{\omega}^{\text{fx}} e^{-i\omega \bar{u}} + a_{\omega}^{\text{fx}\dagger} e^{i\omega \bar{u}}), & \bar{u} = \bar{u}(u) \end{cases}$$

$$\langle \text{vac} | a_{\omega}^{\text{fr}\dagger} a_{\omega}^{\text{fr}} | \text{vac} \rangle = 0, \quad \langle \text{vac} | a_{\omega}^{\text{fx}\dagger} a_{\omega}^{\text{fx}} | \text{vac} \rangle = \frac{1}{e^{\frac{\hbar\omega}{kT}} \pm 1}$$

- ♠ 通过对经典黑洞背景下量子场振荡模式的分析, Hawking 发现在自由下落观察者看来特定精度下一无所有的真空在固定位置观察者看来却包含同样精度下大量随机运动的粒子, 且那些粒子的能谱具有理想的平衡态热力学特征
- ♡ 霍金认为这些粒子源自黑洞辐射, 由于一个黑洞不管之前吃过什么, 它辐射的粒子总具有同样的热力学特征, 所以我们不可能通过观察这些粒子推知被吃物的信息

信息丢失疑难
是什么

解决之道-Z-
model

倍制虫洞法的
工作逻辑

黑洞内核:Z-
structure

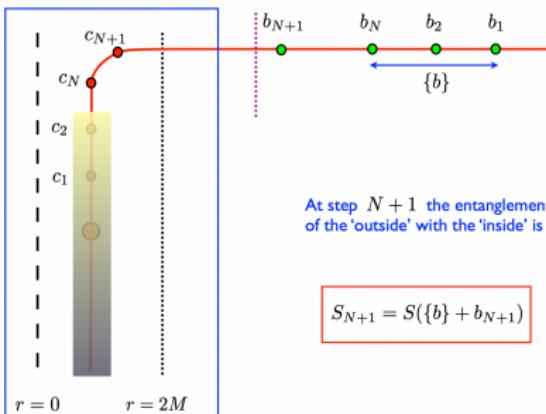
Z-structure
的量子化

总结与展望
7-43

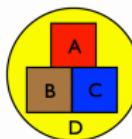
Hawking 疑难的机制问题-Mathur 小修正定理的关键步伐之一

(g) Entanglement entropy at step $N + 1$

$r = 10M$



(h) The strong subadditivity of quantum entanglement entropy



$S(A + B) + S(B + C) \geq S(A) + S(C)$

We take

$A = \{b\}, \quad B = b_{N+1}, \quad C = c_{N+1}$

We recall

$S_N = S(\{b\}), \quad S_{N+1} = S(\{b\} + b_{N+1})$

$S(b_{N+1}, c_{N+1}) < \epsilon_1, \quad S(c_{N+1}) > \ln 2 - \epsilon_2$

Then we get

$S(\{b\} + b_{N+1}) + S(b_{N+1} + c_{N+1}) \geq S(\{b\} + S(c_{N+1}))$

$S_{N+1} > S_N + \ln 2 - (\epsilon_1 + \epsilon_2)$

Mathur: 对逃离黑洞的 Hawking 粒子跟落入黑洞的粒子间纠缠关系的任何小修正都不可能让 Hawking 粒子的伤变小，想获得正确佩奇曲线必须对视界面物理做非微扰修正

Zeng: 只要 Hawking 粒子来自经典视界面附近真空涨落产生的粒子对而不是它们跟黑洞微观态的耦合，则任何修正都不可能让 Hawking 粒子将黑洞微观态信息带出黑洞之外

为跨越无毛定理让 Hawking 粒子将半径典黑洞的信息带出，我们需要新的辐射机制

信息丢失疑难
是什么

解决之道-Z-
model

倍制虫洞法的
工作逻辑

黑洞内核:Z-
structure

Z-structure
的量子化

总结与展望
8-43

破解信息丢失疑难的 Z-model 之-虐猫大法第一千零一招

dfzeng
BJUT,Beijing



$$\begin{aligned} R_{\alpha}^{226} &\rightarrow R_{n}^{222} + \alpha_2^4 \\ |c \cdot R_a\rangle &\rightarrow |c \cdot R_a\rangle + |d \cdot R_n\rangle \\ H(3s_{1/2}) &\rightarrow H(2p_{1/2}) + \gamma \\ |c \cdot H_3\rangle &\rightarrow |c \cdot H_3\rangle + |d \cdot H_2\rangle \\ BH(M) &\rightarrow BH(M') + h_{wk} \\ |c \cdot BH\rangle &\rightarrow |c \cdot BH\rangle + |d \cdot BH'\rangle \end{aligned}$$

镭原子核->中性激发态氢原子或一个自发辐射的黑洞，那只猫将经历相同的无奈，但对氢原子我们有成熟的演化理论 JC-Model

$$H = \begin{bmatrix} \varepsilon_x \\ \varepsilon_o \end{bmatrix} + \sum a_k^\dagger a_k \hbar \omega_k + a_x^\dagger \varepsilon_{xo} + c.c \quad (7)$$

原子和辐射产物的熵完全可计算，结果符合 Page 曲线的要求。这提示给我们一个解决信息丢失疑难的方法，寻找一个类似 JC 的模型描述黑洞-辐射产物之间的相互作用并证明其拥有正确的黑体辐射功率谱

信息丢失疑难是什么

解决之道-Z-model

倍制虫洞法的工作逻辑

黑洞内核:Z-structure

Z-structure 的量子化

总结与展望
9-43

Z-model: 显式轭米的哈密顿量及态空间基矢

$$H = H_{\text{BH}} + H_{\text{vac}} + H_{\text{int}} \quad (8)$$

$$= \begin{pmatrix} w^i & & & \\ & w^j & & \\ & & \ddots & \\ & & & 0^l \end{pmatrix} + \sum_q \hbar \omega_q a_q^\dagger a_q + \sum_{u^n=v^\ell} \hbar \omega_x = g_{u^n v^\ell} b_{u^n v^\ell}^\dagger b_x \quad (9)$$

$w^i \sim$ 初始黑洞能量本征值, i 取遍整个微观态空间的 w 种可能值

$w^j \sim$ 辐射一个极限低能粒子后的黑洞能量本征值, $w-1$ 重简并

$w^i \sim E_{w \times w}, w^j \sim E'_{w' \times w'}, w' = w-1, \dots, 0^l \sim 0_{1 \times 1}$

$a_q^\dagger a_q$: 真空涨落, $b_{u^n v^\ell} a_x^\dagger$: 降低黑洞能级以实化真空涨落模或反之
黑洞&辐射产物态空间基底及辐射演化中间态一般形式

$$\{w^i \otimes \phi, w^j \otimes \omega_1^i, w^k_{--} \otimes \omega_1^j \omega_1^i, w^j_{--} \otimes \omega_2^i, \dots \quad (10)$$

$$, u^n \otimes q^k p^j \dots o^i (u+q+p+\dots+o=w), \dots$$

$$o^l \otimes \omega_1^z \dots \omega_1^j \omega_1^i, o^l \otimes \omega_1^y \dots \omega_2^i, \dots, o^l \otimes \omega_w^i\}$$

$$|\psi(t)\rangle = \sum_{u=w}^0 \sum_{n=1}^u \sum_{\sum o^i = w-u} e^{-iut - i\omega t} c_{u^n}^{\vec{\omega}}(t) |u^n \otimes \vec{\omega}\rangle \quad (11)$$

信息丢失疑难
是什么

解决之道-Z-
model

倍制虫洞法的
工作逻辑

黑洞内核:Z-
structure

Z-structure
的量子化

总结与展望
10-43

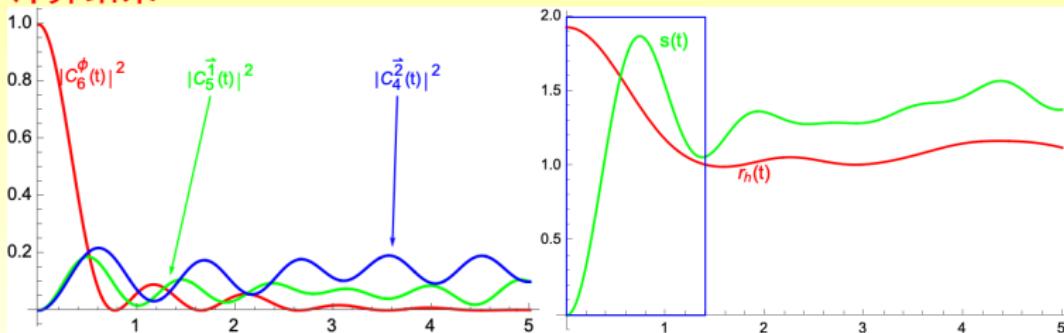
Z-model: 显式公正的状态演化及熵变曲线

$$i\hbar \partial_t |\psi(t)\rangle = (H_{\text{BH}} + H_{\text{vac}} + H_{\text{int}}) |\psi(t)\rangle \quad (12)$$

使用薛定谔方程跟踪{黑洞&辐射产物}状态演化, 将(9)(11)代入之

$$i\partial_t c_{u^n}^{\vec{\omega}}(t) = \sum_{v \neq u}^{v+\ell'=\omega=w} \sum_{\ell=1}^v g_{u^n v^\ell} c_{v^\ell}^{\vec{\omega}}(t) \quad (13)$$

v 取实例 $w^i=6^1$, 令初始条件 $c_{w^1}^{\phi}=1$, $c_{w^{i \neq 1}}^{\phi}=0$, $c_{w^n}^{\vec{\omega} \neq \phi}=0$, 数值计算结果



(i) 貌似残留物-Rabi 振荡, 人为球对称约束的后果;(ii) 先增后减的熵变曲线, 显式轭米哈密顿演化的结果

Z-model 辐射功率谱 Wigner-Wiesskopf 近似

考虑单粒子辐射即除 $c_{w^1}^\phi(t), c_{u^n}^{o_1}(t)$ 之外所有 $c_{v^\ell}^{\omega \neq \phi, o_1} = 0$ 的情形和方程(13)的 Wigner-Wiesskopf 近似 [马尔可夫近似, (15)出自(14)的一次积分, “忘掉历史近似”-Zeng]

$$i\partial_t c_{u^n}^{o_1}(t) = g_{u^n w^1}^{u+\omega=w} c_{w^1}^\phi(t) + \sum_{v \neq u} \sum_{\ell=1}^{v \neq w} g_{w^1 v^\ell} c_{v^\ell}^{\omega}(t) [\approx 0] \quad (14)$$

$$i\partial_t c_{w^1}^\phi(t) = \sum_{u \neq w} \sum_{n=1}^{u+o_1=w} g_{w^1 u^n} c_{u^n}^{o_1}(t) \approx -i |g_{w^1 u^n}|^2 c_{w^1}^\phi(t) \quad (15)$$

$$c_{u^n}^{o_1}(t) \approx -i \int_0^t g_{u^n w^1}^{u+\omega=w} c_{w^1}^\phi(t') dt' \quad (16)$$

$$\stackrel{\text{miss-history}}{\approx} -ig_{u^n w^1} c_{w^1}^\phi(t) \int_0^{t \rightarrow \infty} e^{-i[\omega - (w-u)]t'} dt' \quad (17)$$

$$(15) \Rightarrow c_{w^1}^\phi(t) = e^{-\Gamma t}, \text{ 代入(14)} \Rightarrow c_{u^n}^{o_1}(t) = \frac{ig_{u^n w^1}}{\Gamma} (e^{-\Gamma t} - 1) \quad (18)$$

$$\text{other } c_{v^\ell}^{\omega \neq \phi, o_1} = 0, \quad \Gamma \equiv \sum_{u,n}^{u \neq w} |g_{w^1 u^n}|^2 \quad (19)$$

信息丢失疑难
是什么

解决之道-Z-
model

倍制虫洞法的
工作逻辑

黑洞内核:Z-
structure

Z-structure
的量子化

总结与展望
13-43

Z-model 的 WW 近似值得一个新名词

(13) 局限于 $c_{w^1}^\phi(t), c_{u^n}^{o_1}(t), c_{v^\ell}^{\omega \neq \phi, o_1} = 0 \Rightarrow (14) + (15) \Rightarrow (20)$

$$c_{w^1}^\phi(t) = e^{-\Gamma t}, c_{u^n}^{o_1}(t) = \frac{ig_{u^n w^1}}{\Gamma} (e^{-\Gamma t} - 1) \text{ other } c_{v^\ell}^{\omega \neq \phi, o_1} = 0 \quad (21)$$

- {单粒子辐射的Wigner Wiesskopf近似}~Z-/Hawking-近似，相
应功率谱

$$\langle E \rangle_t^\infty = \sum_{o_1, n}^{u+o_1=w} o_1 |c_{u^n}^{o_1}|^2 = \sum_k \frac{k\omega e^{-\frac{k\omega}{k_B T}}}{e^{-\frac{k\omega}{k_B T}} + \dots 1} = \frac{\omega}{e^{\frac{\omega}{k_B T}} \pm 1} \quad (22)$$

第二个等号使用了辐射量子化假设 $o_1 = k\omega (k \in \mathbb{Z})$ ，指数因子来
自 $c_{u^n}^{o_1}(t)$ 及其归一化

$$\frac{g_{u^n w^1}^2}{\Gamma^2} \approx \frac{u [= e^{4\pi G_N (M - o_1)^2}]}{w_-(= e^{4\pi G_N M^2} - 1) + \dots 2 + 1} \approx \frac{e^{-8\pi GM o_1}}{e^{4\pi G_N M^2}} \quad (23)$$

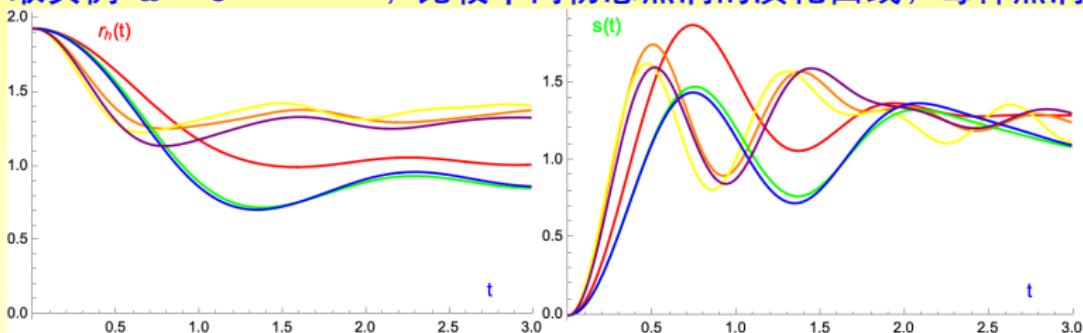
Z-model: 正确的热谱&温度，且均来自单粒子辐射的 WW 近似，
该近似破坏了哈密顿矩阵(9)的轭米性 ~ 非幺正效应

为啥需单粒子辐射的 WW 近似才能获得 Hawking 辐射谱

使用薛定谔方程跟踪{黑洞&辐射产物}状态演化，将(9)(11)代入之

$$i\partial_t c_{u^n}^{\vec{\omega}}(t) = \sum_{v \neq u} \sum_{\ell=1}^{v+\ell'=\omega} g_{u^n v^\ell} c_{v^\ell}^{\vec{\omega}}(t) \quad (24)$$

取实例 $w^i=6^{1,2,3,4,5,6}$ ，比较不同初态黑洞的演化曲线，每种黑洞



都有自己特殊的半径-时间或熵-时间曲线，测绘其中任一均可恢复关于黑洞初态的全部信息，所有微观态黑洞的辐射粒子熵变曲线都具有先增后减再进入 Rabi 振荡的特征。

在一个完整的黑洞辐射演化过程中，其温度是时间依赖的，在给定时刻，只对即将辐射出去的少量粒子而言，黑洞有确定的温度，热谱源于辐射主体初末态的高度简并

信息丢失疑难
是什么

解决之道-Z-
model

倍制虫洞法的
工作逻辑

黑洞内核:Z-
structure

Z-structure
的量子化

总结与展望
14-43

信息丢失疑难的根源和解决之道 - Z-model 启示

◇ 辐射物的熵单调递增源于我们把黑洞+辐射物看成了一对时间依赖的经典对象，从而忽略了末态不同质量配比构型之间的相干性(黑:BH, 灰:Ra, big,middle,small 代表, 非遍举)

$$|\bullet\rangle \rightarrow |\bullet\circlearrowleft\rangle \rightarrow |\circlearrowleft\bullet\rangle \rightarrow |\circlearrowleft\circlearrowleft\rangle \rightarrow |\circlearrowleft\circlearrowright\rangle \Rightarrow \begin{array}{c} s \\ \diagup \\ t \end{array} \quad \times \quad (25)$$

$$|\bullet\rangle \rightarrow |\bullet\rangle + |\bullet\circlearrowleft\rangle + |\circlearrowleft\bullet\rangle + |\circlearrowleft\circlearrowleft\rangle + |\circlearrowleft\circlearrowright\rangle \quad \checkmark \quad (26)$$

$$\rightarrow |\bullet\rangle + |\circlearrowleft\bullet\rangle + |\circlearrowleft\circlearrowleft\rangle + |\circlearrowleft\circlearrowright\rangle + |\circlearrowright\bullet\rangle$$

$\rightarrow \dots \dots \dots$

$$|\psi(t)\rangle = |BH[M(t)]\rangle \quad \times \quad (27)$$

$$|\psi(t)\rangle = |\psi_0\rangle + c_b^t |b^b r^b\rangle + c_m^t |b^m r^m\rangle + c_s^t |b^s r^s\rangle + |\psi_1\rrangle \quad \checkmark \quad (28)$$

$$\sqrt{\rho_R} \equiv |\psi(t)\rangle_{bh.ms}^{\text{tr.out}} \sim \sqrt{\rho^0} \oplus c_b^t \sqrt{\rho^b} \oplus c_m^t \sqrt{\rho^m} \oplus c_s^t \sqrt{\rho^s} \oplus \sqrt{\rho^1} \quad (29)$$

$$\rho^b = \text{tr}_{bb} |b^b r^b\rangle \langle b^b r^b|, \quad \rho^m = \text{tr}_{bm} |b^m r^m\rangle \langle b^m r^m| \dots \quad (30)$$

$$S_R = |c_b^t|^2 S(\rho^b) + |c_m^t|^2 S(\rho^m) + |c_s^t|^2 S(\rho^s) \Rightarrow \begin{array}{c} s \\ \diagup \diagdown \\ t \end{array} \quad \checkmark \quad (31)$$

对辐射演化过程的完整量子描述跟自发辐射机制一样重要-获得正确佩奇曲线的两个必须条件

信息丢失疑难
是什么

解决之道-Z-
model

倍制虫洞法的
工作逻辑

黑洞内核:Z-
structure

Z-structure
的量子化

总结与展望
15-43

Hawking 热谱只是单次辐射 & WW 近似, RM 的视角

dfzeng
BJUT, Beijing

A screenshot of a Microsoft OneNote page. At the top, there's a toolbar with various icons. Below it, a header bar shows 'Notes 3' and other tabs. The main area contains handwritten mathematical equations and text. One equation is $= \frac{\text{Area}(BH)}{4} + S_{QFT}(\rho_B)$, with a green bracket under the first term labeled 'cause-age entropy of R'. Below this, red text states ' $S(\rho_A) \leq S_{gen}(\rho_{A^c})$ is violated after Page time'. Another section is labeled 'Caveat' with blue text below it: 'Hawking calculation of ρ is not exact - low energy EFT.' At the bottom, there's a formula $\rho_R = \rho_R^{\text{thermal}} (1 + \text{loops}) + \mathcal{O}(e^{-S})$. On the right side of the screen, there's a video feed of Tom Hartman, and a 'ZOOM' watermark is visible.

信息丢失疑难
是什么

解决之道-Z-
model

倍制虫洞法的
工作逻辑

黑洞内核:Z-
structure

Z-structure
的量子化

总结与展望
16-43

In a unitary theory, the paradox must be resolved by non-perturbative, non-local (not just QFT in fixed curved geometry) corrections to ρ_R , but from what? how to calculate? (Hartman, KAWS2022Lect3)



Connection with replica wormholes

- You have seen how to calculate $\text{Tr}[\rho^2] = \sum_{ij} \rho_{ij} \rho_{ji}$ by using wormholes.
- How do we calculate ρ_{ij} itself?
- We have learnt how to compute entropies, but not individual matrix elements.
- Here we have discussed a similar situation where average properties can be computed, but it is unclear how to compute the actual function.
- A surprising aspect is that these average quantities can be computed via semiclassical gravity.



Replica wormhole uses saddle point approximation to calculate $\text{tr} \rho_R^2$,
but how about the ρ_R itself? (Maldacena, KAWS2022Lect3)

信息丢失疑难
是什么

解决之道-Z-
model

倍制虫洞法的
工作逻辑

黑洞内核:Z-
structure

Z-structure
的量子化

总结与展望
17-43

信息丢失疑难
是什么

解决之道-Z-
model

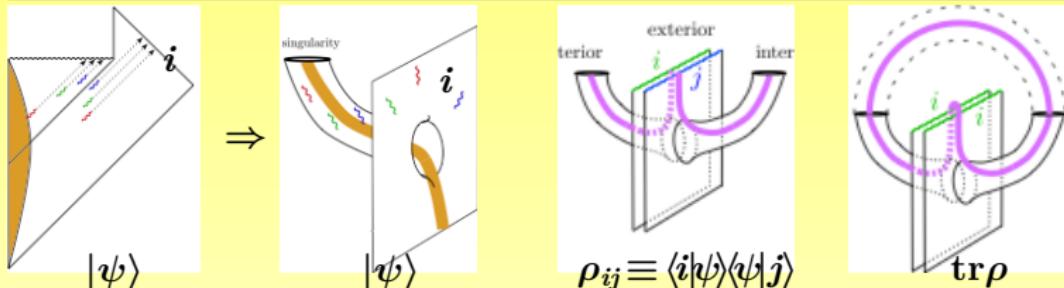
倍制虫洞法的
工作逻辑

黑洞内核:Z-
structure

Z-structure
的量子化

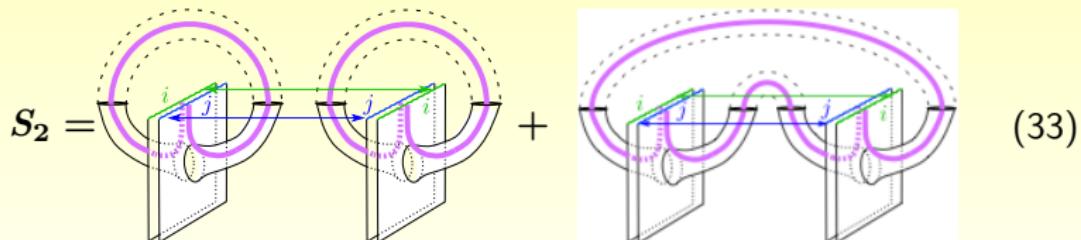
总结与展望
18-43

倍制虫洞法的工作逻辑-Z-model 的视角



左: 一个黑洞及其辐射, 中左, 黑洞+辐射物构成一个婴儿宇宙. 中右: 辐射物密度矩阵元, 右: 密度矩阵的迹. 下: 倍制虫洞以计算二阶 Reny 熵

$$S_n = (1 - n\partial_n) \log \text{tr}[\rho^n], S_{BH} \stackrel{\text{upper}}{=} \lim_{n \rightarrow 1} S_n \quad (32)$$



依据 S_2 的贡献来自两项之和, 认为 S_1 的贡献应该也是, 第一项在早期主导, 随时间增加, 第二项反之

信息丢失疑难
是什么

解决之道-Z-
model

倍制虫洞法的
工作逻辑

黑洞内核:Z-
structure

Z-structure
的量子化

总结与展望
19-43

倍制虫洞法之技术角度质疑-图形拓扑可延拓吗? (Zeng)

按定义 $S(R) = \lim_{n \rightarrow 1^+} \frac{1}{1-n} \log \text{tr}(\rho_R^n)$, 倍制虫洞法不知道如何计算 ρ_R^1 , 但认为 $\text{tr} \rho_R^1$ 与 $\text{tr} \rho_R^2$ 应该有类似的表达式结构

$|\psi_i\rangle_c$ 黑洞亦即辐射补的量子态, 源于对整体 $|\psi_i\rangle_c \otimes |i_R\rangle$ 中辐射态的迹出 ($|\psi_j\rangle_c$ 同). $\text{tr} \rho_R^2$ 对未被迹出的黑洞态指标 ii, jj 进行

$$\text{tr} \rho_R^1 \sim ({}_c\langle \psi_i | \psi_j \rangle_c) = \quad (36)$$

$$\text{tr} \rho_R^2 \sim ({}_c\langle \psi_i | \psi_j \rangle_c) ({}_c(\langle \psi_i | \psi_j \rangle)_c)^* \quad (34)$$

$$= \quad + \quad (35)$$

$$S(R) = \lim_{n \rightarrow 1^+} \frac{1}{1-n} \log \text{tr}(\rho_R^n) \approx \min\{\text{disconn}, \text{conn}\}, \quad (37)$$

在 QFT 中, 认为 $1 \rightarrow 1$ 传播的表达式结构跟 $2 \rightarrow 2$ 散射类似是荒谬的

倍制虫洞法为什么有效

倍制虫洞法的图形论据 $S(R) = \min\{\text{disconn}, \text{conn}\}$ 并不是得到正确 Page 曲线的必需品, ρ_{Rij} 不具对角化形式才是

$$\text{tr} \rho_R^1 \sim ({}_c\langle \psi_i | \psi_j \rangle_c) = \delta_{ij} + r_{ij} \quad (38)$$

这甚至导致了 AdS/CFT 应改为 AdS/CFT[ensemble] 的提议, 然而 Z-model 提示我们, 这并非必须, 这系列事件的底层逻辑在于

$$|\psi(t)\rangle = |BH[M(t)]\rangle \quad \times \quad (39)$$

$$|\psi(t)\rangle = |\psi_0\rangle + c_b^t |b^b r^b\rangle + c_m^t |b^m r^m\rangle + c_s^t |b^s r^s\rangle + |\psi_1\rangle \quad \checkmark \quad (40)$$

$$\sqrt{\rho_R} \equiv |\psi(t)\rangle_{\text{bh.ms}}^{\text{tr.out}} \sim \sqrt{\rho^0} \oplus c_b^t \sqrt{\rho^b} \oplus c_m^t \sqrt{\rho^m} \oplus c_s^t \sqrt{\rho^s} \oplus \sqrt{\rho^1} \quad (41)$$

$$\rho^b = \text{tr}_{bb} |b^b r^b\rangle \langle b^b r^b|, \quad \rho^m = \text{tr}_{bm} |b^m r^m\rangle \langle b^m r^m| \dots \quad (42)$$

$$\rho_R^1 = \rho^0 \oplus c_b^{t2} \rho^b \oplus c_m^{t2} \rho^m \oplus c_s^{t2} \rho^s \oplus \rho^1 \sim \text{non-diagonal} \quad (43)$$

倍制虫洞法能得出结论是一种循环论证或有效描述



Replica Wormholes

The island formula follows from the usual rules of the gravitational path integral.

This doesn't mean that we have a completely derivation of the entropy of microscopic vN entropy of Hawking radiation, it doesn't that case, because when we use the gravitational path integral, we are invoking the postulate that I described last time. The postulate that gravitational path integral infrared tells us about the quantum states in ultraviolet. Many reasons to leave that accurate, but you can't claim to have a microscopic understanding just by doing this calculation in the infrared. So **it's a derivation of the formula in the same sense that Gibbons-Hawking's calculation of the Euclidean black hole free energy is a derivation of black hole entropy, it's not a complete derivation helpful something like string theory** (Hartman KAWS2022,Lect3:67:30)



信息丢失疑难
是什么

解决之道-Z-model

倍制虫洞法的工作逻辑

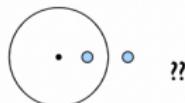
黑洞内核:Z-structure

Z-structure
的量子化

总结与展望
21-43

(D) The wormhole paradigm:

(i) The goal of the information paradox is to explain how the no hair theorem is bypassed in the chosen theory of quantum gravity ...

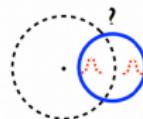
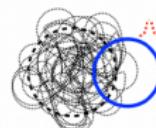


The wormhole paradigm instead assumes that some unknown quantum gravity effect will make the hole radiate like a normal body; thus the paradigm does not seek to address the *information paradox*

(ii) The goal of the paradigm is to make this normal behavior of the radiation consistent with semiclassical dynamics at the horizon, at least approximately in a code subspace

But the Effective small corrections theorem shows that this is not possible

(Guo, Hughes, Mehta, SDM arXiv:2111.05295)



Conceptual error: *Cannot use holographic notion when surface is defined by the entropy it contains*

Guo, Hughes, Mehta, SDM arXiv: 2111.05295

S. Mathur, Talks at Imperial College 2022

信息丢失疑难
是什么

解决之道-Z-
model

倍制虫洞法的
工作逻辑

黑洞内核:Z-
structure

Z-structure
的量子化

总结与展望
22-43

从 Z-model 的视角：要想破解信息丢失疑难，即在无毛定理控制黑洞几何的前提下，解释 Hawking 粒子如何将编码在黑洞微观态中的信息带出黑洞，两个必须件

♣ Hawking 粒子跟黑洞微观态有耦合而不是源于经典视界面附近的正反粒子对产生和逃离

◊ 对辐射演化过程使用完整的量子态描述而不是把中间态看作特定质量经典黑洞跟辐射粒子的配对

倍制虫洞法是对辐射体和辐射物纠缠关系的路径积分描述，是一种鞍点近似，它知道需要一个除 Hawking 鞍点之外的鞍点贡献，于是就加上它并称为倍制虫洞或者 island，是已知答案凑论证，在一定意义上就是循环论证

Z-model 告诉我们，倍制虫洞或者 island 的贡献可以看作对辐射过程宏观相干性的等效描述

信息丢失疑难
是什么

解决之道-Z-
model

倍制虫洞法的
工作逻辑

黑洞内核:Z-
structure

Z-structure
的量子化

总结与展望
23-43

信息丢失疑难
是什么

解决之道-Z-
model

倍制虫洞法的
工作逻辑

黑洞内核:Z-
structure

Z-structure
的量子化

总结与展望
24-43

G 't Hooft: 佩奇曲线的意义不值得抬那么高!

Page curves and such do not enter my analysis; I only need to know how the evolution of a BH proceeds over short stretches of time, after which I find it rather trivial to integrate this over longer periods of time - just by diagonalising the energy. I find it puzzling why people find this Page curve so important.

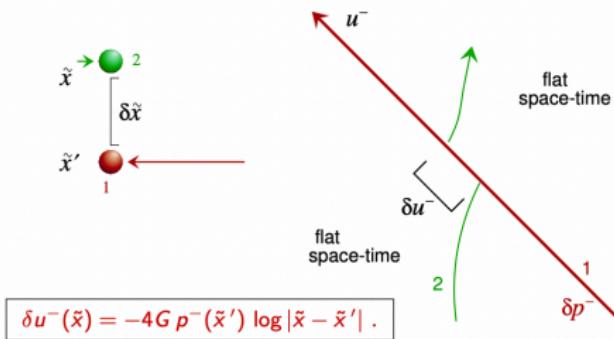
**Re: On antipodal identification and related ideas with black
Greetings, hole information missing puzzle**

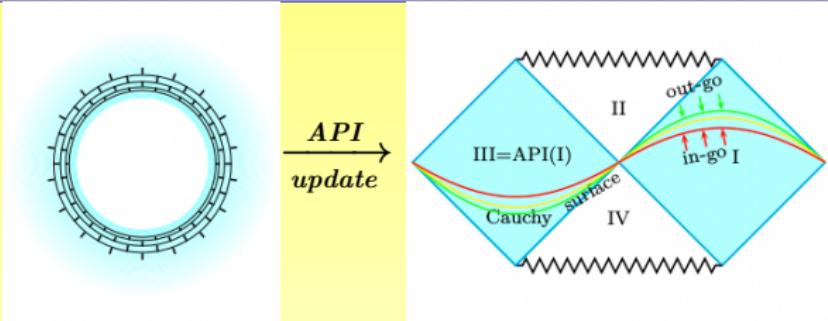
G. 't Hooft

I'm not saying that the Page curve is "wrong", but that its significance is strongly overrated, as I think you agree.

G. 't Hooft

Calculate the *Shapiro time delay* caused by the grav. field of a fast moving particle:
simply Lorentz boost the field of a particle at rest:





信息丢失疑难
是什么

解决之道-Z-
model

倍制虫洞法的
工作逻辑

黑洞内核:Z-
structure

Z-structure
的量子化

总结与展望
25-43

♥ 他早年认为可用定义在视界外有限厚度区域内的标量场球谐函数展开模式代言黑洞的自由度，即砖墙模型，如今他认为没必要，挨着视界面定义一个 **Cauchy** 面，其上入态粒子的位置和动量就是黑洞信息的全部（我同意，引力只关心能动张量）

♠ 入态粒子通过 **Shapiro** 时间延迟在出态粒子及其共轭动量上打下烙印，从而将信息交给出态粒子-此即 **FWT**，它在避免讨论超高能自由度火墙物理的同时，将信息传递问题转化成了一个纯经典物理效应。这种效应的量子化描述是完全符合幺正性的薛定谔方程

信息丢失疑难
是什么

解决之道-Z-
model

倍制虫洞法的
工作逻辑

黑洞内核:Z-
structure

Z-structure
的量子化

总结与展望
26-43

Z-model 要求黑洞拥有跟普通原子一样的内部结构或微观态

◊ 倍制虫洞法对黑洞内部结构和微观态没有任何依赖性, Island 不是真实的物理对象, 粒子碰到 island 不是任何特殊事件

♣ Mathur/弦论模糊球认为 ER=EPR 是一个不靠谱的想法, 倍制虫洞法啥也没干, island 公式破坏量子力学的线性原理/么正性/相互作用的定域性至少其一

♡ 't Hooft 认为重现佩奇曲线无助于理解信息到底去哪了, 视界面的 API 拓扑和 FWT 才是理解黑洞过程么正性的核心, FWT 完全是出/入态粒子间经典引力作用的结果

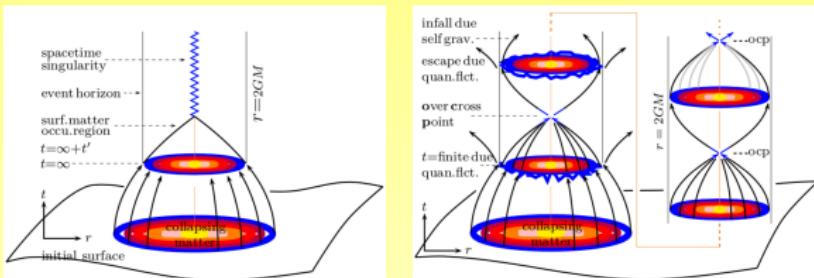
♠ Z-model 要求黑洞拥有跟普通原子一样的内部结构或微观态, 霍金辐射是这些类原子对象的自发辐射

Zeng: Schwarzschild 度规刻画的是从拥内部结构的球对称天体外部度规不合理外推得到的一个非物理对象

物理上既拥视界又拥非平庸内部结构的黑洞度规为 $ds_{\text{in}}^2 \cup ds_{\text{out}}^2$

$$ds_{\text{out}}^2 = -d\tau^2 + \frac{d\rho^2}{(1 - \frac{3\tau}{2r_h})^{\frac{2}{3}}} + (1 - \frac{3\tau}{2r_h})^{\frac{4}{3}} r_h^2 d\Omega_2^2 \quad (44)$$

Z-structure: 史瓦西黑洞 \neq 中性球对称黑洞, 严格解之一



$$ds_{\text{in}}^2 = -d\tau^2 + \frac{\left[1 - \left(\frac{2GM}{\varrho^3}\right)^{\frac{1}{2}} \frac{M'\varrho}{2M} \tau\right]^2 d\varrho^2}{a[\tau, \varrho]} + a[\tau, \varrho]^2 \varrho^2 d\Omega_2^2 \quad (45)$$

$$a[\tau, \varrho] = \left[1 - \frac{3}{2} \left(\frac{2GM[\varrho]}{\varrho^3}\right)^{\frac{1}{2}} \tau\right]^{\frac{2}{3}}, \quad M[\varrho \geq \varrho_{\max}] = M_{\text{tot}} \quad (46)$$

$$a[\tau \in |\frac{p^\varrho}{4}, \varrho|] = -a[\frac{p^\varrho}{2} - \tau, \varrho], \quad a[\tau|_{\frac{p^\varrho}{2}}, \varrho] = -a[p^\varrho - \tau, \varrho] \quad (47)$$

$$a[\tau, \varrho] = a[\tau + p^\varrho, \varrho], \quad p^\varrho \equiv \frac{8}{3} \left(\frac{\varrho^3}{2GM[\varrho]}\right)^{\frac{1}{2}} \quad (48)$$

$$T_{\mu\nu} = \text{diag}\{\rho = \frac{M'[\varrho]/8\pi\varrho^2}{a^2 + \frac{3GM'\tau^2}{4\varrho^2} - \left(\frac{GM}{\varrho^3}\right)^{\frac{1}{2}} \frac{M'\varrho\tau}{2M}}, p = 0, 0, 0\} \quad (49)$$

信息丢失疑难
是什么

解决之道-Z-model

倍制虫洞法的
工作逻辑

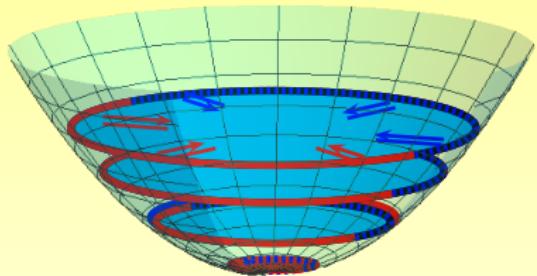
黑洞内核:Z-
structure

Z-structure
的量子化

总结与展望
27-43

Z-structure: 更明显的振荡内核解, AdS2+1 尘埃星

(45)最早为 YSM[CMP34(1973)] 作为裸奇点示例给出, 我们首次对它进行了跨奇点延拓并赋予对穿振荡解释, 我们通过 AdS2+1 尘埃星的内部振荡意识到这一点



AdS2+1中的尘埃星, 振荡内核消解了中心 conic 奇异性

♣ 不管 AdS2+1 还是 Mink3+1, 振荡内核都可无限光滑地连接到外部 Schwarzschild 度规, Lematre 形式最明显(44)

$$ds_{\text{in}}^2 = d\tau^2 + a^2 \left[\frac{d\rho^2}{\kappa} + \rho^2 d\phi^2 \right] \quad (50)$$

$$\kappa(\rho) = 1 + \rho^2 \ell^2 - 2GM(\rho)$$

$$a(\tau) = \cos[\ell^1 \tau], \quad \rho \leq \rho_{\text{hor}}$$

$$ds_{\text{out}}^2 = -h dt^2 + h^{-1} dr^2 + r^2 d\phi^2$$

$M(\rho)_{\text{max}} = M_{\text{tot}}$, 显式的振荡内核解, $M(\rho)$ 表达式的多重性可以解释 BH 熵的起源

信息丢失疑难是什么

解决之道-Z-model

倍制虫洞法的工作逻辑

黑洞内核:Z-structure

Z-structure 的量子化

总结与展望
28-43

信息丢失疑难
是什么

解决之道-Z-
model

倍制虫洞法的
工作逻辑

黑洞内核:Z-
structure

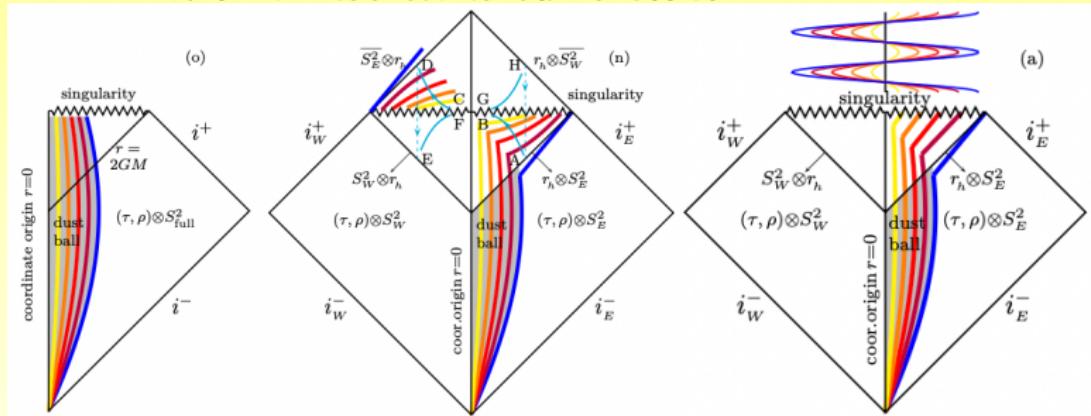
Z-structure
的量子化

总结与展望
29-43

Z-structure: 振荡内核解不违背唯一性定理和奇点定理

◇ 唯一性定理只要求在真空区-即非物质占有区度规为史瓦西度规，我们的振荡内核解确实满足这一点

♣ 奇点定理只要求在有限的固有时间之内，黑洞内容物汇聚到中心点上形成奇点，我们的振荡内核解同样满足



左：星体塌缩形成黑洞的标准彭-卡图表示，中：允许内容物在视界内振荡的黑洞形成过程，我们修改了彭卡图规则，**让图面上每个点的球坐标只在“东半球”“西半球”上取值，一个完整振荡周期A-B-C-D-E-F-G-H-A，对穿振荡与 API 的异曲同工；右：对视界内振荡运动的另一种表示。**

信息丢失疑难是什么

解决之道-Z-model

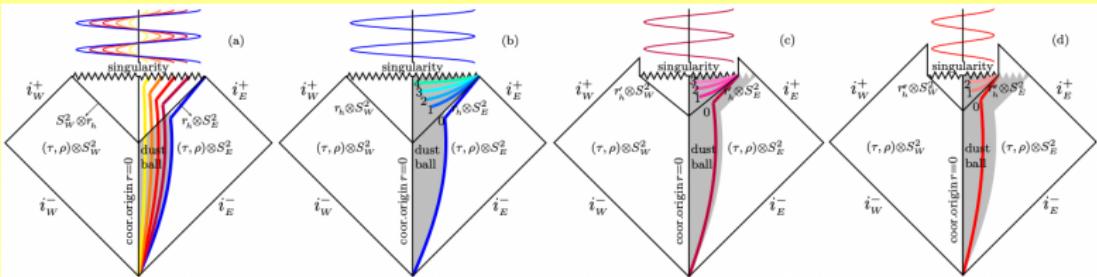
倍制虫洞法的工作逻辑

黑洞内核:Z-structure

Z-structure的量子化

总结与展望 30-43

Z-structure: 视界是一个非常复杂的概念



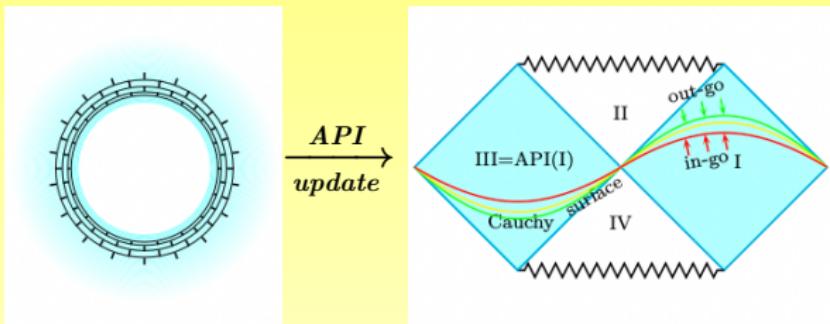
◇ 在物质占有区内部做系列同心球面，不同球面内的质量-能量不相等，每个球面内的内容物都只能定义自己的视界。使用外部观测者定义的时间，这些视界形成的时刻各不相同，但都是无限长！

♣ 所有内容物缩进自己视界面的事件都发生在外部观测者的时间定义域之外，'t Hooft 拒绝讨论那样的物理，Stojkovic 认为霍金辐射会让整个星体在缩进视界之前就蒸发掉。

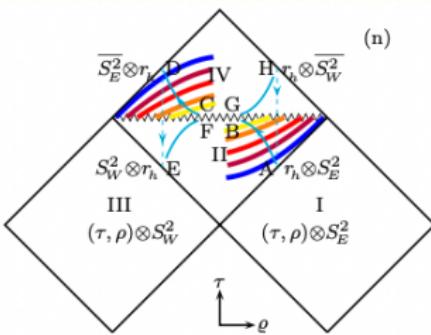
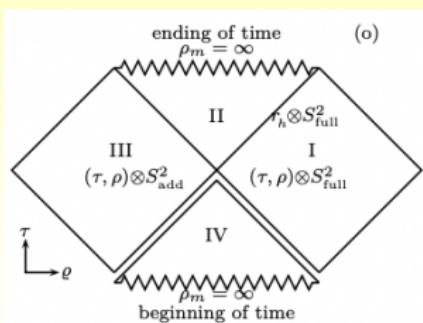
♠ 发生在外部观测者时间定义域之外的事件可解释为这些观测者平行宇宙或者统计系综中的物理，那些平行宇宙或系综系统中的 **麦克斯韦妖** 可以描述其力学细节 $\{x_i(t), p_i(t)\}$ ，而外部观测者只能统计描述 $\{T, V, P, S, E, F \dots\}$

Z-structure: API 增强的砖墙模型与 II+IV 区物理的系统解释

dfzeng
BJUT, Beijing



'tHooft 拒绝谈论 II+IV 区物理, 但为消除火墙引入 Antipodal Point Identification 假设,
 $\{t, r, \theta, \phi\} = \{-t, r, \pi - \theta, \pi + \phi\}$, 我们将把 II+IV 中的事件看作系综系统中的物理,
同时认为 API 是客观机制 (对穿振荡) 而非假设, 下左: 传统彭卡图, 下右: 曾氏彭卡图



信息丢失疑难
是什么

解决之道-Z-
model

倍制虫洞法的
工作逻辑

黑洞内核:Z-
structure

Z-structure
的量子化

总结与展望
31-43

Z-structure: 麦氏妖观测结果的量子化描述 (基本想法)

麦氏妖可看到(经典)视界内黑洞内容物的一举一动 $M[\varrho] \& a(\tau, \varrho)$

$$ds_{\text{in}}^2 = -d\tau^2 + \frac{\left[1 - \left(\frac{2GM}{\varrho^3}\right)^{\frac{1}{2}} \frac{M'\varrho}{2M} \tau\right]^2 d\varrho^2}{a[\tau, \varrho]} + a[\tau, \varrho]^2 \varrho^2 d\Omega_2^2 \quad (51)$$

对这种观测数据的量子化描述只需将内容物层化 $M[\varrho] = \{m_i\}$ 并为每层引入一个波函数 $\psi_i[\varrho]$ 描述其在 ϱ 半径球面上被观测到的概率振幅, $\psi_i[\varrho]$ 形式由 m_i 所满足的爱因斯坦/测地线方程的正则量子化决定, 整个系统的波函数则为 $\prod_i \otimes \psi_i(\varrho)$

在经典水平上, 整个内容物可以分成多少层, 各层质量分别为多少是完全任意的, 亦即在这种水平上, 黑洞的微观态是无限多。

但 $\psi_i[\varrho]$ 满足的正则量子化方程和平方可积性条件以及总质量约束 $\sum m_i = M_{\text{tot}}$ 条件将改变这一切

信息丢失疑难
是什么

解决之道-Z-
model

倍制虫洞法的
工作逻辑

黑洞内核:Z-
structure

Z-structure
的量子化

总结与展望
32-43

Z-structure: 麦氏妖观测结果的量子化 (波动方程及其解)

每个 i 层内容物满足的经典与量子运动方程, $E_i \equiv \frac{m_i}{2}(\gamma_i^2 - 1)$ (字面) 能量本征值, 本质: γ_i 的重定义, 由球层初始位置决定

$$h_i \ddot{t}^2 - h_i^{-1} \dot{r}^2 = 1, \quad \ddot{t} + \Gamma_{tr}^{(i)t} \dot{t} \dot{r} = 0, \quad h_i \equiv 1 - \frac{2GM_i}{r} \quad (52)$$

$$\Rightarrow \dot{r}^2 - \gamma_i^2 + h_i = 0, \quad h_i \dot{t} = \gamma_i = \text{const} \quad (53)$$

$$\left[-\frac{\hbar^2}{2m_i} \partial_r^2 - \frac{GM_i m_i}{r} - E_i \right] \psi_i(r) = 0, \quad 0 \leq r < \infty \quad (54)$$

这些内容物为“黑洞内容物”意味着它们在视界内对穿振荡 $\sim \gamma_i^2 < -1$, ψ_i 的平方可积性 \Rightarrow

$$\frac{\gamma_i^2 - 1}{2} m_i \equiv E_i = -\frac{(GM_i m_i)^2 m_i}{n_i^2 \hbar^2}, \quad n_i = 1, 2, \dots \quad (55)$$

$$\psi_i = N_i e^{-x} x L_{n_i-1}^1(2x), \quad x \equiv mr(1-\gamma_i^2)^{\frac{1}{2}}/\hbar \quad (56)$$

(55): $\frac{GM_i m_i}{[(1-\gamma_i^2)/2]^{1/2}} = n_i \hbar \sim$ 在量子水平上黑洞内容物的分层方式和初始位置设定不是任意的而是需要满足特定关系 ($\Delta x \cdot \Delta p \geq \hbar$ 的变种)

信息丢失疑难是什么

解决之道-Z-model

倍制虫洞法的工作逻辑

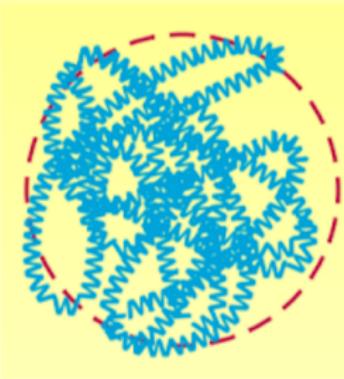
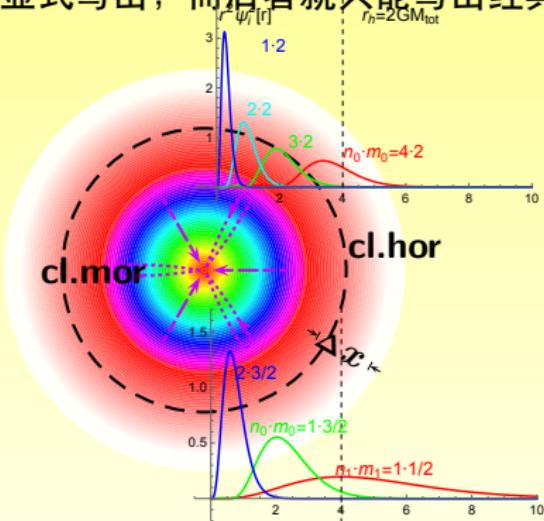
黑洞内核:Z-structure

Z-structure 的量子化

总结与展望
33-43

Z-structure: 麦氏妖观测结果的量子化 (史瓦西模糊球)

这种由内容物在视界内对穿振荡的量子化得到的黑洞微观态图像(左)跟弦理论模糊球非常像, 但其经典度规和量子化波函数均能显式写出, 而后者就只能写出经典度规



♣ $\Delta x \sim 2GM_{\text{tot}}$ 与 r_h 同量级, 视界面是一个高度模糊的概念

♠ $m_{\min}^i = (GM_{\text{tot}})^{-1} \sim kT_{\text{hawking}}$ 同量级

♦ m_i 典型值与 kT_{hawking} 同量级 \sim 被我们称做球层的那些对象是一些集体运动模式而非内容物真实粒子

信息丢失疑难
是什么

解决之道-Z-model

倍制虫洞法的工作逻辑

黑洞内核:Z-structure

Z-structure
的量子化

总结与展望
34-43

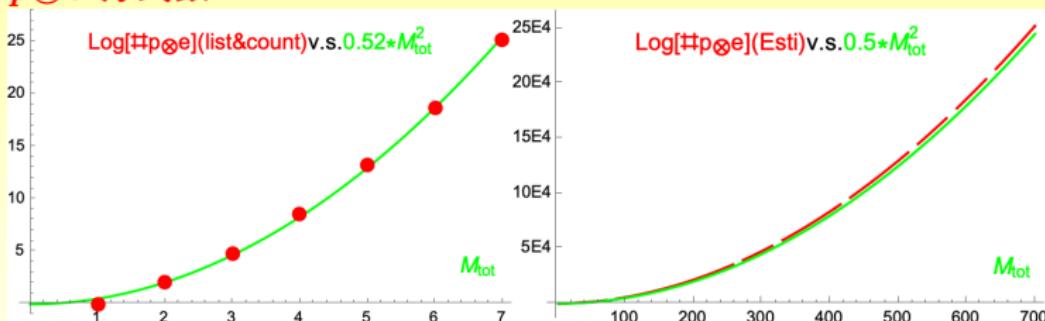
Z-structure: 麦氏妖观测结果量子化给出了正确的面积律熵公式

获得微观态的直观图像并不是 Z-结构的最重要结果，通过对这种图像中波函数简并度的计数导出 B-H 熵才是

黑洞内容物的每一种可能剖分方式 $p \equiv \{m_i\}$ 跟相应初始快度参数 $e \equiv \{\gamma_i\}$ 的组合对应一个微观态，对这些态计数的就是对满足

$$\sum m_i = M, \frac{GM_i m_i}{[(1-\gamma_i^2)/2]^{1/2}} = n_i \hbar \quad (M_i \equiv \sum_{j=0}^i m_j, \gamma_i^2 < -1)$$

$p \otimes e$ 方式数。



数值蛮算和解析近似的结果都跟 B-H 熵的面积律符合得很好。我们也可以将这个问题抽象为一个纯数学问题

信息丢失疑难
是什么

解决之道-Z-model

倍制虫洞法的工作逻辑

黑洞内核:Z-structure

Z-structure
的量子化

总结与展望
35-43

Z-structure: 纯理论预言或猜测-关于实数剖分的一条定理

$$\{m_i\} = \{m_1, \dots, m_{k-1}, m_k\} \quad (57)$$

$$\{M_i\} = \{m_1, \dots, \sum_{i=1}^{k-1} m_i, \sum_{i=1}^k m_i\} \quad (58)$$

$\{m_i\}$ 是 M 的一个实剖分, 当 $\{m\}$ 和 $\{m'\}$ 是实数 M 的两种同项同序剖分时, 若它们的差 $\{m\} - \{m'\}$ 总是小于某个数 Δ , 则称精确到 Δ 这两种剖分不可区分. 所有 ν_i 均为不小于 1 的实数, 我们将称之为激发数.

定理 (猜测): 若 $\{m_i\}, \{M_i\}$ 为任意正实数 M 的剖分及相应的层积, 且 $\forall i, \frac{M_i m_i}{\nu_i (\geq 1)} = \mathbb{Z}^+$, $\{\nu_i\}$ 为相应的激发, 则对于足够大的 M , 所有可区分的剖分-激发方式数目为

$$\# \underset{\text{excitation } \{\nu_i\}}{\otimes} \underset{\text{partition } \{m_i\}}{\text{partition}} \left[M = \sum_i m_i, \frac{M_i m_i}{\nu_i (\geq 1)} = \mathbb{Z}^+ \right] = \exp[k^\Delta M^2] \quad (59)$$

其中 k^Δ 是一个跟剖分精度有关的常数.

arXiv:2112.12531 提供了一种证明思路

信息丢失疑难
是什么

解决之道-Z-
model

倍制虫洞法的
工作逻辑

黑洞内核:Z-
structure

Z-structure
的量子化

总结与展望
36-43

◇ 我们提供了有源 Einstein 场方程的一个严格解族，族中所有成员都拥有相同的外部度规，但内部度规描述的黑洞内容物在视界内做各种模式的中心对穿振荡，那种解族的存在不违背唯一性定理和奇点定理

♣ 这种内视界振荡发生在外部观测者的时间定义域之外，我们将之解释为这些观测者的平行宇宙或者系综系统中的运动，其量子化描述导致了一种史瓦西模糊球图像，该图像堪为黑洞自发辐射理论的根基，波函数拥有足可导致面积律熵公式的简并度

♠ 对黑洞微观态的这种内视界振荡模式解释在一定程度上可看作 API 增强版砖墙模型的某种等价物，但二者之间的严格等价性仍需要证明

♡ 史瓦西模糊球的图像和弦论模糊球高度相似，但其相对优点是经典度规和量子化波函数均可严格写出，这种优点对建立黑洞的自发辐射理论一定意义是必要的

信息丢失疑难
是什么

解决之道-Z-
model

倍制虫洞法的
工作逻辑

黑洞内核:Z-
structure

Z-structure
的量子化

总结与展望
37-43

黑洞的自发辐射：全文总结

◇ 我们为黑洞的自发辐射提供了一个显式厄米的哈密顿模型描述，在单次辐射和 Wigner-Wiesskopf 近似这种模型给出了非常精确的霍金辐射谱，而在多次辐射情况下，数值计算允许我们严格地跟踪任意初始黑洞的量子态演化，并非常自然地导出了具有先增后减趋势的辐射产物熵变曲线，即佩奇曲线，

♣ 黑洞的自发辐射是 Hawking 辐射的一种替代机制，那种认为 Hawking 粒子来自视界面附近真空涨落粒子对的解释无法跨越 Mahtur 小修正定理破解信息丢失疑难，自发辐射 + 辐射演化过程完整量子力学描述是破解信息丢失疑难的两个必要件

♠ 自发辐射模型要求黑洞拥有跟普通原子或分子一样的内部结构或微观态，对这种微观态的描述有许多候选理论，譬如弦论模糊球，API 增强砖墙模型，我们的黑洞内容物对穿振荡模型有许多优点

♡ 和 Mathur 一样，我们认为对信息丢失疑难的研究应该将人们导向对黑洞内部结构和微观态本质的探索，即信息是如何绕过无毛定理从黑洞内部跑去外部的，像倍制冲动法那样将问题导向对量子引力基本结构的遐想很可能只是一种循环论证

信息丢失疑难
是什么

解决之道-Z-
model

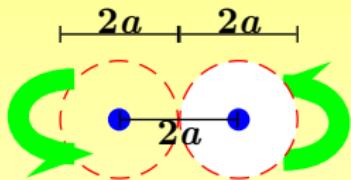
倍制虫洞法的
工作逻辑

黑洞内核:Z-
structure

Z-structure
的量子化

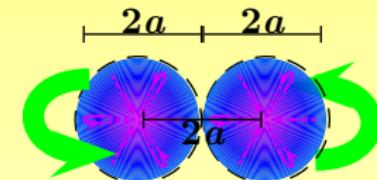
总结与展望
38-43

♣ 黑洞有没有内部结构是一个可以通过实验证实/否的物理问题，而不仅仅是一个抽象的论断。比较两类双黑洞合并过程



$$a = 2GM, D_{xx} = 2Ma^2$$

$$D_{ij} = 0, ij \neq xx$$



$$a = 2GM, D_{xx} \approx \frac{12}{5} Ma^2$$

$$D_{yy} \approx D_{zz} = \frac{2}{5} Ma^2, D_{ij} = 0, i \neq j$$

L: 两个黑洞性除了中心奇点之外没有内部结构，R: 两个黑洞性拥有非平庸的内部结构。

♣ 在不考虑潮汐形变的情况下，二者就有不同的四极矩结构，当它们彼此绕转融合时，无结构黑洞和有结构黑洞将会产生不同的潮汐形变，这种形变将导致不同的引力波波形信号，从而可通过高精度的引力波观测设备捕捉到。

◇ 黑洞外部观测者能够测量到非平庸内部结构是因为在考虑量子效应后，视界变模糊或者说消失了

信息丢失疑难
是什么

解决之道-Z-
model

倍制虫洞法的
工作逻辑

黑洞内核:Z-
structure

Z-structure
的量子化

总结与展望
39-43

- ♣ 有效场论方法是探讨跟黑洞内部结构相关的潮汐形变及其引力波观测信号的工具

$$\exp\{iS_{\text{EH}}[g_{\mu\nu}^L(x) + iS_{\text{eff}}[x_{\text{cm}}^\alpha(\sigma), g_{\mu\nu}^L(x)]]\} = \quad (60)$$

$$\int \mathcal{D}g_{\mu\nu}^s \mathcal{D}\delta x^\alpha(\sigma_p) \exp\{iS_{\text{EH}}[g_{\mu\nu}(x) + iS_{\text{eff}}[x_{\text{cm}}^\alpha(\sigma_p), g_{\mu\nu}(x)]]\}$$

$g_{\mu\nu}^L, g_{\mu\nu}^s$ 时空度规的大尺度和小尺度自由度, $x_{\text{cm}}^\alpha, \sigma$ 双黑洞质心坐标及世界线参数 ($\alpha = 1, 2$); $\delta x_p^\alpha = x_p^\alpha - x_{\text{cm}}^\alpha$ 黑洞内容物相对其知心的坐标, 积分掉小尺度自由度, 单黑洞有效作用量

$$S_{\text{eff}}[x_{\text{cm}}, g_{\mu\nu}^L] = \int d^4x \delta[x - x_{\text{cm}}(\sigma)] \left\{ -m \sqrt{g_{\mu\nu}^L \dot{x}_{\text{cm}}^\mu(\sigma) \dot{x}_{\text{cm}}^\nu(\sigma)} \right. \quad (61)$$

$$+ C_R \int R(g_{\mu\nu}^L) \sqrt{g_{\mu\nu}^L \dot{x}_{\text{cm}}^\mu(\sigma) \dot{x}_{\text{cm}}^\nu(\sigma)} + C_V \int R_{\mu\nu}(g_{\mu\nu}^L) \frac{\dot{x}_{\text{cm}}^\mu(\sigma) \dot{x}_{\text{cm}}^\nu(\sigma)}{\sqrt{g_{\mu\nu}^L \dot{x}_{\text{cm}}^\mu(\sigma) \dot{x}_{\text{cm}}^\nu(\sigma)}} + \dots \left. \right\}$$

- ♠ 拥内部结构双黑洞的动力学值得研究, 可研究。只有将人们的兴趣引入该领域, 信息丢失疑难的价值才可被认为最大化

信息丢失疑难
是什么

解决之道-Z-
model

倍制虫洞法的
工作逻辑

黑洞内核:Z-
structure

Z-structure
的量子化

总结与展望

40-43

非常感谢你对我们的关注

期望获得你我们工作的支持：xxx.arxiv: 2112.12531 是一个完整的关于信息丢失疑难的解决方案，它提出了黑洞自发辐射的新概念，从而为霍金辐射的机制提供了一种新的解释，它在尝试刷新我们对黑洞熵微观起源的认识，许多有趣的新想法和坚实的技术支持。

NPB954,115001-渐近 AdS₂₊₁ 中对穿振荡尘埃球的显式度规，到 Mink₃₊₁ 的推广，直积模糊球思路对小质量 AdS₂₊₁, Mink₃₊₁-对穿振荡球微观的计数，估算了扩展的内部结构对双黑洞体系四极矩的影响，提出了通过这种影响对天文学黑洞是否拥有这种结构进行证实/否的初步想法

NPB941,665-利用直积模糊球 + 自发辐射的概念比较完整地解释了 Hawking 辐射是如何带走信息的，并回答了各路审稿人对于这种信息逃逸机制如何遵守因果律的质疑，分析比较了这种模糊球跟弦论模糊球的差异

NPB930,533-初次将描述对穿振荡的泛函薛定谔方程转化为大量单壳层薛定谔方程的直积，提出了直积模糊球的概念并利用给定质量模糊球简并度高的特征演示了纯态黑洞如何释放热特征辐射谱的事实

NPB917,178-提出了黑洞内容物可能在视界内经历周期性对穿振荡的基本想法，并尝试建立了描述这种对穿振荡的连续泛函薛定谔方程 ($2 \rightarrow \frac{3}{2}$ 打印错误，在 2112.12531 中改正了)

信息丢失疑难
是什么

解决之道-Z-
model

倍制虫洞法的
工作逻辑

黑洞内核:Z-
structure

Z-structure
的量子化

总结与展望
41-43

附录 1: 为什么要有 API?

dfzeng
BJUT,Beijing

信息丢失疑难
是什么

解决之道-Z-model

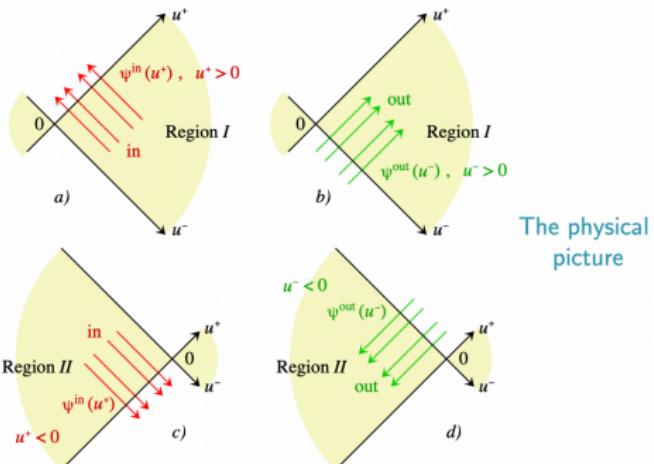
倍制虫洞法的工作逻辑

黑洞内核:Z-
structure

Z-structure 的量子化

总结与展望
42-43

- a) Wave functions $\psi(u^+)$ of the in-particles live in region I, therefore $u^+ > 0$.
 b) Out-particles in region I have $\psi(u^-)$ with $u^- > 0$.

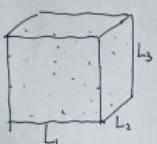


c, d) In region II, the in-particles have $u^+ < 0$ and the out-particles $u^- < 0$.

't Hooft: 通过夏皮罗时间延迟，未来事件视界上的 p^- 会导致过去事件视界上 $\delta u^- \sim u^-$ ，可是 u^- 的取值范围是 $(-\infty, +\infty)$ ，因此我们必须把 II 区和 I 区做同等对待并引入 API 来折叠被重复的世界

附录 2: 一般体系的熵具有体积律是一个错误想象

一个粒子体系的熵与其所占据空间体积的关系



$$V = L_1 \cdot L_2 \cdot L_3 \propto L^3$$

所有粒子的力学相空间

$$\Omega = \Omega_1 \cdot \Omega_2 \cdots \Omega_N \propto \Omega_i^N \rightarrow \text{粒子数}$$

$\Omega_i = \text{Volume}(x_i, p_i)$

$= L \cdot P_{\text{univ}}^{\text{cut}}$

$= L \cdot \frac{Z_{\text{univ cut}} \cdot \hbar}{L} \quad \begin{matrix} \text{整数很大和} \\ \text{粒子到达的空间} \end{matrix}$

$= Z_{\text{univ cut}} \cdot \hbar \quad \begin{matrix} \text{尺寸无关} \\ \text{粒子到达的空间} \end{matrix}$

粒子的总状态数

$$S = k_b \log W = k_b \log \frac{\Omega_i^N}{(\text{ex. op. min})^N} = k_b N \log \frac{Z_{\text{univ cut}} \cdot \hbar}{\hbar}$$

$$= k_b N \log Z_{\text{univ cut}}$$

所以，一套在空间体积 V 内自由运动的粒子集体其熵的上限和 V 无关而是跟粒子数成正比

另一种替代的推导如下

$$Z = \int d\vec{x}_1 d\vec{p}_1 \cdots d\vec{x}_N d\vec{p}_N (2) \\ e^{-\beta H(\vec{x}_1, \vec{p}_1, \dots)}$$

$$S \sim (1 - \beta \partial_\beta) \ln Z \quad (63)$$

$$\sim N^{1-\epsilon} \sim \left(\frac{M_{\text{tot}}}{m} \right)^{1-\epsilon} \quad (64)$$

$$\sim \left(\frac{2GM_{\text{tot}}}{2Gm} \right)^{1-\epsilon} \quad (65)$$

$$\sim r_h^{1-\epsilon}, \epsilon > 0 \quad (66)$$

ϵ 由粒子间的相互作用强度决定，跟它们可以自由流浪的空间体积无关

信息丢失疑难是什么

解决之道-Z-model

倍制虫洞法的工作逻辑

黑洞内核:Z-structure

Z-structure 的量子化

总结与展望

43-43