



早期宇宙中带
磁荷黑洞形成
机制研究

蔡文韬

绪论

研究现状

研究过程

确定参数范围

带磁荷黑洞的净磁荷

结果

捕获磁单极子

形成时获得

长寿命非极端
MBH

致谢

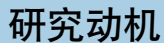
早期宇宙中带磁荷黑洞形成机制研究

Study on the formation mechanism of magnetic black holes in the early universe

蔡文韬

指导教师：张宸 副教授
东北大学 理学院

2024 年 6 月 12 日



蔡文韬

致谢

- 极端带磁荷黑洞附近的电弱对称性恢复¹
- 带磁荷黑洞具有许多和磁单极子类似的性质

¹J. Maldacena, JHEP 04 (2021), 079



带磁荷黑洞的演化：通过霍金辐射耗散质量

早期宇宙中带
磁荷黑洞形成
机制研究

蔡文韬

绪论

研究现状

研究过程

确定参数范围

带磁荷黑洞的净磁荷

结果

捕获磁单极子

形成时获得

长寿命非极端
MBH

致谢

带磁荷黑洞的荷质比 $\equiv \frac{e}{\sqrt{\pi}} \cdot \frac{\chi_{\text{bh}} M_{\text{Pl}}}{m_{\text{bh}}}$:

表: 带磁荷黑洞的演化的 3 个阶段

荷质比	黑洞的状态	霍金辐射
$\ll 1$	带磁荷黑洞 (MBHs)	施瓦西黑洞的霍金辐射
$\rightarrow 1^-$	近极端带磁荷黑洞 (near-extremal MBHs)	2 维霍金辐射 ²
$= 1$	极端带磁荷黑洞 (extremal MBHs)	不辐射

极端带磁荷黑洞的衰变

$$\tau_{\text{eMBH}} \sim \exp \left[\left(\frac{m}{M_{\text{Pl}}} \right)^2 \pi g \chi_{\text{eMBH}} \right] M_{\text{Pl}}^{-1}$$

²J. Maldacena, JHEP 04 (2021), 079



原初黑洞捕获磁单极子

早期宇宙中带
磁荷黑洞形成
机制研究

蔡文韬

绪论

研究现状

研究过程

确定参数范围

带磁荷黑洞的净磁荷

结果

捕获磁单极子

形成时获得

长寿命非极端

MBH

致谢

扩散捕获

$$\ell \lesssim R_{\text{gc}}$$

热运动显著：磁单极子**靠近原初黑洞**后（进入 R_{gc} 范围内），会发生多次由热运动造成的**速度改变**（每走过 ℓ 路程后）。

扩散捕获在**低温**下更有效：热动能小，更容易进入引力束缚态

磁单极子丰度变化来自于 2 个过程：**湮灭** (Δ) 和**引力扩散捕获** (Φ):³

$$\frac{dr}{dT} = \frac{\Delta}{T^2} r^2 + \frac{\Phi}{T^2} r$$

³C. Zhnag & X. Zhang, JHEP 10 (2023), 037



研究过程

早期宇宙中带
磁荷黑洞形成
机制研究

蔡文韬

绪论

研究现状

研究过程

确定参数范围

带磁荷黑洞的净磁荷

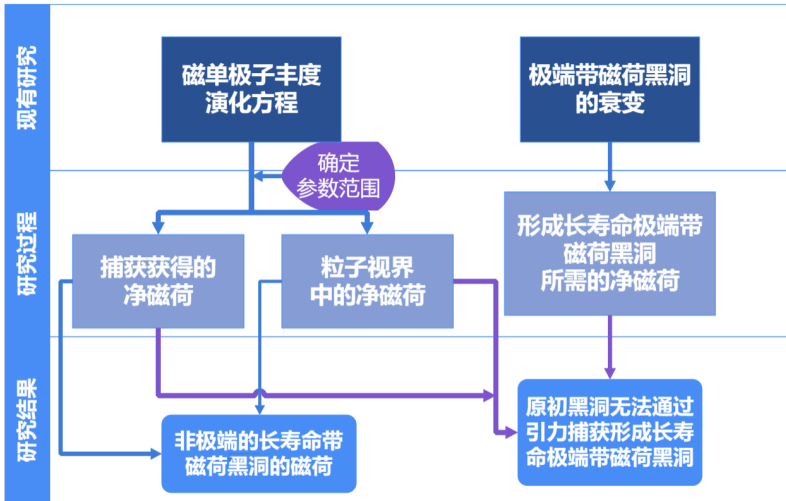
结果

捕获磁单极子

形成时获得

长寿命非极端
MBH

致谢





参数范围

早期宇宙中带
磁荷黑洞形成
机制研究

蔡文韬

绪论

研究现状

研究过程

确定参数范围

带磁荷黑洞的净磁荷

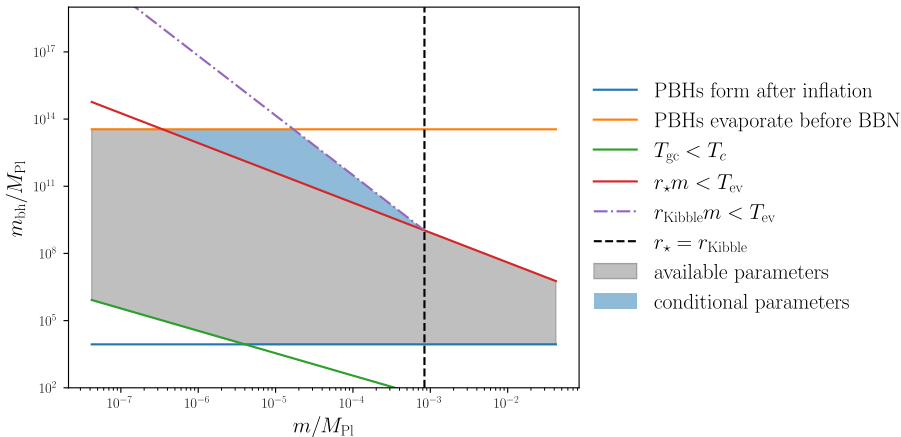
结果

捕获磁单极子

形成时获得

长寿命非极端
MBH

致谢





引力捕获获得的净磁荷

早期宇宙中带
磁荷黑洞形成
机制研究

蔡文韬

绪论

研究现状

研究过程

确定参数范围

带磁荷黑洞的净磁荷

结果

捕获磁单极子

形成时获得

长寿命非极端
MBH

致谢

每个原初黑洞捕获到的磁单极子数量：

$$\frac{s}{n_{\text{bh}}} \int_{T_s}^{T_t} \frac{\Phi}{T^2} r \, dT \propto \int_{T_s}^{T_t} \frac{r}{T^2} \, dT$$

$$\simeq \frac{r}{T_s} \text{ (仅与捕获结束温度 } T_s \text{ 相关)}$$

- 引力捕获必须发生在**原初黑洞蒸发**(T_{ev}) 前
- **原初黑洞蒸发**时 (T_{ev}) 的磁单极子不主导宇宙能量密度: $mrs \lesssim \rho$

$$\Rightarrow \frac{r}{T_s} \lesssim \frac{r}{T_{\text{ev}}} \lesssim m^{-1}$$

净磁荷的库仑力

吸收足够多的净磁荷 ($\chi_{\text{gc}}^{\text{max}}$) 后,
MBH 的库仑力会影响引力捕获

$$\chi_{\text{gc}}^{\text{max}} : \frac{g^2 \chi_{\text{gc}}^{\text{max}} \chi}{R^2} \equiv \frac{G m_{\text{bh}} m}{R^2}$$



确定原初黑洞形成时的磁单极子丰度 r_b

早期宇宙中带
磁荷黑洞形成
机制研究

蔡文韬

在**磁单极子形成**(T_c, r_i) 后, 到**原初黑洞形成**(T_b, r_b) 时
只发生**湮灭**(Δ) 而不发生引力捕获:

$$r_b = \frac{1}{\frac{1}{r_i} + \Delta \left(\frac{1}{T_b} - \frac{1}{T_c} \right)} \simeq \min \left\{ r_i, \frac{1}{\Delta \left(\frac{1}{T_b} - \frac{1}{T_c} \right)} \right\} \simeq \min \left\{ r_i, \frac{T_b}{\Delta} \right\}$$

两个近似关系

$$\frac{1}{\frac{1}{a} + \frac{1}{b}} \simeq \min\{a, b\}, \text{ e.g. 两个差值很大的电阻并联}$$

$$\frac{1}{z^{-1} - 1} = \begin{cases} z & z \ll 1 \\ +\infty & z \rightarrow 1^- \end{cases}, \text{ e.g. 玻色气体中基态粒子的数量}$$

绪论

研究现状

研究过程

确定参数范围

带磁荷黑洞的净磁荷

结果

捕获磁单极子

形成时获得

长寿命非极端

MBH

致谢



捕获磁单极子获得的净磁荷

早期宇宙中带
磁荷黑洞形成
机制研究

蔡文韬

绪论

研究现状

研究过程

确定参数范围

带磁荷黑洞的净磁荷

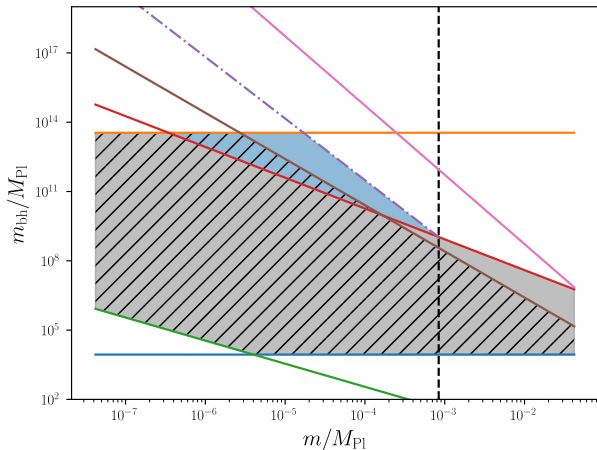
结果

捕获磁单极子

形成时获得

长寿命非极端
MBH

致谢



通过引力捕获磁单极子
形成长寿命极端带磁荷黑洞
所需的最小原初黑洞质量

大部分原初黑洞可以仅通过引力捕
获达到 χ_{gc}^{\max} (阴影区域)



原初黑洞形成时获得的净磁荷 ($\propto \sqrt{r_b}$)

早期宇宙中带
磁荷黑洞形成
机制研究

蔡文韬

绪论

研究现状

研究过程

确定参数范围

带磁荷黑洞的净磁荷

结果

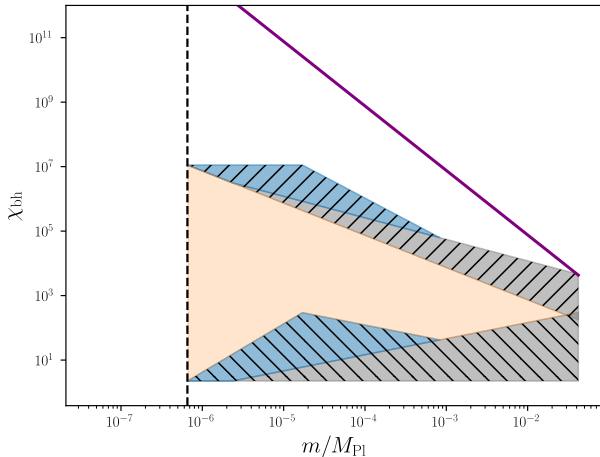
捕获磁单极子

形成时获得

长寿命非极端

MBH

致谢



形成长寿命极端带磁荷黑洞
所需的净磁荷

VS.

不同质量的原初黑洞
在形成时可以获得的净磁荷



长寿命非极端 MBH

早期宇宙中带
磁荷黑洞形成
机制研究

蔡文韬

绪论

研究现状

研究过程

确定参数范围

带磁荷黑洞的净磁荷

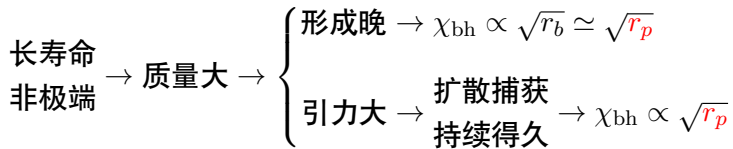
结果

捕获磁单极子

形成时获得

长寿命非极端
MBH

致谢



当前宇宙磁单极子丰度 r_p 的 Parker Bound

$$r_p = \frac{4\pi F_M}{sv_M} \lesssim 8.4 \times 10^{-28} \left(\frac{m}{M_{\text{Pl}}} \right)^{\frac{1}{2}} a$$

^aC. Zhang et al., arXiv: 2404.04926



长寿命非极端 MBH 的净磁荷

早期宇宙中带
磁荷黑洞形成
机制研究

蔡文韬

绪论

研究现状

研究过程

确定参数范围

带磁荷黑洞的净磁荷

结果

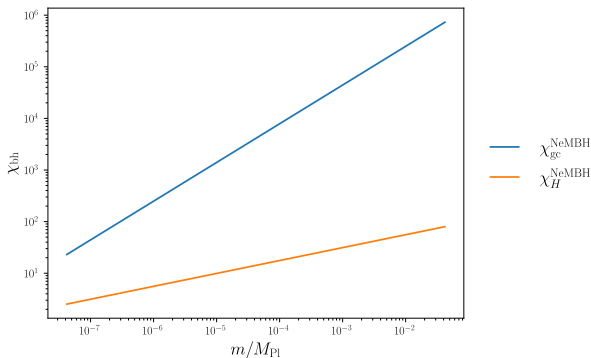
捕获磁单极子

形成时获得

长寿命非极端
MBH

致谢

分别通过**引力捕获** (χ_{gc}) 和
形成时的粒子视界 (χ_H)
获得的净磁荷
(以质量约为 10^{15} g 的黑洞为例)





早期宇宙中带
磁荷黑洞形成
机制研究

蔡文韬

绪论

研究现状

研究过程

确定参数范围

带磁荷黑洞的净磁荷

结果

捕获磁单极子

形成时获得

长寿命非极端

MBH

致谢

谢谢!

Thank You!

ありがとうございます!