

廣義相對論是否符合馬赫原理？——旋轉水桶實驗的科學細節探究 - 隨想 物理 - 新聞訊息

pb.ps-taiwan.org/modules/news/article.php

摘要：馬赫原理始於這樣一個問題：「如果把水桶固定住，並使眾恒星的星空旋轉，能夠證明離心力存在嗎？」參考系拖拽效應回答了馬赫這一問題，這意味著某個旋轉的物體會影響它附近的時空。如果物體本身不旋轉，整個宇宙圍繞著它以反方向旋轉，則無法產生相同的效果。那是否意味著廣義相對論不符合馬赫原理？關於此問題眾說紛紜，兩方意見大致各占一半，且現有的研究多聚焦於小質量星體的慢速旋轉近似情況下，並沒有考慮到黑洞附近的極端重力情況。因此，本文藉由廣義相對論中的黑洞理論來對馬赫關於牛頓旋轉水桶實驗的批判進行細節辨析，並提出“克爾度規無法藉由坐標系轉換變成史瓦西度規”這一事實，可以將解釋推廣到大質量旋轉物體的強場效應。由此，直接從數學上的對稱性證明了這一觀點：廣義相對論不符合馬赫原理，因為時空結構並非如同馬赫所想的那樣，可以通過簡單地變換旋轉視角將二者聯繫起來。

關鍵字：馬赫原理；廣義相對論；牛頓旋轉水桶實驗；絕對空間

引言

馬赫自己從來就沒有提出過具體的“馬赫原理”這個概念。他在《力學及其發展的批判歷史概論》中，批判了牛頓用絕對空間來解釋旋轉水桶實驗。他認為轉動和加速度也是相對的，因此物體慣性並非來源於它們對於絕對空間的相對運動，而是源自對於其餘有質量的物體總和的相對運動。這段見解被愛因斯坦於1918年取名為“馬赫原理”。馬赫自己並沒有提出嚴格的物理陳述，更沒有數學運算式，它只是一種定性的物理思想。

1993年7月底，一群物理學家、物理史家和物理哲學家們在圖賓根的馬克斯·普朗克研究所舉辦了一場專門討論馬赫原理的會議。學者們在這場會議上進行了一次投票：“廣義相對論是否完全符合馬赫原理？”2位受訪者回答“是”，30位回答“否”。而如果把問題改成：“廣義相對論在具有適當的邊界條件下，是否符合馬赫原理？”結果是14票“是”和18票“否”。由此看來，不同學者對於馬赫原理的定義有模糊和分歧。格林鮑姆(Adolf Grünbaum)甚至認為廣義相對論並沒有否認絕對空間的存在。

根據馬赫原理，慣性來自於物體間的相互作用，因此談論一個孤立物體的慣性是毫無意義的；此處物體的慣性是由全宇宙的質量分佈結構所決定的。為了避免歧異混淆，本文提到的馬赫原理都是指：“物體的運動是相對於全宇宙中其餘所有天體的運動，物體慣性的由來是全宇宙中其餘所有天體作用的結果。”1918年，冷澤(Josef Lense)和提爾苓(Hans Thirring)運用廣義相對論研究轉動中空球殼內部的重力場時，得出了與馬赫原理的三點推論相一致的結果。

布里爾(Dieter R. Brill)和科恩(Jeffrey M. Cohen)認為馬赫提到的：“如果桶壁的厚度和質量上增加到有幾里格厚時，那就沒有一個人有能力說，該實驗的結果會怎樣。”可以與冷澤和提爾苓提出的參考系拖拽(frame-dragging)效應(也稱Lense-Thirring effect)進行對比，冷澤-提爾苓進動來自於慣性系的托拽效應，旋轉物體所導致的參考系拖拽效應是個標準的馬赫效應。然而參考系拖拽效應只適用於描述小質量星體的慢速旋轉弱場近似情況，並不能描述黑洞附近的極端重力情況。

威爾(Clifford M. Will)將參考系拖拽效應歸因於重力電磁性，他認為馬赫原理違反了大多數物理學家所珍視的原理：等效原理和局部洛倫茲不變性。另一方面，丘福裡尼(Ignazio Ciufolini)認為LAGEOS衛星所探測的參考系拖拽效應就是馬赫原理在廣義相對論中的物理表述。諾德維特(Kenneth Nordvedt)則認為，馬赫原理證實了現代物理學的“場範式”，物質只能通過場的中間作用來影響遠處的其它物質。

目前對銀河系質量對我們附近的質量產生的馬赫效應的天文觀測結果，大大低於馬赫原理的理論預測。這表明馬赫原理既不是廣義相對論的必要預設，也不是廣義相對論的邏輯結果。在宇宙學尺度上，愛因斯坦希望藉由引入宇宙學項來實現馬赫原理的嘗試已經被德西特(Willem de Sitter)給反駁，因為德西特找到了一個愛因斯坦場方程在只有正的宇宙學常數而沒有任何物質情況下的解；不過，在星體尺度上廣義相對論和馬赫原理的關係(是否不一致)，這目前依然是個很熱門的議題。前人以參考系拖拽效應來考慮牛頓旋轉水桶實驗時，都只考慮了不存在奇點也不會形成事件視界的情形。而本文基於布里爾和科恩將參考系拖拽效應推廣到大質量旋轉物體的想法，再進一步把這個“旋轉水桶”推廣成黑洞，藉由克爾黑洞和史瓦西黑洞來對馬赫關於牛頓旋轉水桶實驗的批判進行物理細節辨析。

本文提出“克爾度規無法藉由坐標系轉換變成史瓦西度規”(數學上等價的概念是：無法通過坐標系變換來將克爾度規的矩陣對角化成一個對角矩陣)的這一事實更是個相當強而有力的證明，直接從數學上的對稱性來證明時空結構並非如同馬赫所想的那樣，可以通過簡單地變換旋轉視角將二者聯繫起來。同理可推斷，觀察史瓦西度規的對稱性和克爾度規的對稱性後便可以得知，無法通過坐標系變換來將史瓦西黑洞變成克爾黑洞，此變換的物理意義是：如果史瓦西黑洞不轉動，讓整個宇宙繞著它旋轉，也不會得到一個克爾黑洞。

我們舉一個生活化的例子來幫助讀者思考：試想，一根棒子在中央旋轉的洗衣機，跟常見的外筒在旋轉的直立式洗衣機，這兩種洗衣機製造出來的漩渦會一樣嗎？如果你是一條魚，把你丟進這兩種洗衣機裡，你有辦法區分自己是處在哪種漩渦中嗎？(可以嘗試用座標系變換的觀點來思考)

一、馬赫如何啟發愛因斯坦？

狹義相對論建立於兩條公設之上，一是相對性原理：物理定律在一切慣性參考系中具有相同的形式。二是光速不變原理：無論觀測者在何種慣性參考系中進行觀測，光在真空中的傳播速度相對於該觀測者都是一個常數，不隨光源和觀測者所在的參考系的相對運動而有所改變。

第一條公設相對性原理表明，物理學定律在任何慣性參考系中都具有相同的形式。愛因斯坦將經典力學中的伽利略相對性原理推廣到電磁學領域，指出不論任何力學或電磁學的實驗現象都不能區分慣性參考系，這同時表明不存在一個絕對的靜止參考系。而麥克斯韋方程組又能推得

光速為常數，並由邁克爾遜-莫雷實驗所證實，這也代表以太並不存在。

第二條公設光速不變原理並不是多餘的，或是說它並非是第一條公設相對性原理的特殊情形。雖然以太是一個絕對靜止參考系，但這並沒有違反相對性原理。例如，空氣作為聲音傳播的介質並不違背相對性原理。以太就像是魚缸中的水一樣，對於魚缸中的魚而言，它是一個“特殊的參考系”，但並非“絕對的”。

狹義相對論只適用於慣性參考系，但究竟甚麼是慣性參考系呢？牛頓說相對於絕對空間靜止或勻速運動的參考系就是慣性參考系，但狹義相對論表明了並不存在絕對靜止參考系。非慣性參考系中有慣性力（例如洗衣機甩乾的離心力或車子突然剎車人往前傾），慣性力和質量成正比，而且牛頓認為慣性力並非是由鄰近物體的相互作用所產生的（但牛頓並沒有說慣性力不能由遙遠物體的相互作用來產生）。

事實上，慣性參考系在現實世界中並不存在，這只是一個理想的概念。基於重力質量等同於慣性質量，愛因斯坦提出弱等效原理，即觀測者不能在局部的區域內分辨出由加速度所產生的慣性力或重力。弱等效原理通常也被描述為：一個處於自由落體的人感受不到自己的體重。但是，由於地球在自轉，所以如果一個物體在地球上自由下落，它將會感受到有幾種慣性力，例如科里奧利力和離心力施加在其上。

馬赫提到：“牛頓的旋轉水桶實驗只是告訴我們，水相對於桶壁的相對轉動沒有產生顯著的離心力，而這離心力是由水相對於地球的質量和其它天體的相對轉動所產生的。如果桶壁的厚度和質量上增加到有幾里格厚時，那就沒有一個人有能力說，該實驗的結果會怎樣。”由於我們當然沒辦法實際做實驗，使整個宇宙繞著水桶轉，於是他設想如果加厚桶壁的厚度（也就是桶的質量）的話，是否還會得到相同的結果，這便是馬赫對牛頓的詰問。而馬赫對牛頓旋轉水桶實驗的質疑啟發了愛因斯坦，激發愛因斯坦提出廣義相對論來顛覆牛頓的絕對時空觀。

愛因斯坦自述：“可以說上一世紀所有的物理學家，都把古典力學看作是全部物理學的，甚至是全部自然科學的牢固的和最終的基礎。……正是馬赫在他的《力學及其發展的批判歷史概論》中衝擊了這種教條式的信念；當我還是一名學生的時候，這本書在這方面給了我深刻的影響。”愛因斯坦把馬赫的著作當作一本哲學著作來閱讀，並且領悟到馬赫在《力學及其發展的批判歷史概論》中的哲學意向，他把馬赫對牛頓力學的批評的哲學意向解釋為修改力學的一種提議，因此他沒有嘗試在力學的修改裡解決慣性的問題，而是更進一步地把慣性處理成重力場論中的一種相互作用。在物理學裡引進慣性力作用的眾多嘗試中，如果僅僅是為了改造古典力學，那是沒有什麼前途的；但把慣性力這種概念與一種重力場論的想法結合起來卻會得到巨大的成功。

從馬赫《力學及其發展的批判歷史概論》一書中愛因斯坦總結出：“慣性只不過是一個由一些物體共用的性質。如果一個特定的物體旁邊沒有天體，那麼它的慣性肯定會消失。”1913年6月25號，愛因斯坦寫了一封信告訴馬赫，說他的廣義相對論終將支持馬赫對牛頓水桶的分析與論點：“慣性的起源來自某種物質間的相互作用，完全符合您對牛頓水桶實驗的評論。”愛因斯坦也於1930年9月18號寫給韋納(Armin Weiner)的信中說：“這個理論的思想的整個方向是同馬赫的思想一致的，所以，可以十分正確地認為馬赫是廣義相對論的先驅。”

在廣義相對論裡，物質的存在改變了其周遭的時空結構，而時空結構又反過來決定了物質的運動，所以沒有絕對的時間或空間。正如馬赫所辯說的，我們所感受到的重力是由於全宇宙中所有物體造成的結果，因此所謂加速就是對此一背景而言。

1918年3月愛因斯坦發表了一篇論文來修正他1916年發表的廣義相對論的論文中的細節，在此文中首次提到馬赫原理，並將其和相對性原理與等效原理並列為建立起廣義相對論的三大基石。

(c)馬赫原理：重力場完全由物體的質量所決定。既然在狹義相對論中質量和能量是等同的，而能量可由能量-動量張量($T_{\mu\nu}$)來描述，於是重力場也可以完全由能量-動量張量來制約並確定。

在註腳中愛因斯坦補充說：「以前我沒有將相對性原理和馬赫原理做出區分，而是把它倆混淆在一起。現在我使用‘馬赫原理’這個名字是因為馬赫指出慣性源自於物質間的相互作用。」根據(c)，按照重力場方程，沒有重力場是可以沒有物質的。顯然，公設(c)緊密地和整個宇宙的時空結構相聯繫；因為宇宙的全部質量都要參與重力場的產生。

馬赫試圖解釋什麼是慣性以及慣性究竟從何而來，馬赫原理的一個粗略表述是：遠處的質量會影響近處的慣性。馬赫原理表明，局部的物理定律是由全宇宙萬物所決定的。愛因斯坦轉述馬赫的觀點：「慣性阻力所抗拒的，並不是加速度本身，而是相對於世界上存在著的其他物體質量的加速度。」馬赫嘗試用這樣一種方法修改力學方程：「他認為物體慣性並非來源於它們對於絕對空間的相對運動，而是源自對於其餘有質量的物體總和的相對運動。」

愛因斯坦誇讚馬赫在幾乎半個世紀之前就提出了類似廣義相對論的想法，並讚揚馬赫是廣義相對論的先驅（愛因斯坦並不曉得萊布尼茲和貝克萊已經有時間空間和物體不能分離的觀點），甚至認為馬赫有可能發明相對論。愛因斯坦自述，他一生的許多工作在很大程度上都受到了馬赫的影響。

需要注意的是，雖然愛因斯坦認為馬赫啟發了他，但請不要誤以為廣義相對論完全符合馬赫原理。馬赫曾激烈地反對狹義相對論，並且愛因斯坦後來也背離了馬赫的實證主義哲學，並反過來批評馬赫。1922年愛因斯坦在法國哲學學會表達他對馬赫哲學的看法：「從邏輯的觀點來看，相對論同馬赫的理論之間似乎沒有很大的關係。馬赫可算是一位高明的力學家，但卻是一位拙劣的哲學家。」

馬赫原理在閔可夫斯基空間中不被滿足，正如馬赫所認為的，漸近平坦的時空間是非馬赫的（因為如果在閔可夫斯基度規中放入一個質點，它仍然會具有慣性，這顯然是違反馬赫原理的）；然而，馬赫原理被發現在羅伯遜-沃克(Robertson-Walker)模型和一類簡單的不均勻解中得到了滿足，如果把馬赫原理完全納入廣義相對論，那麼就會得出我們的宇宙模型是一個具有

局部不規則性的羅伯遜-沃克解。在廣義相對論中，慣性可以由局部的測地線方程和最小作用量原理來定義，於是這便否定了馬赫所認為的：物體慣性的由來是全宇宙中其餘所有天體作用的結果。

二、廣義相對論中的慣性

馬赫的提問：「如果把水桶固定住，並使眾恒星的星空旋轉，能夠證明離心力存在嗎？」可以總結為：你怎麼知道是你自己在自轉還是整個宇宙反方向的繞著你公轉。正如當你在一輛勻速行駛的火車中時，你其實無法分辨究竟是你在往前還是外面的風景在往後，這就是狹義相對論的相對性原理。

馬赫設想使一個重物繞它的軸旋轉，從而它會因離心力而變成扁球形，如果移除一切餘留的重物，也不可能改變什麼，此重物將繼續旋轉，並繼續成扁球形。但是如果運動只是相對的，那麼扁球形必然會隨著全宇宙其餘部分的消失而消失。馬赫指出如果地球真的繞著軸進行絕對自轉，那麼將會產生科里奧利力和離心力，可觀測的效應有：地球會因自轉而變得扁球狀、地表的重力加速度在赤道比在兩極小、傅科擺的平面轉動。如果地球處於靜止，而全宇宙中各星體反方向繞著地球轉的話，那我們將觀測不到這些效應。

馬赫指出，全宇宙總體的物質決定了局部物體的運動；但愛因斯坦的廣義相對論場方程式表示，局部的質量分佈決定了局部運動。根據愛因斯坦的廣義相對論場方程式，地球的質量決定了地球附近的物體運動，那如果地球不存在，則地球的外部環境（即背景時空）或附近的現有背景時空將會是平坦的，由於地球的存在，這個平坦的時空被局部地彎曲了。可以把慣性參考系看作是一個流體，將轉動的物體浸入在這個流體中，物體的轉動會導致慣性參考系的轉動；可以形象地比喻為將一顆球浸入到黏稠的糖漿中，當球開始旋轉時，它也會帶動著周圍的糖漿跟著它旋轉。並且在廣義相對論中，慣性可以由局部的測地線方程和最小作用量原理來定義，於是這便否定了馬赫所認為的：物體慣性的由來是全宇宙中其餘所有天體作用的結果。

物體的轉動效應可以通過轉動參考系來等效的理解，以下將此與馬赫原理做個比較。假定我們在一個平坦時空的轉動參考系中，參考系中的其它物質相對我們轉動，在這個轉動參考系中我們也觀測到離心力和科氏力，這些力並非真實的力，而是來自於慣性參考系觀測者不同的效應。另一方面，假定我們在一個慣性系中，而全宇宙中其餘的物質以相反的角速度轉動，問題是這些物質的轉動是否能導致同樣的慣力？如果答案是可以，則我們就能宣稱所有的力都是相對的，即換到一個角加速度參考系等價於全宇宙進行反向的旋轉。雖然在線性近似下我們確實有這樣的圖像，但是在高度非線性的廣義相對論場方程式中我們看不到這種圖像。

我們可以思考這麼一個問題：如果繞著克爾黑洞的“旋轉方向”反向跑，我會看到史瓦西黑洞嗎（當然這是一個非常粗糙的說法，畢竟克爾黑洞是會帶著整個時空一起轉動，並非像地球自轉這樣整個剛體以近似相同的角速度旋轉）？一艘在能層外的太空船可以不斷地噴射加速，來和克爾黑洞的時空拖拽效應「達成平手」，而一位在無窮遠處的觀察者看這艘太空船就會覺得它好像停止在這個漩渦中不跟著轉了，但太空船內的人會感受到極大的加速度，他們也分辨得出自己究竟是在史瓦西度規還是克爾度規中，因為在史瓦西度規下我只要施加縱向的噴射動力就能靜止，而在克爾度規中還得額外多加一個橫向的噴射動力以抵銷時空拖拽效應。

簡單來說，你無法藉由坐標系變換來將克爾黑洞“變成”史瓦西黑洞，這便回答了馬赫的提問，就是說物體的旋轉會影響它周圍的時空；而如果是這個物體本身不轉，使全宇宙繞著它反向旋轉，則無法產生同樣的效果。

下式是史瓦西度規：

$$ds^2 = -c^2 d\tau^2 = - \left(1 - \frac{r_s}{r}\right) c^2 dt^2 + \frac{dr^2}{1 - \frac{r_s}{r}} + r^2 (d\theta^2 + \sin^2 \theta d\varphi^2)$$

寫成矩陣的形式為：

$$g_{\mu\nu} = \begin{pmatrix} - \left(1 - \frac{r_s}{r}\right) & 0 & 0 & 0 \\ 0 & \frac{1}{\left(1 - \frac{r_s}{r}\right)} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & r^2 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & r^2 \sin^2 \theta \end{pmatrix}$$

其中： $r_s = \frac{2GM}{c^2}$ 。注意史瓦西度規沒有任何交叉項，即寫成矩陣形式時是一個

對角矩陣。

下式是克爾度規：

$$ds^2 = - \left(1 - \frac{2Mr}{\Sigma}\right) dt^2 - \frac{4aMr}{\Sigma} \sin^2 \theta dt d\phi + \frac{(r^2 + a^2)^2 - a^2 \Delta \sin^2 \theta}{\Sigma} \sin^2 \theta d\phi^2 + \frac{\Sigma}{\Delta} dr^2 + \Sigma d\theta^2$$

$\Delta = r^2 - 2Mr + a^2$ $\Sigma = r^2 + a^2 \cos^2 \theta$ 其中且。克爾度規寫成矩陣形式時不是一個對角矩陣。

進行坐標系變換： $\phi' = \phi + \Omega(r, \theta) t$ ，此變換的物理意義便是馬赫的提問：「把水桶固定住，並使眾恒星的星空旋轉。」我們試圖繞著克爾黑洞公轉，看會不會得到一個史瓦西黑洞，很遺憾，此操作雖然能把 $(dt d\phi)$ 項消去，但由於 $(\Omega(r, \theta))$ 是 (r, θ) 的函數，所以會跑出許多 $(dr d\phi, dr d\theta, d\theta d\phi)$ 等項，仍然無法等同于史瓦西黑洞。此變換的數學意義便是：無法通過坐標系變換來將克爾度規的矩陣對角化成一個對角矩陣。

同理可推斷，觀察史瓦西度規的對稱性和克爾度規的對稱性後便可以得知，無法通過坐標系變換來將史瓦西黑洞變成克爾黑洞，此變換的物理意義是：如果史瓦西黑洞不動，整個宇宙繞著它旋轉，也不會得到一個克爾黑洞。我們還可以從邊界條件的角度來看這種變換，因為不論是史瓦西黑洞還是克爾黑洞的邊界條件都是漸進平坦的，所以如果讓整個宇宙轉動的話，其實

改變了無窮遠處漸進平坦的邊界條件，這兩種情形肯定無法彼此聯繫起來，也就是說邊界條件並不是座標變換不變的。於是對於馬赫的提問：“如果把水桶固定住，並使眾恒星的星空旋轉，能夠證明離心力存在嗎？”答案是否定的。

「廣義相對論是否完全符合馬赫原理？」除了理論探討，這個問題也可以用實驗來驗證。NASA在2004年4月20日發射了Gravity Probe B探測衛星，此衛星的任務是測量地球周圍的時空曲率，以及能量-動量張量 $(T_{\mu\nu})$ ，從而檢驗廣義相對論。實驗結果證實一個本身在自轉的物體和物體不動而全宇宙繞著物體反向旋轉有本質的區別。例如，我們可以非常精確地測量地球的自轉，Gravity Probe B是一顆裝載著四個陀螺儀的衛星，測量當衛星繞著地球公轉時陀螺儀的變化，就能證明地球正在自轉，通常稱呼此效應為重力電磁性。如果地球並沒有在自轉，那我們將檢測不到陀螺儀的進動效應。所以如果物體本身不旋轉，讓整個宇宙圍繞著它以反方向旋轉，則無法產生相同的效果。廣義相對論表明並非全宇宙總體的物質決定了局部物體的運動，而是局部的質量分佈決定了局部運動。

三、結論

馬赫自己從來就沒有使用過「馬赫原理」這個詞！馬赫批判了牛頓用絕對空間來解釋旋轉水桶實驗，認為轉動和加速度也是相對的，物體慣性的由來是全宇宙中其餘所有天體作用的結果。這段見解被愛因斯坦於1918年取名為「馬赫原理」。

廣義相對論的參考系拖拽效應回答了馬赫的提問，這意味著某個物體的旋轉會影響它附近的時空。在廣義相對論之前，物理學家們認為物體的旋轉與周圍的空間無關，但是參考系拖拽效應指出一個旋轉的物體會拖拽它周圍的時空，就像球在濃稠的糖漿中旋轉並拖拽著糖漿產生渦流一般，亦即物質的旋轉運動將會影響慣性參考系。而又由於重力場的傳播速度有光速作為上限，並且一個非常遙遠的物質—宇宙微波背景輻射—給出了整個宇宙旋轉速度的嚴格上限，所以遙遠的物體來不及影響局部的慣性運動。因此，如果物體本身不旋轉，整個宇宙圍繞著它以反方向旋轉，則無法產生相同的效果。廣義相對論表明並非全宇宙總體的物質決定了局部物體的運動，而是局部的質量分佈決定了局部運動。

再者，基於參考系拖拽的想法，本文進而提出「克爾度規無法藉由坐標系轉換變成史瓦西度規」的這一事實更是個相當強而有力的證明，直接從數學上的對稱性來證明時空結構並非如同馬赫所想的那樣，可以通過簡單地進行坐標系轉換從而變換旋轉視角將二者聯繫起來。觀察史瓦西度規的對稱性和克爾度規的對稱性後可以得知，無法通過坐標系變換來將克爾度規的矩陣對角化成一個對角矩陣。

同理可推斷，觀察史瓦西度規的對稱性和克爾度規的對稱性後便可以得知，無法通過坐標系變換來將史瓦西黑洞變成克爾黑洞，此變換的物理意義是：如果史瓦西黑洞不動，整個宇宙繞著它旋轉，也不會得到一個克爾黑洞。再者還可以從邊界條件的角度來看這種變換，因為不論是史瓦西黑洞還是克爾黑洞的邊界條件都是漸進平坦的，所以如果讓整個宇宙轉動的話，其實改變了無窮遠處漸進平坦的邊界條件，這兩種情形肯定無法彼此聯繫起來，也就是說邊界條件並不是座標變換不變的。於是對於馬赫的提問，答案是否定的。

廣義相對論證明旋轉物體的扁球形不會隨著宇宙中其餘質量的消失而消失，一個旋轉的物體會局部地彎曲並帶動它附近的時空，實驗證實這不同於馬赫所認為的：局部的物理定律是由全宇宙萬物所決定的。馬赫認為全宇宙總體的物質決定了局部物體的運動，但愛因斯坦的廣義相對論場方程式表示局部的質量分佈決定了局部運動。而且在廣義相對論中，慣性可以由局部的測地線方程和最小作用量原理來定義，於是這便否定了馬赫的觀點：物體慣性的由來是全宇宙中其餘所有天體作用的結果。

雖然馬赫原理是愛因斯坦在馬赫的模糊思想中所提煉出的“原理”，不過愛因斯坦的廣義相對論實際上提出了一種強調局域性的物理學思想或原理，而馬赫原理則其實恰恰違背了這種局域性思想。之所以無法通過坐標系變換來將克爾黑洞轉換為史瓦西黑洞，也正是廣義相對論中局域性思想的某種體現。參考系拖拽效應進一步證實了廣義相對論不符合馬赫原理，因為此效應只能通過物體自身的旋轉來體現，這與馬赫原理的觀點是不一致的。

[參考資料]

- [1]Barbour, J. B., and Pfister, H. (Eds.). Mach's principle: from Newton's bucket to quantum gravity (Vol. 6)[M]. Springer Science and Business Media, 1995.
- [2]Blackmore, J. Ernst Mach - A Deeper Look[M]. Dordrecht: Springer Netherlands, 1992.
- [3]Brans C, Dicke R H. Mach's principle and a relativistic theory of gravitation[J]. Physical Review, 1961, 124(3): 925.
- [4]Brill, D., and Cohen, J. 'Rotating Masses and Their Effect on Inertial Frames'[J]. Physical Review, 1966, 143(4), 1011-1015.
- [5]Cao, T. Y. Conceptual development of 20th century field theories[M]. Cambridge University Press, 2019.
- [6]Cohen, R., and Seeger, R. Ernst Mach[M]. Dordrecht: D. Reidel, 1970.
- [7]Einstein, A. 'Prinzipielles zur allgemeinen Relativitätstheorie'[J]. Annalen Der Physik, 1918, 360(4), 241-244.
- [8]Everitt, C. F., et al. 'Gravity probe B: final results of a space experiment to test general relativity'[J]. Physical Review Letters, 2011, 106.22: 221101.
- [9]Griffiths, D. J. Introduction to Electrodynamics[M]. Cambridge University Press, 4th edition, 2017.
- [10]Grünbaum A. Philosophical Problems of Space and Time[M]. Springer Science & Business Media, 2012.
- [11]Hartle, J. B. Gravity: an introduction to Einstein's general relativity[M]. Pearson, 2003.

- [12]Lense J, Thirring H. On the influence of the proper rotation of a central body on the motion of the planets and the moon, according to Einstein's theory of gravitation[J]. Zeitschrift für Physik, 1918, 19: 156-163.
- [13]Mach, E. The Science of Mechanics: A Critical and Historical Exposition of its Principles[M]. Open court publishing Company, 1893.
- [14]Raine D J. Mach's Principle in general relativity[J]. Monthly Notices of the Royal Astronomical Society, 1975, 171(3): 507-528.
- [15]阿爾伯特·愛因斯坦著. 愛因斯坦文集(第一卷)[M]. 許良英、李寶恒、趙中立、範岱年譯，北京：商務印書館，2010-11.
- [16]阿爾伯特·愛因斯坦著. 愛因斯坦文集(第二卷)[M]. 許良英、李寶恒、趙中立、範岱年譯，北京：商務印書館，2010-11.
- [17]阿爾伯特·愛因斯坦著. 我的世界觀[M]. 方在慶譯，北京：中信出版集團·見識城邦，2018-11.
- [18]恩斯特·馬赫著. 力學及其發展的批判歷史概論[M]. 李醒民譯，北京：商務印書館，2014-10.
- [19]胡化凱. 馬赫原理與廣義相對論的建立[J]. 大學物理, 1995, 14(11): 32-34.
- [20]郝劉祥. 等效原理與引力的規範理論[J]. 自然科學史研究, 2011, 30(02):241-255.
- [21]吳新忠. 馬赫原理與旋轉的相對性[J]. 自然辯證法研究, 2019, 35(01):72-77.
- [22]於爾根·雷恩著. 站在巨人與矮子肩上：愛因斯坦未完成的革命[M]. 關洪、方在慶譯，北京：北京大學出版社，2009-10.
- [23]趙崢. 廣義相對論的幾個問題[J]. 大學物理, 2011, 30(5): 14-19.